

Comportamiento mecánico de compuestos de aluminio reforzados con partículas en función de la temperatura

V. Amigó*, M.D. Salvador*, C. Ferrer*, C.E. da Costa** y D. Busquets*

Resumen La obtención de materiales compuestos de matriz de aluminio por técnicas pulvimetalúrgicas junto a procesos de extrusión, permite desarrollar materiales reforzados con partículas cerámicas, con propiedades mecánicas mejoradas y más si se demanda un trabajo a elevada temperatura. Se han desarrollado materiales reforzados con nitruro de silicio por extrusión de polvos, realizándose la caracterización de sus propiedades mecánicas a temperatura ambiente y elevada.

Palabras clave Materiales compuestos de matriz de aluminio. Si_3N_4 . Comportamiento mecánico.

Mechanical behaviour of aluminium matrix composites with particles in high temperature

Abstract The aluminium matrix composites materials reinforced by ceramic particles can be elaborated by powder metallurgy techniques, with extrusion processes. These can provide new materials, with a better mechanical behaviour and moreover when we need those properties at higher temperatures. Aluminium alloy reinforced composites with silicon nitride particles by powder extrusion process was done. Their mechanical properties were characterised at room and elevated temperatures.

Keywords AlMCs. Si_3N_4 . Mechanical behaviour.

1. INTRODUCCIÓN

El control de las propiedades de los materiales compuestos y, en particular, de las mecánicas, reside en el concepto de la combinación de materiales metálicos tradicionales con fases de refuerzo^[1]. Es importante determinar cuándo una propiedad de un material compuesto sigue la regla de las mezclas. Normalmente, se cumple usando fibras continuas como refuerzo y con interfases entre refuerzo y matriz con buena unión.

Combinando matrices y refuerzos con propiedades específicas, se puede obtener cambios importantes en resistencia, módulo elástico, tenacidad a la fractura, densidad, etc. Los refuerzos cerámicos discontinuos de alto módulo, añadidos a matrices metálicas, producen un aumento de la rigidez del compuesto^[2 y 3]. El módulo de elasticidad no au-

menta de forma lineal con la fracción de volumen de refuerzo, como en el caso de alineamiento de refuerzos continuos. Su incremento estará condicionado por la proporción de alineación y la orientación de las fibras en la dirección del ensayo. El factor dominante en el control del módulo elástico es la fracción volumétrica del refuerzo, siendo particularmente insensible a la distribución del refuerzo, mientras que las variaciones del tipo y forma pueden tomarse en cuenta mediante el empleo de diversas expresiones.

La dependencia del módulo elástico con la temperatura en los materiales compuestos es un reflejo de lo que sucede en la matriz sin refuerzo. Un mayor módulo elástico a una temperatura determinada es muy importante en aplicaciones a elevada temperatura. El tamaño de las partículas tiene un papel importante en el límite elástico. En general,

(*) Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales. Universidad Politécnica de Valencia. Camino de Vera, s/n. 46022 Valencia (España).

(**) Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade do Estado de Santa Catarina, 89. 223-100, Joinville/SC, (Brasil).

refuerzos de pequeños tamaños propician valores altos en esta propiedad, fundamentados en las tensiones térmicas residuales originadas por la diferente contracción térmica de la matriz y del refuerzo y en las variaciones microestructurales relacionadas con el afino del tamaño de grano y aumento de la densidad de dislocaciones que se producen en el material^[2-4].

El primer estudio extensivo sobre aleaciones de aluminio con refuerzos discontinuos fue efectuado por McDanel^[5], quien investigó el efecto de los whiskers y partículas de SiC en diferentes aleaciones usadas como matriz. Él obtuvo resultados por debajo de un 60 % de incremento en el esfuerzo de fluencia y en la resistencia a la tracción, dependiendo de la fracción volumétrica del refuerzo, tipo de aleación y tratamiento térmico de la matriz. Trabajos posteriores han confirmado, en lo general, estos resultados^[6-8], aunque estos resultados experimentales muestran un grado extremadamente alto de dispersión que, presumiblemente, reflejan las diferencias en la calidad de los materiales y en su proceso de fabricación.

Cuando se considera específicamente el módulo elástico, se presenta una dificultad fundamental, como lo ha puntualizado Humphreys^[9]: el límite elástico se considera, generalmente, al 0,2 % y debido a que los materiales compuestos se endurecen con elevada rapidez a bajas deformaciones, este valor puede no ser equivalente al límite elástico convencional^[10-12]. Sin embargo, existen actualmente materiales compuestos en el mercado en los que

podemos encontrar especificaciones de resistencia a tracción de estos productos^[13-16]. La tabla I proporciona las propiedades de algunos de los materiales compuestos disponibles, de diversos proveedores, junto a las propiedades típicas de las aleaciones sin refuerzo.

Un aspecto final de la resistencia, que es de importancia comercial, es el comportamiento a elevadas temperaturas. Mientras que la presencia de partículas mejora el módulo a altas temperaturas, esto no trasciende en la resistencia a altas temperaturas, ya que los mecanismos de endurecimiento que operan en el material compuesto a bajas temperaturas, se ven relajados a temperaturas elevadas de tal manera que la resistencia del compuesto se controla, fundamentalmente, por la resistencia a altas temperaturas de la aleación que constituye la matriz. Sin embargo, todavía persiste una ligera mejora en la resistencia a altas temperaturas en los materiales reforzados^[8], potenciado cuando se utiliza polvo atomizado^[20] o con altas fracciones volumétricas de refuerzo en la matriz^[21].

Para muchas aplicaciones a alta temperatura las propiedades de termofluencia del material son importantes y algunos estudios recientes sobre este fenómeno se han realizado fundamentalmente sobre materiales compuestos procesados a partir de polvos⁽²²⁻²⁸⁾. De todas estas investigaciones realizadas, se desprende que altos volúmenes de partículas finas de refuerzo pueden originar una mejora significativa de la resistencia a la termofluencia alrededor de los 350 °C. A mayores temperaturas,

Tabla I. Propiedades típicas de algunos materiales compuestos de matriz de aluminio

Table I. Typical properties of commercial aluminium composites

Aleación	L.E. 0,2% (MPa)	R (MPa)	A (%)	E (Gpa)	K _{IC} (Mpa·m ^{1/2})	Ref.
6061 (T6) extruido	255	290	17	70		17
6061/Al ₂ O ₃ /10p(T6)	297	338	7,6	81	24,1	18
6061/Al ₂ O ₃ /15p(T6)	317	359	5,4	88	22	18
6061/Al ₂ O ₃ /20p(T6)	359	379	2,1	99	21,5	18
6061/SiC/15p(T6)	342	364	3,2	91		8
6061/SiC/20p(T6)	415	498	6	97		17
6061/SiC/20w(T6)	440	585	4	120		17
6061/SiC/30w(T6)	570	795	2	140		17
6061/Si ₃ N ₄ /10w	342				19,5	19
6061/Si ₃ N ₄ /30w	318				19,6	19

las partículas de refuerzo no ejercen demasiado efecto sobre la plasticidad y el comportamiento en termofluencia será similar al de la matriz^[24,27 y 28].

El desarrollo de materiales compuestos reforzados con nitruro de silicio presenta, como uno de sus objetivos, el aumento de las propiedades mecánicas de estos materiales a elevadas temperaturas, planteándose la investigación del efecto del contenido de refuerzo en las modificaciones de las propiedades a elevadas temperaturas.

2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Las muestras a ensayar se han obtenido a partir de la mezcla de polvos de las aleaciones de aluminio y de las partículas de nitruros de silicio en las proporciones de 5, 10 y 15 % en volumen. Las aleaciones de aluminio de la familia de Al-Si-Mg, responden a las especificaciones de la AA6061 con diferentes contenidos en magnesio, atomizada por The Aluminium Powder Co. Ltd. y cuya composición puede observarse en la tabla II.

El nitruro de silicio, en su fase α , ha sido suministrado por Advanced Refractory Technologies, Inc., con una densidad de 3,44 g/cm³ y un tamaño de partícula promedio $d_{50} = 8,6 \mu\text{m}$.

Los dos materiales, en las proporciones volumétricas apuntadas, se han mezclado en una jarra de alúmina con bolas del mismo material a 90 rpm durante 2 h para obtener una mezcla, lo más homogénea posible. Ésta, se ha compactado, para obtener un cilindro de 25 mm de diámetro y unos 30 mm de altura, con una presión uniaxial de 250 MPa, con la que se consigue una densidad en verde del 90 % de la teórica.

El compacto se ha extruído a una temperatura de 530 °C, en una prensa que ha suministrado los 250 kN necesarios para la fluencia del material, de manera que se obtuvo una barra extruída de 5 mm de diámetro y unos 40 cm de longitud en la cual se realizaron los ensayos de caracterización mecánica, una vez mecanizadas las probetas a un diámetro de 4 mm y una longitud calibrada de 25 mm.

Los ensayos de tracción a temperatura ambiente se realizaron en una prensa INSTRON modelo

Tabla II. Composición de las aleaciones AA6061

Table II. The chemical composition of AA6061 alloys

Material	% Fe	% Si	% Mg	% Cu	% Cr
A1	< 0,2	0,65	0,17	0,87	0,23
A2	0,04	0,63	1,04	0,23	0,21

4204, registrándose mediante ordenador las fuerzas y desplazamientos de ensayo. La velocidad de ensayo ha sido de 5 mm/min. A este equipo se ha acoplado una cámara climática para la realización de la caracterización a elevadas temperaturas, máximo 350 °C. La dureza se ha obtenido con un durómetro portátil Ernst, en la escala Vickers de 50 N.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Características mecánicas de los compuestos

Sobre los materiales extruídos y tratados térmicamente, con una solubilización a 530 °C durante 2 h y un período de envejecimiento a 175 °C durante 8 h, se realizó el ensayo de tracción, obteniéndose, para la matriz A1, los resultados mostrados en la tabla III.

La resistencia de los Al-MMCs, tal como se aprecia en la tabla III, se incrementa ligeramente con un contenido de refuerzo hasta, aproximadamente, el 10 % y es inferior a la del material sin refuerzo para 15 %. Principalmente, este aumento se aprecia tras la etapa de envejecimiento. Este efecto se atribuye a la formación de un mayor tamaño y número de aglomeraciones en borde de grano de las partículas atomizadas de la aleación base, cuando los porcentajes de refuerzo son elevados como consecuencia de la mayor

Tabla III. Resultados de los ensayos de tracción, de los diferentes materiales compuestos con matriz A1, tras la extrusión y el tratamiento térmico de envejecimiento a 175 °C durante 8 h

Table III. Tensile test results of different A1 matrix composites, after extrusion and after aging at 175 °C for 8 h

Material	Carga de rotura	Límite elástico (MPa)	A%
Tras la extrusión (matriz A1)			
6061	196,3	113,2	28,6
5% Si ₃ N ₄	214,5	98,1	16,3
10% Si ₃ N ₄	216,6	113,6	14,4
15% Si ₃ N ₄	197,0	110,2	6,6
Tras el envejecimiento a 175 °C durante 8 h (matriz A1)			
6061	306,1	181,3	11,2
5% Si ₃ N ₄ - T6	351,1	230,7	11,5
10% Si ₃ N ₄ - T6	321,3	166,0	8,0
15% Si ₃ N ₄ - T6	319,1	212,4	5,7

dificultad de homogeneización de los mismos y, a una mayor porosidad inducida por estas aglomeraciones, con la consecuente existencia de pregrietas microscópicas. La aleación mecánica podría contribuir a la disminución de las aglomeraciones. Sin embargo, comercialmente se encuentra muy lejos de ser viable por el incremento sustancial de los costos que ello implica, además de modificar drásticamente las características de las partículas (morfología, tamaño, distribución de tamaños, reactividad, etc.) con respecto a las condiciones iniciales, lo cual reduce el control del proceso e incrementa las variables del mismo.

El alargamiento se reduce proporcionalmente al porcentaje de refuerzo, en todos los casos. Esta caída viene potenciada por la forma de las partículas de refuerzo de Si₃N₄, pues estas partículas, bastante aciculares, actúan como concentradores de tensiones, reduciendo de este modo la ductilidad y tenacidad.

3.2. Dureza de los materiales compuestos

La dureza Vickers, parámetro en el que la influencia de los aglomerados es más pequeña si la comparamos con el resto de parámetros obtenidos en el ensayo de tracción, se representa en la figura 1, tanto para el material tras la extrusión como después del envejecimiento correspondiente a 175 °C durante 8 h.

La evolución de la dureza con el tiempo de envejecimiento responde al modelo matemático,

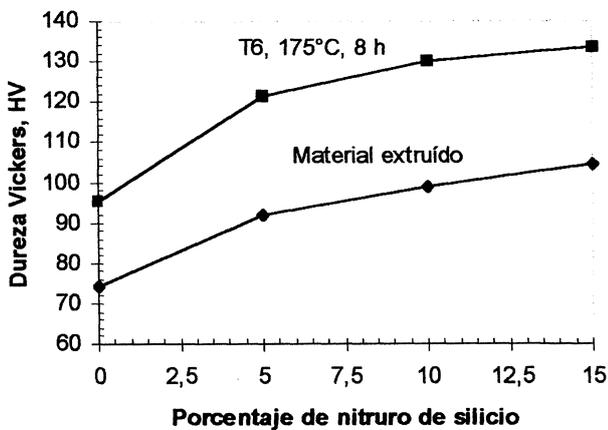


Figura 1. Evolución de la dureza con el porcentaje de refuerzo para compuestos de matriz A1.

Figure 1. Vickers Hardness versus reinforcement for composites of the A1 matrix..

$$\ln \ln \left[\frac{1}{(1-Y)} \right] = n \ln k + n \ln t \quad (1)$$

donde Y es un parámetro dependiente de la dureza obtenida a cada temperatura y k una constante de velocidad de reacción o precipitación, función de la temperatura.

3.3. Características mecánicas en función de la temperatura

Para poder evaluar el comportamiento de los materiales compuestos con la temperatura, se realizaron ensayos de tracción a diferentes temperaturas, cuyos resultados, para la matriz A2, se representan en la figura 2.

Tal como se aprecia en la figura, el refuerzo aumenta, en unos 17 MPa, la capacidad resistente de la aleación a cualquiera de las temperaturas de ensayo.

4. CONCLUSIONES

En conclusión, es posible obtener por vía pulvimetalúrgica, materiales compuestos de matriz de aluminio reforzados con nitruro de silicio que produce un sensible endurecimiento del material aunque ello venga acompañado por una pérdida de las propiedades plásticas. A elevadas temperaturas se sigue manteniendo las mayores prestaciones del compuesto, cuyo comportamiento sigue una ley lineal dentro del rango de temperaturas ensayado.

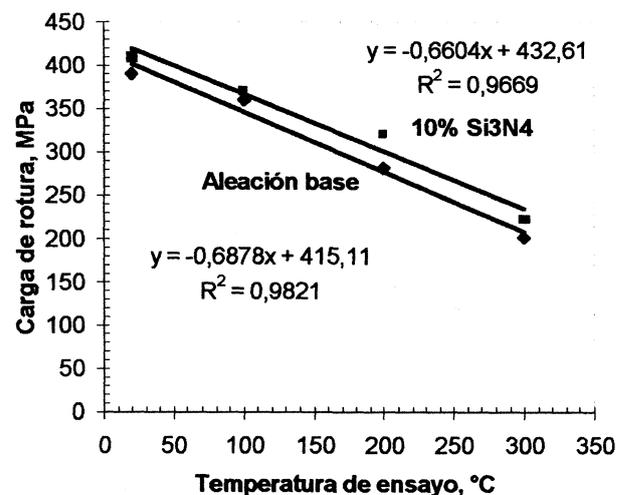


Figura 2. Comportamiento del compuesto, de matriz A2, con 10% de Si₃N₄ con la temperatura de ensayo.

Figure 2. Mechanical behaviour of AA6061/ Si₃N₄/10p with temperatures.

REFERENCIAS

- [1] D.L. ERICH, *Prog. Powder Metall.* 46 (1986) 45-50.
- [2] S.J. HARRIS, AGARD Lectures Series n° 174: New Light Alloys (1990) 4:1-4:21.
- [3] T.W. CLYNE y P.J. WITHERS, *An Introduction to Metal Matrix Composites*. Cambridge University Press. Cambridge, 1993.
- [4] W.S. MILLER y F.J. HUMPHREYS, *Scr. Metall. Mater.* 25 (1991) 33-38.
- [5] D.L. MCDANELS, *Metall. Trans. A*, 16A (1985) 1105-1115.
- [6] R.S. BUSHBY, V.D. SCOTT, A.R. IBBOTSON y N.J. LINDSAY, *ICCM/10*, vol. II, Whistler (Canadá), 1995, pp. 3-10.
- [7] Z.Y. MA, S.H. LI, J.H. LI, X.G. NING, Y.X. LU, y J. BI. *J. Mater. Sci.* 31 (1996) 741-747.
- [8] D.J. LLOYD, *Inter. Mater. Rev.* 39, 1 (1994) 1-23.
- [9] F.J. HUMPHREYS, 9th *Risø Int. Symp. on Metallurgy and Materials Science*, Risø National Lab., Dinamarca, 1988, pp. 51-74.
- [10] M. MABUCHI, T. IMAI y K. HIGASHI, *J. Mater. Sci.* 28 (1993) 6582-6586.
- [11] H. IWASAKI, Y. YADA, T. MORI, M. MABUCHI y K. HIGASHI, *Scr. Mater.* 34 (1996) 1179-1184.
- [12] H. IWASAKI, T. MORI, M. MABUCHI y K. HIGASHI, *Metall. Mater. Trans. A* 29A (1998) 677-683.
- [13] V.C. NARDONE y T.J. GAROSSHEN, *J. Mater. Sci.* 32 (1997) 2549-2557.
- [14] V.K. VARMA, Y.R. MAHAJAN y V.V. KUTUMBARAO, *Scr. Mater.* 37 (1997) 485-489.
- [15] M. LIEBLICH y B. TORRES-BARREIRO, *Proc. PM'98*, vol. 5, Granada (España), 1998, pp. 43-48.
- [16] R.J. ARSENAULT y S.B. WU, *Mater. Sci. Eng.* 96 (1987) 77-88.
- [17] T.S. SRIVATSAN, I.A. IBRAHIM, F.A. MOHAMED y E.J. LAVERNIA, *J. Mater. Sci.* 26 (1991) 5965-5978.
- [18] W. DIXON, *The International Aluminum Extrusion Technology Seminar Proceedings*, The Aluminum Association, 1992.
- [19] A. RABIEI, B-N. KIM, M. ENOKI y T. KISHI, *Mater. Trans. JIM* 37 (1996) 1148-1155.
- [20] M.S. ZEDALIS, P.S. GILMAN y S.K. DAS, *High Performance Composites for the 1990s*, The Metallurgical Society of AIME, S.K. Das (Eds.), 1990, pp. 61-81.
- [21] R. DWIVEDI, G. ALTAND, P. BARRON-ANATOLIN, J. LEIGHTON y F.G. HAMEL, *Int. Off Highway and Podwerplant Cong.*, SAE Technical paper 911770, 1991.
- [22] S.W. LAI y Y. CHUNG, *J. Mater. Sci.* 29 (1994) 6181-6198.
- [23] K.T. PARK y F.A. MOHAMED, *Metall. Mater. Trans. A* 26 (1995) 3119-3129.
- [24] Y. LI y T.G. LANGDON, *Acta Mater.* 45 (1997) 4797-4806.
- [25] M. BESTERCI, M. SLESAR y L. KOVAC, *Scr. Mater.* 37 (1997) 1077-1080.
- [26] Y. LI y T.G. LANGDON, *Acta Mater.* 46 (1998) 1143-1155.
- [27] R. PANDORF y C. BROECKMANN, *Proc. ECCM-8*, vol. 4, Nápoles (Italia), 1998, I. Crivelli, (ed.), Woodhead Pub. Limit., 1998, pp. 315-322.
- [28] M. BESTERCI, *Dispersion-strengthened Aluminium prepared by Mechanical Alloying*, Cambridge Int. Sci. Pub., Cambridge (Inglaterra), 1999.