

CONDUCTIVIDAD TERMICA DE UN MATERIAL DISPERSO Y POROSO

THERMAL CONDUCTIVITY OF A DISPERSED POROUS MATERIAL

A. Denis, A. Soba

Dto. Combustibles Nucleares, Centro Atómico Constituyentes, CNEA
 AVDA. GRAL. PAZ 1499 (B1650KNA) SAN MARTIN - PCIA. DE BUENOS AIRES - Argentina
 E-MAIL: SOBA@CNEA.GOV.AR

En este trabajo se presenta un modelo para la conductividad térmica de una material compuesto como el utilizado para la construcción de combustibles tipo placa para reactores de investigación. El mismo se incluye en un código computacional denominado DPLACA que simula el comportamiento de dichos combustibles en operación. Los resultados se comparan con datos experimentales y con modelos teóricos incluidos en otros códigos similares.

A model to describe the thermal conductivity of a composite material of the type generally used to construct the fuel plates of research reactors is presented in this work. The model is included in the computer code DPLACA that simulates the normal operation behavior of such fuels. The results of the calculations are compared with experimental data and with results of other codes.

Palabras clave: Conductividad térmica, combustibles dispersos, Materiales porosos.

Keywords: Thermal conductivity, dispersed fuel, porous material.

I. INTRODUCCIÓN

Los combustibles tipo placa más utilizados en reactores de investigación se componen básicamente de partículas de un compuesto de uranio disperso en una matriz de aluminio formando un *meat* que se lamina entre dos placas también de aluminio, en general de una aleación diferente. El interior del *meat* contiene una distribución de poros que no alcanzan a ser llenados por el material de la matriz y cumplen con la finalidad de alojar, al menos en parte, los gases que se producen por fisión del uranio. Para quemados prolongados del combustible, se producen burbujas en el interior de las partículas debidas a la precipitación de los productos de fisión gaseosos. Su presencia también altera a la conductividad térmica del conjunto pero de manera diferente a los poros de fabricación.

Como la función de los reactores de investigación no es generar energía, la temperatura de trabajo de estos combustibles en general no supera los 120°C.

Históricamente, la utilización de aluminuros y óxidos de uranio con muy alto enriquecimiento (90% en el isótopo U^{235}) permitían lograr una buena relación entre la cantidad de material fisil, la distribución de temperatura y el número de neutrones generados. Recientemente, la necesidad de reconvertir los núcleos a combustibles de bajo enriquecimiento (inferior al 20% en U^{235}), ha originado la búsqueda de aleaciones de uranio denominadas de *alta densidad*, para contrarrestar la disminución de este isótopo con una mayor carga total de uranio y obtener la misma cantidad de neutrones necesaria para el funcionamiento del reactor. En esta línea se inscriben los combustibles basados en partículas de U_3Si_2 o de aleaciones U-Mo dispersas en una matriz de Al. En estos últimos, durante el quemado del combustible, se forman alrededor de las partículas

capas de aluminuros, de conductividad térmica muy diferente a la de la matriz y de la partícula.

Determinar un modelo teórico adecuado de la conductividad térmica de este tipo de materiales, que contemple la presencia de poros, burbujas y posibles compuestos intermetálicos es imprescindible para los códigos de cálculo que simulan el comportamiento del combustible en operación, ya que influye en la determinación de la distribución de temperatura, que a su vez condiciona el comportamiento mecánico.

En este trabajo se propone un modelo para la conductividad térmica de materiales compuestos y porosos como los utilizados en placas combustibles para reactores investigación.

Este modelo fue aplicado al caso de partículas de U_3Si_2 y de UMo dispersas en Al y los resultados se compararon con valores experimentales y con los de otros modelos analíticos y numéricos.

II. DPLACA

El modelo se incluye como parte de un programa de cálculo complejo denominado DPLACA, que se utiliza para simular el comportamiento bajo irradiación de un combustible disperso tipo placa.

DPLACA calcula la distribución de temperatura en la placa combustible, las deformaciones termo-elasto-plásticas, el hinchado y el crecimiento de intermetálicos, a partir de la historia de potencia del combustible y de las condiciones de operación del reactor, como temperatura y caudal del refrigerante. Los modelos de DPLACA son no lineales y se resuelven básicamente por el método de elementos finitos considerando dos cortes del dominio (Figura 1) y suponiendo deformación plana.

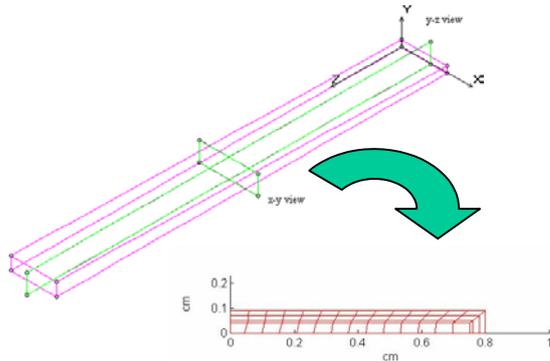


Figura 1: Las dos visiones de DPLACA. El modelo es cuasi tridimensional pues realiza un corte xy y otro yz.

III. CONDUCTIVIDAD TERMICA

Para calcular la conductividad térmica efectiva de un material formado por partículas dispersas en una matriz de otro constituyente, suponemos, en primer lugar, que las partículas dispersas son esféricas, de tamaño uniforme y que ocupan una fracción f del volumen,

$$f = \frac{\text{volumen de partículas}}{\text{volumen de partículas} + \text{volumen de la matriz}}$$

Si las partículas tienen radio R_1 y hay N_1 partículas por unidad de volumen del material, resulta,

$$f = (4/3)\pi R_1^3 N_1$$

Si suponemos, además, que cada partícula está completamente rodeada por la matriz, podemos asociar a cada una una celda de volumen $V_1=1/N_1$ (Figura 2). Suponemos que la celda que contiene una partícula es un cubo de arista L_1 , o sea, $L_1=(N_1)^{-1/3}$. La yuxtaposición de celdas como ésta tantas veces como partículas estén presentes, genera todo el material disperso.

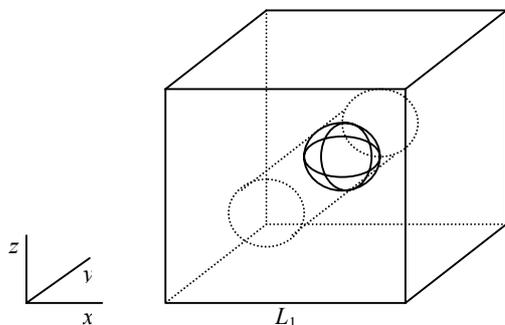


Figura 2. Esquema del modelo propuesto

Consideramos que el calor fluye únicamente en la dirección y . Para calcular la conductividad efectiva del material compuesto, construimos un tubo cilíndrico de

generatriz paralela al eje y y de igual radio que la partícula (Figura 2). A través de la cara xz , el calor atraviesa dos materiales en paralelo: el cilindro que contiene a la partícula y el material de la matriz. Si designamos con k_c y k_m a las conductividades térmicas respectivas, y con k_d a la del material compuesto, tenemos

$$k_d = (\pi R_1^2 / L_1^2) k_c + [1 - (\pi R_1^2 / L_1^2)] k_m$$

donde se ha tenido en cuenta la fracción de área ocupada por cada componente.

Pero el calor que se transmite a través del cilindro encuentra a dos materiales distintos en serie: uno es el de la matriz y el otro, el de la partícula. Luego, la conductividad equivalente del cilindro está dada por

$$k_c^{-1} = 2R_1 / L_1 \cdot k_p^{-1} + (1 - 2R_1 / L_1) \cdot k_m^{-1}$$

donde k_p representa a la conductividad térmica de las partículas dispersas y se ha tenido en cuenta la fracción de longitud del cilindro ocupada por cada componente. Reuniendo ambas expresiones, resulta la siguiente relación entre la conductividad efectiva de la dispersión y la de la matriz:

$$\frac{k_d}{k_m} = 1 - \pi \left(\frac{R_1}{L_1} \right)^2 \cdot \left[1 - \frac{k_p / k_m}{2R_1 / L_1 + (1 - 2R_1 / L_1) k_p / k_m} \right]$$

Dado que la fracción en volumen ocupada por las partículas, es $f = (4/3)\pi R_1^3 / L_1^3$, la conductividad efectiva resulta

$$\frac{k_d}{k_m} = 1 - \frac{3f / 2(k_m / k_p - 1)}{1 + 2(3f / 4\pi)^{1/3} (k_m / k_p - 1)} \quad [1]$$

Si el material disperso, además, contiene poros, la conductividad efectiva del sistema podrá calcularse por aplicación sucesiva de la expresión anterior. En efecto, introduciendo la porosidad, P , definida como

$$P = \frac{\text{vol. de poros}}{\text{vol. de poros} + \text{vol. de partículas} + \text{vol. de la matriz}}$$

y considerando que cada poro está inmerso en un medio cuya conductividad térmica es k_d , esto es, la conductividad equivalente de la dispersión sólida, obtenemos la conductividad equivalente, k_e , del material disperso y poroso en la forma

$$\frac{k_e}{k_d} = 1 - \frac{(3P/2)(k_d - k_v)}{k_v + 2(3P/4\pi)^{1/3} (k_d - k_v)}$$

donde k_v es la conductividad térmica del gas que ocupa el poro. Si éste se encuentra vacío o bien si está lleno por un gas de conductividad despreciable frente a la de la dispersión, la expresión anterior toma la forma:

$$\frac{k_e}{k_d} = 1 - \pi \left(\frac{3P}{4\pi} \right)^{2/3}$$

de donde

$$\frac{k_e}{k_m} = \left[1 - \pi \left(\frac{3P}{4\pi} \right)^{2/3} \right] \cdot \left[1 - \frac{(3f/2)(k_m/k_p - 1)}{1 + 2(3f/4\pi)^{1/3}(k_m/k_p - 1)} \right] \quad [2]$$

Esta expresión es aplicable para determinar la conductividad equivalente de un material disperso que contiene poros. Tal es el caso de la elaboración de placas combustibles para reactores nucleares de investigación, donde el proceso de laminación deja una porosidad remanente, que es significativamente mayor cuando se incrementa la carga de partículas dispersas, ya sea porque el material de la matriz no alcanza a fluir completamente alrededor de cada partícula o bien porque durante la laminación se produce con frecuencia la rotura de partículas dispersas. Se forman así poros adyacentes a las partículas que no alcanzan a ser llenados por el material de la matriz y quedan, por lo tanto, inicialmente vacíos.

En cambio, durante el quemado del combustible nuclear, se producen burbujas que se llenan con los productos de fisión gaseosos y aparecen distribuidas en el interior de las partículas del compuesto fisil. Su presencia también altera a la conductividad térmica del conjunto pero de un modo diferente a los poros descritos más arriba ya que alteran al parámetro k_p que interviene en la ecuación [1]. Para incluir la influencia de las burbujas, se realiza un análisis similar al que condujo a la ecuación [1] pero considerando que las burbujas están dispersas en el material de la partícula. Nuevamente se supone que cada burbuja está enteramente rodeada por material sólido, en este caso el de la partícula. Dado que la concentración de burbujas, y posiblemente también su tamaño, crecen durante el quemado del combustible, esta suposición limita la aplicación de este modelo.

Si indicamos con k_b a la conductividad térmica del gas que ocupa las burbujas, con k_p^e a la conductividad equivalente de las partículas combustibles, y con b a la fracción de volumen de las partículas ocupada por burbujas, resulta

$$\frac{k_p^e}{k_p} = 1 - \frac{(3b/2)(k_p/k_b - 1)}{1 + 2(3b/4\pi)^{1/3}(k_p/k_b - 1)} \quad [3]$$

La conductividad equivalente del sistema completo se obtiene a partir de la ecuación [2] levemente modificada, reemplazando k_p por k_p^e obtenido de [3].

IV. RESULTADOS

De acuerdo a estos resultados es posible entonces expresar la conductividad térmica efectiva de un material compuesto poroso como una función de la conductividad del compuesto de uranio, la del material de la matriz, el porcentaje inicial de compuesto, de matriz y de poros y de la temperatura.

El modelo así construido se compara con datos experimentales para el caso en el que el compuesto de

uranio es U_3Si_2 . Se observa que el acuerdo es aceptable, particularmente en el rango de mayor interés tecnológico [2,3].

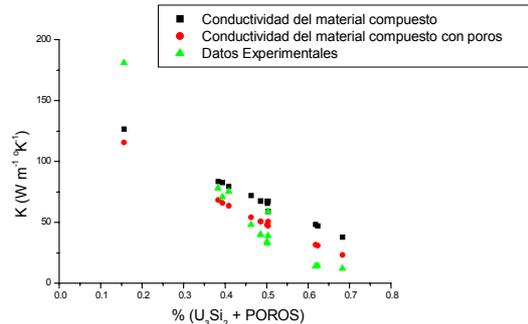


Figura 3: Comparación con datos experimentales para el caso en el que el combustible es U_3Si_2 .

Para el caso en el que el combustible es UMo, se compararon datos experimentales para porcentajes en peso de molibdeno entre el 10 y el 6%. El rango de conductividades predicho se compara con los obtenidos numéricamente para dos temperaturas: 300 y 573 K. Los resultados se incluyen en la figura 4 [1,4].

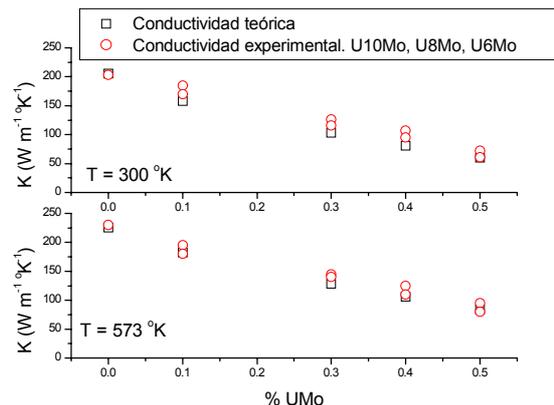


Figura 4: Datos experimentales comparados con la curva analítica para UMo al [10-6] %.

Referencias

- 1 - Meyer, K., Hoffman, G. Properties of UMo-Alloys Dispersion Fuels. Argonne National Laboratory, IAEA, 2003.
- 2 - Matos, J.E., Snelgrove, J.L., Research reactor core conversion guidebook. Volume 4: FUELS (Appendices I-K). IAEA-tecdoc-643. Argonne National Laboratory.
- 3 - J. Rest, J.L. Snelgrove, and G. L. Hofman. DART Model for Thermal Conductivity of U_3Si_2 Aluminum Dispersion Fuel. IMRERTR, 1995
- 4 - S. L. Hayes et al. Modeling RERTR experimental fuel plates using the plate code. IMRERTR, 2003