

Comportamiento a fractura de la aleación 6061 reforzada con alúmina

A. FORN¹, M^a T. BAILE¹, E. RUPÉREZ¹, E. MARTÍN, A. RAPOPORT²

¹ Dep. de Ciència de Materials i Enginyeria Metal·lúrgica, EUPVG, Universitat Politècnica de Catalunya, 08800 Vilanova i la Geltrú, España.

² AEROSPATIALE MATRA, Centre Commun de Recherche, Suresnes, France.

Se estudian las propiedades de las aleaciones de aluminio 6061/(20%Al₂O₃)_p obtenidas por colada y conformadas posteriormente por extrusión y forja. Estos materiales son sometidos a tratamientos térmicos de envejecimiento (T6) para estudiar su efecto en las propiedades mecánicas. En este trabajo se comparan las características de la matriz con las del material reforzado en las distintas etapas de producción utilizando técnicas de microscopía óptica y electrónica, EDS y ensayos de tracción, fatiga y ultramicroindentación.

Los ensayos mecánicos indican que el material compuesto extruido presenta valores de resistencia mecánica más bajos que la aleación 6061 tratada en las mismas condiciones y ello se relaciona con la presencia de espinela en la interfase alúmina-matriz.

Se establecen los mecanismos de fractura por tensiones estáticas y dinámicas en los distintos casos, estudiando las posibles interacciones matriz-refuerzo y su influencia en el comportamiento mecánico de la aleación.

Palabras clave: Aluminio, propiedades mecánicas, materiales compuestos, fractura.

A6061/(Al₂O₃)_p fracture behaviour

The properties of the cast aluminium alloys 6061/(20%Al₂O₃)_p are studied. This material is obtained by Duralcan procedure after being submitted to an extrusion and forging process. These materials are submitted to T6 heat treatments in order to study their effect on mechanical properties. In this work the matrix characteristics are compared with the reinforced material in different production stages, using an optical and electronic microscopy, EDS, tensile, fatigue and ultramicrohardness tests. The mechanical properties indicate that the extruded reinforced material presents ultimate tensile strength values lower than the alloy 6061 under the same conditions, and this is related to the presence of spinel in the interface matrix-reinforcement. The fracture mechanisms are established by static and dynamic tensions in different cases, studying the possible interactions matrix-reinforcement and their repercussion in the mechanical behaviour of the alloy.

Keywords: Aluminium, mechanical properties, composites, fracture.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años los materiales compuestos de matriz metálica (MMC) han recibido una atención especial por ofrecer una combinación excelente de propiedades físicas y mecánicas.

Una de las técnicas de obtención de materiales compuestos de bajo coste es el proceso de colada, incorporando partículas cerámicas en la aleación metálica fundida. En este proceso, las temperaturas de trabajo son relativamente elevadas y los tiempos suficientemente largos para que algunos refuerzos cerámicos reaccionen con la matriz, debido a su inestabilidad termodinámica, y formen compuestos no deseados, que repercutirán en las propiedades mecánicas de dichos materiales (1-3).

En el desarrollo y diseño de nuevos materiales estructurales, el comportamiento a fatiga es un factor importante que ha de ser considerado. De los fallos prematuros de componentes sometidos a sollicitaciones dinámicas, más del 90% son fallos por fatiga. Debido a que los MMCs presentan, en general, ductilidades inferiores a sus correspondientes matrices, es esencial un estudio del comportamiento a fatiga para su diseño y aplicación. En algunos casos la presencia de refuerzo en MMCs empeora el comportamiento a fatiga cuando es sometido a una carga cíclica con control de deformación mientras que en otros sucede lo contrario (4,5). Algunos de los factores causantes de este fenómeno son la fragilidad de los refuerzos, la concentración de tensiones y acumulación de dislocaciones cerca de la interfase. La nucleación y crecimiento de la grieta durante el ensayo a fatiga de MMCs ha sido estudiado por muchos autores. La mayoría de los resultados indican que la nucleación de la grieta es consecuencia de la fractura de las partículas y de la decohesión. No obstante aún queda mucho por conocer en el comportamiento a fatiga de los MMCs.

2. MÉTODO EXPERIMENTAL

2.1. Materiales

Se ha estudiado la aleación A6061 / 20% (Al₂O₃)_p, con un tamaño medio del refuerzo de 13.6 μm (6-7). El material ha sido obtenido mediante proceso Duralcan y ha sido posteriormente extruido a una temperatura de 450°C y forjado en caliente a 460° C ± 20° C. La composición química de la aleación está indicada en la Tabla I. Muestras de estos materiales así como de la matriz 6061 se han sometido a un tratamiento T6 (puesta en solución a 560°C y envejecimiento artificial a 175°C durante 10 h).

TABLA I. COMPOSICIÓN QUÍMICA (% EN PESO) A6061.

Si	Mg	Cu	Ni	Ti
0,56	0,99	0,23	0,001	0,007
Cr	Fe	Zn	Mn	Al
0,12	0,12	0,003	0,004	resto

2.3 Ensayos mecánicos

De los lingotes extruidos y de las piezas forjadas, con y sin tratamiento térmico, se han mecanizado probetas en la dirección longitudinal, siguiendo la norma ICG04-21-111 con métrica 6 (6). Los ensayos de tracción se han realizado según la norma EN 10002-1.

Se han llevado a cabo ensayos de fatiga por flexión rotativa de las muestras extruidas, forjadas y con tratamiento térmico T6. El tipo de probeta utilizada en los ensayos se indica en la fig. 1, donde a la pro-

beta nº1 le corresponde una $K_I=1,035$ y para la probeta nº2 una $K_I=2,3$. En todos los casos $R = -1$.

Se han realizado ensayos de ultramicrodureza en la aleación 6061 y en el material compuesto, en las diferentes etapas de conformación. En todos los casos la indentación se ha hecho aplicando una carga de 1000 mN durante 30seg. Estos ensayos se rigen por el proyecto de norma ISO VDI/VDE 2616.

3. RESULTADOS EXPERIMENTALES

3.1 Análisis microestructural

En la fig.2. se observa una distribución homogénea de partículas de Al_2O_3 en la matriz de aluminio del material compuesto 6061/ $(Al_2O_3)_p$ de fundición .

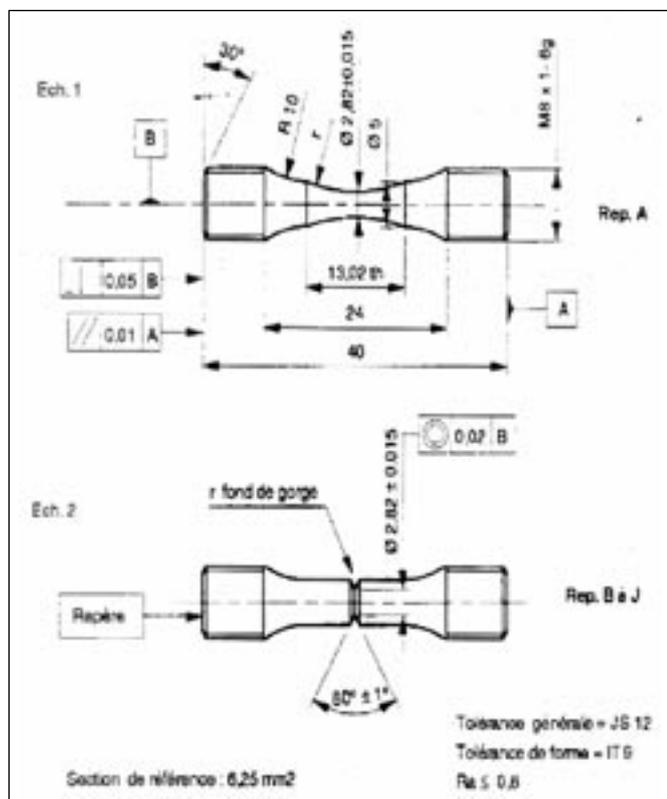


Fig. 1. Esquema de las probetas de fatiga.



Fig.2. Microestructura del material A6061MMC.

El análisis mediante SEM (Fig. 3) pone de manifiesto la presencia de un constituyente en la interfase refuerzo-matriz (1,6). La caracterización de este compuesto mediante difracción de RX y por espectrometría de energía dispersada de Rayos X (EDS) confirman la presencia de espinela $MgAl_2O_4(s)$ (6). Algunos autores (3) sugieren la posibilidad de que dicha espinela sea producto de la reacción del magnesio en solución líquida con las partículas sólidas de óxido de aluminio.

3.2 Ensayos de tracción

En la tabla II se muestran los resultados de los ensayos realizados. La incorporación de las partículas de Al_2O_3 no mejora las propiedades mecánicas de la aleación, sino que disminuye notablemente el límite elástico y la resistencia a la tracción. Ello puede ser debido a la falta de adherencia entre la matriz y el refuerzo, como consecuencia de la formación de espinela que recubre las partículas de óxido de aluminio (Fig. 4).

TABLA II. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE TRACCIÓN DE LA ALEACIÓN 6061 Y DEL MATERIAL COMPUESTO A6061/ $(Al_2O_3)_p$.

Material	$\sigma_{0,2}$ /MPa	σ_r /MPa	ϵ_r / %
6061 extruido	165±17	191±0.1	10,9±1.6
6061 extruido+T6	305±11	319±8	9,3±1.4
6061MMC extruido	99,5±0.8	164±3	12,5±0.4
6061MMC extruido+T6	346±2.2	380±0.4	3,7±0.2
6061MMC forjado	126±18	207±18	12,2±1.0
6061MMC forjado + T6	352±13	382±15	1±0.1

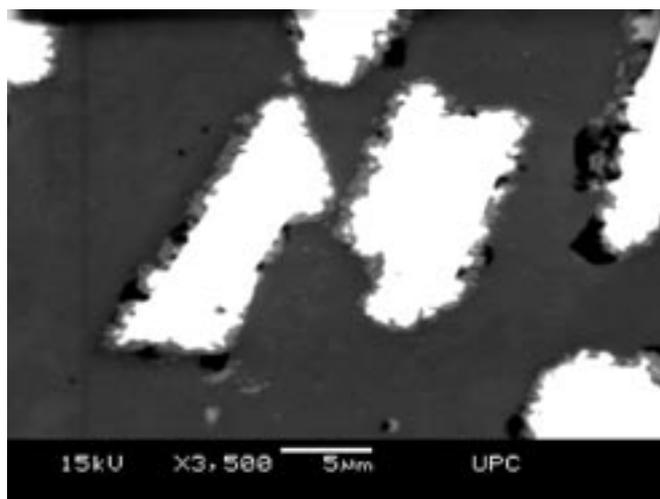


Fig. 3. Partícula de óxido de aluminio rodeada de espinela en el material compuesto 6061/ $(Al_2O_3)_p$.

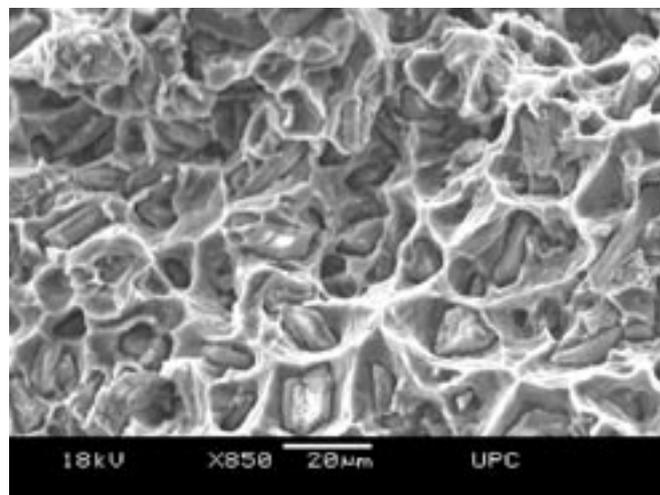


Fig. 4. Fractografía del material compuesto AA6061/ $(Al_2O_3)_p$ extruido.

Cuando se analiza la fractura de una probeta forjada en caliente, puede comprobarse que hay una mejora notable en la adherencia (Fig. 5) y un aumento en la cantidad de partículas fragmentadas. Ello provoca una mejora en el límite elástico y en la resistencia a tracción respecto al material extruido, manteniéndose la ductilidad.

El efecto del tratamiento térmico T6 produce, tanto en la aleación 6061 como en el material reforzado, un aumento de la resistencia mecánica y una pérdida de ductilidad (tabla II) debido a la formación de precipitados β' -Mg₂Si (6) y a una mejora de la cohesión matriz-refuerzo (Fig. 6).

3.3 Ensayos de fatiga

Los resultados de fatiga se muestran en la tabla III, observándose un relativo buen comportamiento bajo solicitaciones cíclicas. En la Fig. 7 se pueden apreciar la buena adherencia de las partículas y las "marcas de río" debidas al endurecimiento del material provocado por los tratamientos térmicos. En las probetas tipo 1, con una K_t de 1,035 la microductilidad está localizada en algunas zonas de la superficie de fractura (Fig. 8).

TABLA III. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE FATIGA DEL MATERIAL COMPUESTO 6061/(Al₂O₃)_p EXTRUIDO, FORJADO Y CON TRATAMIENTO TÉRMICO T6.

Probeta n°	K_t	σ_{ms} (Mpa)	N_R
2	2.3	50	630.458
2	2.3	75	310.728
1	1.035	175	201.003
1	1.035	200	71.085

3.4 Ultramicrodurezas

Los resultados de los ensayos de durezas (tabla IV) corroboran los obtenidos en el ensayo de tracción: el material reforzado que en principio se comporta peor que el de la matriz, mejora alrededor del 50% tanto con los procesos de conformación en caliente como con los tratamientos térmicos T6.

TABLA IV. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE ALEACIÓN ULTRAMICRODUREZAS DE LA ALEACIÓN 6061 Y DEL MATERIAL COMPUESTO 6061/(Al₂O₃)_p.

Material	HUcorr (N/mm ²)	Hplac (N/mm ²)
6061 extruido	946	1060
6061 extruido+T6	1291	1525
6061MMC extruido	762	817
6061MMC extruido + T6	1902	2267
6061MMC forjado	1021	1174
6061MMC forjado + T6	1679	1990

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Además de los mecanismos de fractura conocidos en los MMC de rotura dúctil originada por la nucleación, crecimiento y coalescencia de huecos en la interfase matriz-refuerzo, y el de rotura frágil de las partículas de Al₂O₃, existe un tercer mecanismo que se inicia en la interfase espinela-matriz como consecuencia de la falta de cohesión entre ambas (6). En el material extruido se observan el primero y el tercer tipo de fractura, mientras que en las muestras tratadas térmicamente, predomina el segundo mecanismo de fractura. Con la forja en caliente la rotura por formación de microcavidades es el mecanismo dominante.

El buen comportamiento de los materiales tratados puede deberse a dos efectos: la mejora de la adherencia matriz-refuerzo que

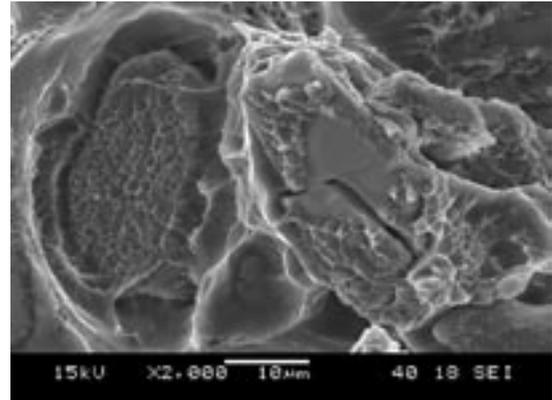


Fig. 5. Buena adherencia matriz-refuerzo del material A6061MMC forjado

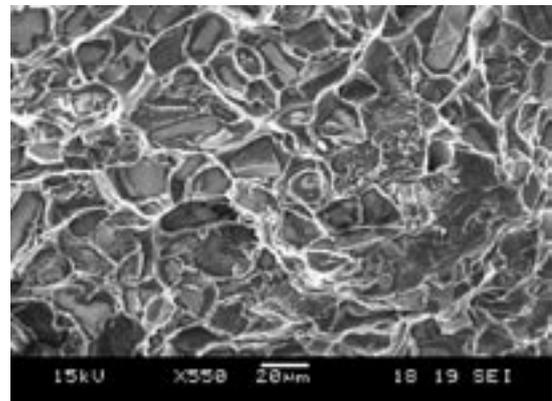


Fig. 6. Fractografía del material forjado A6061MMC con T6.

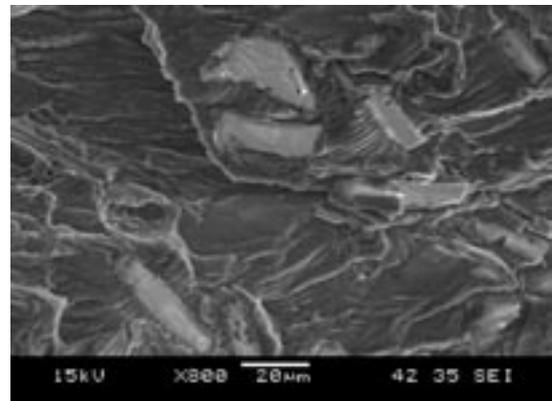


Fig. 7. Fractografía de fatiga del material forjado A6061MMC con T6 (50MPa, $K_t=2.3$).

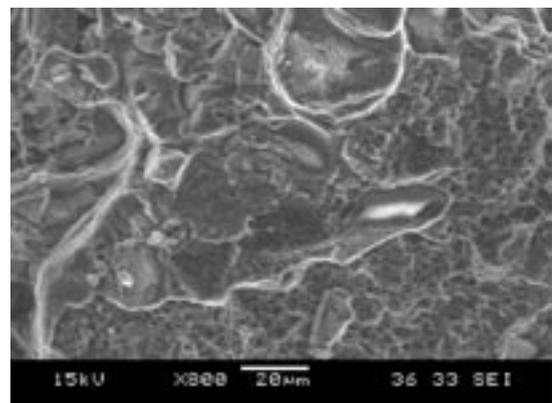


Fig. 8. Fractografía de fatiga del material forjado A6061MMC con T6 (200MPa, $K_t=1.035$).

se produce durante la etapa de solubilización o en la forja en caliente, tal y como se ha visto en los ensayos de fatiga, y la presencia de finos precipitados β'' en la matriz (6), que provocan el aumento de dureza observado en el ensayo de ultramicrodurezas.

5. CONCLUSIONES

1. Los ensayos de tracción y de ultramicrodureza ponen de manifiesto el mal comportamiento a fractura del material procedente de colada, debido a la mala adherencia matriz-refuerzo.
2. Los procesos de conformación en caliente y los tratamientos térmicos mejoran dicha adherencia, con lo que se obtienen buenas propiedades a tracción y a fatiga.
3. El análisis fractográfico del material compuesto tratado con T6 muestra que el mecanismo que predomina es la fractura frágil del refuerzo.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo forma parte del Proyecto Europeo BRITE-EURAM nº BRPR-BE97-4568 y cofinanciado por la CICYT MAT2001-1732-CO2-O2.

6. BIBLIOGRAFIA

1. Forn, M. T. Baile y E. Rupérez. «Spinel effect on the mechanical properties of metal matrix composite Al-6061/(Al₂O₃)_p». Proceedings of the International Conference on Advanced Materials Processing Technologies (AMPT'01), Leganés, pp. 277-282, J.M^a Torralba, ed., Madrid (2001)
2. A.D. McLeod and C.M. Gabryel. «Kinetics of the growth spinel, MgAl₂O₄, on alumina particulate in aluminium alloys containing magnesium», Metallurgical Transactions A, 23^a, 1279-1283 (1992).
3. J. C. Lee, G. H. Kim y H. I. Lee., «Characterisation of interfacial reaction in (Al₂O₃)_p/6061 aluminium alloy composite». Materials Science and Tech., 13, 182-186 (1997).
4. B. Tabernig, y otros. «Modelling of in-service fatigue performance of particle reinforced aluminium alloys». 4th International Conference of the Engineering Integrity Society (Fatigue 2000). Cambridge, 2000.
5. A.Forn, E. Martín. «Mecanismos de generación y propagación de grietas en materiales compuestos base aluminio». Anales de Mecánica de la Fractura. Vol 19, pp. 229-234. 2002.
6. Forn, M. T. Baile y E. Rupérez. «Comportamiento a fractura de las aleaciones 6061 MMC extruidas y forjadas». Anales de Mecánica de la Fractura. Vol 19, pp. 269-274. 2002.
7. Forn, M. T. Baile, y E. Rupérez. «Caracterización microestructural de la aleación 6061 + 22%Al₂O₃». Actas del VIII Congreso Nacional de Tratamientos Térmicos y de Superficie (TRATERMAT 2000), Barcelona, pp. 439-446, A. Herrero, F. Vivas ed., Barcelona.

Recibido: 1.2.03

Aceptado: 30.11.03