Desgaste de materiales compuestos Al-Li/SiC

J.Rodríguez, P. Poza, M. A. Garrido Maneiro, A. Rico

Departamento de Ciencia e Ingeniería de Materiales,
Universidad Rey Juan Carlos. Tulipan s/n, 28933 Móstoles (Madrid), España

ABSTRACT: Aluminium matrix composites reinforced with ceramic particles exhibit better properties than the corresponding unreinforced alloys, particularly the wear resistance. This work presents a comparative study of the sliding wear behaviour of an aluminium-lithium (Al-8090) composite material reinforced with silicon carbide particles (15% in vol.) and the unreinforced alloy. The experimental results were obtained from pin on disc tests where the normal load and the temperature were varied. The material without reinforcement behaves better than the composite material under mild wear conditions. Nevertheless, in the severe wear regime (high temperature and high pressure) the composite wear resistance is higher than that of the unreinforced alloy. The particles of the reinforcement stabilize thermally the aluminium-lithium alloy and their mechanical properties remain at higher temperatures. For that reason, the transition temperature from mild to severe wear is higher in the composite material than in the unreinforced alloy.

Keywords: sliding wear, metal – matrix composites, mechanically mixed layers (mml), temperature effect.

Resumen
Los materiales compuestos de matriz de aluminio reforzados con partículas cerámicas presentan mejores propiedades que las correspondientes aleaciones sin reforzar. La resistencia al desgaste es una de las propiedades que se ven más afectadas por la presencia del refuerzo. En este trabajo se ha realizado un estudio comparativo del comportamiento frente al desgaste por deslizamiento de material compuesto de matriz de aluminio-litio (Al – 8090) reforzado con un 15 % en volumen de partículas de carburo de silicio y la correspondiente aleación sin reforzar. Los resultados experimentales corresponden a ensayos de punzón sobre disco (*pin on disc)* en los que se ha variado la carga normal y la temperatura. A pesar de lo que inicialmente podría esperarse, el material sin reforzar se comporta mejor que el material compuesto en condiciones de desgaste suave. Sin embargo, cuando las condiciones de desgaste son más exigentes (alta temperatura y elevada presión) el material compuesto presenta una mayor resistencia al desgaste que el material sin reforzar. Las partículas del refuerzo estabilizan térmicamente la aleación de aluminio-litio y como consecuencia de ello, la temperatura de transición entre el régimen de desgaste suave y el de desgaste severo es más elevada en el material compuesto que en la aleación sin reforzar.

Palavras chave: Desgaste por deslizamiento, materiales compuestos de matriz metálica, capas de aleación mecánica, efecto de la temperatura.

1. INTRODUCTION

La resistencia al desgaste está asociada a la pérdida de material de la superficie de un sólido. El proceso está controlado, principalmente, por fenómenos mecánicos y químicos. El comportamiento frente al desgaste de un material depende fundamentalmente del estado superficial y de las propiedades mecánicas de las superficies en contacto, sin embargo éstas últimas son muy dependientes de la temperatura, que además, activa mecanismos tanto de difusión como de formación y destrucción de capas de óxidos, alterando la naturaleza de los materiales en contacto.
La resistencia al desgaste de aleaciones metálicas reforzadas con partículas depende de las propiedades de la matriz, de la resistencia de la partícula de refuerzo y de las características de la intercara matriz-refuerzo [1]. Durante un proceso de desgaste, tanto la superficie de contacto como la zona subsuperficial pueden sufrir modificaciones significativas debido a la concentración de tensiones y al calor producido en los puntos de contacto real. Las aleaciones Al-Li se caracterizan por una elevada rigidez y resistencia junto con una baja densidad, lo que las convierte en aleaciones de particular interés en aplicaciones aeronáuticas [2]. Sin embargo, una de las limitaciones más importantes se encuentra en su uso a altas temperaturas. El refuerzo de estas aleaciones con partículas duras de SiC busca aumentar tanto la rigidez como la resistencia específica [3], sin modificar drásticamente la densidad de la matriz metálica, y mejorar su comportamiento frente al desgaste. No obstante, la adición de estas partículas de refuerzo puede conducir a la generación de tensiones térmicas en la intercara debido a los diferentes coeficientes de expansión térmica entre la matriz y el refuerzo [4].
El comportamiento tribológico de las aleaciones de aluminio deslizando contra acero se ha estudiado profundamente. Los mapas de desgaste desarrollados por Lim y Ashby [5], se han aplicado satisfactoriamente a este tipo de aleaciones identificando distintos mecanismos dominantes que dependen de la carga, velocidad, y la temperatura. A bajas cargas y velocidades el régimen de desgaste suave está asociado con procesos de oxidación. La formación de capas superficiales durante el desgaste (capas de aleación mecánica) parece ser clave para este régimen, aunque los modelos clásicos de desgaste desprecian este efecto. A medida que la carga o la temperatura aumentan, se produce una transición entre desde el régimen de desgaste suave al

severo, observándose un cambio en el mecanismo de desgaste, produciéndose la delaminación de estas capas superficiales junto con una elevada deformación plástica.
En este trabajo se investiga el comportamiento frente al desgaste por deslizamiento de una aleación 8090 Al-Li con un tratamiento T651 reforzada con un 15% en volumen de partículas de SiC, con un diámetro medio de 7µm. Los resultados obtenidos a distintas temperaturas se han comparado con los correspondientes a la misma aleación sin reforzar.

2. MATERIALES Y TÉCNICAS EXPERIMENTALES

El material compuesto estudiado fue una aleación Al-Li (8090) reforzada con un 17 % en volumen de partículas de SiC. Paralelamente se analizó la aleación sin reforzar para evaluar el efecto del refuerzo. La matriz de Al-Li se encontraba originalmente en condición de madurado artificial T651, en la que la aleación fue tratada a 530ºC tras una extrusión, templada en agua y deformada un 2% para eliminar las tensiones residuales del temple, madurada artificialmente a 170ºC durante 32 horas para el material compuesto y 48 horas para la aleación sin reforzar. En la tabla 1 se indican las composiciones del material compuesto y de la aleación Al 8090.

Tabla 1. Composición química en % en peso de la aleación Al8090 sin reforzar y reforzada (MCMM).

% en peso	Li	Cu	Mg	Zr	Ti	Fe	Si	Al	SiC
Al 8090	2,38	0,99	0,81	0,12	0,023	0,04	0,03	Bal.	
MCMM	2,32	1,21	0,82	0,10	0,036	0,05	0,06	Bal.	17,3

La microestructura de la aleación sin reforzar es anisótropa, con un tamaño de grano medio en la dirección paralela al eje de extrusión de 1mm, 8µm en dirección transversal corta y 21 µm en la dirección transversal larga. Por otra parte, la microestructra del compuesto es menos anisótropa, el tamaño de grano medio en la dirección paralela al eje de extrusión es 12µm, mientras que los granos resultaron ser equiaxiales en la sección transversal con un tamaño medio de 6 µm. Las partículas de SiC se encuentran completamente embebidas en la matriz mostrando una buena adherencia con ésta y orientadas según la dirección de extrusión; la longitud media característica de refuerzo es de 8 µm, con un factor de forma medio de 2,3 [6].
Las muestras para ensayos de desgaste, tanto de material base como de material compuesto, se mecanizaron para adecuar su geometría a las dimensiones del soporte de la máquina de ensayos. Se utilizó una geometría paralelepipédica con dimensiones nominales 6 mm x 2,3 mm x11,41 mm, según se muestra en la Fig.1.
Se realizaron ensayos de desgaste punzón sobre disco sin lubricación a distintas presiones, 6,3 MPa, 12,5 MPa y 16,5 MPa, y temperaturas, 20 ºC, 100 ºC, 150 ºC y 200 ºC, a una velocidad constante de 0,1 m/s. Los ensayos se realizaron en un tribómetro Wazau en el que la muestra, que actúa como punzón, es fija y se pone en contacto con un disco móvil de acero F-114 (Fig.1). El control de la temperatura del ensayo se realizó mediante un horno diseñado para alojar en su interior al conjunto punzón-contracuerpo, y su medida se obtuvo mediante un termopar situado en el centro del soporte del punzón.. El horno se controló de manera que la temperatura estuviera estabilizada antes de comenzar los ensayos.

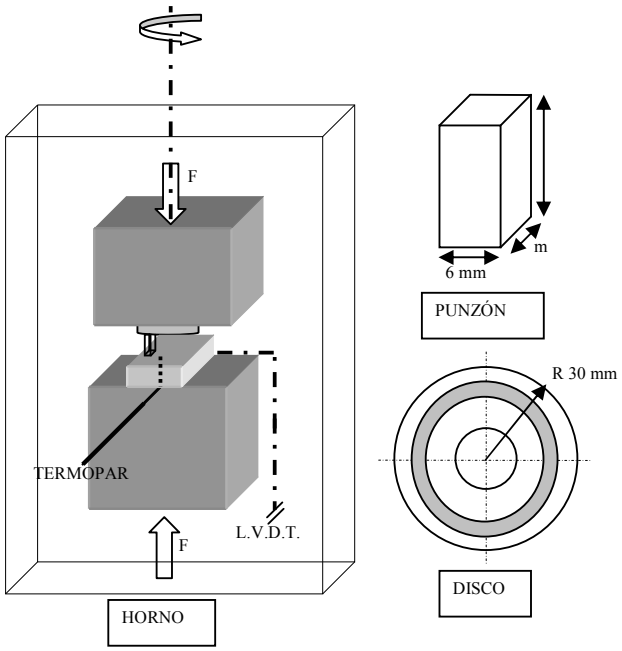

Fig. 1: Esquema de la máquina de tribología empleada en los ensayos de punzón sobre disco.

En la Fig. 2 se muestra un registro original de uno de los ensayos experimentales. El coeficiente de rozamiento se determinó a través de un medidor de par instalado en el tribómetro. El cambio en la altura de la muestra se midió y registró mediante un transductor de desplazamiento (L.V.D.T.) con una precisión de ±1 µm. El desgaste de las muestras se representó como la pendiente de la rama estacionaria de variación de la altura de la muestra, h, frente a la distancia deslizada, l. Si se supone válida la ley de Archard [Ec.1], este valor ha de ser constante en la etapa estacionaria siguiendo la ley de Archard y suponiendo que la dureza, H, de la muestra en la zona de contacto permanece constante:

$$\frac{h}{l} = K\frac{P}{H} \quad \text{[Ec.1]}$$

En la expresión de la ley de Archard, H es la dureza del material, P la presión normal aplicada y K el coeficiente de desgaste.
Para analizar la variación que sufre la microestructura del material en la proximidad de la superficie de contacto, se realizaron cortes transversales de las probetas ensayadas con una microcortadora Struers Accutom-5. Las muestras se prepararon para su observación en un microscopio electrónico de barrido ambiental (ESEM) PHILIPS XL 30 utilizando técnicas convencionales de metalografía (desbaste a 300, 600, 1200, 4000 *grid*, y pulido con pasta de diamante de 3 µm y 1 µm).

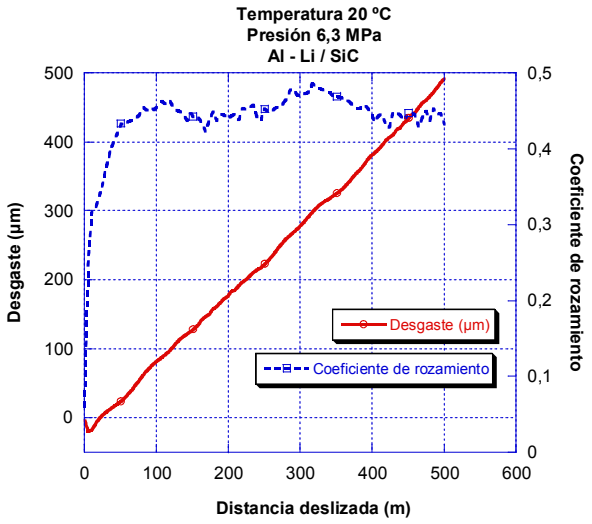

Fig.2: Registro original de uno de los ensayos experimentales.

3. RESULTADOS

Influencia de la Temperatura:

La Fig. 3 representa la tasa de desgaste de la aleación base Al-Li 8090 y del material compuesto Al-Li 8090/SiC a presión constante frente a la temperatura de ensayo. Para las presiones de 6,3 MPa y 12,5 MPa (Figs. 3a y 3b), la evolución de la tasa de desgaste es similar para ambos materiales hasta 150ºC aproximadamente, caracterizándose por una disminución inicial del desgaste al aumentar la temperatura; y por presentar el material compuesto una tasa de desgaste mayor. Estas tendencias cambian a partir de 150ºC y el desgaste del material base aumenta drásticamente, llegando a superar el desgaste sufrido por el material reforzado. En las Figs. 3a y 3b se aprecia que la tasas de desgaste disminuye inicialmente al aumentar la temperatura para, posteriormente, volver a aumentar a temperaturas más elevadas. El hecho de que la tasas de desgaste pase por un mínimo en el entorno de los 100 ºC, sólo puede ser debido a la presencia simultánea de dos fenómenos que compiten en direcciones opuestas. Es bien conocida la pérdida de propiedades mecánicas con la temperatura para cualquier material. En consecuencia, otro fenómeno debe influir en la línea de disminuir el desgaste a medida que aumenta la temperatura. Alpas et al [6] ya encontraron resultados de este tipo en materiales compuestos de matriz metálica.

El resultado de los ensayos de desgaste para una presión constante de 16,5 MPa se representan en la Figura 3c. La tasa de desgaste del material compuesto es aproximadamente un 65 % mayor que la obtenida para la aleación sin reforzar, siguiendo en ambos casos una tendencia similar, hasta una temperatura de 150ºC. A partir de esta temperatura, ambos materiales experimentan un aumento brusco de la tasa de desgaste. La aleación 8090 alcanza rápidamente un régimen de desgaste severo, mientras que el material compuesto aumenta su tasa de desgaste con una pendiente mucho menor (desgaste suave). El régimen de desgaste severo se alcanza en el material compuesto a partir de los 200ºC. Por tanto, la presencia del refuerzo retrasa la temperatura de transición de desgaste suave a severo a presiones elevadas.

Influencia de la Presión:

La Figura 4 representa la evolución de la tasa de desgaste con la presión a temperatura constante. La tasa de desgaste, en general, aumenta con la presión para ambos materiales, si bien, es ligeramente mayor en el material compuesto para

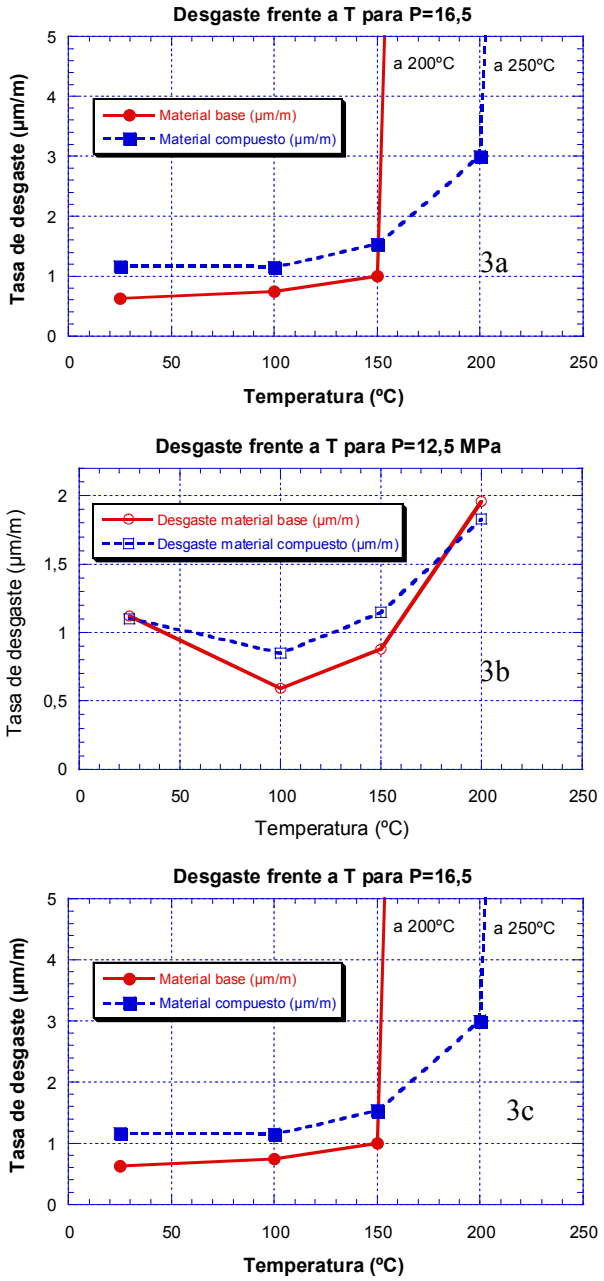

Fig. 3: Tasa de desgaste frente a la temperatura de material base y material compuesto a distintas presiones: 6,3 MPa (3a), 12,5 MPa (3b) y 16,5 MPa (3C)

una misma presión y una temperatura. La evolución de la tasa de desgaste con la presión dentro del régimen de desgaste suave, obedece para ambos materiales la tendencia reflejada por la ecuación de Archard [Ec.1], a excepción de las medidas realizadas a 20 ºC.

Caracterización microestructural:
Con el fin de determinar los mecanismos causantes del desgaste, se estudiaron cortes transversales de las probetas ensayadas. Se identificó una zona cercana a la superficie de contacto con una microestructura altamente modificada, que se ha denominado zona de daño. La composición química se ha alterado en esta zona al quedar atrapadas partículas de desgaste (debris). Se observó también una alta densidad de defectos y microgrietas. Las Figuras 5 y 6 muestran la zona de daño en diferentes ensayos de desgaste a una presión constante de 6,3 MPa y a temperaturas de 20 ºC, 100 ºC y 200 ºC.
En la aleación sin reforzar la zona de daño mostró las siguientes características: a 20ºC (Fig.5a) es discontinua, llegando a desaparecer en algunas zonas y con un espesor máximo de aproximadamente 30 µm; a 100 ºC la zona de daño se extendió a lo largo de toda la superficie de desgaste de manera continua, pero con un espesor poco uniforme, que alcanzó valores máximos cercanos a las 40 µm (Fig. 5b); finalmente, a 200 ºC el espesor de la zona de daño es aproximadamente constante entorno a las 40 µm (Fig.5c). En el material compuesto las características de la zona de daño son bastante similares, pero con espesores menores (Fig.6). Es además destacable el hecho de que las partículas del refuerzo se encuentren absolutamente pulverizadas en las cercanías del contacto. Cuanto mayor sea la zona de partículas rotas peor será el comportamiento del material.
La Figura 7 muestra la variación del espesor medio de la zona de daño para ambos materiales, en función de la temperatura. En todas las condiciones, el espesor medio de la zona de daño de la aleación base es mayor que la del material compuesto. No obstante, estas medidas deben tomarse únicamente como una indicación cualitativa, dada la dificultad experimental asociada a la determinación de estos valores. Ligeras alteraciones de la superficie durante la preparación de las probetas pueden conducir a resultados muy diferentes, aunque cualitativamente puedan extraerse conclusiones similares.

4. DISCUSIÓN

Efecto de la temperatura sobre el desgaste:
A una presión normal de 16,5 MPa, los materiales estudiados experimentan una transición de desgaste suave a desgaste severo al aumentar la temperatura. Esta temperatura es de 150ºC para el material base, mientras que para el material compuesto es de 200ºC (Fig.3). De este modo, el refuerzo actúa retrasando la temperatura de transición de desgaste suave a severo. Dentro del régimen de desgaste suave, el material compuesto presentó una tasa de desgaste ligeramente mayor por lo en estas condiciones, el refuerzo no constituye ninguna mejora, es más, disminuye la resistencia al desgaste. El efecto de la temperatura está muy ligado al de la presión. A presiones bajas, Figs. 3a y 3b, aumentar la temperatura es beneficioso hasta cierto punto. De hecho, la mayor resistencia al desgaste se corresponde con temperaturas cercanas a los 100 ºC. Estos resultados indican mecanismos diferentes en los distintos regímenes de desgaste y no un simple incremento de la severidad del contacto.

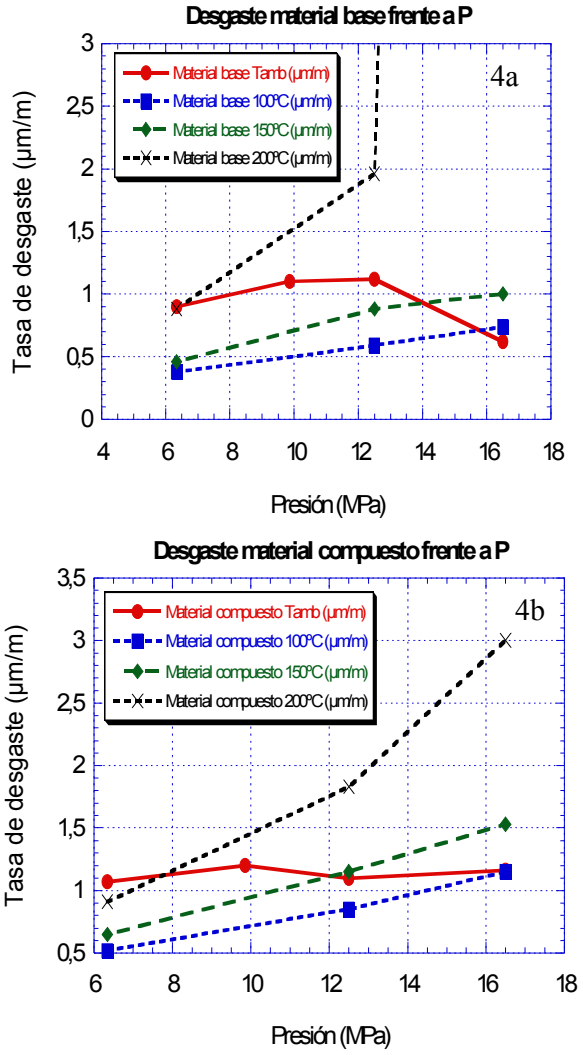

Fig.4: Tasa de desgaste frente a la presión de material base (3a) y material compuesto (3b) a distintas temperaturas: 20 ºC; 100 ºC; 150 ºC, 200 ºC

Efecto de la presión sobre el desgaste:
A excepción de los ensayos a 20 ºC, un aumento de la presión supone un incremento en el desgaste, de acuerdo con la tendencia expresada en la ecuación de Archard [Ec.1]. Para temperaturas inferiores a la de transición del material base (150ºC), el material compuesto sufre un desgaste ligeramente mayor para todo el intervalo de presiones estudiado con pendientes de aumento de la tasa de desgaste superiores. El beneficio de incorporar el refuerzo cerámico se pone de manifiesto únicamente a temperaturas y presiones elevadas. En estas condiciones, el compuesto presentó tasas de desgaste aceptables cuando la aleación sin reforzar sufrió una gran degradación.

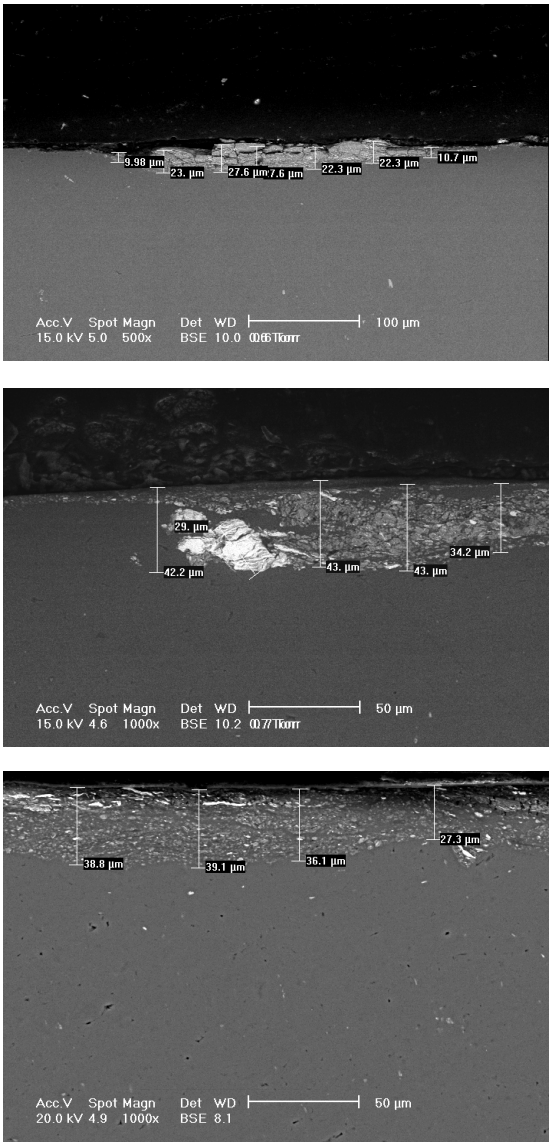

Fig. 5: a) Aleación base ensayada a 20 ºC y 6,3 MPa. b) Aleación base ensayada a 100 ºC y 6,3 MPa. c) Aleación base ensayada a 200 ºC y 6,3 MPa. Contraste de retrodispersados

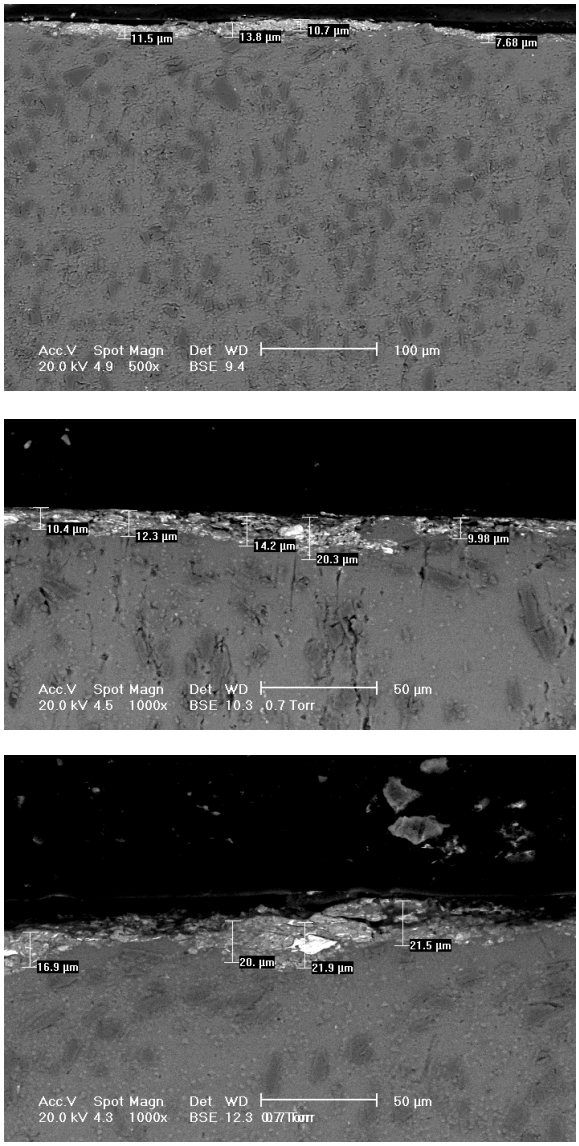

Fig. 6: a) Material compuesto ensayado a 20 ºC y 6,3 MPa. b) Material compuesto ensayado a 100 ºC y 6,3 MPa. c) Material compuesto ensayado a 200 ºC y 6,3 MPa. Contraste de retrodispersados.

Caracterización morfológica de la zona de contacto:

Existen diversas teorías que intentan describir el mecanismo de desgaste que sufre un material cuando se encuentra deslizando contra un contracuerpo de acero sin lubricación [8]. Debido a las altas presiones y temperaturas que se alcanzan en el contacto, las asperezas de la superficie de ambos materiales pueden llegar a oxidarse, generándose óxidos de hierro, de aluminio e incluso óxidos mixtos de ambos metales. Como consecuencia del proceso de fricción estas asperezas oxidadas se arrancan del material y actúan como partículas abrasivas, produciendo a su vez el arranque de nuevas asperezas. Si el material presenta una ductilidad elevada, como es el caso del aluminio a las temperaturas reales de contacto, es fácil que estas partículas queden embebidas en la aleación debido al flujo plástico que experimenta. Cuanto mayor es el grado de plasticidad del aluminio, más partículas se incorporan a la superficie de desgaste haciendo que la zona de daño sea más continua, y de mayor espesor. Por ello, ya en las primeras etapas del proceso de desgaste, los materiales que se encuentran en contacto no tienen las mismas características superficiales que al comenzar el ensayo. El comportamiento frente al desgaste estará dominado tanto por las propiedades de esta nueva superficie, como por las propiedades de la aleación en la zona subsuperficial.

Es sabido, que dentro del régimen de desgaste suave, la tasa de desgaste de las aleaciones de aluminio y sus compuestos está controlada por la formación de capas de aleación mecánicas. Sin embargo, el papel de estas capas se encuentra en la actualidad bajo discusión. Algunos autores, han informado del papel protector de estas capas [9], mientras que otros no han observado ningún beneficio. Ghazeli et al han publicado recientemente un trabajo centrado en el efecto que tiene la composición de la aleación

de aluminio en las propiedades de estas capas superficiales

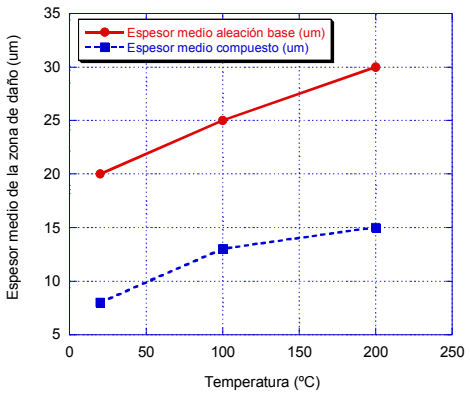

Fig.7. Espesor medio de la zona de daño en función de la temperatura para material base vs. material compuesto ensayados a 6,3 MPa.

[10]. Los resultados no son en ningún caso concluyentes, ya que no se pueden establecer tendencias claras. En el caso particular de la aleación de Al-Li estudiada en este trabajo, la presencia de esta capa de aleación mecánica es beneficiosa. Como ya se ha indicado, la morfología de esta capa no es uniforme, y está formada por un conglomerado de partículas con un alto

Tabla 2: Coeficientes de rozamiento medios de la aleación sin reforzar y el material compuesto

	Aleación Al/Li		Material compuesto	
	Temperatura (ºC)	Coeficiente de rozamiento	Temperatura (ºC)	Coeficiente de rozamiento
	20	0,369	20	0,441
P=6,3 MPa	100	0,380	100	0,395
	150	0,352	150	0,399
	200	0,350	200	0,365
	20	0,354	20	0,421
P=12,5 MPa	100	0,336	100	0,366
	150	0,349	150	0,370
	200	0,362	200	0,395
	20	0,372	20	0,425
P=16,5 MPa	100	0,335	100	0,372
	150	0,348	150	0,390
	200	0,425	200	0,400

nivel de porosidad. Estas características hacen que el efecto de esta capa sea lubricante. Lo cierto es que a medida que aumenta la temperatura del ensayo, para una misma presión, se produce una competición entre dos fenómenos que parecen ir en direcciones opuestas: por un lado, aumenta la continuidad y el espesor de la zona de daño superficial (Figs. 5, 6 y 7), favoreciendo la reducción de la tasa de desgaste por su efecto lubricante, pero por el otro la zona subsuperficial sufre una pérdida gradual de propiedades mecánicas. Esta pérdida es consecuencia del efecto de la temperatura y en el caso del material compuesto puede agravarse por la rotura de las partículas del refuerzo [11]. Los coeficientes de rozamiento medios, medidos en los ensayos de desgaste, presentan un mínimo a temperaturas superiores a 20 ºC (ver tabla 2), lo cual apoya la hipótesis del efecto lubricante de la capa de aleación mecánica.
Finalmente, la razón por la que el material compuesto en régimen de desgaste suave no mejora la resistencia al desgaste de la aleación sin reforzar, puede deberse al efecto abrasivo que partículas de desgaste provenientes del refuerzo cerámico causan en el contacto entre probeta y contracuerpo. Las propiedades mecánicas de ambos materiales son bastante similares a excepción de la rigidez, mucho mayor en el compuesto.

5. CONCLUSIONES

A partir de los resultados experimentales y de los análisis realizados pueden establecerse las siguientes conclusiones:

- El proceso de desgaste de materiales compuestos Al – Li/ SiC(p) y de la aleación Al – Li está críticamente influido por la carga normal aplicada y por la temperatura del proceso.
- Existe una temperatura crítica dependiente de la presión a partir de la cual se produce una transición desde el régimen de desgaste suave al severo. Esta transición provoca un incremento muy elevado de la tasa de desgaste. La temperatura de transición es mayor en el caso del material compuesto debido a la presencia del refuerzo.
- La presencia de una zona de daño en la superficie de contacto aumenta la resistencia frente al desgaste cuando la temperatura se encuentra por debajo de la de transición. A partir de esta temperatura domina la pérdida de propiedades mecánicas de la zona subsuperficial al contacto, lo que se traduce en un aumento gradual de la tasa de desgaste que puede aumentar enormemente bajo condiciones severas
- El material sin reforzar se comporta mejor frente al desgaste que el materia compuesto a baja temperatura. Sin embargo, cuando las condiciones de desgaste son muy exigentes, el material compuesto presenta una mayor resistencia frente al desgaste. Las partículas de refuerzo estabilizan térmicamente a la aleación de Al – Li, y permiten que sus propiedades mecánicas se mantengan a temperaturas mayores.

REFERENCIAS

[1] D.J. Lloyd. Int. Mater. Rev, **39** (1994) 1-23.
[2] Rohatgi, P. K., Riu, Y. and Ray, S., in Friction, Lubrication and Wear Technology, ASM Handbook. ASM International, Metals Park, OH, 1992, pp. 801-811.
[3] C. González, A. Martín and J. Llorca. Scripta Materialia, **51**(2004),1111-1115
[4] I. Gutiérrez-Urrutia , M. L. Nó and J. San Juan. Materials Science and Engineering A, **370**,(2004) 555-559.
[5] Lim S.C. and Ashby M.F. Acta Metall. **35** (1987) 1 – 24.
[6] P.Poza, J. Llorca. Metal. Trans. **30 A**, (1999) 845.
[7] Singh, J. and Alpas, A. T., Metall. Mater. Trans., **27A** (1996) 3135.
[8] Tribology: Friction and wear of engineering materials. I.M. Hutchings. CRC Press. 1992
[9] Venkataraman B., Sundararajan G. Wear, **245** (2000) 22 -28.
[10] Ghazali M.J., Rainforth W.M., Jones H. Wear, **259** (2005) 490 – 500.
[11] J. Rodríguez, A. Martín, J. Llorca. Acta Mater. **48** (2000) 993-1003.