

La Infiltración no asistida como una técnica de procesamiento de compósitos Al/SiC

Resumen

En este trabajo se pretende describir la técnica de infiltración no asistida como una ruta alternativa en el procesamiento de compósitos Al/SiC. También se discuten algunos parámetros que se deben controlar adecuadamente, como lo es la formación de productos indeseables, mojabilidad, atmósfera de procesamiento, elementos aleantes, etc. Asimismo se pretende dar una breve descripción acerca de los compósitos de matriz metálica para, de esta manera, conocer la importancia que tienen esta clase de materiales en nuestra sociedad hoy en día.

Palabras claves: compósitos, mojabilidad, infiltración no asistida, SiC.

1. Introducción

Los compósitos de matriz metálica (en adelante referidos como CMM) son una clase de materiales que poseen propiedades que los hacen atractivos para una gran variedad de aplicaciones donde se requiere de resistencia al desgaste o abrasión, resistencia mecánica, estabilidad química, así como de estabilidad dimensional a temperaturas relativamente elevadas [1]. Debido a las propiedades anteriormente mencionadas, estos materiales han encontrado una aplicación directa en la industria automotriz, aeroespacial, militar, electrónica y la industria de equipos deportivos de alto desempeño.

Una técnica de procesamiento de los CMM es el método de infiltración, en el que se aprovechan las ventajas de utilizar el metal en estado líquido. Además, el uso de preformas cerámicas ofrece una valiosa flexibilidad en cuanto a la forma y a las operaciones de acabado de la pieza final. En general, la fuerza motriz para la infiltración de un metal líquido dentro de una preforma cerá-

mica es la aplicación de fuerzas externas (asistida por presión o vacío) o por el fenómeno de capilaridad [2]. Aunque la infiltración asistida por presión es una de las técnicas que más se utiliza industrialmente, el desarrollo de técnicas de infiltración sin la aplicación de fuerzas externas es de vital importancia para abatir los costos de procesamiento. Otras desventajas relacionadas la infiltración asistida incluyen la deformación y/o ruptura de la preforma cerámica durante el procesamiento, limitando seriamente la técnica.

Bajo condiciones especiales se pueden infiltrar de manera exitosa preformas de un material cerámico sin el empleo de fuerzas externas. A esta operación se le ha denominado "infiltración no asistida" o "infiltración espontánea".

Investigaciones recientes [3-7] han demostrado que existe el potencial de fabricar compósitos por infiltración no asistida de preformas de partículas de SiCp por aleaciones de aluminio. Sin embargo, existen ciertas barreras en el procesamiento que pueden limitar su aceptación comercial, por ejemplo, la presencia de porosidad residual en los compósitos y el desarrollo de reacciones indeseables en la interfase metal/cerámico.

2. Compósitos de matriz metálica (CMM)

Los compósitos se definen como un sistema de materiales formado por una mezcla o combinación de dos o más constituyentes que difieren en su forma y composición química [8]. La idea original de utilizar los CMM, es el de incorporar una segunda fase de alto desempeño en un material convencional de ingeniería para producir una combinación con características no obtenibles a partir de los constituyentes individuales [9].

Los compósitos de matriz metálica reforzados con partículas cerámicas son materiales de gran interés para muchas aplicaciones, tanto por sus elevadas propiedades mecánicas debidas a su relación resistencia-peso, en comparación con las aleaciones no reforzadas, como por su capacidad de mantener su comportamiento en ambientes agresivos o a temperaturas relativamente altas [10]. La combinación de un refuerzo cerámico, capaz de soportar cargas elevadas, con una matriz ligera, proporciona estas propiedades [11]. Otras ventajas de los CMM es que no son flamables, no dejan escapar gases en el vacío, y sufren un mínimo ataque químico por los fluidos orgánicos tales como combustibles y solventes [9].

Un importante criterio en el desempeño de estos materiales es la resistencia a la fatiga, particularmente en los componentes automotrices [12]. La primera aplicación comercial de los CMM fueron pistones para motores diesel por la Toyota (1982) para después usarlos en partes de transmisión. También la Honda ha aplicado estos materiales en los cilindros de bloques de motores de aluminio [13].

La mayor parte del trabajo comercial sobre los CMM se ha enfocado en el aluminio como la matriz metálica. La combinación de peso ligero, resistencia al medio ambiente y propiedades mecánicas han hecho que las aleaciones de aluminio sean muy populares. Estas propiedades también hacen que el aluminio sea una buena elección para ser utilizado como una matriz metálica; el punto de fusión del aluminio (660°C) es lo suficientemente alto para satisfacer muchos requisitos de aplicaciones térmicas pero lo suficientemente bajo para proporcionar un procesamiento óptimo del compósito [9].

Cabe mencionar que la mayor parte de los CMM se desarrollaron originalmente para la industria aeroespacial. Sin embargo, en la actualidad algunos de estos materiales han encontrado aplicación en partes de automóviles, blindaje balístico e inclusive en artículos deportivos [14].

3. Métodos de procesamiento de los CMM

Los métodos de procesamiento de los CMM se pueden agrupar en tres categorías que emplean: 1) el metal en estado sólido, 2) el metal en estado líquido y 3) las fases sólido-líquido7 (Fig. 3.1). El método en estado

sólido ha sido muy exitoso, pero tiene la desventaja de ser muy costoso, comparado con el proceso en estado líquido. Con respecto a la categoría de procesamiento con el metal en estado líquido, el método de infiltración ofrece flexibilidad en cuanto a la forma y operaciones de acabado debido al uso de preformas cerámicas. Por ejemplo, la obtención de formas cuasinetas permite minimizar el proceso de maquinado para el acabado de las piezas fabricadas. Además, mediante el empleo de preformas cerámicas con una porosidad controlada se obtiene una buena distribución de las partículas de reforzamiento dentro del compósito.

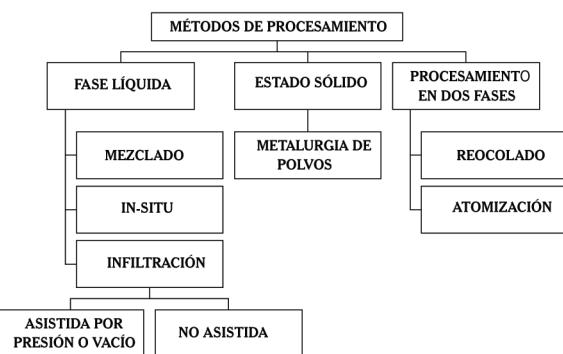


FIGURA 3.1 MÉTODOS DE PROCESAMIENTO DE COMPÓSITOS METAL/CERÁMICO [15].

4. Procesamiento de compósitos Al/SiC_p por infiltración no asistida

En general, la infiltración de un cuerpo poroso por un líquido se lleva a cabo por la aplicación de vacío o una fuerza para promover la penetración del líquido dentro de los poros (Figura 4.1 [16]). Sin embargo, bajo condiciones especiales puede obtenerse la infiltración satisfactoriamente sin la ayuda de fuerzas externas. Esto normalmente se conoce como "infiltración sin presión" o "infiltración espontánea". El término "infiltración espontánea" puede ser confundido con la idea de que la infiltración ocurre "instantáneamente". En realidad, la infiltración espontánea no se refiere a la cinética del proceso, sino a que las condiciones termodinámicas del proceso son tales que la infiltración es autopromovida.

La infiltración de un cuerpo poroso por un líquido es más convenientemente modelada aproximando el cuerpo poroso como una multitud de capilares cilíndricos a través de los cuales sube el líquido, como se ilustra en la figura 4.2 [3]. En dicha figura R es el radio

del capilar y q es el ángulo de contacto entre las partículas sólidas y el líquido.

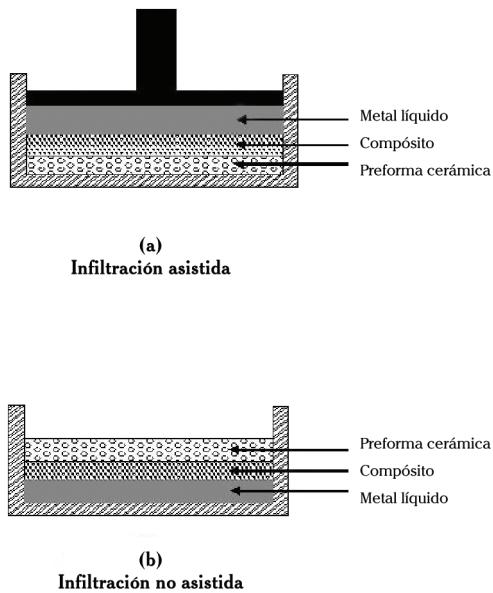


FIGURA 4.1 REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DEL MÉTODO DE PROCESAMIENTO POR INFILTRACIÓN, A) ASISTIDA POR PRESIÓN O VACÍO Y B) NO ASISTIDA.

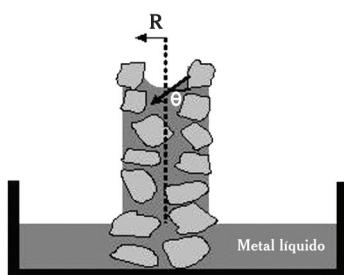


FIGURA 4.2 REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA QUE MUESTRA CÓMO SUBE UN LÍQUIDO EN UN CANAL CAPILAR QUE ESTÁ FORMADO ENTRE PARTÍCULAS EN UN CUERPO POROSO [3].

Algunos modelos predicen la presión requerida para la infiltración de un cuerpo poroso en términos del tamaño del poro [17-20]. Una relación matemática conveniente para la modelación de la infiltración de preformas fabricadas por compactación de polvos con un control de la fracción de volumen de las partículas está dado por la Ec. 4.1.

$$\Delta P = \frac{6\lambda\gamma_v \cos\theta(1-\omega)}{D\omega}$$

La ecuación 4.1 fue propuesta por S.Y. Oh y col. *** [3,21], donde ΔP es la presión capilar o presión crítica

necesaria para iniciar la infiltración, D es el diámetro promedio de las partículas, ω es la fracción de poros en la preforma, λ es un factor geométrico (usualmente igual a 1.4), γ_v es la tensión superficial líquido-vapor y θ es el ángulo de contacto.

5. Parámetros de procesamiento que afectan la producción de compósitos Al/SiC_p

Durante el procesamiento existen varios parámetros que afectan la tensión superficial y el ángulo de contacto entre el aluminio y las partículas de SiC. Estos incluyen: adiciones de aleantes al aluminio, atmósfera del proceso, temperatura y tiempo de infiltración. Se ha encontrado que el magnesio y el silicio son los elementos aleantes más importantes de las aleaciones de aluminio que han sido diseñadas para la infiltración de camas empacadas y preformas de SiC [3,22]. Ambos elementos reducen el punto de fusión del aluminio e incrementan su fluidez al fundirse. Por una parte, el Si tiene un importante papel en prevenir o retardar la formación de los compuestos Al₄C₃ y Al₄SiC₄ durante la fabricación de compósitos de Al/SiC. Ambos carburos disminuyen las propiedades mecánicas. Por otra parte, el Mg es un poderoso surfactante que consume el oxígeno presente al formar la espinela MgAl₂O₄ en la interfase Al/SiC [23-24]. Además de incrementar la fuerza motriz para el mojado, esta reacción consume el oxígeno presente en la superficie del reforzamiento, disminuye el espesor de la capa de óxido y por lo tanto, mejora el mojado [25]. También se ha encontrado que el efecto combinado del nitrógeno en la atmósfera del horno y el magnesio en la aleación juegan un papel esencial para alcanzar el mojado del SiC por el Al fundido [3,22,26].

En resumen las características de infiltración de una preforma cerámica se ven afectadas tanto por las condiciones de procesamiento (tiempo, temperatura, atmósfera, etc.), como por la composición de la aleación y los parámetros de la preforma (porcentaje de porosidad, tipo de reforzamiento, condición superficial del reforzamiento, etc.).

6. Aspectos sobre mojabilidad

La mojabilidad entre los metales y los cerámicos es un fenómeno muy importante para una gran gama de aplicaciones industriales relacionadas con la fabricación

de materiales compósitos metal-cerámico y uniones metal-cerámico [4].

La mojabilidad es un término que es comúnmente utilizado para describir la distribución de un líquido sobre un sólido. Una buena mojabilidad es una condición esencial para la generación de la unión adecuada entre la fase cerámica y la matriz metálica líquida. Una buena mojabilidad es necesaria para producir una resistencia lo suficientemente fuerte en la interfase metal-cerámico para la transferencia y distribución de la carga de la matriz al reforzamiento sin provocar la falla [27-29]. Además, es deseable que los productos de reacción que se forman en la interfase metal/cerámico sean termodinámicamente estables y mecánicamente resistentes.

Desde el punto de vista práctico, una condición para lograr que una aleación de aluminio infiltre en una pre-forma cerámica es que la aleación de aluminio fundido moje la superficie de la preforma de partículas de SiC_p cerámica y por lo tanto se extienda sobre ella.

Cuando un líquido entra en contacto con un sólido se crea una nueva interfase y el líquido puede o no, extenderse sobre la superficie. De acuerdo con la termodinámica, el líquido se extenderá sólo si la energía resultante de la nueva interfase sólido-líquido es menor que la correspondiente interfase sólido-vapor. Cuanto mayor sea esta diferencia de energía, mayor será la extensión de la superficie de contacto entre el líquido y el sólido. La fuerza que conduce el proceso de mojado está, por lo tanto, relacionada con la diferencia de energía entre las interfases sólido-vapor y sólido-líquido. Sin embargo, debido a que la configuración de energía superficial más baja es una esfera, hay una fuerza adicional que se resiste a la extensión de la superficie del líquido. Este comportamiento se estudia a menudo experimentalmente en función del ángulo de contacto θ , entre la gota del líquido y el sólido tal como se muestra en la figura 6.1. La forma de la gota es una función de tres términos de energía, como lo describe la ecuación clásica de Young [28,30]:

$$\gamma_{sv} = \gamma_{sl} + \gamma_{lv} \cos \theta \quad 6.1$$

donde γ_{sv} , γ_{sl} y γ_{lv} son las energías interfaciales de las interfases sólido-vapor, sólido-líquido y líquido-vapor, respectivamente.

Un líquido mojará un sólido ($\theta < 90^\circ$) cuando la energía neta del sistema disminuya como consecuencia de la formación de la interfase sólido-líquido. Cuanto mayor sea el grado de mojado, más pequeño será el ángulo θ . Por supuesto, ningún líquido exhibirá el ángulo de contacto máximo de 180° , incluso en el caso de que el líquido no moje al sólido, debido a la influencia distorsionante de la gravedad en la gota del líquido [31].

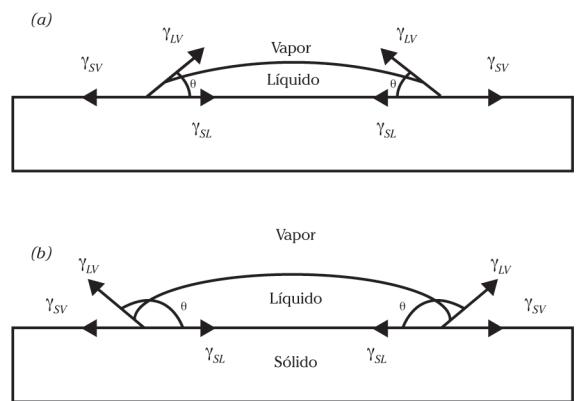


FIGURA 6.1 CONFIGURACIONES DE LA GOTÁ ESTÁTICA PARA LAS SITUACIONES EN QUE EL LÍQUIDO MOJA EL SÓLIDO, (A) Y EL LÍQUIDO NO MOJA AL SÓLIDO, (B)

El límite entre las condiciones de mojado y no mojado se toma generalmente como $\theta = 90^\circ$, por lo que se considera que la condición de mojado existe cuando $\theta < 90^\circ$ y cuando $\theta > 90^\circ$ la condición de no mojado [5,32].

7. Conclusiones

Por todo lo anteriormente mencionado, existe el potencial de fabricar compósitos por infiltración no asistida de preformas de partículas de SiC_p por aleaciones de aluminio, aún a expensas de que existen ciertas barreras en el procesamiento las cuales pueden limitar su aceptación comercial, como lo es la presencia de porosidad residual en los compósitos y el desarrollo de reacciones indeseables en la interfase metal/cerámico. Sin embargo llevando a cabo un buen control de cada uno de los parámetros antes mencionados es posible obtener compósitos con excelentes propiedades mecánicas, además de costos de procesamiento mucho más bajos que otras técnicas de proceso. T

8. Referencias

- [1] MORTENSEN, S. SURESH
(1995) Functionally Graded Metals and Metal-Ceramic Composites: Part 1 Processing. International Materials Reviews Vol. 40, pp. 239-265.
- [2] Y. KAJIKAWA, T. NUKAMI, M.C. FLEMINGS
(1995) Pressureless Infiltration of Aluminum Metal-Matrix Composites. Metallurgical Materials and Transactions A Vol. 26 A, pp. 2155 -2159.
- [3] M.I. PECH-CANUL, R.N. KATZ, M.M. MAKHLOUF
(2000) Optimum Conditions for Pressureless Infiltration of SiCp Preforms by Aluminium Alloys. Journal of Materials Processing Technology Vol. 108, pp. 68-77.
- [4] M.I. PECH-CANUL, R.N. KATZ, M.M. MAKHLOUF
(2000) The Role of Silicon in Wetting and Pressureless Infiltration of SiCp Preforms by Aluminum Alloys. Journal of Materials Science Vol. 35, pp. 2167-2173.
- [5] ZULFIA, R.J. HAND
(2002) The production of Al-Mg alloy/SiC metal matrix composites by pressureless infiltration. Journal of Materials Science Vol. 37, pp. 955-961.
- [6] J.A. AGUILAR MARTÍNEZ, M.I. PECH-CANUL, M. RODRÍGUEZ REYES, J.L. DE LA PEÑA
(20-26/Jul/2003) Effect of Mg and SiC Type on the Degree of Infiltration and Residual Porosity of Al-Si-Mg/SiC Composites Processed by Pressureless Infiltration. Tenth International Conference on Composites/Nano Engineering, New Orleans, EUA, pp. 11-12.
- [7] J.A. AGUILAR-MARTÍNEZ, M.I. PECH-CANUL, M. RODRÍGUEZ REYES, J.L. DE LA PEÑA
(2004) Effect of Mg and SiC Type on the Processing of Two-Layer Al/SiC Composites by Pressureless Infiltration. Journal of Materials Science Vol. 39, pp. 1025-1028.
- [8] W.F. SMITH
(1998) Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales, España, McGraw-Hill, Tercera Edición, 453-760, 678-681.
- [9] J. R. DAVIS
(1998) Aluminium and Aluminium Alloys. ASM Specialty Handbook, pp. 160-179.
- [10] D.J. LLOYD
(1994) Particle Reinforced Aluminium and Magnesium Matrix Composites. Int. Mat. Rev Vol. 39, pp. 1-22.
- [11] J.M. UREÑA, GÓMEZ DE SALAZAR, L. GIL, P. RODRIGO, E. E. MARTÍNEZ
(2000) Estudio de la Reactividad entre Aleaciones de Aluminio y Partículas de SiC. Bol. Soc. Esp. Cerám. Vidrio Vol. 39, pp. 243-250.
- [12] N. CHAWLA, C. ANDRES, J.W. JONES, J.E. ALLISON
(1998) Effect of SiC Volume Fraction and Particle Size on the Fatigue Resistance of a 2080 Al/SiCp Composite. Metallurgical and Materials Transaction A Vol. 29A, pp. 2843.
- [13] Y. KAJIKAWA, T. NUKAMI, M.C. FLEMINGS
(1995) Pressureless Infiltration of Aluminum Metal-Matrix Composites. Metallurgical Materials and Transactions A Vol. 26A, pp. 2155.
- [14] R.L. WILLIAMSON, J.T. DRAKE, R.H. RABIN
(1991) Numerical Modeling of Interface Residual Stresses in Graded Ceramic-Metal Materials, Developments in Ceramic and Metal-Matrix Composites. Ed. Kamleshwar Upadhyay, The Minerals, Metal and Materials Society, pp. 241-251.
- [15] T. NISKIOTA
(1992) New development in Advanced Ceramics. Ira ed., Asahi Kousoku Insactu K.K. Japón, pp. 185-196.
- [16] MARIO RODRÍGUEZ REYES
(2001) Tesis de Maestría en Ciencias de la Ingeniería Cerámica, Cinvestav-Saltillo.
- [17] S. GLASS, D. J. GREEN
(1999) Permeability and Infiltration of Partially Sintered Ceramic. Journal of American Ceramic Society Vol. 82, pp. 2745-2752.
- [18] S. M. SWEENEY, M. J. MAYO
(1999) Relation of Pore Size to Green Density: The Kozeny Equation. Journal of American Ceramic Society Vol. 82, pp. 1931-1933.
- [19] G. H. GEIGER, D. R. POIRIER
(1973) Transport Phenomena in Metallurgy. Addison-Wesley Publishing Company.
- [20] R. LENORMAND, D. SCHLUMBERGER
(1987) Statical Physical and Immiscible Displacements Trough Porous Media. American Institute of Physics.

- [21] A.Y. OH, J. A. CORNIE, K. C. RUSSEL
 (1989) Wetting of ceramic particulates with liquid aluminum alloys: part I. Experimental techniques. Metallurgical Transactions A, Vol. 20A, pp. 527-532.
- [22] DONALD R. ASKELAND
 (1998) Ciencia e Ingeniería de los Materiales. México, International Thomson Editores.
- [23] M.I. PECH-CANUL, R.N. KATZ, M.M. MAKHLOUF
 (2000) Optimum Parameters for Wetting Silicon Carbide by Aluminum Alloys. Metallurgical and Materials Transactions A Vol. 31A, pp. 565-573.
- [24] M. I. PECH-CANUL, R. N. KATZ, M. M. MAKHLOUF.
 (2000) The combined Role of Nitrogen and Magnesium in Wetting SiC by Alluminum Alloys. XXII Congreso Internacional de Metalurgia y Materiales, Instituto Tecnológico de Saltillo, México, pp. 232-241.
- [25] A.C. FERRO, B. DERBY
 (1995) Wetting Behaviour in the Al-Si/SiC System: Interface Reactions and Solubility Effects. Acta Metallurgical Materialia Vol. 43, pp. 3061-3073.
- [26] A.-Y. OH, J.A. CORNIE, K.C. RUSSELL
 (1989) Wetting of Ceramic Particulates with Liquid Aluminum Alloys: Part II. Study of Wettability. Metallurgical Transactions A Vol. 20A, pp. 533-541.
- [27] A.- Y. OH, J.A. CORNIE, K. C. RUSSELL
 (1989) Wetting of Ceramic Particulates with Liquid Aluminum Alloys: Part I. Experimental Techniques. Metallurgical Transactions A Vol. 20A, pp. 527-532
- [28] CONTRERAS C., V.H. LÓPEZ M, E. BEDOLLA B.
 (1999) Mojabilidad e Infiltración del TiC por el Aluminio y sus Aleaciones. XXI Congreso Internacional de Metalurgia y Materiales, Instituto Tecnológico de Saltillo, México, pp. 317.
- [29] M.J. PASCUAL, L. PASCUAL, A. DURAN
 (1997) Vidrios y Vitrocerámicos para Soldadura: Usos Tradicionales y Nuevas Áreas de Aplicación. Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio Vol. 36, pp. 390-395.
- [30]
 (1992) Technical Brief 26: Metal-Matrix Composites (MMCs), ASM Material Engineering Dictionary.
- [31] V. M. KEVORKIAN
 (1999) Commercial Viability of MMC in the Automotive Industry. The American Ceramic Society Bulletin Vol. 78, pp. 67-70.
- [32]
 (2001) Wetting and Surface Tension Measurements on Gold Alloys. Enrica Ricci and Rada Novakovic. Gold Bulletín Vol. 34, pp. 41-49.

J. A. Aguilar-Martínez^{a*}, M. B. Hernández^b, M. A. Loubet^a y M.I. Pech-Canul^c

^a Instituto de Minería, ^b Instituto de Diseño; Universidad Tecnológica de la Mixteca. ^c Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN-Unidad Saltillo.