

Materiales compuestos de matriz metálica. I parte. Tipos, propiedades, aplicaciones(*)

Cesar Edil da Costa*, Francisco Velasco López* y Jose Manuel Torralba Castelló**

Resumen En este trabajo se realiza una revisión acerca del estado actual de los materiales compuestos de matriz metálica habitualmente utilizados en la industria aeronáutica y automotriz. Normalmente, son materiales de base aleaciones ligeras (Al, Ti o Mg) reforzados con fibras o partículas. En esta revisión se repasan las distintas familias de materiales de matriz metálica, se da una visión general acerca de sus propiedades y, por último, se comentan algunas de sus principales aplicaciones.

Palabras clave Materiales compuestos. Matriz metálica. Aleaciones ligeras.

Metal matrix composites. Part 1. Types, properties, applications

Abstract An overview on the state of the art of metal matrix composites used in the automotive and aerospace industries is made. These materials usually are based on light alloys (Al, Ti and Mg) and reinforced with fibres or particles. In this review, it is presented a general scope on the different MMCs families, about their properties and their main applications.

Keywords Metal matrix. Composites. Light alloys.

1. INTRODUCCIÓN

Bajo el epígrafe “material compuesto de matriz metálica (MMC)”, podrían incluirse dos grandes familias de materiales: aquellos materiales destinados para aplicaciones de corte y desgaste (carburos cementados, aceros reforzados con carburos, etc.) y aquellos materiales de alta rigidez, resistencia y módulo específico, normalmente destinados para aplicaciones estructurales en la industria automotriz o aeronáutica. El primer grupo de materiales se basa en matrices de metales de transición (Co, Fe, Ni) y el segundo en aleaciones ligeras (base Al, Ti, Mg). Pese a que en buena ortodoxia, ambas familias caen bajo el paraguas de los MMCs, en la mayoría de tratados y revisiones únicamente se considera como tales los materiales pertenecientes a esta última familia, considerando a casi todos los materiales del primer grupo bajo la definición de “metal duro”. Siguiendo esta línea, el objeto de esta revisión serán aquellos materiales normalmente utilizados por su alta resistencia y módulos específicos y no por su extrema dureza o resistencia al desgaste.

Los MMCs forman un grupo de materiales de los más estudiados en las dos últimas décadas. Una de las causas por la que se desarrollaron los materiales compuestos es la obtención de propiedades imposibles de conseguir con un material monolítico. El diseño óptimo de un componente demanda un conjunto de propiedades, como por ejemplo, una alta rigidez o resistencia con mínimo peso o mínimo coste; o bien en el diseño de propiedades termomecánicas una máxima transferencia de calor junto con una mínima distorsión térmica, o todas estas propiedades juntas. Por ello, el mejor material es el que posee el perfil de propiedades que más se acerca a las definidas por el diseño. El material que optimice estas combinaciones es el que merece la pena fabricar^[1-3].

En principio, se pueden combinar dos materiales cualquiera para formar un compuesto (metales, cerámicos, polímeros, etc.). La fabricación se determina en función de lo atractivas que sean las propiedades que presenta. En la figura 1 vemos las diferentes clases de materiales que pueden formar un material compuesto^[1]

(*) Trabajo recibido el día 23 de septiembre de 1999 y aceptado en su forma final el 5 de abril de 2000.

(*) Universidade do Estado de Santa Catarina. Dept. Ing. Mecánica. Campus Universitario Bom Retiro, 89223-100 Joinville /SC (Brasil).

(**) Universidad Carlos III de Madrid. Dpto. Materiales. Avda. Universidad 30. 28911 Leganés (Madrid, España).

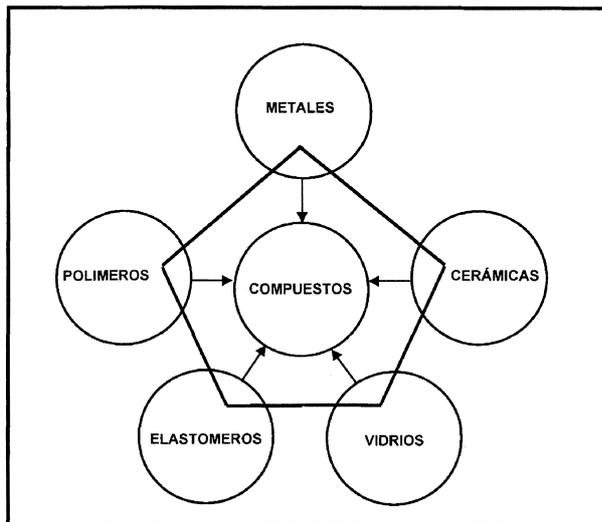


Figura 1. Clases de materiales a partir de los cuales se puede fabricar un material compuesto.

Figure 1. Different materials which can be used for manufacturing composites.

A la hora de fabricar un material compuesto se debe trabajar, de forma simultánea, en tres planos distintos: el índice de funcionamiento, que determina qué combinación de propiedades del material puede maximizar sus prestaciones; los gráficos de selección de materiales, en los que las propiedades de distintos materiales junto a sus índices de funcionamiento se pueden seleccionar y, por último, el uso de límites para definir el entorno de propiedades accesibles por un sistema compuesto^[1].

2. MATRICES UTILIZADAS PARA LA FABRICACIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ METÁLICA

Las funciones que tiene la matriz metálica en los materiales compuestos son las siguientes^[3-5]:

- Proteger las fibras o partículas del ambiente exterior (aire, humedad,...).
- Propiciar la unión solidaria de los elementos que constituyen el refuerzo: unir las fibras entre ellas, pero separarlas para evitar la transmisión de grietas a través del compuesto, sobre todo en el caso de un refuerzo con fibras continuas.
- Repartir y transmitir las cargas de los elementos de refuerzo. En general, para que la transmisión sea óptima, la matriz debe deformarse plásticamente para tensiones netamente inferiores a las que está sometido el compuesto, y que su deformación sea inferior a la correspondiente a la rotura. La matriz no deberá tener un módulo de elasticidad demasiado elevado.

- Por último, las condiciones de utilización particulares del compuesto pueden exigir que la matriz presente buena resistencia a la corrosión o a la oxidación, o una buena resistencia mecánica en caliente.

Es prácticamente imposible nombrar todos los metales o aleaciones que se emplean en la fabricación de MMCs, bien en estado de desarrollo o bien industrialmente. Así, las aleaciones más comúnmente empleadas en materiales compuestos de matriz metálica son las ligeras: del aluminio (principalmente de las series 2000, 6000, 7000 y 8000). El titanio y sus aleaciones (aunque en algunos casos presentan el problema de reacción química con el refuerzo durante el procesado a temperaturas elevadas, lo que deteriora las propiedades del compuesto obtenido) y el magnesio y sus aleaciones (que presentan graves problemas de corrosión). Destacar que en los últimos años, la posible utilización de intermetálicos y superaleaciones como matrices está siendo objeto de intensas investigaciones. El mayor inconveniente que presentan estos materiales para su uso es la baja ductilidad.

En la tabla I se muestran propiedades relativas entre distintos metales ligeros empleados habitualmente como matrices en MMCs^[6].

3. REFUERZOS EMPLEADOS EN MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ METÁLICA

Las funciones que tiene un material de refuerzo en MMCs son las siguientes^[4 y 5]

- Soportar las tensiones que se ejercen sobre el compuesto.
- Aumentar las características mecánicas de la matriz, su dureza y resistencia al desgaste (sobre todo en el caso del refuerzo con partículas).
- Mitigar los fallos de estas características con el aumento de temperatura.
- Frenar o detener la propagación de grietas a través del compuesto y el desarrollo de las fisuras.

Las fases de refuerzo se pueden clasificar en tres categorías; fibras continuas, *whiskers* y partículas. Generalmente, se habla de la gran mejora que, desde el punto de vista de las propiedades mecánicas, pueden obtenerse mediante fibras continuas, reforzando en la dirección de la tensión aplicada, mientras que con *whiskers* y partículas, se experimenta una disminución de resistencia, pero se tiene una gran isotropía en el material^[2, 5, 7 y 8].

Tabla I. Propiedades relativas entre diferentes materiales ligeros empleados como matriz en materiales compuestos*Table I. Comparative properties between different light materials used as matrix in metal matrix composites*

	Al	Mg	Ti		
Nº Atómico	13	12	22		
Estructura cristalina	CFC	HC	HC ↓ 882°C C.C.		
Propiedades físicas					
Punto de ebullición (°C)	2.467	1.090	3.287		
Punto de fusión (°C)	660	650	1.660		
Densidad (g/cm ³)	2,7	1,7	4,5		
Propiedades eléctricas					
Conductividad eléctrica (% IACS)	64	38	4		
Resistividad eléctrica (μΩ cm)	2,67	4,2	42		
Propiedades térmicas					
Calor latente de fusión (J g ⁻¹)	388	362	365		
Coef. de expansión lineal (x10 ⁻⁶ K ⁻¹)	23,5	26	8,9		
Calor específico a 25°C (J K ⁻¹ kg ⁻¹)	900	1.020	523		
Conductividad térmica 0-100°C	237	156	21,9		
Propiedades mecánicas					
Tipo de material	Blando	Duro	Blando	Duro	Recocido
Dureza (HV)	21	35-48	30-35	35-45	60
Coefficiente de Poisson	0,345		0,291		0,361
Resistencia a la tracción (MPa)	50-90	130-195	185	232	230-460
Límite elástico (MPa)	10-35	110-170	69	100	140-250
Módulo elástico (GPa)	70,6		44,7		120,2

En la tabla II podemos comparar el efecto que tiene sobre las propiedades de una misma matriz distintos tipos de refuerzo^[5].

La figura 2^[5] nos muestra un esquema de diferentes tipos de refuerzo utilizados en materiales compuestos de matriz metálica.

Como es el material de refuerzo el que soporta las tensiones principales, las investigaciones suelen centrarse en fibras o partículas de excelentes características mecánicas (en particular elevada resistencia a la tracción y/o alto módulo de elasticidad), y que conservan las propiedades mecánicas, junto con la estabilidad química y la compatibilidad con la matriz a temperatura elevada.

3.1. Fibras continuas

Las fibras metálicas se emplean poco a causa de su posible ataque químico por parte de la matriz, los cambios estructurales por la elevación de temperatura (en particular la recristalización), la posible disolución de la fibra en la matriz y la relativamen-

te fácil oxidación de las fibras de metales refractarios (W, Mo, Nb, etc.). Por ello, se han desarrollado con gran profusión las fibras cerámicas, que presentan numerosas ventajas: no se disuelven en la matriz, su resistencia se mantiene a temperaturas elevadas, su módulo de elasticidad es alto, no se oxidan (con carácter general) y tienen baja densidad. Una de las primeras fibras continuas utilizada como refuerzo fue la BORSIC, que está constituida por fibras de boro formadas sobre una alma de wolframio y con un revestimiento de carburo de silicio. Las fibras más empleadas como refuerzo son las de boro, alúmina y carburo de silicio^[8-10].

3.2. Partículas

El refuerzo de menor coste económico es la partícula, y es el que nos permite obtener una mayor isotropía de propiedades. El control del tamaño y la pureza son los principales requisitos para su empleo en materiales compuestos. Refuerzos típicos en forma de partículas son la mica, óxidos

Tabla II. Propiedades de materiales compuestos de diferentes matrices con refuerzos continuos y discontinuos

Table II. Properties of composites with different matrix and reinforcements

Matriz	Refuerzo	Fracción (% vol.)	Resistencia a la tracción longitudinal (MPa)	Módulo elástico longitudinal (GPa)
Al-7Zn	Fibra de grafito	40	90	190
Al 2024	Fibra de boro	60	1.500	270
Al 6061	Fibra de SiC	50	1.500	205
Al 2024	Al ₂ O ₃ 50	450	175	
Al 6061	Whisker de SiC	15	480	100
Al 6061	Partícula de SiC	15	370	100
Ti-6Al-4V	BORSIC40	900	205	
Ti-6Al-4V	SCSC-635	1.600	240	
Ti-6Al-4V	Sigma SM1240	35	1.550	230
Mg	Fibra de grafito	40	560	230
Mg	Fibra de SiC	50	1.300	230

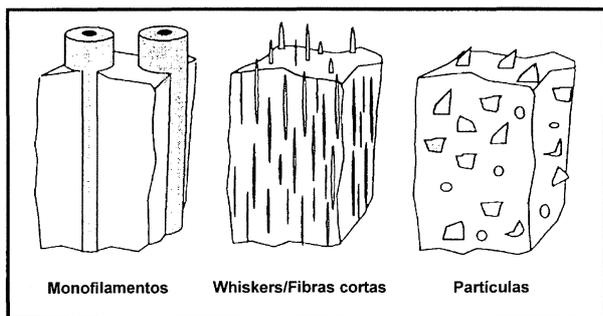


Figura 2. Esquema de varios tipos de materiales compuestos de matriz metálica, reforzado con fibras continuas, con whiskers y partículas.

Figure 2. Different metal matrix composites, reinforced with continuous fibres, whiskers and particles.

(como SiO₂, TiO₂, ZrO₂, MgO), carburos (como el TiC o el B₄C) y nitruros (Si₃N₄)^[11 y 12]. Los materiales más empleados son el grafito, la alúmina (Al₂O₃) y el carburo de silicio (SiC)^[13-17]. En los últimos años, se han empezado a utilizar como partículas de refuerzo intermetálicos, principalmente de los sistemas Ni-Al^[18-21] y Fe-Al^[21].

3.3. Fibras discontinuas

Las fibras discontinuas utilizadas normalmente para la producción de MMCs son mezclas de óxidos, comercializándose distintos diámetros, entre 3 y 5 µm. Las fibras discontinuas conducen a propiedades inferiores que las fibras continuas, por lo que su coste se reduce^[7, 22 y 23].

Los whiskers tienen diámetros menores de 1 µm y pueden tener una longitud de hasta 100 µm, por lo que puede considerárseles como refuerzos discontinuos. Los principales whiskers disponibles comercialmente son los de SiC y Si₃N₄. El hecho de que normalmente se obtengan en forma monocristalina, además de su pequeño diámetro, conduce a que tengan pocos defectos de fractura interna, y como consecuencia presentan mayores niveles de resistencia que otras fibras discontinuas, propiciándose su mayor uso^[2 y 5]. Recientemente, este crecimiento en su utilización se ha visto restringido en algunos países a causa de su carácter cancerígeno.

4. INTERFASE MATRIZ REFUERZO

La interfase matriz-refuerzo condiciona las propiedades mecánicas finales de los compuestos. La transmisión y reparto de las cargas aplicadas al material compuesto se efectúa por la unión existente entre matriz y refuerzo. Si la unión no es buena, la matriz soportará la mayor parte de las tensiones y la función de los refuerzos será nula. La interfase es, pues, una región de composición química variable, que constituye la unión entre la matriz y el refuerzo, y que asegura la transferencia de las cargas aplicadas entre ambos^[4, 24-27].

Los principales parámetros necesarios para obtener una interfase “ideal” son:

- El mojado (entendiendo como mojado la aptitud de un líquido a extenderse sobre un sólido,

propiedad de alto interés cuando el conformado pasa por la infiltración de una preforma-refuerzo por un fundido-matriz) entre la matriz y el material de refuerzo debe ser bueno. Aquí interviene la naturaleza termodinámica de los diferentes elementos y, en especial, sus energías superficiales.

- Deben existir fuerzas de unión suficientes para transmitir los esfuerzos de la matriz al refuerzo.
- Las uniones deben ser estables en el tiempo y sobre todo en el rango de temperaturas de utilización del compuesto.
- Las zonas de reacción entre la matriz y el refuerzo deben ser reducidas y no afectar a los elementos de refuerzo.
- Los coeficientes de dilatación térmica de la matriz y de los refuerzos deben ser similares para limitar los efectos de tensiones internas a través de la interfase, sobre todo al utilizar el compuesto a altas temperaturas.

Es difícil clasificar los distintos tipos de uniones, aunque se puede realizar una clasificación según el tipo de reacción química que se desarrolla entre la matriz y los refuerzos:

- La matriz y los materiales de refuerzo son no reactivos e insolubles.
- La matriz y los materiales de refuerzo son no reactivos pero solubles.
- La matriz y los elementos de refuerzo reaccionan para formar un tercer componente en la interfase.

En primer lugar, se deben considerar las uniones de tipo mecánico, en las que no tiene lugar ninguna reacción química. Este tipo de unión puede existir en el caso de refuerzos que tengan la superficie rugosa. La ausencia de unión química conduce a un material compuesto con propiedades mecánicas mediocres.

La unión con mojado y con disoluciones tiene lugar en los compuestos reforzados por casi cualquier elemento, excepto con los óxidos. La matriz moja y/o disuelve parcialmente los elementos del refuerzo, sin que se forme ningún compuesto entre ambos, existiendo interacciones electrónicas a corta distancia (distancias atómicas).

En las uniones en las que se producen reacciones químicas, estas pueden ser simples, que hacen intervenir las transferencias de átomos de uno o ambos compuestos, formándose un nuevo compuesto químico en la interfase, o bien reacciones

más complejas, que se pueden representar mediante una secuencia de reacciones.

Existen factores que pueden afectar a la estabilidad de la interfase como son las inestabilidades debido a la disolución, cuyo inconveniente principal es la pérdida parcial de refuerzo, produciéndose cavidades debido al efecto Kirkendall, principalmente en el caso de refuerzos metálicos; inestabilidades debido a reacciones interfaciales, que degradan las propiedades del compuesto; e inestabilidades debido a la descomposición de la interfase, que se producen básicamente en compuestos sujetos a ciclos térmicos.

5. PRINCIPALES FAMILIAS DE MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ METÁLICA (MMCs)

5.1. Materiales compuestos con matriz de aluminio y sus aleaciones (Al-MCs)

Ya hace mucho tiempo que la mayoría de MMCs, tanto en investigación y desarrollo como en varias aplicaciones industriales, son base aluminio y sus aleaciones. Esto se debe a que el aluminio es ligero, que es el primer requisito en la mayor parte de las aplicaciones de los MMCs actuales. Adicionalmente, es barato en comparación con otros metales ligeros, como el titanio y el magnesio. También se debe a que las aleaciones de aluminio convencionales se utilizan en grandes cantidades, en un gran número de aplicaciones, desde la industria de automoción y aeronáutica, hasta en ocio y recreo^[5, 28 y 29].

Su excelente resistencia, ductilidad y comportamiento frente a la corrosión ya son bien conocidos y pueden modificarse para satisfacer los requisitos de muchas aplicaciones distintas. Entre las aleaciones de aluminio, las aleaciones endurecibles por precipitación (Al-Cu-Mg y Al-Zn-Mg-Cu) son de especial interés^[30-33]. La más importante y reciente incorporación a estas aleaciones es la de las aleaciones de Al-Li. El particular efecto del litio es que cuando se alea con aluminio, simultáneamente decrece la densidad y aumenta el módulo de elasticidad de la aleación. Por lo tanto, no sorprende que la industria aeroespacial esté interesada en los compuestos de matriz Al-Li^[34 y 35].

Aunque la fabricación de compuestos de matriz de aluminio reforzado con fibras continuas es bastante compleja y cara, se utiliza en algunas aplicaciones, principalmente en la industria aeroespacial.

Hoy en día, se pone un gran énfasis en la mejora de la eficiencia de las técnicas de producción en masa y la reducción de costes de producción. Una alternativa interesante es la de los materiales compuestos de base aluminio reforzados con partículas, que ofrecen propiedades más moderadas (desde el punto de vista mecánico), pero son mucho más baratos que los materiales reforzados con fibras continuas.

La tabla III [5] presenta costes relativos de métodos de procesado y tipos de refuerzos en materiales compuestos.

Por último, el hecho de que estos MMCs presenten buenos desarrollos desde el punto de vista de procesos secundarios, tales como el mecanizado o la soldadura, además de su posible reciclado en el caso de los compuestos reforzados con partículas, hace interesante que el uso de estos materiales en la vida cotidiana sea de alto interés.

5.1.1. Aluminio reforzado con partículas

Otra tendencia en la investigación de Al-MCs es el desarrollo de técnicas más baratas, especialmente para refuerzos discontinuos. El elevado consumo de aluminio monolítico permite el desarrollo de tecnologías eficientes y viables económicamente. Muchas de estas tecnologías se pueden aplicar perfectamente en la producción de Al-MCs. En la actualidad, pueden utilizarse métodos convencionales de conformado, como es el caso de la extrusión, forja y laminación.

Los procesos convencionales en estado líquido, como es el caso de varios métodos de fundición, y los métodos de metalurgia de polvos se utilizan para la obtención de Al-MCs reforzados con partículas. Nuevos procesos, como depositación por *spray* y las técnicas *in situ* son potencialmente muy eficientes

y económicos, por lo que se estudian con profusión [2, 7, 23, 36 y 37].

Las partículas de carburo de silicio (SiC) son uno de los refuerzos discontinuos más comúnmente utilizados en Al-MCs a pesar de que la densidad del SiC es ligeramente mayor que la del aluminio. Este alto interés se debe a su bajo precio, al hecho de poseer una buena gama disponible y de proporcionar al compuesto alta resistencia y módulo elástico. El aumento de la resistencia al desgaste es también un tema a considerar [13 y 37-40].

Otro tipo de refuerzo utilizado en Al-MC es la alúmina. En comparación con el SiC es mucho más inerte y también más resistente a la corrosión y conveniente para fabricación y uso a elevadas temperaturas [16 y 41]. Para resolver el problema de mojabilidad de la alúmina en el líquido, la matriz puede alearse y el refuerzo recubierto. Un proceso de producción en este sentido son los métodos de rociado (*spray*), donde una fase líquida, atomizada por un gas, rocía la preforma, recubriéndola e infiltrándola.

5.1.2. Obtención de materiales compuestos de matriz de aluminio por formación *in situ* [3 y 11]

El clásico ejemplo de procesado *in situ* de compuestos es la solidificación unidireccional de aleaciones eutécticas donde un componente es fabricado en forma de fibra o tira dentro del otro.

Sin embargo, los nuevos procesos que se están desarrollando se basan en dos principios: las reacciones controladas entre una aleación de metal líquido y un gas, y la consiguiente formación de refuerzos en el metal líquido, y las reacciones endotérmicas entre componentes para formar los refuerzos. Este último proceso se refiere a la síntesis autopropagante a elevadas temperaturas (SHS). Un ejemplo de reacciones controladas en el líquido es el proceso de oxidación *in situ* (uno de los más conocidos es el proceso Primex, desarrollado por Lanxide Corp.) [42]. En este proceso el aluminio líquido se oxida para formar una mezcla de alúmina y aluminio.

5.2. Materiales compuestos con matriz de titanio y sus aleaciones (Ti-MCs)

Un metal estructural importante, utilizado en aplicaciones aeroespaciales es el titanio. Es más denso que el aluminio y es el metal con la mejor relación de resistencia/densidad de entre todos los llamados

Tabla III. Tendencia de costes de métodos de fabricación de materiales compuestos de matriz metálica y refuerzos empleados

Table III. Cost trends for different manufacturing methods using different matrix and reinforcements

Proceso	Coste	Refuerzo
Unión por difusión		Monofilamentos
Pulvimetalurgia	↑	Whisker
Métodos spray		Fibra corta
Proceso en estado líquido		Partícula

ligeros (Al, Mg, Be) y que un acero de tipo medio^[43]. Por su elevado punto de fusión mantiene su resistencia a altas temperaturas, mucho mayores que el aluminio. Además, la resistencia a la corrosión y oxidación es buena y es el material ideal para la fabricación de motores a propulsión en la industria aeroespacial.

El problema de los Ti-MCs y su producción está relacionado con la extremada reactividad de la matriz. Durante el procesado a elevadas temperaturas, las reacciones entre la matriz y el refuerzo son difíciles de evitar y consecuentemente los recubrimientos de fibras son de especial interés. Por otro lado, la demanda de recubrimientos restringe la aplicación de refuerzos discontinuos. Si el titanio ya es muy caro, la producción de Ti-MCs lo es mucho más. Esto restringe las aplicaciones más genéricas a nivel de ingeniería^[5 y 12].

5.3. Materiales compuestos con matriz de magnesio y sus aleaciones (Mg-MCs)

Se han desarrollado de acuerdo con criterios similares a los de las aleaciones de aluminio. El magnesio es el más ligero de los metales estructurales, siendo, aproximadamente, un 35 % más ligero que el aluminio. El magnesio está presente en una gran gama de aleaciones y es relativamente fácil de colar.

Además, las propiedades mecánicas y rigidez de los Mg-MCs son comparables con los materiales de base aluminio y no sorprende los muchos esfuerzos que se invierten en el desarrollo del magnesio. Sin embargo, las propiedades frente a la corrosión de este material son pobres. Este problema se puede minimizar mediante técnicas de pintura y recubrimiento. Avances recientes en la tecnología de Mg-MCs, con matrices de alta pureza, han mejorado sustancialmente las características de corrosión de los Mg-MCs. Pese a todo no se utilizan en ambientes muy corrosivos. En la actualidad, los recubrimientos galvánicos mejoran la velocidad de corrosión del material reforzado con carbono, pese a que las fibras pueden separarse de la matriz.

Debido a la ligereza que se persigue en estos MMCs, se emplean muchas veces como refuerzo fibras de carbono, aunque la alúmina, el carburo de silicio y las fibras de boro son las más investigadas. El mayor problema es la baja mojabilidad del carbono por el magnesio líquido.

El elevado coste de estos materiales limita su uso a aplicaciones muy concretas, como por ejemplo, aplicaciones en satélites espaciales. Los traba-

jos de investigación se centran en mejorar la calidad y costes de las técnicas de producción^[5 y 12].

5.4. Otros materiales compuestos

Recientemente, se han desarrollado materiales compuestos de base hierro para reducir costes en componentes resistentes al desgaste en la industria química y en industrias de procesado. En estos casos, en los que la resistencia a la corrosión es particularmente deseada, además de la resistencia al desgaste, se pueden utilizar como material matriz varios tipos de acero inoxidable y superaleaciones.

Pese a que el que se encuentran en la frontera entre los metales y las cerámicas o en una hipotética clasificación dentro de los materiales compuestos podrían estar con los de matriz cerámica, vamos a tratar aquí, de forma sucinta, los intermetálicos como matriz^[44 y 45].

Los intermetálicos se han desarrollado activamente en los últimos años. Su resistencia a elevadas temperaturas y su resistencia a la oxidación es mucho mayor que la ofrecida por los materiales compuestos de matriz de titanio. Entre los más prometedores materiales resistentes a altas temperaturas están los intermetálicos ordenados Ni₃Al, NiAl, Ti₃Al y MoSi₂. Poseen elevada resistencia, elevado módulo elástico y buena resistencia a la fluencia. La mayor desventaja de estos materiales es su baja ductilidad a temperatura ambiente. Esto se convierte en una mayor dificultad para su procesado como componentes estructurales.

Una manera de mejorar la ductilidad del Ni₃Al es mediante adiciones de boro^[44]. Otra posibilidad potencial de aumentar la tenacidad es mediante la utilización de refuerzos para obtención de materiales compuestos. La ductilidad de los intermetálicos puede ser mejorada mediante refuerzos con fibras continuas. De nuevo, el problema fundamental es cómo evitar la indeseable reacción entre la matriz y el refuerzo^[5].

6. PROPIEDADES DE LOS MATERIALES COMPUESTOS

El control de las propiedades mecánicas reside en el concepto de la combinación de materiales metálicos tradicionales con fases de refuerzo. Bajo condiciones ideales, el compuesto exhibe un límite superior de propiedades mecánicas y físicas definida por la regla de las mezclas^[3]:

$$P_c = P_m F_m + P_r F_r$$

donde P_c , P_r y P_m son los valores de una propiedad determinada en el material compuesto, el refuerzo y la matriz, respectivamente, y F es la fracción volumétrica en cada caso. El valor inferior debe ser determinado en cada caso. Es importante conocer cuándo una propiedad de un material compuesto sigue la regla de las mezclas. Normalmente, se cumple usando fibras continuas como refuerzo (en la dirección de las fibras), y con interfaces entre refuerzo y matriz con buena unión.

Combinando matrices y refuerzos que exhiban propiedades apropiadas, se pueden obtener cambios importantes en resistencia, módulo elástico, tenacidad a la fractura, densidad, etc. La clave del control de estas propiedades depende en parte del éxito en la selección del refuerzo. Una de las tendencias seguidas en la fabricación de MMCs es bajar el coste, que generalmente se consigue a costa de bajar el nivel de propiedades.

6.1. Propiedades mecánicas

6.1.1. Comportamiento mecánico a temperatura ambiente ^[2 y 46-49]

6.1.1.1. Módulo de elasticidad

Los refuerzos cerámicos discontinuos de alto módulo, añadidos a matrices metálicas, producen un aumento de la rigidez del compuesto. Del mismo modo, la orientación preferente del *whisker* y fibras cortas en el compuesto provocan también un aumento de la rigidez en la dirección de alineamiento.

El módulo de elasticidad no aumenta de forma lineal con la fracción de volumen de refuerzo, como en el caso de alineamiento uniaxial de refuerzos continuos. Su incremento estará condicionado por el grado de alineamiento y la orientación de las fibras en la dirección del ensayo.

6.1.1.2. Límite elástico

La adición de refuerzos discontinuos en valores del 5 % o más, produce un aumento del límite elástico en una gran variedad de aleaciones de aluminio. En algunos casos, se pueden obtener pequeños aumentos en el límite elástico por la combinación del tipo de refuerzo y la elección adecuada de la matriz.

El tamaño de las partículas tiene un papel importante en el límite elástico. En general, refuerzos de pequeños tamaños propician altos valores en es-

ta propiedad (por ejemplo, adiciones de partículas de 3 μm pueden aumentar el límite elástico en 60-70 MPa cuando se comparan con refuerzos de 25 μm).

Los principales factores que contribuyen a la mejora del límite elástico son:

- tensiones térmicas residuales: se originan debido a la diferente contracción térmica de la matriz y del refuerzo. Bajo la aplicación de una carga exterior se producen tensiones localizadas que disminuyen el límite elástico efectivo del material. Se pueden utilizar muchos procesos para disminuir este efecto de tensiones térmicas en la matriz, como por ejemplo la relajación y formación de precipitados (θ' -CuAl₂), que producen cambios en el volumen y de esta forma compensan las tensiones internas residuales.
- mecanismos de refuerzo de la matriz: este efecto se refiere, principalmente, a las variaciones microestructurales relacionadas con el afino de tamaño de grano y aumento de la densidad de dislocaciones que se producen en el material. El control de estas variables depende de la vía de fabricación y del tamaño y fracción en volumen de las partículas de refuerzo.

6.1.1.3. Endurecimiento ^[2,50 y 51]

El comportamiento mecánico de los MMCs viene caracterizado por los elevados valores de la velocidad de endurecimiento tras el límite elástico. Esto se explica microestructuralmente en términos de transferencia de carga entre la matriz y el refuerzo. Se ha observado que esta velocidad aumenta con la relación longitud-diámetro de las partículas de refuerzo, lo que parece indicar la existencia de una transferencia de carga más efectiva para esta morfología.

6.1.1.4. Resistencia a la tracción

La resistencia a la tracción de materiales compuestos de matriz metálica reforzados con partículas depende de la relación entre dimensiones, fracción de volumen y distribución del refuerzo, de la aleación base, los tratamientos térmicos y de la unión refuerzo-matriz.

Los valores de resistencia de MMCs obtenidos con *whiskers* son superiores a los alcanzados con adiciones de $\delta\text{-Al}_2\text{O}_3$ de fibra corta. La resistencia a la tracción en la dirección de extrusión de compuestos reforzados con *whiskers* llega a duplicar los

valores alcanzados en aleaciones conformadas no reforzadas. Esto evidencia el efecto de alineamiento preferente de los *whiskers* por extrusión.

Se puede alcanzar un mayor aumento de resistencia mediante la reducción del tamaño de las partículas, llegando a un incremento de un 10 %, cuando comparamos partículas de 3 y 23 μm de tamaño.

En contrapartida, con el aumento de resistencia tenemos una reducción de la ductilidad, principalmente cuando superamos el 10 % de cantidad de refuerzo. Un tamaño más pequeño del refuerzo favorece la ductilidad.

6.1.1.5. Fractura

El examen de las superficies de fractura revela fractura dúctil de la matriz en la interfase fibra-matriz y fractura frágil del refuerzo.

La menor ductilidad se obtiene para aleaciones de gran resistencia (Al-Cu-Mg) reforzadas con elevadas fracciones en volumen de partículas de gran relación longitud/diámetro y alta fuerza de unión interfacial refuerzo-matriz.

La utilización de matrices de menor resistencia (Al-4Cu) y la reducción de la fuerza de unión refuerzo-matriz, resulta en un aumento de la ductilidad. La utilización de *whiskers* mejora la tenacidad a la fractura en comparación con el uso de fibras cortas.

Para los refuerzos con partículas, el control de los factores de fractura es más complejo. La tenacidad a la fractura decrece con el aumento de la fracción de volumen de partículas, a lo que ocurre de igual manera con los *whiskers*.

6.1.2. Propiedades mecánicas a temperaturas elevadas^[2]

Los MMCs experimentan un aumento en el módulo y resistencia a elevadas temperaturas respecto a las aleaciones no reforzadas. En el caso de la matriz de aluminio, la resistencia del compuesto puede sobrepasar los 200 MPa a temperaturas de 300 °C durante cortos periodos de tiempo. La exposición a tiempos mayores y ciclos térmicos produce la aparición de inestabilidades dimensionales.

6.1.2.1. Fatiga

En general, la mejora en el comportamiento a la fatiga es una de las características que hacen atractivos los MMCs.

En este tipo de ensayos, las grietas se inician, generalmente, en la interfase matriz/refuerzo, especialmente en agrupaciones de partículas de refuerzo. Uno de los aspectos más determinantes de la respuesta a la fatiga de los MMCs es el tamaño de partícula de refuerzo, aunque su efecto depende del tipo de ensayo en particular.

En la tabla IV se resumen algunas de las propiedades mecánicas de los MMCs^[2].

6.2. Propiedades térmicas

6.2.1. Coeficiente de expansión térmica

El valor del coeficiente de expansión térmica en MMCs depende de la fracción en volumen de refuerzo, así como de su morfología y distribución en la aleación base. El valor del coeficiente de expansión térmica puede verse modificado por el estado de precipitación de la matriz.

6.2.2. Conductividad térmica

La conductividad térmica de la aleación monolítica se reduce con un refuerzo cerámico discontinuo. La importancia de esta reducción depende, principalmente, de la fracción en volumen y distribución del refuerzo.

6.3. Comportamiento tribológico de los MMCs reforzados con partículas^[52]

El comportamiento tribológico de un material compuesto depende de las propiedades microestructurales del material y de la condición de carga y contacto (tribosistema). Bajo situaciones abrasivas y de deslizamiento, los materiales que contengan una elevada fracción de volumen de refuerzos duros exhiben elevada resistencia al desgaste. Para situaciones que combinan situaciones de carga e impacto, en la microestructura aparece alguna superficie de fatiga.

6.3.1. Fricción y deslizamiento

El comportamiento de fricción y desgaste de materiales compuestos depende de la naturaleza de las partículas de refuerzo y tiene relación con el contenido en la matriz. Las partículas pueden ser blandas o duras comparadas con la matriz. Las partículas cerámicas típicas, usadas como refuerzo son el carbono, SiC, Al₂O₃, que tienen baja adhesión para un hipotético contramaterial.

Tabla IV. Propiedades mecánicas de materiales compuestos de matriz metálica

Table IV. Mechanical properties of different metal matrix composites

Material	Método de fabricación	Módulo de elasticidad GPa	$\sigma_{0,2}$ MPa	$\sigma_{m\acute{a}x}$ MPa	Alargamiento %	Tenacidad a la fractura MPa m ^{1/2}
Al-Cu	<i>Squeeze cast</i>	70,5	174	261	14,0	-
Al-Cu + Al ₂ O ₃ (Vf=0,2 Fibra)	<i>Squeeze cast</i>	95,4	238	374	2,2	-
Al-Cu-Mg (T6) 2014	<i>Spray</i> (chapa)	73,8	432	482	10,2	-
Al-Cu-Mg + SiC(T6) Vf = 0,1, 10µm partic.	<i>Spray</i> (chapa)	93,8	437	484	6,9	-
Al-Cu-Mg (T4) 2124	Polvos laminados (chapa)	72,4	360	525	11,0	-
Al-Cu-Mg + SiC(T4) Vf = 0,17 - 3µm partic.	Polvos laminados (chapa)	99,3	420	610	8,0	18
Al-Cu-Mg (T6) 2124	Polvos laminados (chapa)	73,1	425	474	8,0	26
Al-Cu-Mg + SiC (T6) Vf = 0,17,3µm partic.	Polvos laminados (chapa)	99,6	510	590	4,0	17
Al-Si-Mg (T6) 6061	<i>Spray</i> + laminado (chapa)	69,0	240	264	12,3	-
Al-Si-Mg + SiC (T6) Vf= 0,1 - 10µm partic.	<i>Spray</i> + laminado (chapa)	91,9	321	343	3,8	-
Al-Zn-Mg-Cu (T6) 7075	<i>Spray</i> + extrusión	71,1	617	659	11,3	-
Al-Zn-Mg-Cu+SiC (T6) Vf= 0,12 -10µm partic.	<i>Spray</i> + extrusión	92,2	597	646	2,6	-
Al-Li-Cu-Mg (T6) 8090	<i>Spray</i> (chapa)	70,5	420	505	6,5	38
Al-Li-Cu-Mg + SiC (T6) Vf= 0,17 - 3µm partic.	<i>Spray</i> (chapa)	104,5	510	550	2,0	-

La rugosidad del contramaterial puede fácilmente surcar y/o carbonizar el material (esto no ocurre con otras partículas duras como Al₂O₃ o SiC). Las partículas carbonizadas son partículas blandas que contienen carbono y otros minerales (óxidos duros), y los compuestos que contienen fa-

ses carbonizadas exhiben mayor desgaste. El aluminio es más duro que las partículas carbonizadas pero más blando que el SiC, y los compuestos Al-Al₂O₃ muestran mayor desgaste que los Al-SiC pero menor desgaste que un compuesto de aluminio y partículas carbonizadas.

Sin embargo, compuestos de base aluminio que contengan grafito tienen un menor desgaste, debido a que el grafito no es solamente blando sino que también cizalla a lo largo del plano basal de su estructura hexagonal compacta, susceptible al ambiente y la acción de lubricantes sólidos.

Compuestos que contienen lubricantes sólidos como el grafito tienen bajo desgaste debido a que se transfieren a la tribosuperficie con la consiguiente formación de una película entre la matriz del compuesto y el contramaterial. De esto, podemos concluir que los refuerzos de partículas duras producen menor desgaste por deslizamiento en los compuestos, con la excepción de los lubricantes sólidos. Otra conclusión importante es que la resistencia al desgaste puede aumentarse por el incremento de la fracción volumétrica. El coeficiente de fricción es mayor para partículas con mayor dureza.

6.3.2. Fricción y desgaste abrasivo

La resistencia a la abrasión normalmente se determina por dos ensayos diferentes: a) ensayo de bajas tensiones, con una rueda de goma y b) ensayo con altas tensiones, como son *pin-on-disk* y *pin-on-drum*. En el ensayo de bajas tensiones, las partículas no frenan, y en el ensayo de altas tensiones, las partículas frenan. Las partículas abrasivas son generalmente redondeadas, o trituradas en varios tamaños y forma. El tamaño y la forma de las partículas abrasivas, así como la dureza, son importantes parámetros para determinar el desgaste. Cuando el tamaño de las partículas abrasivas es inferior a 1 μm , el mecanismo de desgaste que predomina es el abrasivo.

En materiales compuestos de matriz metálica, como en materiales monolíticos, el desgaste abrasivo comporta la formación de surcos, acanaladuras, estrías y deformación plástica por penetración de las partículas duras. Las tensiones desarrolladas durante las interacciones entre las partículas duras pueden exceder los límites de resistencia requeridos para deformaciones plásticas localizadas, en el caso de ruedas de goma. Para ensayos de altas tensiones, la superficie rígida del contramaterial del disco o tambor, provoca una interacción entre partículas muy severa, provocando un amplio desprendimiento por fractura de partículas duras, pero frágiles.

6.3.3. Mecanismos de desgaste abrasivo en compuestos que contienen partículas duras

El desgaste abrasivo puede clasificarse tomando como base a la naturaleza de la interacción, en

desgaste con dos o tres cuerpos. En desgaste abrasivo con dos cuerpos, éste es fuertemente dependiente de la tenacidad a la fractura y no meramente de la resistencia del compuesto, debido a que la propagación de grietas es el factor de control.

En el desgaste abrasivo con tres cuerpos, las partículas abrasivas (como arena silíceo) tienden a romper y penetrar en aleaciones de la matriz relativamente blanda. Sin embargo, las partículas duras en los materiales compuestos resisten el arañazo, debido a su elevada dureza bajo pequeñas cargas, y se agrietan en pequeñas piezas para elevadas cargas. Las partículas rotas permanecen empujadas en la matriz durante el proceso de desgaste. En este caso, la resistencia del compuesto y la tenacidad a la fractura de ambos juegan un papel importante.

6.3.4. Mecanismos de desgaste abrasivo en compuestos que contienen partículas blandas

Un compuesto típico de este grupo es un MMC/grafito o el MMC/MoS₂. La formación de una película lubricante en la tribosuperficie se considera como responsable del bajo coeficiente de fricción y desgaste de estos compuestos. El área recubierta por la película, como está relacionada con la fracción de volumen de partículas blandas, es el factor de control.

7. APLICACIONES DE LOS MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ METÁLICA

Todas las ventajas ofrecidas por los MMCs posibilitan una serie de aplicaciones en diferentes sectores de la industria^[53-61].

7.1. Industria aeronáutica

Las principales propiedades requeridas para materiales de aplicación aeronáutica son elevada resistencia, rigidez y bajo peso; por lo tanto, los materiales compuestos de matriz metálica presentan un gran potencial en este área de aplicación.

Los MMCs estudiados para estas aplicaciones son esencialmente los reforzados con fibras continuas, ya que los *whiskers* y partículas no ofrecen resistencia suficiente a altas temperaturas. Los materiales más desarrollados en este área son los MMCs de matriz de titanio o intermetálicos reforzados con monofibras. Actualmente son pocos los componentes utilizados en aviones.

7.2. Industria de la automoción

En la actualidad, la industria del automóvil está afrontando retos tecnológicos importantes como los referidos a la reducción del consumo de combustible, reducción de emisiones, reciclado de materiales y aumento, en general, del rendimiento. Los materiales avanzados tienen mucho que decir en la mejora tecnológica necesaria para afrontar estos retos. Particularmente, los MMCs son especialmente prometedores debido a sus buenas propiedades y a la posibilidad de adaptar esas propiedades a aplicaciones concretas. Hasta el momento, la principal barrera para su introducción viene impuesta por la viabilidad económica. En este sentido, el uso de materiales compuestos de matriz de aluminio con refuerzo discontinuo resulta especialmente ventajoso.

La reducción del peso total del vehículo es importante para reducir el consumo de combustible. Por tanto, el uso de materiales compuestos de matriz de aluminio en componentes de frenos, especialmente los discos, está suscitando un gran interés. El peso de un disco de freno puede reducirse en un 60 % si se sustituye la fundición convencional por un MMC adecuado. La elevada conductividad térmica del aluminio reforzado con SiC proporciona ventajas adicionales en su posible incorporación a los sistemas de frenado.

Asimismo, existe un importante número de aplicaciones de los MMCs en el motor. Algunas compañías de automóviles están desarrollando piezas de aleaciones de aluminio para el motor, con la intención de reducir el peso y, por tanto, el consumo. Estas aleaciones, sin embargo, no pueden utilizarse en las zonas de más responsabilidad del cilindro, donde las condiciones de trabajo son muy severas y las propiedades de resistencia al desgaste, la fatiga y la fluencia del material muy importantes, de modo que la mayoría de los fabricantes introducen fundición en esta zona. Algunos MMCs ofrecen la posibilidad de sustituir esta fundición con el consiguiente ahorro de peso, y ya se están utilizando comercialmente, aunque su rendimiento económico a largo plazo no se ha contrastado suficientemente.

Los MMCs también se tienen en cuenta para la fabricación de bielas y pistones. Reducir el peso de estos componentes conlleva un importante beneficio. En motores de cuatro cilindros, con capacidad superior a los dos litros, se producen vibraciones en la unión biela/pistón que pueden reducirse disminuyendo la masa del sistema. Esto puede conse-

guirse, por ejemplo, con bielas obtenidas a partir de MMCs de aluminio con refuerzo discontinuo consistentes en una aleación de la serie 2XXX reforzada con partículas de carburo de silicio (SiC). Asimismo, se pueden obtener pistones a partir de MMCs de aluminio con refuerzo discontinuo, procedentes de forja.

A pesar del gran número de aplicaciones que se han encontrado para los MMCs en la industria de automoción, es importante tener en cuenta varias dificultades que deberán ser superadas antes de la introducción a gran escala de estos materiales. En primer lugar, deben desarrollarse técnicas que permitan un mecanizado rápido y barato de los MMCs.

También es importante perfeccionar y aplicar la tecnología del reciclado. Actualmente, el reciclado de materiales de aluminio es una actividad rentable ya que se consigue ahorrar hasta el 95 % de la energía al producirlo a partir de chatarra. En el sector de automoción, ya se consigue reciclar el 90 % del aluminio utilizado, de modo que esta actividad da respuesta a dos importantes problemas del mundo actual: es buena para el medio ambiente y es económica.

Una deficiencia técnica adicional asociada al uso de MMCs en la industria del automóvil es el desconocimiento de las variables que controlan propiedades como la resistencia a la fatiga, fluencia, desgaste y corrosión, que impide optimizar el diseño de estos materiales.

7.3. Industria de armamento

Ya se han realizado investigaciones en el sentido de utilizar MMCs en misiles, siendo esta una reciente área de aplicación. Una de las aplicaciones es la fabricación de esferas de guía inercial de misiles, donde el requisito crítico es la rigidez del material. MMCs con elevada fracción volumétrica de partículas (40 %) reforzando una aleación de aluminio, en sustitución del berilio, produce una reducción en costes y evita problemas asociados con la toxicidad del berilio.

7.4. Industria electrónica

Las aplicaciones de los materiales compuestos en electrónica están relacionadas con el comportamiento térmico.

Elevadas fracciones volumétricas de partículas reforzando matrices de aluminio, o fibras de carbono reforzando aluminio, pueden combinar

adecuadamente el coeficiente de expansión térmica con el de un sustrato, mejorando la conductividad térmica y disminuyendo considerablemente el peso.

7.5. Industrias para aplicaciones en ocio

La utilización de los materiales compuestos de matriz metálica se ha evaluado para muchas aplicaciones en diferentes tipos de equipos deportivos, como, por ejemplo, palos de golf, componentes para bicicletas (cuadro, corona, etc.), siendo difícil saber la importancia real de los MMCs en estas aplicaciones, pues en este sector es común aplicar estos materiales, más por una estrategia comercial que propiamente por la ventajas técnicas.

8. CONCLUSIÓN

Los materiales compuestos de matriz metálica están en una situación industrial que, podríamos considerar, como de maduración de la tecnología. Es por ello que aún se debe esperar de ellos un importante crecimiento en su utilización y aplicaciones. Si consideramos además, que los materiales de base aluminio y reforzados con partículas pueden obtenerse mediante técnicas de conformado baratas y de grandes series, se augura para esta familia de materiales un futuro prometedor.

REFERENCIAS

- [1] M.F. ASHBY, *Acta Metall. Materialia*, 41 (1993) 1313-1335.
- [2] S.J. HARRIS, *AGARD Lectures. Series nº 174: New Light Alloys*, 1990: 4:1-4:21.
- [3] D.L. ERICH, *Prog. Powder Metall.* 46 (1986) 45-65.
- [4] F. VELASCO, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, 1994.
- [5] V.K. LINDROOS y M.J. TALVITIE, *J. Mater. Proc. Technol.* 53 (1995) 273-284.
- [6] I.J. POLMEAR, *Light Alloys: Metallurgy of the Light Metals*, Ed. Arnold, London, Reino Unido, 1995.
- [7] W.H. HUNT y T.J. RODJOM, *Adv. Powder Metall. Particulate Mater.* 9 (1992) 21-31.
- [8] H.E. DEVE y C. MCCULLOUGH, *J. Mater.* Julio (1995) 33-37.
- [9] J.W. KACZMAR y K.U. KAINER, *Powder Metall.* 35 (1992) 133-136.
- [10] T. ZHANG, J.R.G. EVANS y M.J. BEVIS, *Int. J. Powder Metall.* 32 (1996) 331-339.
- [11] T. NUKAMI y M.C. FLEMINGS, *Metall. Mater. Trans. A*, 26A (1995) 1877-1884.
- [12] F. HEHMANN y F.H. FROES, *Proc. World Congress on Powder Metallurgy*, SF2M, Paris, Francia, vol. III, 1994, pp. 1591-1604.
- [13] A.J. MOURISCO, F. AMBROSIO FILHO y J.L. ROSSI, *Proc. of the World Congress on Powder Metallurgy*, SF2M, Paris, Francia, vol. III, 1994, pp. 959-962.
- [14] G. STANIEK, F. LEHNERT, M. PETERS y W.A. KAYSER, *Proc. of the World Congress on Powder Metallurgy*, Kyoto, Japón, 1993, pp. 867-870.
- [15] C-H. LEE, S-Y. SHIN, K.T. KIM y B-K. SUH, *Adv. Powder Metall. Particulate Mater.* 8 (1992) 71-80.
- [16] F. BONOLLO, L. CESCHINI y G.L. GARAGNANI, *Appl. Compos. Mater.* 1 (1997) 173-185.
- [17] D.E. ALMAN, J.A. HAWK, A.V. PETTY-JR. y J.C. RAWERS, *J. Mater.* Marzo (1994) 31-35.
- [18] J.L. GONZÁLEZ-CARRASCO, F. GARCÍA-CANO, G. CARUANA y M. LIEBLICH, *Mater. Sci. Eng.* A183 (1994) L5-L8.
- [19] C.E. COSTA, W.C. ZAPATA, J.M. TORRALBA, J.M. RUIZ-PRieto y V. AMIGÓ, *Mater. Sci. Forum*, 217-222 (1996) 1859-1864.
- [20] C. FERRER, V. AMIGÓ, M.D. SALVADOR, D. BUSQUETS y J.M. TORRALBA, *Rev. Metal. Madrid* 34 (1998) 232-236.
- [21] C.E. COSTA, Tesis de la Universidad Politécnica de Madrid, 1998.
- [22] M. MACLEAN y R.P. DOWER, *Proc. of the World Congress on Powder Metallurgy*, Inst. of Materials, London, Reino Unido, 2, 1990, pp. 251-254.
- [23] J. KRYZE, V. DJAFARI, D. BAPTISTE y D. FRANÇOIS, *Proc. of the World Congress on Powder Metallurgy*, SF2M, Paris, Francia, vol. III, 1994, pp. 963-1966.
- [24] O. BOTSTEIN, E.Y. GUTMANAS y D. ZAK, *Horizons of Powder Metallurgy, Part II*, 1986, pp. 961-964.
- [25] A.F. WHITEHOUSE y T.W. CLYNE, *Acta Metall. Mater.* 43 (1990) 2107-2114.
- [26] K. SUGANUMA, *Proc. of the World Congress on Powder Metallurgy*, Kyoto, Japón, 1, 1983, pp. 630-633.
- [27] C.P. YOU, M. DOLLAR, A.W. THOMPSON e I.M. BERNSTEIN, *Metall. Trans. A*, 22A (1991) 2445-2450.
- [28] D.J. LLOYD, *Adv. Struct. Mater.* (1990) 1-21.
- [29] *Powder Metallurgy - Metals Handbook*, ASM, vol. 7, 9ª ed. 1984.
- [30] ALCOA. *Aluminium Powders in Powder Metallurgy. Metal Powder Report*, 35 (5) 1980, pp. 187-191.
- [31] W.J. ULLRICH, *Progr. Powder Metall.* 46 (1986) 535-556.
- [32] D.P. VOSS, *Mod. Dev. Powder Metall.* 13 (1981) 467-481.
- [33] H-C. SHIH, N.J. HO y J.C. HUANG, *Metall. Mater. Trans. A*, 27A (1996) 2479-2494.
- [34] M.J. TAN, L.H. KOH, Y. MURAKOSHI y T. SANO, *Proc. of the World Congress on Powder Metallurgy*, SF2M, Paris, Francia, vol. III, 1994, pp. 1987-1990.
- [35] J.C. LASALLE, R.L. BYE, D. RAYBOULD y S.K. DAS, *Adv. Powder Metall.* 3 (1989) 225-236.

- [36] S. HOLECEK, M. PRAZÁK, M. PROCIO y A. AL-RASHED, *Proc. of the World Congress on Powder Metallurgy*, SF2M, Paris, Francia, vol. III, 1994, pp. 1631-1634.
- [37] F.H. FROES, C. SURYANARAYANA, P.R. TAYLOR, C.M. WARD-CLOSE y P. GOODWIN, *Powder Metall.* 39 (1996) 63-65.
- [38] T. MARCELO, M.H. CARVALHO, H. CARVALHINHOS, Y. SONG y T.N. BAKER, *Proc. of the Euro PM'95: Light Alloys*, 1995, pp. 181-188.
- [39] R. SAGAR, P.K. MADAN, M. KUMAR y S. SACHDEVA, *Adv. Powder Metall. Particulate Mater.* 9 (1992) 45-56.
- [40] U.V. BHANUPRASAD, R.B.V. BHAT, A.K. KURUVILLA, K.S. PRASAD, A.B. RANDEY e Y.R. MAHAJAN, *Int. J. Powder Metall.* 7 (1991) 227-235.
- [41] T. DAS, P.R. MUNROE y S. BANDYOPADHYAY, *J. Mater. Sci.*, 31 (1996) 5351-5361.
- [42] C.R. KENNEDY, *Satellite Symposium 2 on Advanced Structural Inorganic Composites of the 7th International Meeting on Modern Ceramics Technologies (7th CIMTE- World Ceramic Congress)*, (De. P. Vincenzini, Londres, Elsevier), 1991, pp. 671-700.
- [43] P. TARÍN, *Rev. Metal. Madrid*, 26 (1990) 395-409.
- [44] P. PÉREZ, Tesis Doctoral de la Universidad Complutense de Madrid, 1996.
- [45] P. PÉREZ, J.L. GONZÁLEZ-CARRASCO y P. ADEVA, *Rev. Metal. Madrid* 34 (1998) 18-28.
- [46] J. TROXEL, *Adv. Mater. Proc.* 6 (1995) 35-37.
- [47] C.R. HARRIS y F.E. WAWNER, *Tensile Strength. The Metallurgical Society*, Ed. P. Kumar, 1988, pp. 107-117.
- [48] P.S. MISRA y G.S. UPADHYAYA, *Int. J. Powder Met.* 11 (1975) 129-134.
- [49] E. SHALUNOV e I. ROMANENKO, *Colloquium: Controlling the Properties of Powder Metallurgy Parts Through their Microstructure*, Paris, Francia, marzo 1990, pp. 29.1-29.6.
- [50] R.J. ARSENAULT, L. WANG y C.R. FENG, *Acta Metall. Mater.* 39 (1991) 47-57.
- [51] W.S. MILLER y F.J. HUMPHREYS, *Scr. Metall. Materialia*, 25 (1991) 33-38.
- [52] *Friction, Lubrication and Wear Tecnology: Friction and Wear of Metal-Matrix Composites*, ASM, vol. 18, 1992, pp. 801-811.
- [53] A.R. BEGG, *Metal Powder Report*, 1991, pp. 42-45.
- [54] W.A. KAYSSER, *Proc. of the World Congress on Powder Metallurgy*, SF2M, Paris, Francia, vol. I, 1994, pp. 3-10.
- [55] T. KOIKE y H. YAMAGATA, *Proc. of the World Congress on Powder Metallurgy*, SF2M, Paris, Francia, vol. III, 1994, pp. 1627-1630.
- [56] C.G.E. MANGIN, J.A. ISAACS y J.P. CLARCK, *JOM* Febrero (1996) 49-51.
- [57] V. ARNHOLD, K. HUMMERT, J. BAUGARTEN y G. BROCKMANN, *Adv. Powder Metall.* 2 (1989) 201-202.
- [58] T.B. GURGANUS, *Adv. Mater. Proc.* 8 (1995) 57-59.
- [59] S. PICKERING, *Metal Powder Report* Junio, 1995, pp. 30-33.
- [60] D.GRIFFITHS, *Metal Powder Report* Enero, 1994, pp. 8-9.
- [61] S. SURESH, A. MORTENSEN y A. NEEDLEMAN, *Butterworth-Heinemann*, 1993.