

# Propiedades mecánicas de materiales compuestos de matriz de aluminio reforzados con intermetálicos

B. Torres\*, A. García-Escorial\*, J. Ibáñez\*\* y M. Lieblich\*

## Resumen

En este trabajo se estudia el comportamiento mecánico de varios materiales compuestos de matriz de aluminio 2124 reforzados con partículas de los intermetálicos, Ni<sub>3</sub>Al, NiAl, MoSi<sub>2</sub> y Cr<sub>3</sub>Si. Los resultados obtenidos se comparan con la aleación 2124 monolítica y con esa misma aleación reforzada con partículas del cerámico SiC. En todos los casos, se sigue la misma ruta de procesado pulvimetalúrgico a partir de polvos rápidamente solidificados, en el caso de la aleación 2124, y de la molienda mecánica de un tocho obtenido por síntesis autopropagada a temperatura elevada (SHS), para el refuerzo intermetálico. Matriz y reforzante se mezclan, mecánicamente, para, a continuación, compactar uniaxialmente en frío, procediéndose, finalmente, a la consolidación por extrusión. Las propiedades mecánicas se estudian mediante ensayos de tracción en estado T1 y T4. Los resultados obtenidos indican que las propiedades mecánicas dependen, muy fuertemente, de la tendencia a la formación de nuevas fases en la intercara matriz-refuerzo durante el propio procesado o en los tratamientos térmicos posteriores. Los materiales que presentan mejores propiedades mecánicas son aquellos en los que la reacción entre reforzante y matriz es menor, como sucede en el caso de los compuestos reforzados con MoSi<sub>2</sub> y con SiC.

## Palabras clave

Materiales compuestos. Pulvimetalurgia. Aleaciones de aluminio. Intermetálicos.

## Mechanical properties of aluminium matrix composites reinforced with intermetallics

## Abstract

In this work 2124 aluminium matrix composites reinforced with Ni<sub>3</sub>Al, NiAl, MoSi<sub>2</sub> and Cr<sub>3</sub>Si intermetallic powder particles have been investigated. For comparison purposes, unreinforced 2124 and reinforced with SiC have also been studied. In all cases, the same powder metallurgy route was used, i.e. the 2124 alloy was obtained by rapid solidification and the intermetallic particles by self-propagating high-temperature synthesis (SHS). The matrix and the intermetallics were mechanically blended, cold compacted and finally hot extruded. Tensile tests were carried out in T1 and T4 treatments. Results indicate that mechanical properties depend strongly on the tendency to form new phases at the matrix-intermetallic interface during processing and/or further thermal treatments. The materials which present better properties are those that present less reaction between matrix and intermetallic reinforcement, i.e. MoSi<sub>2</sub> and SiC reinforced composites.

## Keywords

Metal matrix composites. Powder metallurgy. Aluminium alloys. Intermetallics.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los materiales compuestos de matriz de aluminio reforzados con cerámicos han tenido recientemente un gran desarrollo en nuevas aplicaciones, tanto en la industria aeroespacial como en la automovilís-

tica<sup>[1 y 2]</sup>. No obstante, como en estos materiales la diferencia en el coeficiente de expansión térmica (CET) entre matriz y cerámico es muy elevada, su resistencia a la fatiga térmica es baja<sup>[3 y 4]</sup>. Sería deseable, por tanto, desarrollar otros materiales que, conservando gran parte de las ventajas que poseen

(\*) CENIM-CSIC. Avda. Gregorio del Amo, 8. 28040 Madrid (España).

(\*\*) ETSI Industriales UNED. Ciudad Universitaria. 28040 Madrid (España).

los reforzados con cerámicos, muestren un mejor comportamiento en condiciones de servicio que incluyan ciclos térmicos. Entre los distintos materiales para sustituir a los cerámicos como refuerzo destacan los compuestos intermetálicos, ya que, además de poseer unas elevadas resistencia mecánica y módulo elástico, su coeficiente de expansión térmica es más próximo al de la matriz de aluminio. Esta menor diferencia entre el coeficiente de expansión térmica de matriz e intermetálico hace que disminuyan las tensiones residuales en las intercaras, consiguiendo de este modo que la fatiga térmica tenga una menor incidencia<sup>15 y 61</sup>. También, la maquinabilidad y los procesos de manufacturación son más fáciles de llevar a cabo con intermetálicos que con cerámicos. Además, los materiales compuestos reforzados con intermetálicos pueden reciclarse más fácilmente que los reforzados con cerámicos.

En este trabajo se presentan algunos resultados preliminares, obtenidos dentro del proyecto europeo BRPR-CT-0547, acerca del comportamiento mecánico de materiales compuestos de matriz de aluminio 2124 reforzados con partículas de diferentes compuestos intermetálicos y su comparación con la aleación 2124 y con esa misma aleación reforzada con partículas del cerámico SiC.

Con el fin de aumentar la viabilidad industrial de este tipo de materiales los intermetálicos se han obtenido por SHS (síntesis autopropagada a temperatura elevada), que es un proceso de costo reducido. La síntesis y la molienda de los intermetálicos se llevaron a cabo en el laboratorio de uno de los socios de dicho proyecto (INASMET).

Se espera que el campo de aplicación de estos materiales compuestos de matriz de aluminio reforzados con intermetálicos sea, al menos, tan alto como el de los reforzados con cerámicos, que son utilizados para una gran variedad de usos donde se requieren componentes ligeros.

## 2. PARTE EXPERIMENTAL

### 2.1. Materiales y procesado

El material fue procesado por vía pulvimetalúrgica, a partir de partículas de polvo de la aleación 2124 y de los intermetálicos Ni<sub>3</sub>Al, NiAl, Cr<sub>3</sub>Si y MoSi<sub>2</sub>, así como del cerámico SiC. Las partículas de polvo de la aleación 2124 con un tamaño de ~50 µm se obtuvieron por atomización en atmósfera de argón. Las partículas del material intermetálico de ~30 µm se obtuvieron por molienda mecánica

del tocho del intermetálico sintetizado por SHS. Las partículas de polvo de la matriz se mezclaron con un 15 %, en volumen, de intermetálico ó cerámico en un mezclador rotatorio simple y, una vez compactada la mezcla uniaxialmente en frío, se extruía en una prensa horizontal. En todos los casos la temperatura de extrusión fué de 450 °C. La barra extruida se templó en agua a la salida de la prensa, obteniendo de este modo el estado T1. Para poder comparar con datos industriales y entre una extrusión y otra, los materiales también se estudiaron en estado T4, que consistió en solubilización a 495 °C durante 30 min seguido de temple en agua y envejecimiento natural durante 2 d.

### 2.2. Caracterización mecánica y microestructural

La caracterización mecánica se realizó mediante ensayos de tracción en una máquina Servosis con una celda de carga de 10 t, sobre probetas con un diámetro de 3 mm y una longitud útil de 10 mm. La velocidad de deformación inicial fué de 10<sup>-4</sup> s<sup>-1</sup>. Todos los ensayos se realizaron a temperatura ambiente en, al menos, dos probetas del mismo estado y material.

La caracterización microestructural se realizó por microscopía electrónica de barrido (MEB) con microanálisis sobre probetas embutidas y pulidas, para estudiar la homogeneidad del material y la composición de los distintos productos de reacción.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la tabla I se muestran el valor medio obtenido de los dos ensayos realizados por material y estado de los materiales reforzados con los distintos intermetálicos, así como del reforzado con SiC y de la aleación sin reforzar.

En dicha tabla los datos correspondientes a los materiales 2124/Ni<sub>3</sub>Al y 2124/NiAl en estado T4 están en blanco porque, debido a su gran fragilidad, las probetas rompían antes de llegar al límite elástico. De la observación del resto de los datos que figuran en la tabla I se extraen los siguientes puntos:

- a) Los valores del límite elástico en estado T4 son superiores a los del estado T1. La mejora en el límite elástico del material compuesto prueba que la matriz endurece por precipitación como consecuencia del tratamiento T4, lo que indica que, o bien no hay pérdida de soluto de

**Tabla I.** Propiedades mecánicas de la aleación 2124 y de los compuestos 2124/Ni<sub>3</sub>Al, 2124/NiAl, 2124/Cr<sub>3</sub>Si, 2124/MoSi<sub>2</sub> y 2124/SiC en estado T1 y T4*Table I. Mechanical properties of the 2124 alloy and the 2124/Ni<sub>3</sub>Al, 2124/NiAl, 2124/Cr<sub>3</sub>Si, 2124/MoSi<sub>2</sub> and 2124/SiC composites in T1 and T4*

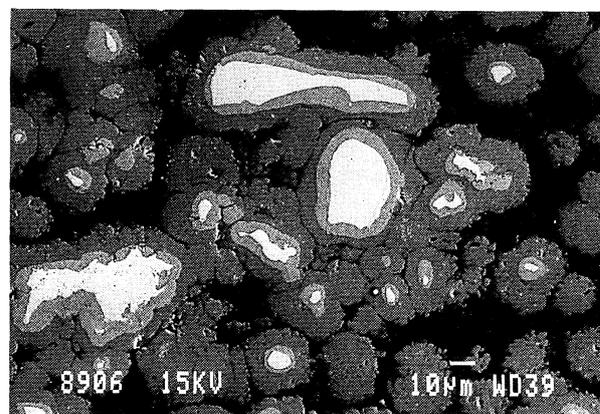
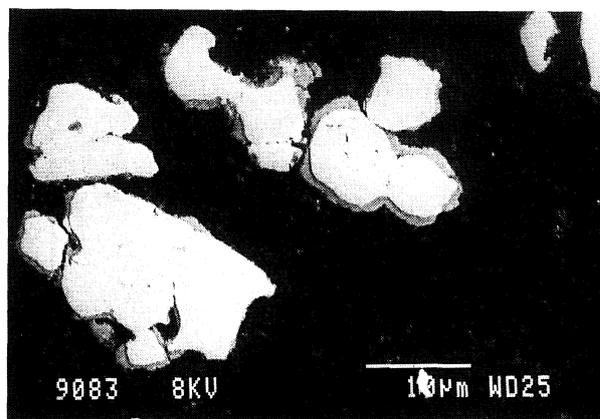
	2124		2124/Ni <sub>3</sub> Al		2124/NiAl		2124/Cr <sub>3</sub> Si		2124/MoSi <sub>2</sub>		2124/SiC	
	T1	T4	T1	T4	T1	T4	T1	T4	T1	T4	T1	T4
Límite elástico $\sigma_y$ (MPa)	320	410	280	-	320	-	330	360	330	390	340	370
Resistencia máxima UTS (MPa)	520	560	370	-	430	-	470	420	460	520	450	500
Alargamiento (%)	12	14	3,5	-	4	-	5	0,5	5	8	3,5	6,5

la matriz, a consecuencia de reacciones de difusión con las partículas de intermetálico, o ésta no afecta al endurecimiento.

- b) Los valores de la resistencia máxima y del alargamiento en estado T4 son superiores a los del estado T1, excepto en el material reforzado con Cr<sub>3</sub>Si. La mejora se debería a las mismas razones apuntadas en a). La disminución en la UTS, observada en el material 2124/Cr<sub>3</sub>Si, va acompañada de una disminución en el alargamiento, que hace que los valores de  $\sigma_y$  y UTS estén muy próximos.
- c) El material que presenta un mejor comportamiento mecánico en estado T4 es la aleación sin reforzar. De entre los materiales compuestos, el 2124/MoSi<sub>2</sub> es el que posee mejores propiedades mecánicas, incluso superiores al reforzado con SiC.

De la observación de la microestructura se extraen los siguientes puntos:

- En los materiales reforzados con Ni<sub>3</sub>Al y NiAl se observa la aparición de nuevas fases en la intercara matriz-refuerzo, incluso en estado T1 (Fig. 1a), fases cuya presencia aumenta de manera muy importante en el estado T4. En ambos materiales las nuevas fases que se forman son Al<sub>3</sub>Ni y Al<sub>3</sub>Ni<sub>2</sub>, tal y como se aprecia en la figura 1 b). La aparición de estas nuevas fases en forma de capas concéntricas ya había sido observada en materiales compuestos de matriz de aluminio reforzados con Ni<sub>3</sub>Al<sup>[7]</sup>, con la diferencia de que, para los compuestos con matriz 2124, aparece señal de Cu en la fase que correspondería al Al<sub>3</sub>Ni. Estas fases conllevan un incremento considerable de volumen respecto al Ni<sub>3</sub>Al inicial, provocando tensiones de expansión tan grandes que dan lugar a cavidades y fisuras.



**Figura 1.** Microestructura del material compuesto 2124/Ni<sub>3</sub>Al (a) en estado T1, (b) en estado T4.

*Figure 1. Microstructure of the 2124/Ni<sub>3</sub>Al composite in (a) T1 and (b) T4.*

- Tanto en estado T1 como en estado T4 el material reforzado con NiAl, presenta menor reacción que en el reforzado con Ni<sub>3</sub>Al.
- En relación al compuesto reforzado con Cr<sub>3</sub>Si no se aprecian productos de reacción en la intercara matriz-refuerzo en estado T1. En estado T4 se observa, aunque en menor medida

que los casos anteriores, cierta disolución de las partículas de intermetálico, con la aparición de una fase rica en Cu en la intercara (Fig. 2), aunque no se aprecian defectos en forma de microcavidades o fisuras.

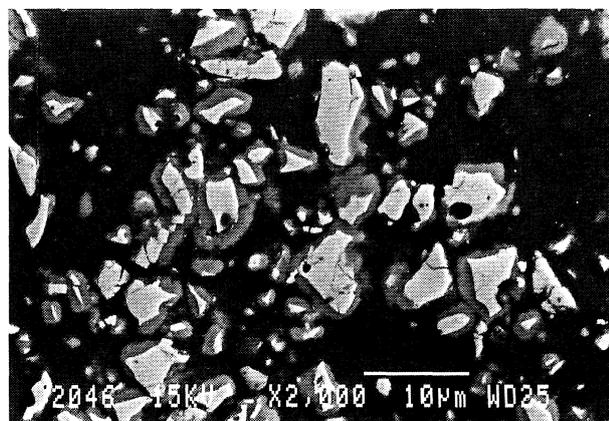
- El material reforzado con  $\text{MoSi}_2$  no presenta reacción entre matriz y reforzante en ninguno de los dos estados estudiados (Fig. 3).

El paralelismo entre los cambios microestructurales que se acaban de comentar y las propiedades mecánicas es evidente, por lo que se puede decir que para los materiales reforzados con  $\text{Ni}_3\text{Al}$  y  $\text{NiAl}$  son los cambios microestructurales provocados por la aparición de nuevas fases los responsables de la fragilidad observada. Esta deducción se confirma por el hecho del aumento simultáneo de la fragilidad y de los productos de reacción en estado T4.

En relación al compuesto reforzado con  $\text{Cr}_3\text{Si}$ , el hecho de que, al igual que en los dos casos anteriores, la fragilidad aumente en estado T4, parece indicar que las nuevas fases debilitan la unión de la intercara matriz-refuerzo.

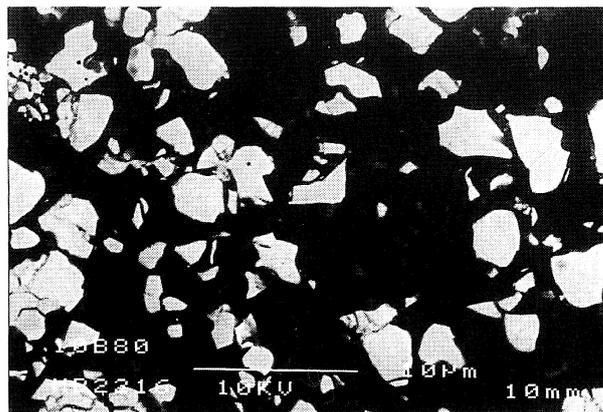
El intermetálico en el que no se ha detectado disolución del intermetálico durante el tratamiento de solubilización es el  $\text{MoSi}_2$ , que es el único que presenta una sensible mejora en las propiedades mecánicas del compuesto al pasar de estado T1 a T4. Es interesante resaltar que este material compuesto posee mejores propiedades mecánicas que la misma aleación reforzada con partículas de material cerámico y procesada de manera similar.

El hecho de que las propiedades mecánicas del compuesto 2124/ $\text{MoSi}_2$  sean algo inferiores a las



**Figura 2.** Microestructura del material compuesto 2124/ $\text{Cr}_3\text{Si}$  en estado T4.

*Figure 2. Microstructure of the 2124/ $\text{Cr}_3\text{Si}$  composite in T4.*



**Figura 3.** Microestructura del material compuesto 2124/ $\text{MoSi}_2$  en estado T4.

*Figure 3. Microstructure of the 2124/ $\text{MoSi}_2$  composite in T4.*

de la matriz puede ser debido a varias causas y sucede también con materiales compuestos 2124/ $\text{SiC}$ , para los que se puede encontrar en la literatura<sup>[8 y 9]</sup> una gran dispersión de valores de límite elástico, entre 360 MPa y 485 MPa, y de UTS, entre 440 MPa y 610 MPa. Igualmente sucede con la aleación 2124 PM, donde los valores obtenidos en este trabajo, tanto de  $\sigma_y$  como de UTS, están entre los más altos. No obstante, el hecho importante que se deduce del presente trabajo es que las propiedades mecánicas del compuesto 2124/ $\text{SiMo}_2$  son incluso superiores a las del 2124/ $\text{SiC}$ . Puesto que, tal y como muestran otros trabajos, las propiedades del compuesto 2124/ $\text{SiC}$  son mejorables a través del procesado, es esperable que también lo sean las del 2124/ $\text{SiMo}_2$ . En la actualidad, se está investigando la manera de mejorar las propiedades a partir de un mejor conocimiento de la intercara matriz-refuerzo y de una optimización del procesado, con el objetivo de introducir aquellos cambios que no impliquen un mayor coste. Por último, es preciso señalar que, aunque los valores obtenidos de  $\sigma_y$ , UTS y alargamiento sean ligeramente inferiores a los de la aleación sin reforzar, no hay que olvidar que la introducción del reforzo intermetálico produce un aumento del módulo elástico cercano al 35%.

#### 4. CONCLUSIONES

Las propiedades mecánicas de los materiales compuestos reforzados con partículas de intermetálicos están íntimamente relacionadas con la estabilidad térmica del intermetálico. En los compuestos

2124/Ni<sub>3</sub>Al, 2124/NiAl y 2124/Cr<sub>3</sub>Si los productos de reacción fragilizan, claramente, el material y disminuyen su límite elástico y resistencia máxima a tracción. Este efecto aumenta al pasar del estado T1 al T4.

Las mejores propiedades mecánicas se obtienen en el material reforzado con MoSi<sub>2</sub>, siendo este intermetálico el único que se mantiene estable durante el tratamiento de solubilización. Más aún, las propiedades mejoran al pasar del estado T1 al T4. El material compuesto 2124/MoSi<sub>2</sub> presenta límite elástico, resistencia máxima a tracción y alargamiento a rotura superiores a los del 2124/SiC, ambos procesados de la misma manera.

### Agradecimientos

Se agradece la financiación de la Comunidad Europea a través de un proyecto BRPR-CT-0547 y al CSIC e INASMET por la beca "Formación y Especialización en Líneas de Investigación de Interés Industrial".

### REFERENCIAS

- [1] F.H. FROES, *Mater. Sci. Eng.* A184 (1994) 119-133.
- [2] *Powder Metall.* 39 (1996) 189.
- [3] *Smithells Metals Reference Book*, 7<sup>th</sup> ed., E. A. Brandes and G. B. Brook (eds.), Butterworth-Heinemann Ltd., Oxford, 1992, pp. 14-14.
- [4] R. RAMESH, B. PATHIRAJ, B.H. KOLSTER y J.H. MASS, *Mater. Sci. Eng.* A152 (1992) 60-66.
- [5] D.C. DUNAND y B. DERBY, *Creep and thermal cycling*, in *Fundamentals of Metal-Matrix Composites*, S. Suresh, A. Mortensen and A. Needleman (eds.), Butterworth-Heinemann, Stoneham, 1993, pp 191-216.
- [6] L. WANG, Z.M. SUN y T. KOBAYASHI, *Scr. Mater.* 35 (1996) 973-978.
- [7] J.L. GONZÁLEZ CARRASCO, F. GARCÍA CANO, G. CARUANA y M. LIEBLICH, *Mater. Sci. Eng.* A183 (1994) L5.
- [8] R.J. ARSENAULTD y L. MCDANELS, *Metall. Trans.* 16A (1985) 1.105.
- [9] K. SHIN, D. CHUNG y S. LEE, *Metall. Trans.* 28A (1987) 2.625.