

Influencia de la distribución de las fibras en la conductividad térmica de materiales compuestos con matrices de aleaciones de titanio y de magnesio

D. Alcaraz*, F. Alhama** y J.A. Moreno***

Resumen Los “composites” de matriz metálica son materiales de uso creciente en distintas aplicaciones industriales. En general, la determinación de su conductividad térmica no considera el tipo de distribución de los refuerzos en el seno de las matrices. Aplicando el Método de Redes, se diseña un modelo (2D) cuya simulación numérica permite obtener valores precisos de conductividad en “composites” con distribuciones aleatorias. El modelo se aplica a “composites” con matrices de aleaciones de titanio y magnesio reforzados con diferentes tipos de fibras continuas.

Palabras clave Composites. Matriz metálica. Conductividad térmica.

Effect of fibers distribution on the thermal conductivity of titanium and magnesium matrix composites

Abstract Metal matrix composites are materials with an increasing use in industrial applications. Generally, the estimation of their thermal conductivity does not take into account the type of reinforcements distribution within the matrix. By applying the Network Simulation Method, a 2-D network model is designed and simulated to determinate precise numerical values of thermal conductivity of composites with random distributions. The proposed model is applied to titanium and magnesium matrix composites reinforced with different types of continuous fibers.

Keywords Composites. Metal matrix. Thermal conductivity.

1. INTRODUCCIÓN

Las propiedades mecánicas de los materiales compuestos de matriz metálica (“MMCs”) han sido objeto de numerosos estudios y trabajos^[1-6]. Sin embargo, se ha prestado menos atención a sus propiedades térmicas que, en muchas aplicaciones, desempeñan un papel primordial (materiales para elevadas temperaturas, problemas de “choque” térmico, necesidad de materiales aislantes o conductores del calor, etc.)^[7 y 8]. Además de su evaluación experimental^[9], las propiedades térmicas de estos materiales suelen estimarse mediante métodos, aproximados y sencillos, que tienen en cuenta las propiedades individuales de matrices y refuerzos y sus proporciones de masa, o volumen, en el ma-

terial. En ocasiones, los resultados obtenidos se alejan mucho de sus valores reales.

En este trabajo se plantea la estimación numérica de la conductividad térmica de “composites” mediante modelos obtenidos por el Método de Simulación por Redes (MESIR)^[10], y simulados con PSPICE^[11 y 12], cuya efectividad ha sido contrastada en numerosos trabajos en el campo de la transferencia de calor^[13 y 14].

El modelo propuesto se aplica a materiales compuestos con matriz de aleación de titanio, reforzada con fibras continuas de boro y de carburo de silicio, y con matriz de aleación de magnesio, reforzada con fibras continuas de alúmina y de grafito. Para cada matriz, refuerzo y distintas proporciones de estos constituyentes se han ensayado diferentes

(*) Universidad Politécnica de Cartagena. Dpto. de Ingeniería de Materiales y Fabricación. Campus Paseo Alfonso XIII. 30203-Cartagena (España).

(**) Universidad Politécnica de Cartagena. Dpto. de Física Aplicada. Campus Muralla del Mar. 30202-Cartagena (España).

(***) Universidad Politécnica de Cartagena. Dpto. de Ingeniería Mecánica. Campus Muralla del Mar. 30202-Cartagena (España).

clases de distribuciones aleatorias, obteniéndose para cada distribución los valores límite (mínimo y máximo) de conductividad térmica en la dirección normal a la orientación de las fibras. Los valores conseguidos se comparan y analizan para conocer el efecto del tipo de refuerzo, su distribución y su proporción. Los datos de conductividad térmica de matrices y fibras son los suministrados por los fabricantes de estos materiales o por la base de datos *on-line* MATWEB^[15].

2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El modelo matemático 2D está definido por el siguiente conjunto de ecuaciones:

$$\nabla[k_{\xi} \nabla(T)] = 0 \quad (1)$$

$$T(\mathbf{r},0) = T_{ini} \quad (2)$$

$$\mathbf{j}(\mathbf{r},t) = 0 \text{ (superficies adiabáticas)} \quad (3)$$

$$T(\mathbf{r},0) = T_o \text{ (superficies isotermas)} \quad (4)$$

donde, k es la conductividad térmica, ξ se refiere al componente (1:matriz, 2:refuerzo), $T(\mathbf{r},t)$, la temperatura, $\mathbf{j}(\mathbf{r},t)$, el vector densidad de flujo de calor (Wm^{-2}), \mathbf{r} y t , las variables independientes posición y tiempo. La ecuación (1) es la de conducción de calor en estado estacionario, la ecuación (2) es la condición inicial y las ecuaciones (3) y (4) representan las condiciones de contorno (Fig. 1).

Como asumen otros autores^[7], la aproximación de fibras de sección circular por fibras con una sección cuadrada del mismo valor, no introduce errores apreciables en los resultados finales. De esta manera, el tamaño del elemento de volumen para

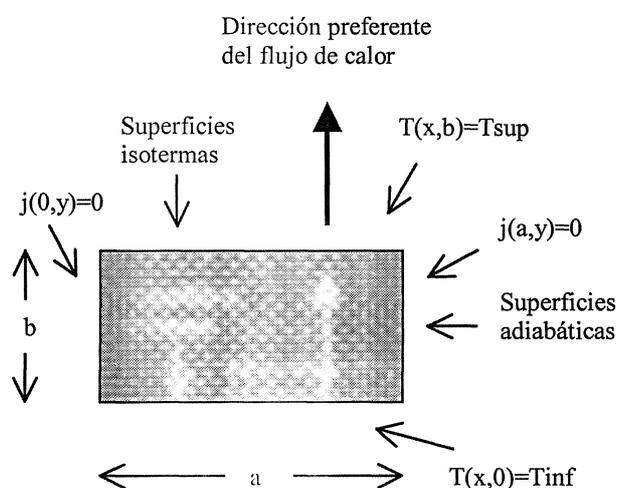


Figura 1. Geometría del modelo, $b \ll a$.

Figure 1. Geometry of the model, $b \ll a$.

ambos materiales es $\Delta x = (\pi D^2/4)^{1/2}$, siendo Δx el lado de la celda y D el diámetro de la fibra.

3. MODELO DEL MÉTODO DE SIMULACIÓN POR REDES

En coordenadas cartesianas (con $\Delta x = \Delta y$), y de acuerdo con la nomenclatura de la figura 2, la ecuación (1) discretizada en coordenadas espaciales conduce a:

$$\frac{k_{\xi}(T_{i-\Delta x,j}-T_{i,j})/(\Delta x/2)-k_{\xi}(T_{i,j}T_{i+\Delta x,j})/(\Delta x/2)+k_{\xi}(T_{i,j-\Delta y}-T_{i,j})/(\Delta y/2)-k_{\xi}(T_{i,j}T_{i,j+\Delta y})/(\Delta y/2)=0 \quad (5)$$

en la que ij ($0 < i < N_x$, $0 < j < N_y$) designa el número de celda. $\Delta x = a/N_x$ y $\Delta y = b/N_y$, donde N_x y N_y son los números de celdas en las direcciones x y y respectivamente.

Si llamamos (eliminando la variable ξ para mayor claridad)

$$j_{i,j,1} = (2/\Delta x)k(T_{i-\Delta x,j} - T_{i,j}) \quad (6)$$

$$j_{i,j,2} = (2/\Delta x)k(T_{i,j} - T_{i+\Delta x,j}) \quad (7)$$

$$j_{i,j,3} = (2/\Delta y)k(T_{i,j-\Delta y} - T_{i,j}) \quad (8)$$

$$j_{i,j,4} = (2/\Delta y)k(T_{i,j} - T_{i,j+\Delta y}) \quad (9)$$

la ecuación (5) se convierte en: $j_{i,j,1} - j_{i,j,2} + j_{i,j,3} - j_{i,j,4} = 0$, equivalente a la ley de corrientes de Kirchhoff en circuitos eléctricos. La relación entre la corriente eléctrica y la tensión permite deducir el valor de las resistencias eléctricas del modelo

$$R_{i-\Delta x,j} = R_{i+\Delta x,j} = R_{i,j-\Delta x} = R_{i,j+\Delta x} = \Delta x/2k \quad (10)$$

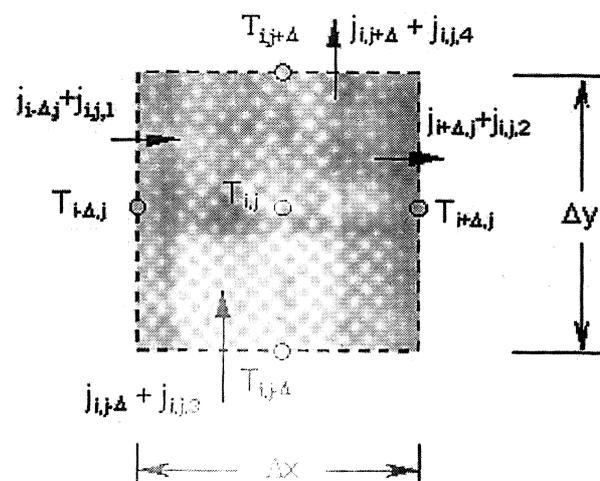


Figura 2. Nomenclatura de flujos de calor y temperaturas en la celda.

Figure 2. Nomenclature of heat flows and temperatures in the cell.

cuya implantación en el modelo en red de la celda se muestra en la figura 3. Aunque las fibras utilizadas tienen sección circular, la elección de celdas cuadradas constituye en principio una buena aproximación. Para reproducir todo el medio se conectan en serie N_x por N_y celdas (intercalando convenientemente el refuerzo en la matriz) y se añaden las condiciones de contorno. En cuanto a las condiciones de contorno isotermas se implementan pilas del valor adecuado en cada uno de los nudos de la superficie correspondiente. Para la condición adiabática es suficiente conectar resistencias de valor elevado en las celdas bajo esta condición.

Una vez elaborado el modelo el valor de la conductividad térmica del material compuesto (k_{MC}) se obtiene a partir de los datos de su simulación en PSPICE, dividiendo la diferencia de potencial (diferencia de temperaturas, $T_o - T_{ini}$) entre la intensidad de corriente eléctrica total (densidad de flujo de calor, j_{total}), suma de las intensidades de corriente de todas las pilas.

$$k_{MC} = (T_o - T_{ini}) / (j_{total}) \quad (11)$$

4. APLICACIONES

Se han estudiado “composites” integrados por dos tipos de matrices metálicas. La primera matriz es la aleación de titanio Ti-6242 (Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo), de baja conductividad térmica ($k = 7,1$ W/mK) y que se considera reforzada con fibras continuas de boro ($k = 25$ W/mK) y de carburo de silicio ($k = 150$ W/mK). La segunda matriz es la aleación

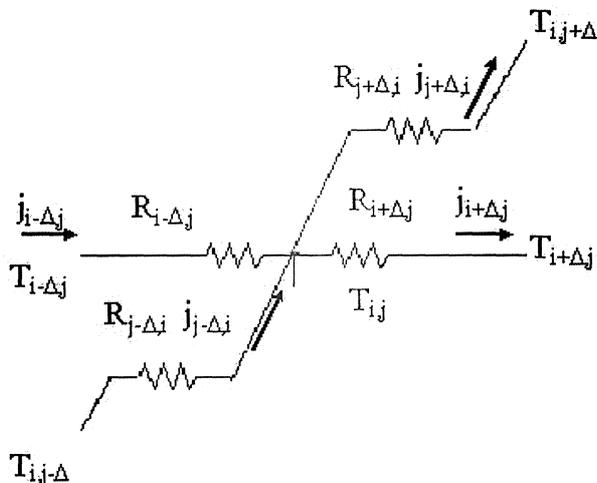


Figura 3. Modelo en red de la celda elemental, con indicación de los nudos.

Figure 3. Network model for the elementary cell, with the nodes indicated.

Rev. Metal. Madrid Vol. Extr. (2005) 299-303

de magnesio AZ31B-F, con una conductividad más alta ($k = 96$ W/mK), y que contiene como aleantes más importantes aluminio (2,5-3,5 %) y cinc (0,6-1,4 %). Las fibras que se han utilizado como refuerzo de esta aleación son fibras continuas de alúmina, con $k = 30$ W/mK, y grafito, con k (transversal) = 5 W/mK.

De acuerdo con el modelo propuesto, el elemento de volumen de material compuesto se caracteriza por presentar una longitud considerablemente mayor que su espesor (flujo de calor preferentemente en dirección transversal). Cualquier sección transversal de éste tiene forma rectangular y se divide en 150 celdas que pueden ser ocupadas por el material matriz o por la fibra, originando diferentes distribuciones (Fig. 4).

Se ensayaron 50 distribuciones aleatorias distintas para cada porcentaje de refuerzo. La elección de este número proviene de experiencias previas que indican que, a partir de unas 40 distribuciones, los valores medios, máximos y mínimos de conductividad se estabilizan. Todas las distribuciones aleatorias se utilizaron en las diferentes combinaciones de matriz y fibras consideradas.

Cada una de las distribuciones se obtuvo mediante un programa de generación de números aleatorios. Así, por ejemplo, para un porcentaje de refuerzo del 15 %, una de las series generadas se muestra en la Figura 4, donde se aprecia la distribución del refuerzo en la matriz (celdas de matriz en blanco, celdas de refuerzo en gris).

Para cada distribución se creó un fichero del modelo, se definieron los subcircuitos para ambos materiales y se situó el refuerzo. La simulación en PSPICE permitió establecer el valor de conductividad térmica asociado a cada distribución. De este modo se calcularon los valores límites (máximos

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75
76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105
106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120
121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135
136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150

Figura 4. Sección transversal de material compuesto dividida en 150 celdas.

Figure 4. Cross-section of composite divided into 150 cells.

y mínimos) y medios de conductividad térmica para diferentes porcentajes de refuerzo en cada uno de los tipos de "composites". Las figuras 5 a 7 muestran los resultados alcanzados.

La figura 5 recoge los valores máximos, mínimos y medios de conductividad para "composites" de aleación de titanio Ti-6242 con diferentes porcentajes de fibras continuas de boro y de carburo de silicio.

Del mismo, la figura 6 ilustra los resultados que se alcanzan cuando una matriz de aleación de magnesio AZ31B-F se refuerza con fibras continuas de alúmina y de grafito.

Analizando las gráficas anteriores se observa que, en las distintas proporciones de refuerzo analizadas, la separación entre las curvas correspondientes a los valores límites de conductividad es tanto mayor cuanto más elevada es la diferencia de conductividades térmicas entre matriz y fibras. En

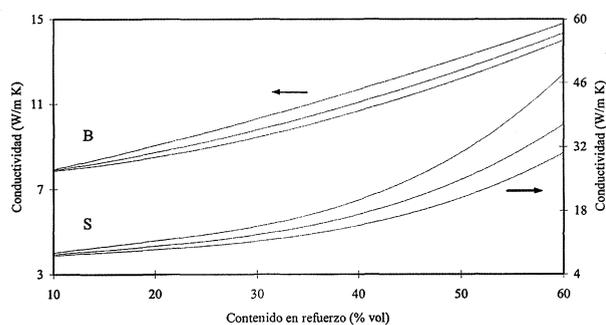


Figura 5. Conductividades térmicas de "composites" con matriz de aleación Ti-6242 reforzados con fibras continuas de boro (curva B) y de carburo de silicio (curva S).

Figure 5. Values of thermal conductivity for titanium (Ti-6242) matrix composites reinforced with continuous fibers of: boron (curve B) and silicon carbide (curve S).

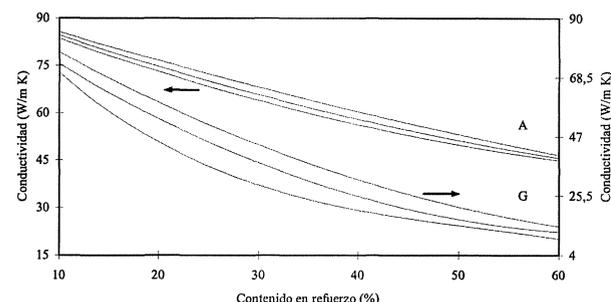


Figura 6. Conductividades térmicas de "composites" con matriz de aleación AZ31B-F reforzados con fibras continuas de alúmina (curva A) y de grafito (curva G).

Figure 6. Values of thermal conductivity for magnesium (AZ31B-F) matrix composites reinforced with continuous fibers of: alumina (curve A) and graphite (curve G).

estos casos los errores cometidos en la determinación de la conductividad del "composite" pueden ser considerables. Estos errores se convierten en irrelevantes para combinaciones de matrices y refuerzos con valores de conductividades térmicas cercanos.

Por último, la figura 7 resume los valores medios de conductividad térmica obtenidos para "composites" con las matrices de aleación de titanio y de magnesio en función del tipo de fibras usadas y del porcentaje de estas últimas.

5. CONCLUSIONES

Se han determinado los valores de conductividad térmica de materiales compuestos con matrices de aleación de titanio Ti-6242 y de aleación de magnesio AZ31B-F. En el caso de la matriz de aleación de titanio los refuerzos empleados son fibras continuas de boro y de carburo de silicio. Para la matriz de aleación de magnesio los refuerzos utilizados son fibras continuas de alúmina y de grafito. Los modelos numéricos usados permiten establecer, de un modo preciso y fiable, los valores de conductividad térmica de un "composite" en función de la matriz, el refuerzo y el porcentaje de este último. Para distribuciones aleatorias, si se representan en una misma gráfica las curvas correspondientes a valores máximos y mínimos de conductividad en función del porcentaje de refuerzo, se observa que, a medida que éste se eleva, aumenta la separación entre las curvas. Esta separación es más acusada para matrices y fibras con conductividades térmicas muy diferentes. En distribuciones aleatorias, cuanto mayor es la diferencia entre las

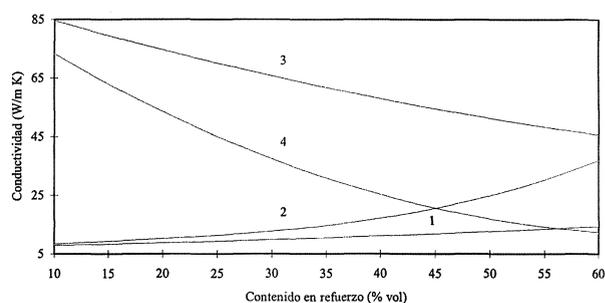


Figura 7. Conductividades medias para "composites" de aleación Ti-6242 (1: fibras de boro, 2: fibras de carburo de silicio) y de aleación AZ31B-F (3: fibras de alúmina, 4: fibras de grafito).

Figure 7. Average values of thermal conductivity for composites with matrices of Ti-6242 (1: boron fibers, 2: silicon carbide fibers) and AZ31B-F (3: alumina fibers, 4: graphite fibers).

conductividades térmicas de matriz y fibras, mayor es el error en la estimación de dicha propiedad.

REFERENCIAS

- [1] ASM, *ASM Handbook*, Vol. II, Ohio, USA, 2002.
- [2] L. BANKS-SILLS y V. LEIDERMAN, *Composites Part B: Eng.* 30 (1999) 443-452.
- [3] C. EDIL, F. VELASCO y J. TORRALBA, *Rev. Metal. Madrid* 36 (2000) 179-192.
- [4] C. EDIL, F. VELASCO y J. TORRALBA, *Rev. Metal. Madrid* 36 (2000) 193-197.
- [5] S.T. MILEIKO, V.M. KIIKO, A.A. KOLCHIN, V.P. KORZHOV y V.M. PROKOPENKO, *Compos. Sci. Technol.* 62 (2002) 181-193.
- [6] D.H. PAHR y S.M. ARNOLD, *Composites Part B: Eng.* 33 (2002) 153-170.
- [7] P.E. PHELAN y R.C. NIEMANN, *J. Heat Transfer*, 120 (1998) 971-976.
- [8] G.P. PETERSON y L.F. FLETCHER: *AIAA 22nd Thermophysics Conf.*, Paper No AIAA-87-1586, Honolulu, Hawaii, USA, 1987.
- [9] ASTM, *Standard Test Method for Thermal Diffusivity of Solids by the Flash Method*, ASTM Designation: E1461-92, 1992, pp. 933-940.
- [10] C.F. GONZÁLEZ-FERNÁNDEZ y F. ALHAMA, *Heat Transfer and the Network Simulation Method*. In *Network Simulation Method*, Ed. Research Signpost, Trivandrum, India, 2002, pp. 35-58.
- [11] MICROSIM CORPORATION, *PSPICE 6.0.*, Microsim Corporation, Irvine, California, USA, 1994.
- [12] L.W. NAGEL, *SPICE, A Computer Program to Simulate Semiconductor Circuits*, University of California, USA, 1975.
- [13] F. ALHAMA y A. CAMPO, *Int. Comm. Heat Mass Transfer* 28 (2001) 127-137.
- [14] F. ALHAMA y A. CAMPO, *Appl. Therm. Eng.* 23 (2002) 37-47.
- [15] MATWEB, Virginia, USA, 2002, <http://www.matweb.com>.