

Comportamiento a desgaste de recubrimientos de material compuesto de matriz de aluminio fabricados por proyección térmica^(*)

M. Campo*, M. D. Escalera*, B. Torres*, J. Rams* y A. Ureña*

Resumen

En este trabajo se ha evaluado el comportamiento a desgaste de recubrimientos de material compuesto reforzado con un 20 % de partículas de SiC fabricados por proyección térmica con llama oxiacetilénica. Se ha comparado el desgaste de los recubrimientos proyectados con partículas sin recubrir y recubiertas con la sílice sol-gel tratada térmicamente a 500 °C y 725 °C. Los recubrimientos proyectados con partículas recubiertas de sílice son más homogéneos y menos porosos debido fundamentalmente al aumento de su mojabilidad por aluminio fundido. La microestructura de los recubrimientos proyectados, de las superficies desgastadas y del material eliminado en los ensayos *pin-on-disc* se ha analizado por técnicas de microscopía óptica y electrónica de barrido junto a microanálisis EDX. Los resultados obtenidos muestran una menor tasa de desgaste, menor coeficiente de rozamiento y menor pérdida de masa para los recubrimientos proyectados con las partículas con el recubrimiento de sílice sol-gel que para los de las partículas sin recubrir.

Palabras clave

Proyección térmica. Materiales compuestos. Matriz de aluminio. Recubrimientos sol-gel. Desgaste.

Wear behaviour of coatings of aluminium matrix composites fabricated by thermal spray method

Abstract

In this work, the wear behaviour of coatings made of aluminium matrix composites reinforced with 20% of SiC particles and manufactured by thermal spray method with oxyacetylene flame has been investigated. The wear behaviour between coatings with uncoated particles and sol-gel silica coated ones heat treated at 500 °C and 725 °C have been compared. The sprayed coatings with silica coated particles are more homogenous and less porous due to increase of wettability by molten aluminium that takes place on coated particles. The microstructure of the sprayed coatings, the wear surfaces and the wear debris have been analysed using optical microscopy, scanning electron microscopy and microanalysis techniques (EDX). The results show a smaller wear rate, a lower friction coefficient and more reduced loss of mass for the coatings sprayed with particles with sol-gel silica coatings than those made with uncoated particles.

Keywords

Plasma-spray. Composites. Aluminium matrix. Sol-gel coatings. Wear.

1. INTRODUCCIÓN

Las aleaciones de aluminio reforzadas con partículas de SiC muestran, en general, unas buenas propiedades, dado que el aluminio proporciona ligereza y una buena resistencia a la corrosión mientras que el carburo de silicio mejora el comportamiento mecánico y, particularmente, aumenta su resistencia frente al desgaste^[1 y 2]. Por este motivo, resulta interesante la posibilidad de utilizarlo como recubrimiento de otro tipo de materiales menos resistentes.

La técnica que se ha empleado para obtener el recubrimiento de material compuesto ha sido la proyección térmica con llama oxiacetilénica a baja presión^[3]. Es una técnica muy utilizada industrialmente debido a su gran versatilidad, a que es aplicable tanto a la fabricación de recubrimientos monocomponente como multicomponente y a que presenta un coste muy inferior al de otras técnicas de proyección como la combustión de alta velocidad (HVOF) o la proyección plasma. En esta técnica, el material con el que se quiere recubrir, en forma de polvo, pasa primero por una llama

(*) Trabajo recibido el día 25 de Octubre de 2006 y aceptado en su forma final el día 2 de Febrero de 2007.

* Departamento de Ciencia e Ingeniería de Materiales, Universidad Rey Juan Carlos. C/ Tulipán, s/n, 28933 Móstoles, Madrid, España. monica.campo@urjc.es.

donde se acelera hasta velocidades de 240 m/s y, por último, se hace impactar en un estado líquido o semilíquido contra el sustrato. Las sucesivas gotas que llegan al sustrato se van uniendo entre sí dando lugar al recubrimiento. El aire que queda ocluido suele generar en muchos sistemas una elevada porosidad^[4].

La fabricación por proyección térmica de un recubrimiento de material compuesto presenta muchas similitudes con la fabricación por vía líquida, donde la temperatura empleada es elevada, aunque el tiempo de contacto entre el aluminio líquido y las partículas de SiC es muy corto. En estas condiciones de procesado, es necesario que la mojabilidad del refuerzo por el aluminio fundido sea elevada y que la reacción entre ambos no dé lugar a la degradación de la intercara formada^[5]. El método sol-gel permite obtener una capa de sílice amorfa sobre las partículas de SiC que cumple ambos requisitos, al actuar como barrera activa aumenta la mojabilidad y evita la degradación del refuerzo^[6 y 7]. Además, el grado de mojabilidad y reactividad con el aluminio líquido de las partículas recubiertas se puede controlar modificando la temperatura del tratamiento térmico aplicado en el método sol-gel, debido a que se obtiene una sílice con porosidad y reactividad química controlable. A bajas temperaturas de tratamiento térmico (500 °C) se obtiene una sílice con elevada reactividad con el aluminio, mientras que a altas temperaturas (725 °C) se produce una sílice poco reactiva^[8 y 9]. Además, este recubrimiento de sílice depositado sobre las partículas de SiC disminuye la sensibilidad a la corrosión^[10] y aumenta las propiedades mecánicas interfaciales matriz-refuerzo en los materiales compuestos^[9 y 11].

En investigaciones previas^[12] se fabricaron recubrimientos de material compuesto por proyección térmica con llama oxiacetilénica. Se ha demostrado que utilizando partículas recubiertas con sílice se obtienen recubrimientos más homogéneos, continuos y con menor porosidad que los de partículas sin recubrir, debido fundamentalmente al aumento de mojabilidad por el aluminio líquido que tiene lugar en las partículas recubiertas.

En el presente trabajo se estudia el comportamiento a desgaste de los recubrimientos de material compuesto proyectados sobre una aleación de aluminio mediante ensayos de desgaste *pin-on-disc*. Se ha comparado el desgaste de los recubrimientos fabricados

con partículas sin recubrir y recubiertas con la sílice sol-gel tratada a 500 °C y 725 °C. El análisis de las superficies y de las partículas de desgaste mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) ha permitido conocer el mecanismo asociado al desgaste de los diferentes recubrimientos estudiados.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

2.1. Materiales

Se han utilizado sustratos de aleación de aluminio 5754 con la composición química indicada en la tabla I y de dimensiones 5×3×0,5 cm. Para mejorar la adherencia del recubrimiento se realizó un granallado con corindón sobre la superficie a proyectar. A continuación, estas superficies se limpiaron con aire comprimido y etanol para eliminar las impurezas, y, por último, antes de la proyección, las chapas fueron precalentadas a 200 °C para favorecer la adherencia y limitar el efecto de las tensiones de origen térmico entre el sustrato y el material proyectado.

Para obtener un recubrimiento de material compuesto, se utilizó un polvo de aluminio (99,8 %) con un tamaño medio de 125 µm suministrado por CAS-TOLIN, para que configurara la matriz, y como refuerzo partículas de SiC (Navarro S.A.) con un tamaño medio de 26,2 µm. Ambos constituyentes se mezclaron en una relación 80/20 en volumen en un molino de bolas de alúmina durante 15 min para obtener una mezcla homogénea que se utilizó como alimentación de proyección para cargar en la pistola. La mezcla se realizó en aire en condiciones secas, con una velocidad de giro de 270 r.p.m. llenando un 25 % del volumen de la jarra.

Para mejorar la calidad de los recubrimientos proyectados, favoreciendo la mojabilidad por el aluminio líquido, las partículas de refuerzo se recubrieron con sílice por el proceso sol-gel.

2.2. Recubrimiento de las partículas de sílice por sol-gel

Los recubrimientos de SiO₂ depositados sobre las partículas de SiC se obtuvieron por un proceso sol-gel

Tabla I. Composición de la aleación 5754 utilizada como sustrato

Table I. Composition of the aluminum alloy 5754 substrates

Compuesto	Al	Mg	Cu	Cr	Si	Fe	Mn	Zn	Ti	Otros
% en peso	95,25-94,25	2,6-3,6	0,1	0,3	0,4	0,4	0,5	0,15	0,15	0,15

utilizando como precursor tetraetoxisilano (TEOS), etanol como disolvente y agua destilada. La hidrólisis se llevó a cabo a pH ácido durante 2 h a temperatura ambiente, siendo la concentración del sol de 204 g/l. Seguidamente, las partículas de SiC se agregaron al sol, manteniendo la mezcla bajo agitación durante 2 h y en reposo durante 30 min más. Una vez recubiertas las partículas de SiC se lavaron con etanol y se secaron a 120 °C. Finalmente, se sometieron a un tratamiento térmico de 1 h a temperaturas de 500 y 725 °C, obteniéndose recubrimientos de sílice con distinta porosidad y reactividad química.

2.3. Condiciones de proyección de los recubrimientos

El método de recubrimiento utilizado fue la proyección térmica de polvo por combustión a baja presión utilizando un equipo de proyección por llama DS 8000 de la empresa CASTOLIN. Se trata de una pistola de llama oxiacetilénica en la que se puede controlar la riqueza de la mezcla de la llama, la cantidad de energía aportada al polvo, la velocidad de alimentación del polvo, además de los lógicos parámetros de distancia de proyección y velocidad relativa de la pistola sobre la muestra. En la tabla II se recogen las condiciones de proyección empleadas después de optimizar el proceso empleando diferentes distancias y velocidades de proyección.

2.4. Ensayos de desgaste

Se ha evaluado el comportamiento a desgaste de los diferentes recubrimientos de material compuesto obtenidos por proyección sobre aluminio, analizando la influencia de los diferentes recubrimientos de sílice

empleados. Los ensayos de desgaste se realizaron usando el método de *pin-on-disc* sobre los recubrimientos previamente desbastados superficialmente con lijas hasta una granulometría de 1.200.

Se empleó un tribómetro de la casa Microtest en condiciones secas y con los siguientes parámetros de ensayo: pin de acero con forma esférica de 6 mm de diámetro, carga de 10 N, diámetro de huella de 8 mm, y una velocidad de 200 r.p.m. para un recorrido total de 150 m. El equipo proporciona directamente la fuerza de rozamiento, a partir de la cual se determina el coeficiente de rozamiento, y la penetración del pin en el recubrimiento en función de la distancia de desgaste recorrida.

La tasa de desgaste se ha determinado como el volumen de material eliminado, calculado a partir de la penetración de la esfera en el recubrimiento, en función de la distancia recorrida. Puesto que las curvas de desgaste presentan una primera etapa de acomodamiento del pin a la muestra, se ha determinado la tasa de desgaste cuando en los ensayos se alcanzaba el régimen estacionario, es decir, cuando el volumen eliminado crece linealmente con la distancia. A partir de estos valores, se ha determinado el coeficiente de Archard K empleando la siguiente ecuación^[13]:

$$Q = K \frac{W}{H} \quad (1)$$

donde, W es la carga normal aplicada que es de 10 N, H es la dureza de la superficie del material y Q es la tasa de desgaste, es decir, el volumen retirado de la superficie por unidad de distancia recorrida que se ha medido. El parámetro K permite comparar la severidad de los distintos procesos de desgaste, si bien, siempre resulta necesario realizar inspecciones de la morfología de la zona desgastada para estimar los diferentes mecanismos que pudieran estar presentes en el desgaste de los recubrimientos estudiados. Simultáneamente, como elemento de verificación, se determinó la pérdida de masa por diferencia de pesada antes y después de los ensayos para todos los recubrimientos proyectados. Los valores se determinaron realizando la media de tres ensayos de desgaste sobre cada tipo de recubrimiento: aluminio sin reforzar, material compuesto con partículas sin recubrir, y con partículas recubiertas con sílice sol-gel tratada a 500 y 725 °C.

Se evaluó la dureza de los recubrimientos proyectados realizando ensayos de microdureza Vickers con un microdurómetro Buehler 2101 aplicando una carga de 5 N (ensayo HV0,5). Las microestructuras de los recubrimientos de material compuesto proyectados, de las superficies y de las partículas de desgaste se caracterizaron por microscopía óptica y electrónica de barrido (SEM) en un microscopio electrónico de barrido ambiental modelo Philips ESEM- XL30.

Tabla II. Parámetros experimentales del proceso de proyección térmica

Table II. Thermal spray process parameters

Presión de Oxígeno	0,4 bar
Presión de acetileno	0,7 bar
Presión de aire	Sin aire
Llama	neutra
Módulo de proyección	SS40 (típica de cerámicos)
Paso de portamodulos	2
Velocidad	150 cm/min
Distancia de proyección	200 µm

3. RESULTADOS

3.1. Caracterización microestructural de los recubrimientos

En la figura 1 a) se muestra la morfología del recubrimiento de aluminio, con un espesor medio de 950 μm , proyectado sobre el sustrato de aleación de aluminio. En el detalle de la figura 1 b) se puede observar como este recubrimiento presenta una elevada porosidad, siendo evidente que no existe una buena integración entre las distintas gotas de aluminio debido a la capa de óxido presente en su superficie. También, se observa un elevado grado de porosidad interfacial con el sustrato, equivalente a la obtenida dentro del propio recubrimiento.

El recubrimiento de material compuesto con las partículas de SiC sin recubrir, con un espesor medio de 450 μm , se muestra en la figura 2. Puede observarse que presenta una elevada porosidad, con un valor medio de 5,7 %, y que las partículas de SiC se distribuyen heterogéneamente, tienden a agruparse y no se encuentran integradas dentro de las gotas de aluminio. Además, se observa la presencia de grietas asociadas a las tensiones residuales generadas por la contracción que se produce durante el enfriamiento. Este deterioro en la calidad del recubrimiento se debe, fundamentalmente, a la baja mojabilidad de las partículas de SiC sin recubrir por el aluminio líquido. En la figura 2 c) se muestra como una de las partículas de SiC se encuentra casi totalmente separada de la matriz de aluminio que la rodea, lo que prueba la reducida mojabilidad que existe entre las partículas y el aluminio fundido.

En este tipo de recubrimientos no se ha detectado la presencia de Al_4C_3 ni de silicio, que son los productos que se forman en la reacción directa entre el Al y el SiC a elevadas temperaturas^[5 y 14]. Esto,

se debe a que, aunque la temperatura que se alcanza en este proceso es elevada no existe tiempo de contacto suficiente para que se verifique la reacción interfacial. Sin embargo, esta falta de reactividad genera una alta porosidad que afectaría negativamente a las características mecánicas de la capa.

En las imágenes de la figura 3 se muestra un recubrimiento de material compuesto, con un espesor medio de 500 μm , fabricado con partículas recubiertas con la sílice sol-gel tratada a 500 °C. Se puede apreciar que la morfología del recubrimiento es totalmente distinta a la del material con las partículas sin recubrir. Las partículas están más integradas en la matriz y la porosidad se ha reducido en gran medida, presentando un valor medio de, tan sólo, un 1,4 %. Un motivo por el que la presencia de partículas favorece la unión entre las gotas de aluminio es que al impactar con las gotas de aluminio parcialmente solidificadas rompen la capa de alúmina que las rodea. Además, la porosidad en la unión disminuye de forma importante mejorando la continuidad existente entre el recubrimiento y el sustrato. En la figura 3c) se puede observar cómo la unión con el sustrato es buena y continua, no apreciándose signos de discontinuidad entre éste y el recubrimiento.

A diferencia de las partículas sin recubrir, donde la mojabilidad era prácticamente nula (Fig. 2 c)), las partículas recubiertas se encuentran totalmente mojadas por el aluminio como se puede observar en la figura 3 d) en la que se muestra cómo el aluminio rodea totalmente una de las partículas de SiC penetrando incluso en las irregularidades superficiales de la misma. Este aumento de la mojabilidad se debe a la reacción que tiene lugar entre el recubrimiento de sílice y las gotas de aluminio fundido.

Para analizar cómo influyen las características del recubrimiento de sílice depositado sobre las partículas, se han empleado también partículas de SiC con

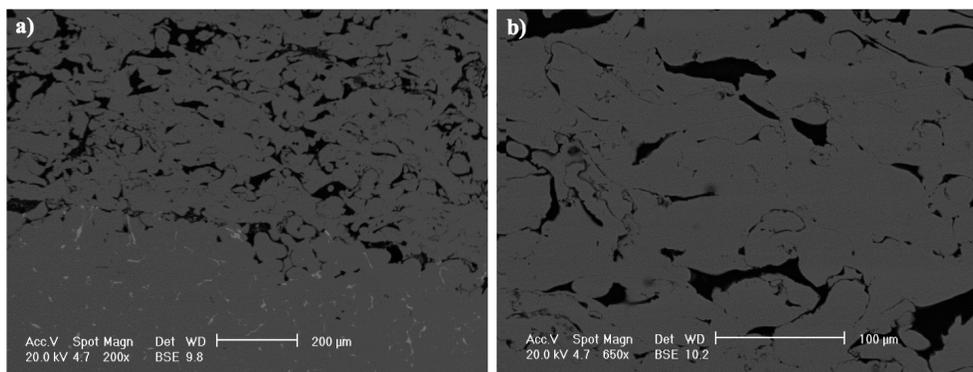


Figura 1. Imágenes de SEM: vista general (a) y detalle de la microestructura (b), del recubrimiento de aluminio.

Figure 1. SEM images: general view (a) and detail of microstructure (b) of the coating with aluminium.

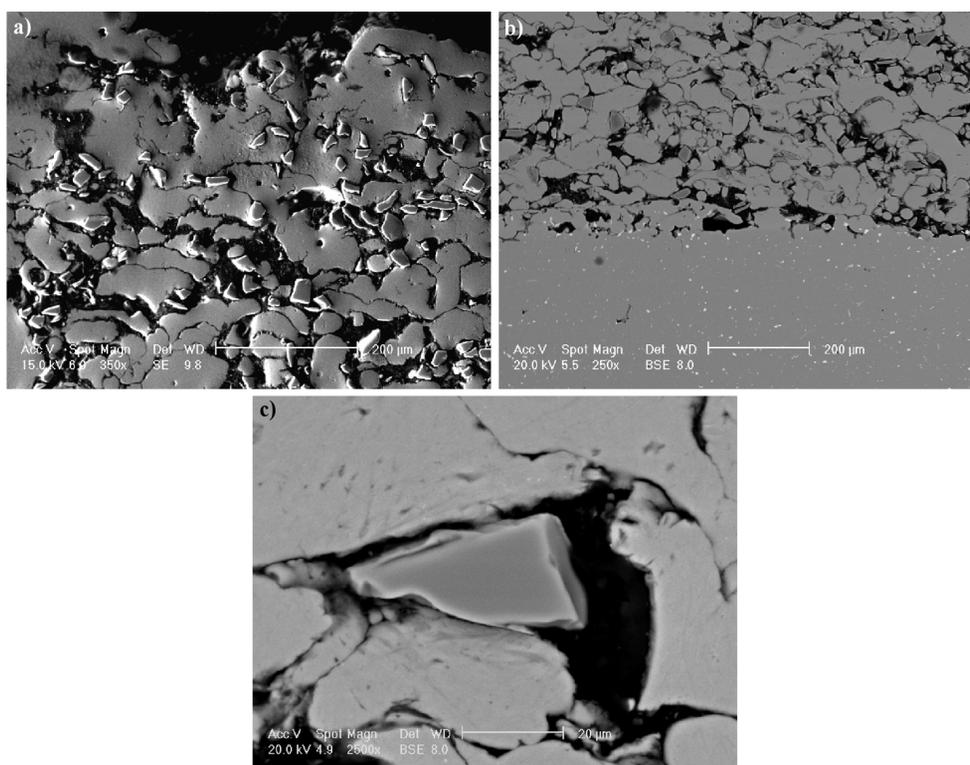


Figura 2. Imágenes del recubrimiento de material compuesto con partículas sin recubrir: a) vista general, b) detalle de la unión al sustrato y c) detalle de la baja mojabilidad de una partícula por el aluminio líquido.

Figure 2. Images of the composite coating with uncoated SiC particles: a) general view, b) detail of substrate-coating interface, and c) detail of the low wettability of SiC particle by molten aluminium.

el recubrimiento sol-gel tratado térmicamente a 725 °C, que presenta una menor reactividad y una sílice con menor porosidad que el tratado a 500 °C [5 y 7]. En la figura 4 se muestra la microestructura del recubrimiento fabricado al proyectar aluminio con este tipo de partículas. Se puede apreciar que la morfología del recubrimiento es similar a la obtenida con las partículas con el recubrimiento sol-gel tratado a 500 °C aunque el nivel de porosidad es superior (3 %). En este caso, al tener unas partículas con un recubrimiento menos reactivo, la reacción química entre la sílice y el aluminio es más lenta. Aunque, como puede observarse en la figura 4 b), la mojabilidad aumenta permitiendo que el aluminio rodee completamente las partículas de SiC.

3.2. Propiedades tribológicas de los recubrimientos

La resistencia mecánica del recubrimiento proyectado térmicamente depende, principalmente, de su adhesión al sustrato y de su cohesión que, en este caso,

se debe a la integración de las partículas depositadas en el recubrimiento. En los recubrimientos proyectados, al producirse principalmente una unión mecánica y metalúrgica, es importante la realización de una buena preparación superficial del sustrato para asegurar una buena adherencia. En ninguno de los ensayos de desgaste realizados se ha observado el desprendimiento del recubrimiento del sustrato, lo que indica que la adhesión entre ambos es elevada.

Las tasas de desgaste y las microdurezas Vickers medidas para los distintos recubrimientos de material compuesto fabricados por proyección térmica sobre los sustratos de aluminio se muestran en la figura 5. Se puede observar que, tal y como indica la ecuación de Archard (Ec. (1)), la tasa de desgaste disminuye al aumentar la dureza si se mantiene el mismo mecanismo de desgaste en sistemas similares.

A partir de estos valores de tasa de desgaste se puede concluir que la incorporación de partículas duras de SiC aumenta la resistencia al desgaste de los recubrimientos. La disminución en la tasa de desgaste es bastante más acusada para los recubrimientos fabricados con partículas recubiertas con sílice sol-gel que para los de partículas sin recubrir. Este

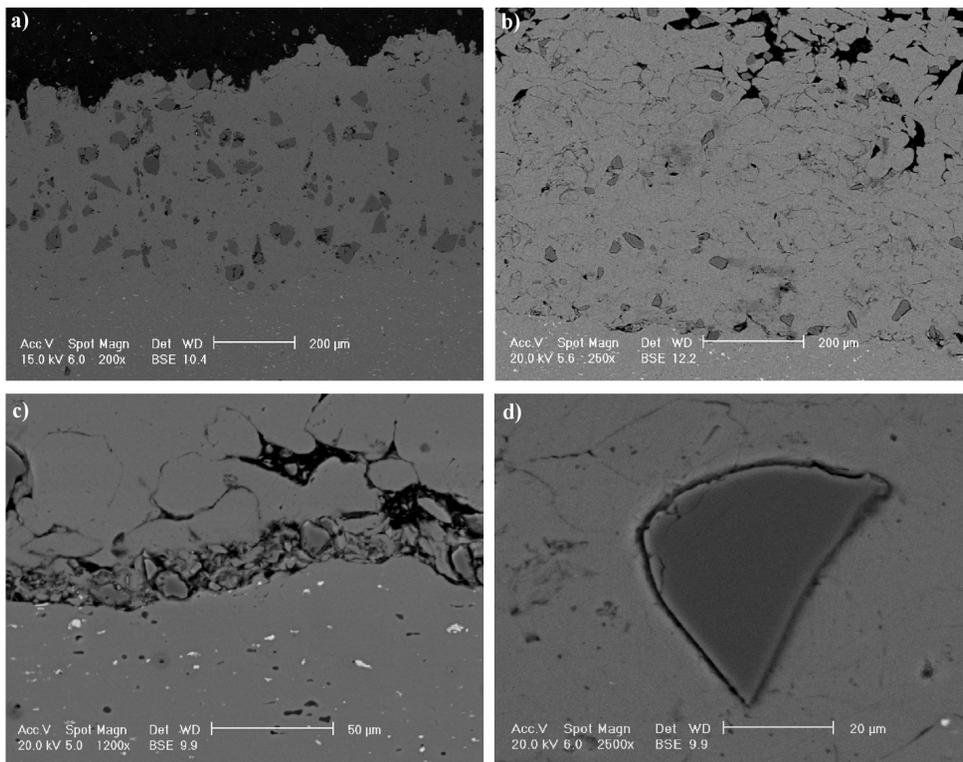


Figura 3. Imágenes del recubrimiento de material compuesto con partículas recubiertas con sílice sol-gel tratada a 500 °C: a) vista general; b) detalle de la integración de las partículas en la matriz, c) detalle de la unión al sustrato y d) detalle de la alta mojabilidad de las partículas por el aluminio.

Figure 3. Images of the coating of composite with sol – gel coated SiC particles treated at 500 °C: a) general view, b) detail of the particles integrated in the matrix, c) detail of substrate-coating interface, and d) detail of the high wettability between particles coated with SiO₂ and aluminium.

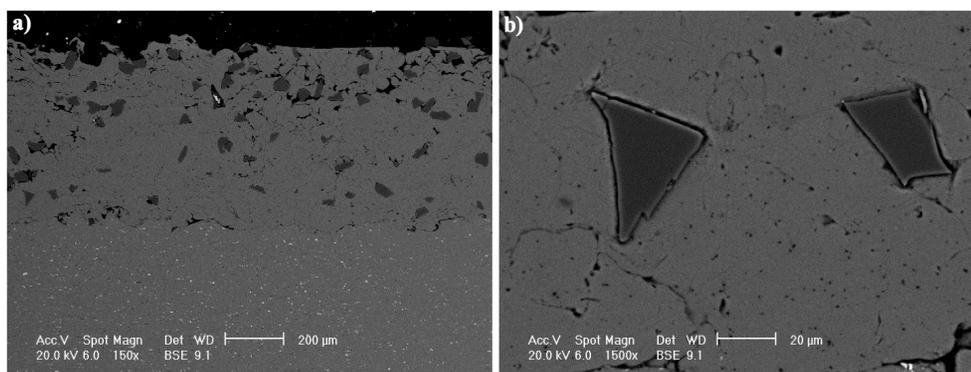


Figura 4. Imágenes del recubrimiento de material compuesto con partículas recubiertas con sílice sol-gel tratada a 725 °C: a) vista general y b) detalle de la alta mojabilidad de las partículas por el aluminio de la matriz.

Figure 4. Images of the coating of composite with sol-gel coated SiC particles treated at 725 °C: a) general view, and b) detail of the high wettability between particles coated with SiO₂ and sprayed aluminium.

resultado se justifica por la menor porosidad, mayor homogeneidad y mejor unión al sustrato que presentan los recubrimientos con partículas recubiertas y

que es debido, como ya se ha comentado anteriormente, a su mayor mojabilidad por el aluminio líquido. En particular, resulta interesante comprobar que

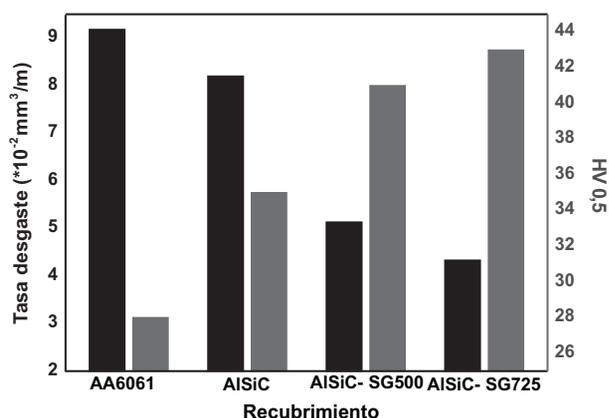


Figura 5. Tasa de desgaste y microdureza Vickers de los distintos recubrimientos proyectados.

Figure 5. Wear rate and Vickers microhardness of the different sprayed coatings.

son los recubrimientos proyectados con partículas con sílice sol-gel tratada a 725 °C los que mejor comportamiento poseen, aunque la porosidad de estos recubrimientos de material compuesto sea ligeramente mayor que la que presentan los reforzados con partículas de SiC recubiertas y tratadas a 500 °C. Esta mejora debe estar asociada a las características de la intercara matriz-refuerzo, cuyas propiedades mecánicas, dureza y resistencia interfacial, están condicionadas por la reacción sílice-aluminio fundido y, en concreto, por la reactividad de la capa de SiO₂ que rodea a la partícula de SiC.

Este diferente comportamiento concuerda con lo observado en el coeficiente de fricción (Fig. 6) y en la pérdida de masa medida (Fig. 7), ya que el recubrimiento de material compuesto con partículas recubiertas con sílice tratada a 725 °C es el que presenta valores más bajos en todos los casos estudiados. La tendencia de ambos parámetros es similar a la de la tasa de desgaste, observándose que los valores correspondientes al aluminio sin reforzar son muy superiores a los presentados por los materiales compuestos. Entre éstos, los reforzados con partículas recubiertas con sol-gel son los que presentan los coeficientes de fricción y pérdida de masa más bajos. Además, de la similitud entre la pérdida de masa y la tasa de desgaste se puede extraer que el material desgastado se elimina de la superficie del recubrimiento y que la transferencia de material desde el pin hasta la superficie del recubrimiento no es muy relevante.

A la vista de los resultados obtenidos de tasa de desgaste, coeficiente de rozamiento y pérdida de masa podemos concluir que el recubrimiento de material compuesto con partículas con sílice tratada a 725 °C es el que mejor se comporta frente al desgaste.

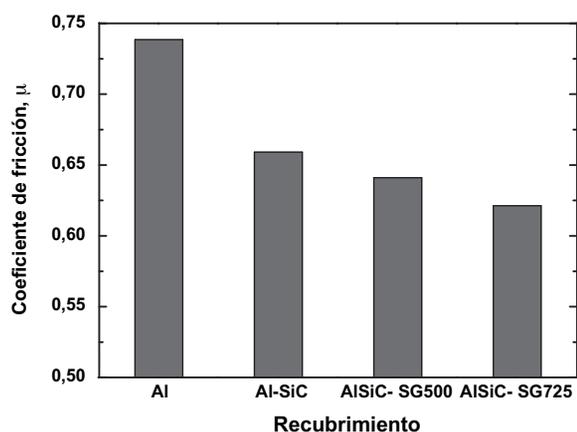


Figura 6. Coeficiente de fricción de los diferentes recubrimientos proyectados.

Figure 6. Friction coefficient of the different sprayed coatings.

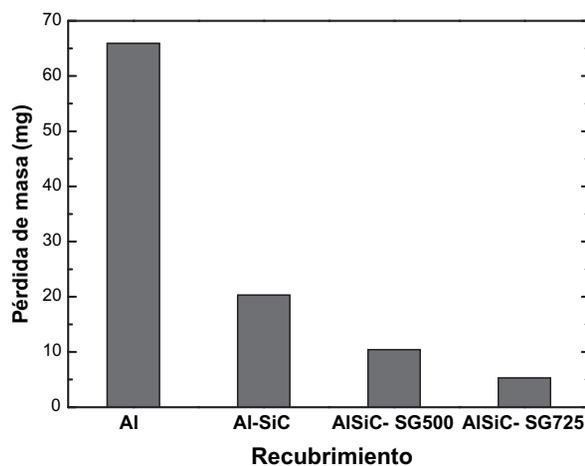


Figura 7. Pérdida de masa de los diferentes recubrimientos estudiados.

Figure 7. Mass loss of the different studied coatings.

Aunque estas partículas presentan una sílice menos porosa y una menor reactividad con el aluminio que las tratadas a 500 °C, su dureza y sobre todo su resistencia interfacial entre la matriz y las partículas son superiores, como se desprende de los ensayos de nanoindentación realizados en los materiales compuestos fabricados por vía líquida^[9, 11 y 15].

En la tabla III se recogen los valores del coeficiente de Archard, K, obtenidos para los distintos recubrimientos de material compuesto ensayados utilizando la (Ec. (1)). Estos valores permiten estimar que en todos los recubrimientos se produce, principalmente, un

desgaste abrasivo cuando se alcanza el estado estacionario.

3.3. Estudio de las superficies de desgaste

Las superficies desgastadas tras los ensayos realizados en los diferentes recubrimientos se han caracterizado por microscopía electrónica de barrido (Fig. 8). La superficie desgastada del recubrimiento de aluminio pro-

yectado (Fig. 8a)) es bastante uniforme observándose la acumulación del aluminio deformado plásticamente y levantado que, posteriormente, ha sido aplastado durante el deslizamiento. Al ser el aluminio más blando que el pin de acero, éste puede penetrar en la superficie, causando una deformación plástica extensa que da por resultado una gran cantidad de pérdida de material. El mecanismo de desgaste que tiene lugar es adhesivo acompañado de un proceso de delaminación.

Para los recubrimientos de material compuesto con las partículas de SiC (Figs. 8 b), c) y d)) la trayectoria no es tan homogénea. Esto, implica que existe un desgaste no uniforme, observándose zonas donde el material está acumulado y surcos en la dirección de deslizamiento. A priori, podría considerarse que en este tipo de recubrimientos se produce un desgaste abrasivo de dos cuerpos, por el cual el material se elimina de la superficie de desgaste. Sin embargo, la existencia de surcos en la dirección de deslizamiento permite proponer la presencia de un tercer cuerpo de desgaste que son las partículas desprendidas del recubrimiento, dando lugar a un desgaste abrasivo de tres cuerpos.

Por otro lado, también se observa la presencia de surcos de menor profundidad, lo que es señal inequívoca de la participación de un mecanismo secundario de

Tabla III. Valores del coeficiente de Archard (K) para los distintos recubrimientos

Table III. Values of the coefficient of Archard (K) for the different coatings

Recubrimiento	K (*10 ⁻³)
Aluminio	2,5
Al - SiC sin recubrir	2,9
Al - SiC sol-gel 500 °C	2,1
Al - SiC sol-gel 725 °C	1,9

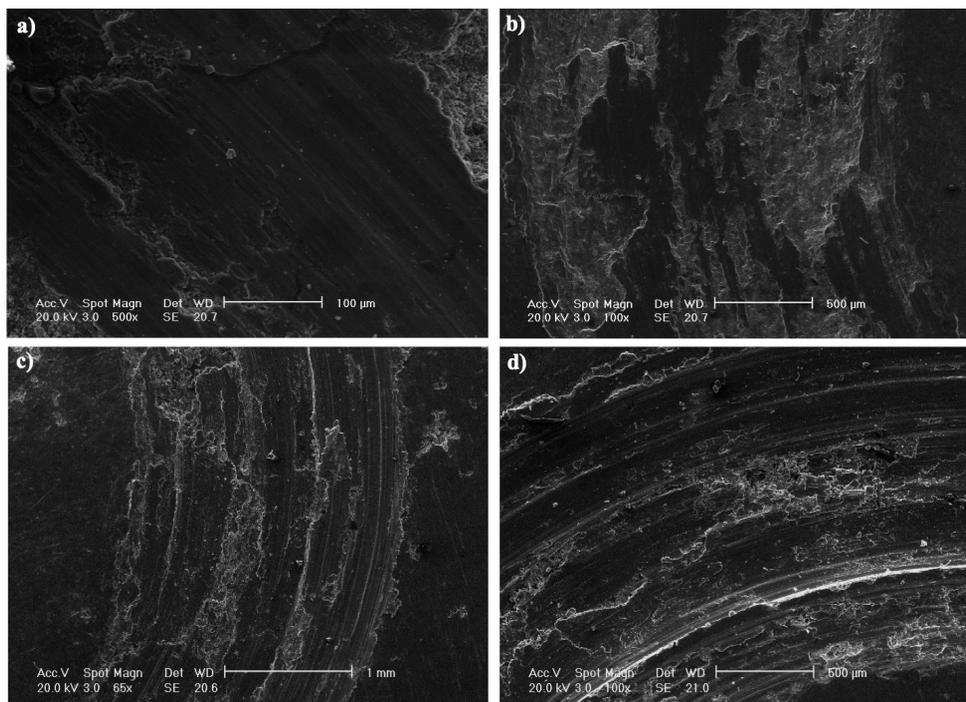


Figura 8. Imágenes de SEM de las superficies de desgaste del recubrimiento de aluminio (a), y de los recubrimientos de material compuesto con partículas sin recubrir (b), y recubiertas con sílice sol-gel tratada a 500 °C (c) y 725 °C (d).

Figure 8. SEM Images of the wear surface of aluminium coating (a), and the coatings of composite with uncoated particles (b), and coated particles with sol-gel silica treated at 500 °C (c) and 725 °C (d).

delaminación mediante el cual, el material acumulado y aplastado durante el deslizamiento se elimina de la superficie.

Estos resultados, por tanto, permiten concluir que en los recubrimientos de material compuesto el mecanismo de desgaste, aunque es mayoritariamente abrasivo (de dos y tres cuerpos), presenta una pequeña componente adhesiva.

Una vez analizados los tipos de mecanismos de desgaste, si se compara el desgaste de los materiales compuestos reforzados con las partículas sin recubrir (Fig. 8 b)) con los que participan en los materiales con las partículas con recubrimientos SiO₂ sol-gel (Figs. 8 c y d)), se puede concluir que el desgaste es más severo para el recubrimiento con las partículas sin recubrir, ya que se aprecia una superficie de desgaste más ancha y presenta una mayor cantidad de surcos de mayor profundidad. Este peor comportamiento al desgaste puede asociarse a la menor unión interfacial existente entre las partículas sin recubrir y la matriz, lo que permite que las partículas se arranquen con mayor facilidad, produciéndose un mayor desgaste abrasivo. Por esta misma razón, el desgaste es menos abrasivo en el material compuesto con partículas con sílice sol-gel tratada a 725 °C que a 500 °C, debido a su mayor resistencia interfacial.

Como la morfología y la composición de las partículas de desgaste están directamente relacionadas con el mecanismo de desgaste, se ha realizado un estudio de su morfología mediante SEM, así como de su composición mediante EDX.

La morfología de las partículas de desgaste desprendidas durante el ensayo realizado sobre los recubrimientos de aluminio se muestran en la figura 9a). La imagen muestra una distribución heterogénea, pudiéndose distinguir dos tamaños de partículas, unas más grandes y otras muy pequeñas que, en ocasiones, están adheridas a las mayores con pequeñas partícu-

las sobre su superficie. El análisis de su composición por EDX (Fig. 9 b)) ha indicado que este material está constituido principalmente por aluminio y oxígeno. Por tanto, se trata mayoritariamente de restos de aluminio parcialmente oxidados durante el desgaste. El mecanismo de desgaste en el recubrimiento de aluminio sin reforzar es predominantemente un desgaste adhesivo, con un cierto grado de abrasión.

En la figura 10 se muestran los productos obtenidos de los ensayos realizados en los recubrimientos de material compuesto con las partículas de SiC sin recubrir (Fig. 10 a)) y recubiertas con sílice sol-gel tratada a 500 °C (Fig. 10 b)) y 725 °C (Fig. 10 c)). El tamaño y cantidad de las partículas obtenidas para los recubrimientos con partículas recubiertas es bastante inferior al desprendido del recubrimiento con partículas sin recubrir. Esto demuestra que la cantidad de material eliminado en estos recubrimientos es menor y, por tanto, se justifica un menor desgaste abrasivo en ellos. En este caso, podría tener más relevancia la contribución de un mecanismo de desgaste por fatiga. Los análisis de las composiciones de estas partículas de desgaste por EDX (Fig. 10 d)) presentan los picos del aluminio, silicio, oxígeno y hierro, lo que indica que se trata de restos de la matriz de aluminio de las partículas de SiC y una pequeña proporción de óxidos de hierro. La presencia de este elemento demuestra la existencia de una pequeña transferencia del contracuerpo al material, y la presencia de partículas de SiC justifica la existencia de un desgaste abrasivo de tres cuerpos.

4. CONCLUSIONES

— Los recubrimientos proyectados de material compuesto con partículas sin recubrir presentan una

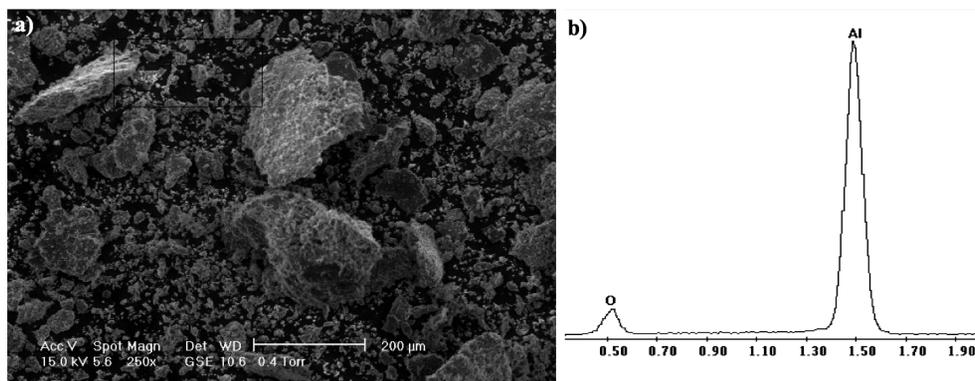


Figura 9. Morfología (a) y análisis EDX (b) de las partículas de desgaste obtenidas del recubrimiento de aluminio.

Figure 9. Morphology (a), and analysis EDX (b) of wear debris from aluminium coating tested.

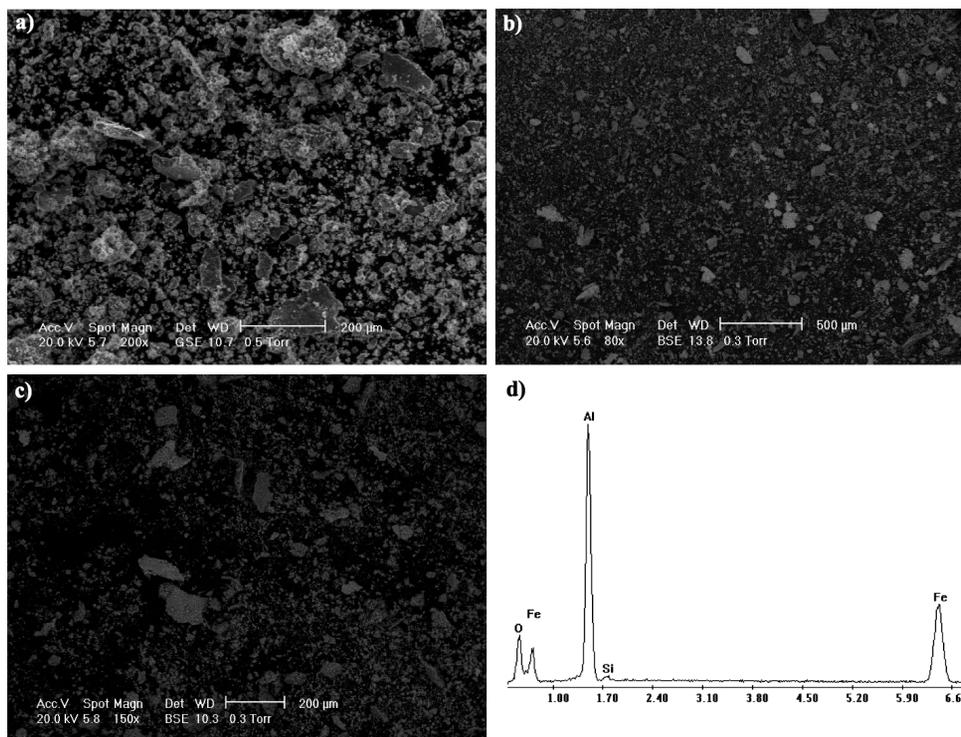


Figura 10. Morfología de las partículas de desgaste obtenidas de los recubrimientos de material compuesto con partículas sin recubrir (a) y recubiertas de sílice sol-gel tratada a 500 °C (b) y 725 °C (c). Análisis EDX de estas partículas (d).

Figure 10. Morphology of wear debris from composites coatings tested with uncoated particles (a), and coated particles with sol-gel silica treated at 500 °C (b) and 725 °C (c). Analysis EDX of these wear debris.

elevada porosidad y una falta de continuidad en la unión entre el recubrimiento y el sustrato, debido a la baja mojabilidad de las partículas por el aluminio líquido.

- La utilización de partículas recubiertas con sílice sol-gel como refuerzo en el recubrimiento de material compuesto fabricado por proyección térmica disminuye su porosidad, aumenta la homogeneidad y mejora la continuidad en la unión con el sustrato, debido al aumento de la mojabilidad de las partículas.
- Los recubrimientos de material compuesto presentan una resistencia al desgaste superior al recubrimiento de aluminio proyectado. De entre los recubrimientos de los materiales compuestos, son los reforzados con partículas recubiertas con sílice sol-gel los que presentan una menor tasa de desgaste, coeficiente de rozamiento y pérdida de masa.
- El tratamiento térmico a 725 °C aplicado a las partículas recubiertas con sílice sol-gel se ha mostrado como el más efectivo a la hora de mejorar el comportamiento a desgaste, debido al incremento de dureza y resistencia que confiere a la intercara partícula-matriz.

- Se ha determinado que el mecanismo de desgaste de los recubrimientos de material compuesto es, principalmente, abrasivo de dos y tres cuerpos, combinado con procesos adhesivos.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Ministerio de Ciencia y Tecnología la financiación de este trabajo (proyectos MAT2003-4931-C02-02, MAT2004-06018) y a la Comunidad de Madrid (S-0505/MAT/0077 y GR/MAT/0931/2004).

5. REFERENCIAS

- [1] P. RODRIGO, P. POZA, M.V. UTRILLA Y A. UREÑA, *Rev. Metal. Madrid* 41 (2005) 298-307.
- [2] A. FORN-ALONSO, M.T. BAILE-PUIG Y RUPÉREZ-DE-GRACIA, *Rev. Metal. Madrid* Vol. Extr. (2005)193-196.
- [3] J.A. PICAS, A. FORN, R. RILLA Y E. MARTÍN, *Rev. Metal. Madrid* Vol. Extr. (2005)197-201.

- [4] H. ESCHNAUER Y E. LUGSCHEIDER, *Metall.* 45 (1991) 458-456.
- [5] J.C. VIALA, P. PORTIER Y J. BOUIX, *J. Mat. Sci.* 25 (1990) 1.842-1.852.
- [6] J. RAMS, M. CAMPO Y A. UREÑA, *Adv Eng. Mat.* 6 (2004) 57-61.
- [7] A. UREÑA, J. RAMS, M. D. ESCALERA Y M. CAMPO, *Bol. Soc. Esp. Ceram.* 43 (2004) 135-138.
- [8] J. RAMS, M. CAMPO Y A. UREÑA, *J. Mat. Res.* 19 (2004) 2.109-2.116.
- [9] M. CAMPO, A. UREÑA Y J. RAMS, *Scripta. Mat.* 52 (2005) 977-982.
- [10] A. PARDO, M. C. MERINO, J. RAMS, S. MERINO, F. VIEJO Y M. CAMPO, *Oxid. Met.* 63 (2005) 215-227.
- [11] M. CAMPO, J. RAMS Y A. UREÑA, *Bol. Soc. Esp. Ceram.* 44 (2005) 270-277.
- [12] M. CAMPO, B. TORRES, A. UREÑA Y J. RAMS, *Proc. IX Congreso Nacional de Materiales*, Vol.1, Vigo, España (2006), Servicio de Publicaciones de la Universidad de Vigo (Eds.), Vigo, España (2006), pp. 425-428.
- [13] J.F. ARCHARD, *J. Appl. Phys.* 24 (1953) 981-988.
- [14] J.C. LEE, J.P. AHN, J.H. SHIM, Z. SHI Y H.I. LEE, *Scripta. Mat.* 41 (1999) 895.
- [15] A. UREÑA, J. RAMS, M. CAMPO Y M. SÁNCHEZ, *Rev. Metal. Madrid* Vol. Extr. (2005) 395-400.