

## ESTUDIO DE LA TENACIDAD DE COMPOSITOS DE MATRIZ METALICA BASADOS EN ALEACIONES HIPEREUTECTICAS Al/Si

J. Valer Goñi, J.M. Rodríguez Ibabe y J.J. Urcola Galarza

Centro de Estudios e Investigaciones Técnicas de Gipuzkoa (CEIT) y  
Escuela Superior de Ingenieros Industriales  
Pº. Manuel de Lardizabal, 15, 20009 San Sebastián (Pais Vasco)

**Resumen.** Se han estudiado las propiedades mecánicas y la tenacidad de un composite Al/25Si/5Cu conformado hasta formas semiacabadas mediante una combinación de spray formado (Osprey), extrusión y thixoformado. Los valores de la tenacidad medidos oscilan entre 9.5 y 14 MPa√m. La fractura del material tiene lugar mediante la rotura de partículas de Si que se encuentran agrupadas y el posterior crecimiento de las grietas a través de la fase eutéctica CuAl<sub>2</sub> y de la matriz de Al. Una optimización microestructural disminuyendo la conectividad y el agrupamiento de las partículas de Si conduciría a una mejora en el comportamiento mecánico del material.

**Abstract.** Conventional mechanical properties and toughness of an Al/25Si/5Cu composite formed to near-net-shape by a combination of spray-forming (Osprey), extrusion and thixoforming have been measured. Toughness values between 9.5 and 14 MPa√m have been obtained. Fractures starts at Si particle clusters growing through CuAl<sub>2</sub> eutectic phase and Al matrix. Microstructural optimisation, decreasing Si particles connectivity and clustering would bring to a better mechanical behaviour.

### 1. INTRODUCCION

Las aleaciones hipereutécticas Al/Si son utilizadas en la industria del automóvil y en otras aplicaciones en las que se requiere una buena resistencia al desgaste. Sin embargo la utilización de aleaciones con elevados contenidos de Si obtenidas a través de procedimientos convencionales presenta el inconveniente de requerir elevadas temperaturas de fusión que dan origen a la aparición de partículas de Si primario de gran tamaño (Fig. 1). Dicha microestructura confiere al material unos valores de ductilidad y tenacidad muy pobres (en el caso de una aleación Al/20Si,  $\sigma_{0,2\%} = 130$  MPa y UTS = 180 MPa [1]).

Si durante el proceso de solidificación de un material se evita que el mismo solidifique de forma dendrítica tomando un aspecto globular, en estado semisólido dicho material posee propiedades thixotrópicas. Una vez solidificado, en un posterior calentamiento hasta una temperatura semisólida el material vuelve a recuperar sus propiedades thixotrópicas [2]. En esas

condiciones ese material es apto para ser conformado ("thixoforming") o inyectado a presión ("thixocasting"), pudiendo lograrse piezas con geometrías semiacabadas [2]. Teniendo en cuenta que la temperatura a la que hay que calentar el material para alcanzar el estado semisólido es mucho menor que la necesaria en un proceso de fundición convencional, la microestructura final resulta mucho más fina. Por otra parte, la obtención de formas con geometrías semiacabadas reduce notablemente los costes de mecanizado frente a los procedimientos convencionales de mecanizado a partir de barras.

En el presente trabajo se exponen los resultados obtenidos con una aleación Al/25Si/5Cu. Para lograr la estructura fina y globular se ha recurrido al procedimiento Osprey [3] y posteriormente el material ha sido thixoformado en estado semisólido. El trabajo forma parte de un proyecto de investigación BRITE/EURAM realizado conjuntamente con varios laboratorios e industria de la CE.

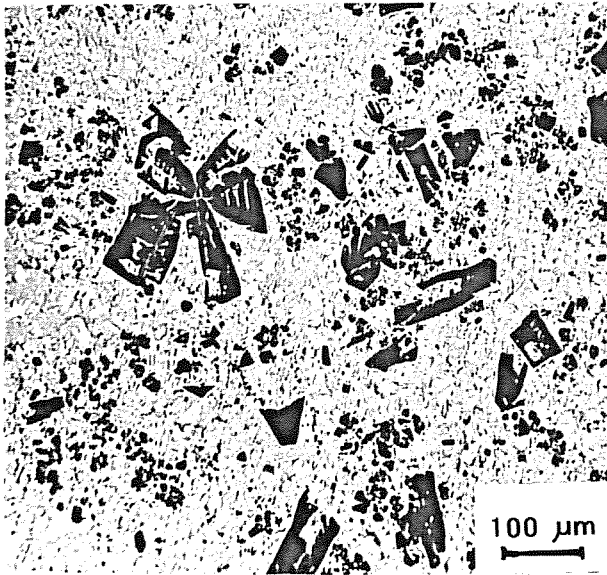


Fig. 1. Microestructura de una aleación Al/20Si obtenida mediante colada convencional. Se observa la presencia de partículas de Si primario de gran tamaño.

## 2. TECNICAS EXPERIMENTALES

El material analizado en el presente trabajo es un composite de matriz metálica de composición Al/25Si/5Cu. El material fue obtenido mediante el proceso de spray formado (Osprey, UK) y a continuación extruido y posteriormente thixoformado a 570°C (Universidad de Sheffield, UK). Las características microestructurales y mecánicas del material se estudiaron en dos condiciones diferentes: extruido y extruido + thixoformado. La aplicación de la extrusión tiene por objeto romper el esqueleto o red continua de partículas de Si que se observan en la microestructura del material obtenido mediante spray formado. La microestructura del composite está constituida por partículas de Si primario, glóbulos de Al- $\alpha$  y por eutéctico con CuAl<sub>2</sub>. En la Fig. 2 se muestran ejemplos de micrografías correspondientes a las condiciones de spray formado, spray formado + extrusión y spray-formado + extrusión + thixoformado.

La medición de la fracción volumétrica y distribución de tamaños de las partículas de Si se realizó utilizando un analizador de imágenes Quantimet. El tamaño medio de las partículas de Si en condiciones de extrusión es de ~ 4 μm. Después del proceso de thixoformado el tamaño medio crece hasta 9 μm. El histograma de distribución de tamaños de partículas de Si para las dos condiciones se indica en la Fig. 3. Como puede observarse durante el thixoformado tiene lugar un crecimiento de las partículas de Si. Por otra parte, mediante un ataque químico selectivo y posterior observación microscópica se constató que en gran cantidad de ocasiones dichas partículas no son

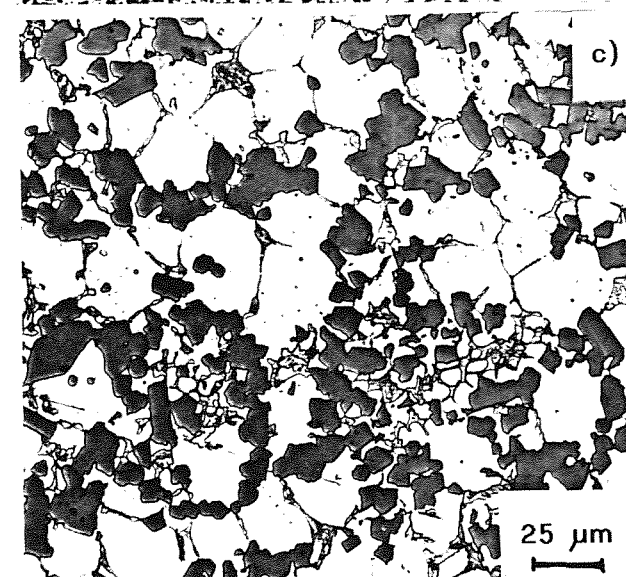
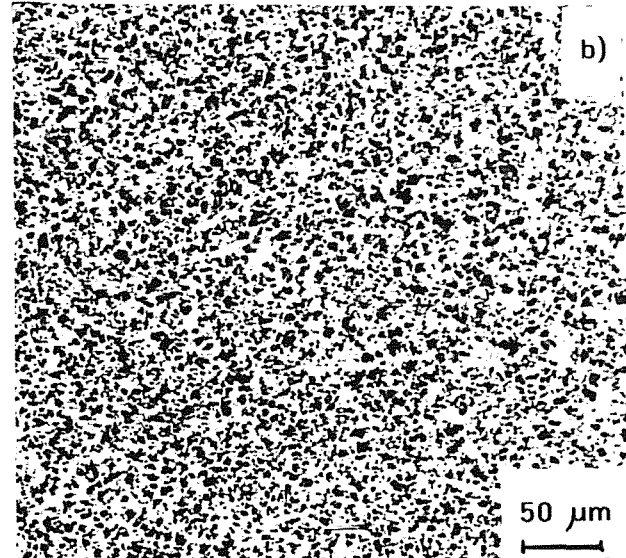
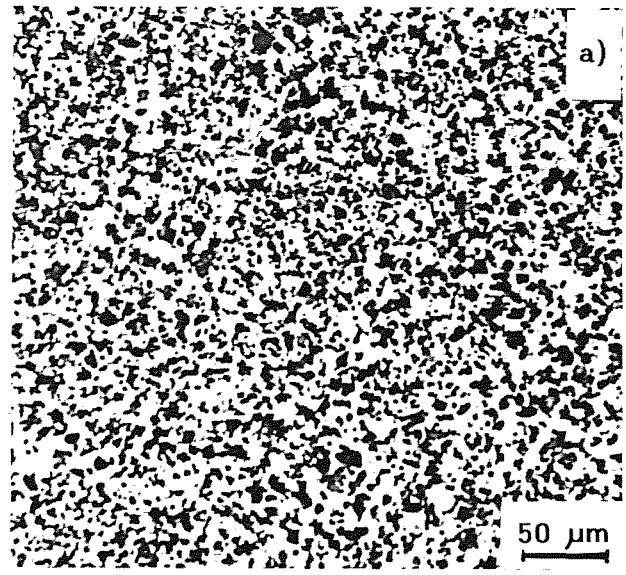


Fig. 2. Microestructuras del material Al/25Si/5Cu en las tres siguientes condiciones: a) spray formado, b) spray formado + extruido y c) spray formado + extruido + thixoformado.

monocristales, sino que están constituidas por aglomerados de Si (Fig. 4). En el resto de la exposición al referirse a partículas de Si no se hará distinción de su carácter mono o policristalino.

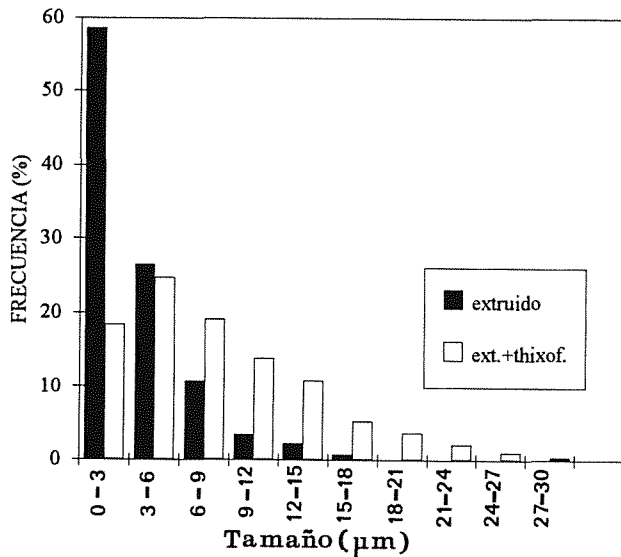


Fig. 3. Histograma de distribución de los tamaños medios de las partículas de Si, pudiendo observarse el efecto que en las mismas ejerce el proceso de thixoformado.

Tanto el crecimiento como la aglomeración de las partículas dependen notablemente de la temperatura y tiempo de permanencia a la misma durante el thixoformado. Las microestructuras estudiadas en este trabajo han sido obtenidas tras un proceso de optimización de la composición química y de las

condiciones de thixoformado llevado a cabo en el transcurso del proyecto BRITE anteriormente citado.

Para la realización de ensayos de tracción y de flexión de tres puntos ( $W = 11$  mm,  $B = 5,5$  mm), las probetas se mecanizaron a partir de barras de extrusión (60 mm de diámetro, paralelo a la dirección de extrusión) y de placas thixoformadas (12x 120x 120 mm). Los ensayos de tenacidad se realizaron de acuerdo con la norma E399. El análisis fractográfico de las probetas ensayadas se llevó a cabo mediante microscopía electrónica de barrido.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSION

Los resultados de los ensayos de tracción se resumen en la Tabla 1. Como puede observarse a partir de los datos obtenidos, tras el thixoformado el material experimenta un aumento de la resistencia a la vez que disminuye notablemente el alargamiento.

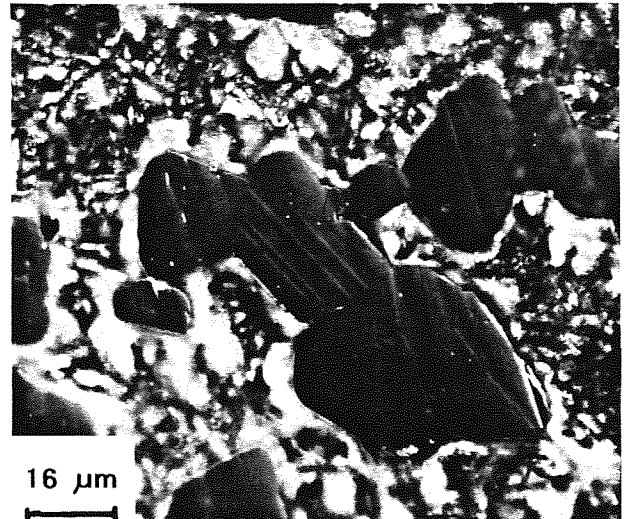


Fig. 4. Aglomeración de partículas de Si tras el thixoformado. Ataque químico realizado con  $\text{HF}:\text{CrO}_3$  (5M) = 1:1.

Tabla 1. Propiedades mecánicas convencionales

Material	$\sigma_{0.2\%}$ (MPa)	UTS (MPa)	Alargamiento (%)	$\text{Si}_{\text{fract}}$ (%)	$\text{Si}_{\text{local}}$ (%)	$\text{Si}_{\text{fract}}/\text{Si}_{\text{local}}$
extruido	155	249	3.5	71	39	1.8
	167	257	2.9	-	-	-
	143	254	2.4	-	-	-
thixoformado	275	312	0.5	84	29	2.9
	258	298	0.45	-	-	-
thixo + t.t.	-	254	-	72	31	2.3

t.t.: tratamiento térmico a 500°C, 24h.

Tabla 2. Resultados de los ensayos de tenacidad

Material	$K_{Ic}$ (MPa√m)	$Si_{fract}$ (%)	$Si_{local}$ (%)	$Si_{fract}/Si_{local}$
extruido	7.9 (*)	-	-	-
	8.9 (*)	-	-	-
thixoformado	10.3	63	28.6	2.2
	11.0	-	-	-
	9.6	60	28.6	2.1
	10.5	75	29.3	2.6
thixo + t.t.	14	74	31.8	2.3

(\*)  $K_Q \neq K_{Ic}$

Los resultados de los ensayos de tenacidad se indican en la Tabla 2. En el caso de las microestructuras correspondientes al material extruido los valores obtenidos de  $K_Q$  no cumplieron la condición de espesor mínimo necesario para ser considerados como  $K_{Ic}$ . Tal como se indica en la tabla, los valores de tenacidad obtenidos oscilan entre 8 y 9 MPa√m, mientras que tras el thixoformado el intervalo de medidas se encuentra entre 9.5 y 11 MPa√m.

El análisis fractográfico de las probetas de tenacidad pone de manifiesto la gran cantidad de partículas de Si que aparecen en la superficie de fractura. La Fig. 5 corresponde a la superficie de fractura de una probeta thixoformada, pudiendo apreciarse la gran cantidad de partículas de Si fracturadas unidas entre sí por ligaduras dúctiles de Al (Fig. 6).

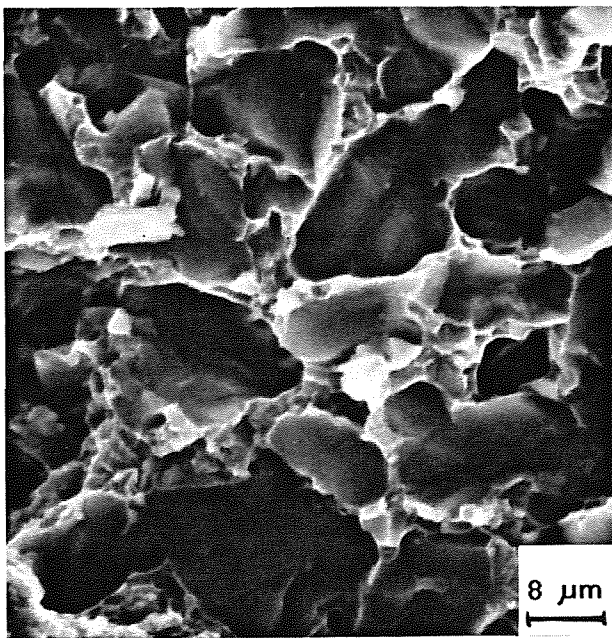


Fig. 5. Aspecto de la superficie de fractura de la aleación Al/25Si/5Cu thixoformada con gran cantidad de partículas de Si presentes, pudiendo apreciarse también franjas dúctiles de Al rodeando a algunas partículas de Si.

Para analizar los mecanismos predominantes en la fractura se prepararon secciones longitudinales de las probetas ensayadas. El estudio del perfil de la grieta pone de manifiesto que tanto en los ensayos de tracción como en los de tenacidad el micromecanismo predominante es la fractura de las partículas de Si. La propagación de la grieta de una partícula a otra tiene lugar a través del eutéctico y en menor medida mediante la fractura dúctil de la matriz de Al. La decohesión partícula-matriz aparece como un mecanismo muy poco frecuente. Un ejemplo de un perfil de fractura de una probeta de tenacidad se indica en la Fig. 7.

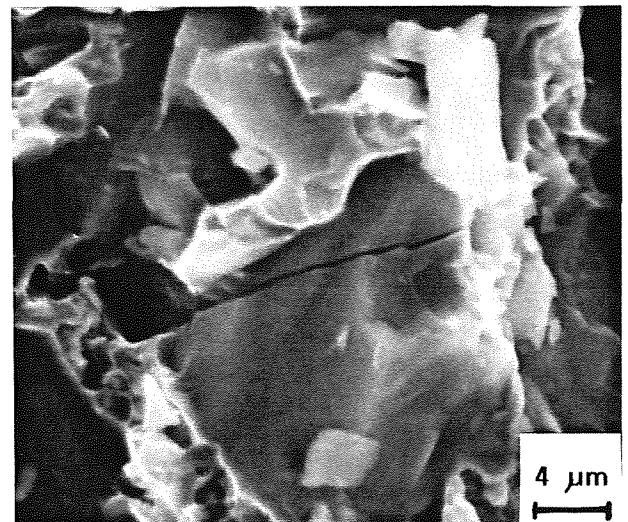


Fig. 6. Detalle de una partícula de Si fracturada rodeada por cavidades dúctiles nucleadas en la matriz de Al.

Para cuantificar la importancia de la presencia de partículas de Si en la superficie de fractura, se procedió a determinar mediante un analizador de imágenes la relación[4]:

$$\%Si_{fract} = \frac{\sum I_i}{I_t} \quad (1)$$

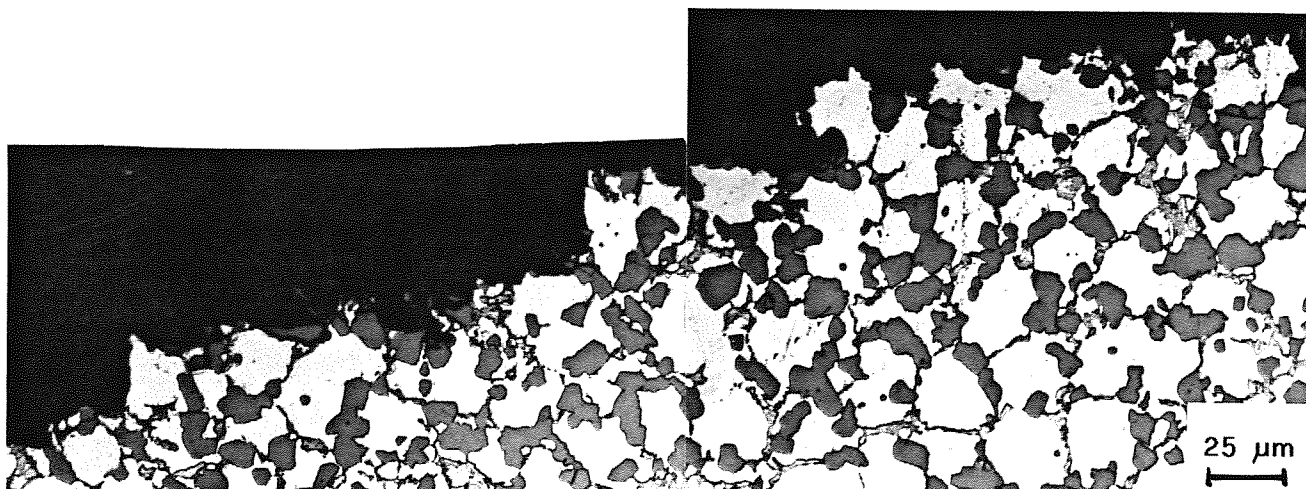


Fig. 7. Sección normal al plano de propagación de una probeta de tenacidad (material spray formado + extruido + thixoformado,  $K_{IC} = 10.5 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ )

donde  $\Sigma_l$  representa la longitud del perfil de la fractura constituida por partículas rotas de Si y  $l_t$  la longitud total del perfil. Teniendo en cuenta la posible heterogeneidad de unas zonas a otras y de unas probetas a otras en la fracción volumétrica de partículas de Si, en cada probeta analizada se procedió a determinar la fracción volumétrica de Si en una franja de material adyacente a la superficie de fractura. Los resultados obtenidos tanto con las probetas de tracción como con las de tenacidad se resumen en las Tablas 1 y 2.

Tanto en los ensayos de tracción como en los de tenacidad se constata la elevada fracción volumétrica de partículas de Si, siendo ésta entre 2 y 3 veces superior a la media existente en la aleación. Por otra parte, el análisis del perfil de la grieta pone de manifiesto que la propagación de la misma de una partícula de Si a otra adyacente acontece con gran frecuencia a través de la fase eutéctica  $\text{CuAl}_2$ . En consecuencia, si se consideran conjuntamente las fracciones de Si y de  $\text{CuAl}_2$  presentes en los perfiles de la grieta, se deduce que la colaboración en la fractura de la matriz dúctil de Al es realmente muy escasa.

Considerando la fase  $\text{CuAl}_2$  presente en el eutéctico como de carácter frágil [5] su eliminación como un camino de fácil propagación de la grieta de una partícula de Si a otra podría proporcionar una mejora en la tenacidad del composite. Con objeto de analizar dicha posibilidad varias probetas thixoformadas fueron sometidas a un tratamiento de globulización de la fase  $\text{CuAl}_2$ . El tratamiento consistió en un calentamiento a  $500^\circ\text{C}$  durante 24 horas y la variación microestructural obtenida se indica en la Fig. 8. Como puede apreciarse, además de la globulización del  $\text{CuAl}_2$  tiene lugar un cierto redondeo de las aristas vivas de las partículas de Si, si bien no se constató un crecimiento apreciable de su tamaño medio.

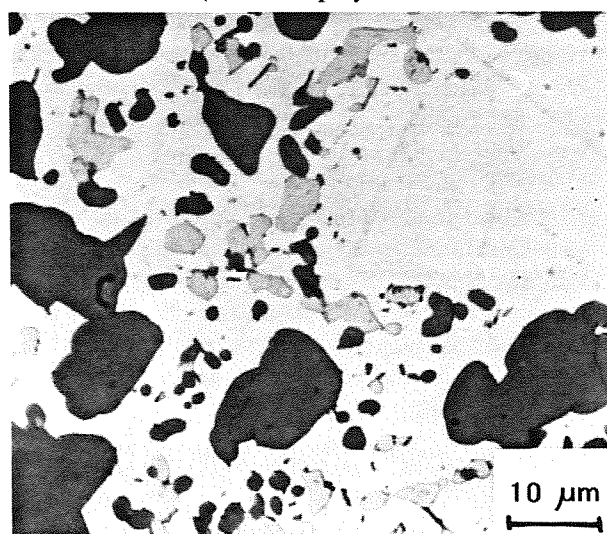


Fig. 8. Microestructura de la aleación Al/25Si/5Cu thixoformada después de haber sido sometida a un tratamiento térmico ( $500^\circ\text{C}$ , 24h) de globulización.

Los resultados obtenidos después de aplicar el tratamiento térmico de globulización se indican en las Tablas 1 y 2. Si bien no se apreciaron mejoras en el ensayo de tracción, el valor  $K_{IC} = 14 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  supone un importante aumento de la tenacidad con relación a los resultados obtenidos sin el tratamiento de globulización. Por otra parte, el análisis fractográfico muestra la existencia de cavidades dúctiles nucleadas a partir de glóbulos de  $\text{CuAl}_2$  (Fig. 9), poniendo de manifiesto la influencia que el tratamiento térmico ha tenido en los micromecanismos de fractura actuantes.

A pesar de la mejora introducida en la tenacidad por el tratamiento térmico, el análisis del perfil de la grieta sigue poniendo de manifiesto la elevada cantidad de partículas de Si rotas existentes en la superficie de fractura (Tabla 2). Dicho fenómeno se considerará más adelante.



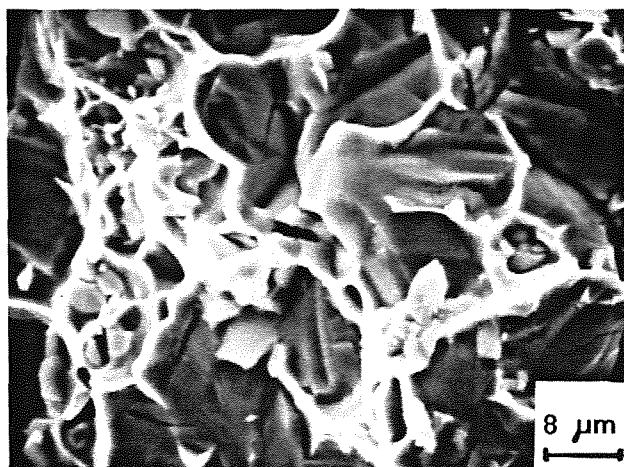


Fig. 9. Presencia en la superficie de fractura de cavidades dúctiles nucleadas en  $\text{CuAl}_2$  globulizado.

Por otra parte, la información relativa a aleaciones de Al reforzadas con partículas de Si es muy escasa en la bibliografía y prácticamente inexistente para las elevadas fracciones volumétricas consideradas en el presente trabajo. Al respecto es de destacar el resultado medido con una aleación Al-Si-Mg con 20% Si (en peso) obtenida mediante metalurgia de polvos con una tenacidad de  $15 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  [6]. Si el resultado obtenido de  $K_{Ic} = 14 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  se compara con aleaciones reforzadas con partículas de SiC, se constata que el mismo se encuentra en el nivel inferior del rango de dispersión obtenido con diferentes tipos de matrices de Al y tratamientos térmicos [7-9]. Con objeto de analizar las posibles causas por las cuales el composite estudiado en el presente trabajo se encuentra en el rango inferior es necesario considerar el efecto de las partículas, del proceso (thixoformado frente a otros procedimientos) y de la microestructura en la tenacidad.

Las partículas de Si son más frágiles que las partículas de SiC [9], con lo cual resulta más fácil su fractura y, en consecuencia, para un mismo nivel de tensión el daño inducido en el material thixoformado sería mayor que el inducido en una matriz reforzada con SiC. Cabría pensar que dicho efecto tendría una incidencia en el valor de la tenacidad.

Por otra parte, el control del tamaño de las partículas (si bien existen resultados contradictorios en la bibliografía, un afino del tamaño de partícula se considera beneficioso desde el punto de vista de propiedades mecánicas convencionales [7]) ha sido uno de los objetivos a lo largo del proyecto BRITE, habiéndose logrado una notable mejora tras la adición de Cu y del control adecuado de la temperatura y tiempo durante el thixoformado. La adición de Mg aparece como un procedimiento de mayor afino del tamaño medio de la partícula, si bien todavía no se han

realizado mediciones de tenacidad que confirmen su efecto positivo en la misma.

La presencia de aglomerados de Si y de agrupamientos (clusters) de partículas aparece como el problema más importante desde el punto de vista microestructural. Si bien el procedimiento de la extrusión rompe el esqueleto de Si formado durante el spray formado, en el transcurso del calentamiento hasta el estado semilíquido tiene lugar, más que un crecimiento, la aglomeración de partículas de Si. A través del análisis fractográfico ha quedado de manifiesto que un aglomerado de partículas de Si no es tan perjudicial como una única partícula del mismo tamaño, ya que es frecuente observar grietas dentro de un aglomerado paradas en una junta partícula-partícula. A pesar de ello, es evidente que la aglomeración va a presentar efectos negativos tanto en la ductilidad como en la tenacidad del material.

El análisis de los perfiles de grietas indicando que éstas se propagan fundamentalmente a través de agrupaciones (clusters) de Si pone de manifiesto la importancia de la heterogeneidad microestructural. Además de proporcionar caminos de fácil propagación para la grieta, el agrupamiento de partículas de Si contribuye a una más fácil fractura de la matriz como consecuencia del elevado grado del estado triaxial de tensiones actuante en la misma [9, 10, 11]. Considerando la analogía de que la película de Al de espesor  $h$  y longitud  $b$  situada entre dos partículas de Si está sometida a un estado de deformación plana, Lloyd [11] propone la siguiente expresión del valor de la tensión máxima:

$$\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_F} = 1 + \frac{b}{2h} \quad (2)$$

donde  $\sigma_F$  es la tensión de fluencia de la matriz. Esta expresión pone claramente de manifiesto que, incluso en aquellos casos en los que no hay contacto entre partículas (aglomeramiento), el agrupamiento de las mismas da origen a una elevada triaxialidad de tensiones en la matriz que origina el fallo prematuro de la misma.

Con relación al procedimiento de thixoformado debe señalarse que si bien presenta la gran ventaja de proporcionar piezas con geometrías semiacabadas, desde el punto de vista de propiedades mecánicas puede resultar no ser totalmente comparable con los métodos de obtención de piezas por medio de mecanizado de barras extruidas o laminadas. La presencia de porosidad (o microporosidad) formada en el estado semisólido puede conducir a una merma de la

ductilidad frente a los procedimientos convencionales, con lo cual resultaría más conveniente comparar las propiedades mecánicas con procesos similares (fundición inyectada por ejemplo). Desde este punto de vista resulta interesante considerar los resultados obtenidos con un composite obtenido mediante fundición y constituido por una matriz de Al356 reforzada con un 15% (vol.) de partículas de SiC (tamaño comprendido entre 5 y 10  $\mu\text{m}$ ) [12]. Las propiedades mecánicas medidas fueron:  $\sigma_{0.2\%} = 256$  MPa, UTS = 280 MPa y alarg. = 1%. Teniendo en cuenta que en el material thixoformado la fracción volumétrica de partículas de Si es el doble que en la fundición señalada anteriormente, los resultados medidos en el alargamiento pueden considerarse coherentes.

Resumiendo, en el presente trabajo se han expuesto los resultados obtenidos con un composite Al/25Si/5Cu obtenido mediante thixoformado. Los valores de resistencia mecánica y tenacidad obtenidos y el análisis fractográfico llevado indican la posibilidad de lograr propiedades válidas para aplicaciones industriales. Sin embargo, el mayor problema existente en la actualidad es la baja ductilidad que presenta el material. Este problema está relacionado en gran medida con el hecho de que todavía no se ha alcanzado una optimización total de la microestructura. Un control adecuado de las variables que intervienen en el proceso permite predecir una mejora de las propiedades mecánicas alcanzadas hasta el momento presente.

#### 4. CONCLUSIONES

- Mediante el procedimiento de conformado semisólido (thixoformado) se ha desarrollado un composite Al/25Si/5Cu con una resistencia a la tracción de ~ 300 MPa y una tenacidad comprendida entre los 9.5 y 11 MPa $\sqrt{\text{m}}$ .

- Los micromecanismos controlantes de la fractura del material son fundamentalmente la rotura de las partículas de Si y la coalescencia de las grietas originadas a través de la fase CuAl<sub>2</sub> y de la matriz dúctil de Al. La decohesión partícula-matriz es un mecanismo de escasa relevancia.

- Un tratamiento térmico de globulización de la fase CuAl<sub>2</sub> permite aumentar la tenacidad del material hasta 14 MPa $\sqrt{\text{m}}$ .

- La elevada presencia de partículas de Si en la superficie de fractura (hasta 3 veces superior a la existente en el volumen del material) pone de relieve la importancia de los agrupamientos de Si en el proceso de fractura.

- A través de los resultados obtenidos cabe predecir una mejora de los mismos, fundamentalmente ductilidad y tenacidad, mediante una mayor homogeneización microestructural realizando un adecuado control de las variables del thixoformado.

#### 5. AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo forma parte de un proyecto de investigación realizado dentro del programa BRITE/EURAM contrato nº BREU 0129-C. Los participantes en el proyecto son: CEIT, Ederlan S. Coop., Universidad de Sheffield (UK), Lucas Automotive Ltd. (UK), Osprey Metals Ltd. (UK) y Ruhr-Universität Bochum (G).

#### 6. REFERENCIAS

- [1] CEIT, Informe Brite/Euram, Mayo 1991.
- [2] Flemings, M.C., Metall. Trans., **22A**, 957-981 (1991).
- [3] Ikawa, Y., Itami, T., Kumagai, K., Kawashima, Y., Leatham, A.G., Coombs, J.S y Brooks, R.G., ISIJ Intern., **30**, 756-763 (1990).
- [4] Sinclair, I. y Knott, J.F., Fracture Behaviour and Design of Materials and Structures (ECF8), EMAS, vol.1, 303-309 (1990).
- [5] Valer Goñi, J., Tesis Doctoral (en curso), ESII, San Sebastián.
- [6] Manoharan, M., Lewandowski, J.J. y Hunt, W.H., Mater. Sci. and Eng., **A172**, 63-69 (1993).
- [7] Taya, M. y Arsenault, R.J., Metal Matrix Composites, Pergamon Press, 98 (1989).
- [8] Roebuck, B. y Lord, J.D., Mater. Sci. and Technol., **6**, 1199-1209 (1990).
- [9] Lloyd, D.J., Inter. Mater. Rev., **39**, 1-23 (1994).
- [10] Hunt, W.H., Brockenbrough, J.R. y Magnusen, P.E., Scrip. Met. and Mat., **25**, 15-20 (1991).
- [11] Lloyd, D.J., Acta. Metall. Mater., **39**, 59-71 (1991).
- [12] Wang, Z. y Zhang, R.J., Metall. Trans., **22A**, 1585-1593 (1991).