

MEDICIÓN DIRECTA DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA EN ALGUNAS ALEACIONES BINARIAS BASE COBRE

G. J. Gutiérrez⁽¹⁾, M. García⁽¹⁾, G. Plascencia⁽²⁾

(1) SEPI ESIME-Azcapotzalco, Instituto Politécnico Nacional, MÉXICO.

(2) CIITEC, Instituto Politécnico Nacional, MÉXICO.

E-mail: g.plascencia@utoronto.ca

RESUMEN

Se midió la conductividad térmica de 5 aleaciones binarias base cobre. Para ello, se ha desarrollado una técnica de medición directa. Esta técnica consiste en la imposición de un heat flux conocido, mediante una resistencia eléctrica, aplicando diferentes voltajes y corrientes. Alcanzada la condición de transporte de energía estacionaria, se midieron y registraron mediante un sistema de adquisición de datos temperaturas en diversas locaciones de la muestra evaluada. Con estos datos de temperatura y conociendo las dimensiones de la probeta se determinó el valor de la conductividad térmica de las aleaciones evaluadas. La comparación de las conductividades medidas con valores previamente reportados, presenta valores razonables entre sí; por lo que se puede afirmar que la técnica de medición desarrollada en este trabajo se puede aplicar en diversos materiales metálicos.

Tópico: Tópico2: Materiales metálicos

Palabras clave: Conductividad térmica, aleaciones base cobre, heat flux, medición directa

1. ANTECEDENTES

Para la determinación experimental de la conductividad térmica, se han desarrollado varias técnicas de medición [1 – 13]; estas técnicas se pueden clasificar de forma general como directas e indirectas. De estas, las últimas son las más empleadas [1 – 4], ya que se determina la conductividad eléctrica o la resistividad de algún material, y mediante el uso de la Ley de Wiedeman – Franz, la cual relaciona a la conductividad eléctrica con la térmica:

$$k = 2.44 \times 10^{-8} \cdot \sigma \cdot T \quad (1)$$

Donde k es la conductividad térmica (W/m/K), T es la temperatura (K), σ es la conductividad eléctrica (S/m) y 2.44×10^{-8} (W/S/K²) es el número de Lorentz.

Por ejemplo, He [5] determinó la conductividad térmica de diversos gases mediante la técnica del disco caliente. Esta técnica a pesar de ser simple y fácil de aplicar, tiene la desventaja de que necesita que se defina una función temporal para poder estimar propiamente los valores de conductividad térmica. Desafortunadamente, esta función temporal no siempre es conocida, por lo que se puede definir después de llevar a cabo un proceso de optimización de los datos obtenidos; como es de esperarse, este proceso complica la determinación de la conductividad térmica del material bajo estudio.

Ghrib et al [6] propusieron un método óptico basado en el “efecto mirage”, para medir la conductividad térmica y la difusividad térmica. Esta técnica requiere de un láser que hace un barrido sobre un fluido en el que se sumerge la muestra bajo estudio. Conforme, el láser calienta la muestra, el fluido desvía la trayectoria del láser, por lo que mediante la medición de esta desviación, es posible determinar el valor de la conductividad térmica del material analizado. Esta técnica es precisa, sin embargo necesita de una instalación especial;

consecuentemente es cara. En otros reportes [7 – 9], se ha descrito el denominado método láser flash para determinar la conductividad térmica en metales puros y composites. Éste método es similar en términos de ventajas y desventajas al presentado por Ghrib.

Por otro lado [10 – 12], otra técnica muy comúnmente empleada para la determinación de la conductividad térmica es la del alambre caliente. Esta técnica es directa y mucho más económica que las técnicas ópticas antes citadas. Mlavsky [13] desarrolló un método analítico para minimizar los errores asociados a la recolección de datos en las técnicas directas de medición.

1.1 Conductividad térmica de algunas aleaciones base cobre

Actualmente existen reportados valores de conductividad térmica para algunas aleaciones base cobre, especialmente para aquellas aleaciones desarrolladas para propósitos especiales [2, 8, 10, 14 – 20]. Monaghan et al. [2] determinaron la conductividad térmica de aleaciones Cu – Sn tanto en el estado sólido como en el líquido. Por su parte Tan et al. [14] reportaron la conductividad térmica de aleaciones Cu – Be y Cu – Zn. Kuhn et al. [15] estimaron valores de conductividad térmica en las aleaciones C70350, C70250, C17200 y C17410, endurecidas por precipitación. Koeppen y Muller [16] por su parte reportaron la conductividad térmica de las aleaciones C17400 y C17410.

Ishino et al. [17], reportaron la conductividad térmica para el sistema Cu – Ni, mientras que Raj et al. [18] midieron la conductividad térmica en las aleaciones de cobre utilizadas en la fabricación de cohetes. El método de medición utilizado en estos reportes [2, 14 – 18] es indirecto, ya que se determinó la conductividad eléctrica o la resistividad, y de ahí se calculó el valor de la conductividad térmica.

Kim et al. [8] determinaron la conductividad térmica en compósitos Cu-W mediante láseres. Weber y Tavangar [10] midieron la conductividad térmica de compósitos Cu – X – diamante (X= Cr, Be) al imponer un heat flux conocido sobre sus muestras.

Miettinen [19], recolectó datos reportados y con ellos modeló el cambio en la conductividad térmica de algunas aleaciones base cobre durante la solidificación. De manera similar, Poirier y Mc Bride [20] recolectaron datos publicados en el sistema Cu –Al y obtuvieron correlaciones para la conductividad térmica de éstas aleaciones tanto en el estado sólido como en el líquido.

Finalmente, también se pueden encontrar valores de conductividad térmica de aleaciones base cobre en algunos manuales [20 – 23].

En este trabajo, el método de medición se asemeja en principio al desarrollado por Franco [12]. Para medir la conductividad térmica, en las aleaciones seleccionadas, se coloca una fuente de energía conocida en un extremo de una muestra aislada térmicamente, mientras que al otro extremo de la misma, se mide el cambio de la temperatura de esta hasta que se alcanza el estado estable. Al ser conocida la longitud de las muestras, las temperaturas en cada extremo de cada muestra y el heat flux impuesto, se puede determinar directamente la conductividad térmica.

2. EXPERIMENTAL

Las aleaciones utilizadas en este trabajo se obtuvieron a partir de cobre, níquel, silicio y zinc de alta pureza. Estos metales se colocaron en un crisol de grafito bajo una atmósfera inerte (N₂) en un horno eléctrico. Una vez fundidas, las aleaciones se vaciaron en un molde cilíndrico de grafito, donde se obtuvieron cilindros cuya longitud fue cercana a 5.0cm. Estos cilindros después fueron maquinados hasta obtener cilindros cuyas dimensiones se muestran en la Tabla 1. También se verificó la composición química de las aleaciones a utilizar mediante un espectrofotómetro absorción atómica Perkin Elmer.

Los cilindros metálicos se colocaron concéntricamente en un cilindro hueco de acero al bajo carbono, cuyas dimensiones son 0.74 cm de diámetro y 1.81 cm de altura. El espacio entre la aleación y el cilindro se llenó con cerámico de fraguado rápido el cual sirve de aislante térmico. Los extremos de cada muestra quedaron expuestos, y solo el cuerpo de los especímenes quedó embebido en el cerámico. Las muestras se rectificaron, para asegurar superficies planas.

Tabla 1. Composición química y dimensiones de las probetas utilizadas en este estudio

| Muestra | Aleación | Composición (% masa) | | Dimensiones (cm) | |
|---------|---------------|-------------------------|------------|---------------------|-------|
| | | Nominal | Real | Ø | Largo |
| 1 | Cu-1% masa Si | 1 % Si | 0.968 % Si | 0.734 | 1.772 |
| 2 | Cu-2% masa Si | 2 % Si | 1.992 % Si | 0.727 | 1.814 |
| 3 | Cu-4% masa Si | 4 % Si | 4.000 % Si | 0.752 | 1.811 |
| 4 | Cu-3% masa Ni | 3 % Ni | 3.000 % Ni | 0.764 | 1.809 |
| 5 | Cu-2% masa Zn | 2 % Zn | 1.998 % Zn | 0.708 | 1.681 |

De manera análoga, se montó en el cerámico la resistencia utilizada como fuente de calor; en este caso, el cilindro en el cual se embebió la resistencia tuvo dimensiones de 11.37 cm de diámetro por 7.12 cm de largo. Como con las aleaciones a evaluar, se dejó expuesta a la intemperie el extremo de la resistencia, mientras que por el otro extremo del montaje, se sacaron los cables para conectar la resistencia a la red eléctrica. Para poder mantener la muestra a evaluar en contacto con la resistencia, se fabricó un sujetador de acero bajo carbono de 5 cm de diámetro al que se le practicó un barreno concéntrico de 2 cm de diámetro. Este sujetador se fijó al cilindro con la resistencia mediante tensores.

Se conectó a la línea comercial de 127 VAC y 60 Hz de frecuencia un variac. La función de este dispositivo eléctrico es el de regular el voltaje suministrado a la fuente de calor. A la salida del variac, se conectó en uno de sus polos una resistencia de valor fijo de 50 Ω, mientras que el otro polo de salida del variac se conectó directamente a la fuente de calor. Además, se conectaron dos termopares tipo k, para determinar la temperatura ambiente así como la de la superficie expuesta de la muestra a evaluar. Se midieron y registraron los valores de temperatura, voltaje y corriente a través de un sistema de adquisición de datos (SAD), conectado a una computadora. Para confirmar los valores de temperatura, se colocó a una distancia de aprox. 1.5 m un termómetro infrarrojo marca Rayltec, el cual se conectó a la misma computadora que el SAD. El SAD, se conectó a la computadora a través de un puerto serial, el protocolo de comunicación es RS 232. Mientras que en el caso del infrarrojo, la conexión es mediante un puerto tipo USB.

Con las mediciones de corriente y voltaje se determinó el calor que se suministró a cada probeta, ya que la energía suministrada a las muestras es igual a la potencia, la cual se define mediante la siguiente relación:

$$q = P = V \cdot i \quad (2)$$

Donde q es la energía suministrada (W), P es la potencia (W), V es el voltaje aplicado a la fuente de calor (V) e i es la corriente que pasa a través de la fuente de calor (A). Con esta información y conociendo el área de transferencia (definida por el diámetro de la muestra), se determina el heat flux impuesto al sistema. Con esto y con la diferencia de temperaturas entre los extremos de cada muestra, fue como se determinó el valor de la conductividad térmica de cada aleación.

Los experimentos se realizaron primero conectando la resistencia directamente a la salida del variac; cabe señalar, que se preseleccionaron aleatoriamente 5 voltajes de salida del mismo (127, 100, 90, 72 y 41.5 V). Conforme se aplicó el voltaje y la corriente, se midió la temperatura en el extremo expuesto de la resistencia tanto con un termopar (tipo k) como con el termómetro infrarrojo. Estas mediciones se realizaron de manera constante hasta que la temperatura de la resistencia se mantuvo constante. Una vez alcanzada esta condición; se siguió registrando la temperatura del extremo de la resistencia por 2 horas, esto para confirmar que se alcanzó el estado estable. Este proceso se repitió 5 veces, una por cada voltaje seleccionado. Una vez alcanzada esta

condición de equilibrio, se colocó enfrente de la fuente de calor las muestras de las aleaciones a estudiar. A partir de la colocación de las muestras, se comenzó el registro de datos (voltaje, corriente y temperaturas). Los datos generados se almacenaron en un archivo de texto, mismo que pudo ser manipulado mediante una hoja de cálculo.

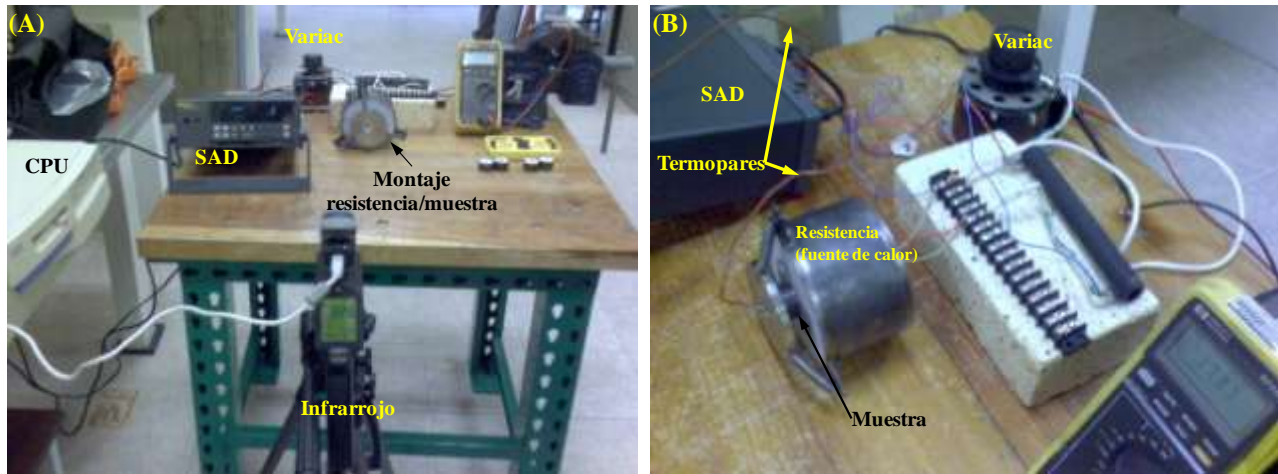


Figura 1. (A) Dispositivo experimental armado, (B) Detalle de las conexiones eléctricas y del sistema de adquisición de datos.

Con la información generada, se construyeron gráficos de conductividad térmica vs. temperatura, mismos que se analizaran y discutirán en las secciones posteriores de este texto. En total se llevaron a cabo 25 experimentos, uno por cada aleación utilizando los 5 voltajes preseleccionados.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 2 muestra los resultados obtenidos en la medición de conductividad térmica de las diferentes aleaciones ensayadas.

Los valores encontrados en estos experimentos se aproximan a lo esperado en términos del valor de conductividad térmica del cobre sin alea. A excepción de la aleación con 2% masa de zinc, las otras aleaciones presentan valores de conductividad ligeramente por debajo de la del cobre. La disminución de la conductividad térmica con pequeñas adiciones de los diferentes aleantes está de acuerdo a lo esperado. Es de resaltar el hecho que contra lo reportado, la aleación con 4% de silicio en vez de disminuir su conductividad, esta aumenta aproximándose al valor de la conductividad térmica del cobre. Estos valores menores de conductividad se deben a que al alea el cobre con los metales seleccionados, al incrementar la temperatura sucede la oxidación del zinc y el silicio, lo cual resulta en la menor capacidad para transferir calor. En el caso del níquel el cobre se oxida preferentemente sobre él, lo cual resulta en una disminución en las propiedades de conducción del cobre. Así mismo, se aprecia que conforme aumenta la temperatura, el valor de la conductividad tiende a disminuir como es de esperarse, a excepción de la aleación con zinc.

Las barras de error mostradas en la Figura 2 demuestran que los resultados obtenidos son confiables. El error experimental varía entre el 1.08 % para la aleación con 2% Si y 3.55% para la aleación con 2% Zn. Como se aprecia en la Figura 2, la aleación con zinc presenta mayor dispersión entre los puntos experimentales. Por otro lado, del procesamiento de los datos en la Figura 2 y de los valores de temperatura de la probeta se puede obtener una correlación lineal entre la conductividad térmica y la temperatura. Esta funcionalidad se presenta en la Tabla 2.

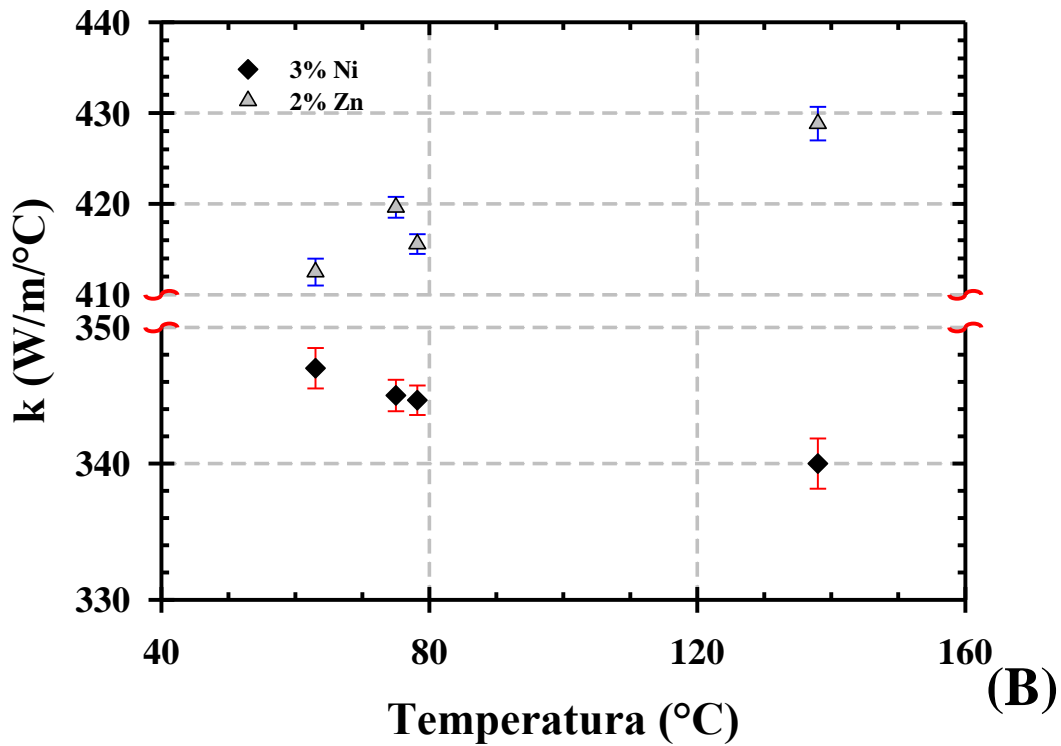
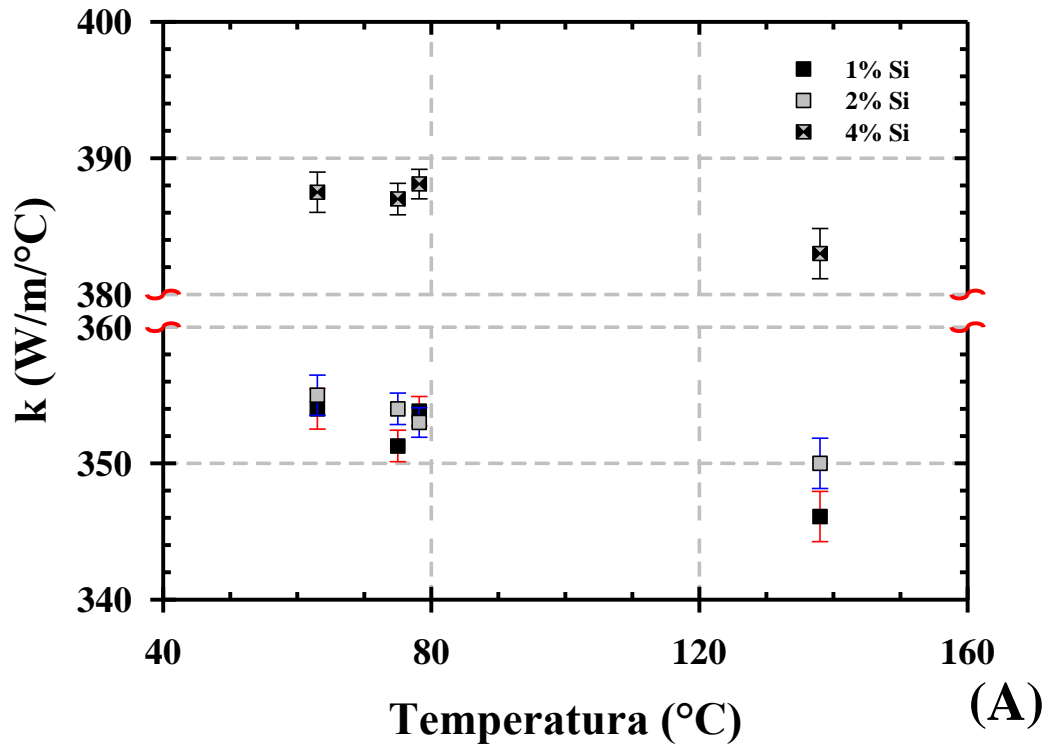


Figura 2. Determinación experimental de la conductividad térmica en estado estable para las aleaciones (A) Cu – 1% Si, Cu – 2% Si, Cu 4% Si y (B) Cu – 3% Ni, Cu -2% Zn.

Tabla 2. Correlaciones entre la conductividad térmica y la temperatura de las aleaciones estudiadas.

| Aleación | Correlación | Coefficiente de correlación |
|------------|-------------------------|-----------------------------|
| Cu – 1% Si | $k = - 0.104 T + 360.5$ | 0.89 |
| Cu – 2% Si | $k = -0.063 T + 358.6$ | 0.96 |
| Cu – 4% Si | $k = -0.066 T + 392.2$ | 0.91 |
| Cu – 3% Ni | $k = - 0.087 T + 351.9$ | 0.97 |
| Cu – 2% Zn | $k = 0.200 T + 401.4$ | 0.90 |

Como se puede apreciar en la Tabla 2, existe una buena correlación entre la temperatura y la conductividad térmica de las diferentes aleaciones probadas. Se ha obtenido una funcionalidad lineal, la cual al ser empleada, simplifica los cálculos que pudiesen realizarse con ella. La Figura 3 por su parte, presenta la comparación de los resultados obtenidos con los valores de conductividad térmica reportados para el cobre puro [24, 25]. Como se ha indicado, hay buena concordancia entre los valores obtenidos y los registrados para el cobre.

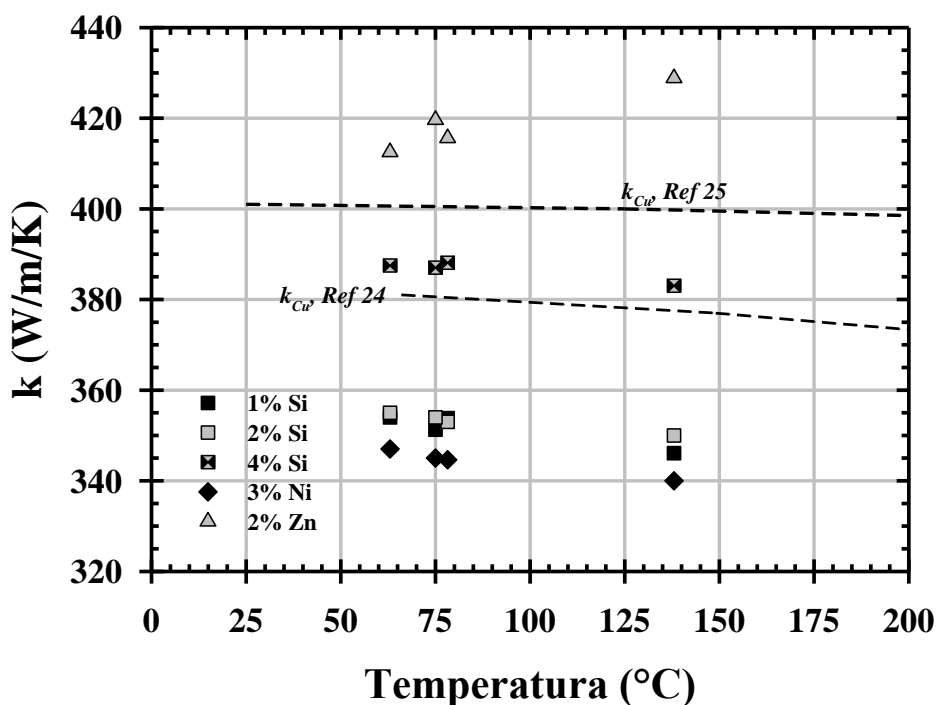


Figura 3. Comparación entre la conductividad térmica medida en 5 aleaciones base cobre y los valores de conductividad reportados para este metal sin alea.

Nuevamente, se aprecia que en el caso de la aleación con zinc, la conductividad térmica tiende a incrementar, esto está fuera de lo esperado, ya que la conductividad térmica debe disminuir con el incremento de la temperatura. Esta tendencia en los valores de la conductividad de la aleación Cu- 2% Zn puede atribuirse a algún error experimental.

4. CONCLUSIONES

Se ha desarrollado una técnica de medición directa de la conductividad térmica. Esta técnica se ha aplicado en 5 aleaciones binarias base cobre. Los resultados obtenidos indican que los valores obtenidos experimentalmente con esta técnica se aproximan a lo esperado. Sin embargo, y a pesar de que los resultados obtenidos son alentadores, la técnica de medición necesita perfeccionarse para eliminar cualquier posibilidad de error en

futuras determinaciones. Cabe recalcar que este método de medición se puede aplicar a cualquier material inorgánico en el estado sólido. Su aplicabilidad en materiales poliméricos o de origen orgánico requiere de mas experimentación.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer el apoyo económico para esta investigación a través de los proyectos SIP IPN 20061485 y 20071478.

REFERENCIAS

1. R. Power, R. Tye and M. Woodman, "The thermal conductivity and electrical resistivity of rhenium"; *J. less common Metals*, Vol. 5 (1963), p. 49-55.
2. B. Monaghan, J. Neale and L. Chapman, "Some Thermal properties of a copper – tin alloy"; *International journal of thermophysics*, Vol. 20 (1999), p. 1051-1060.
3. B. Giordanengo, N. Benazzi, J. Vinckel, J. Gasser, and L. Roubi, "Thermal conductivity of liquid metals and metallic alloys"; *J. of non-crystalline solids*, Vol. 250 – 252 (1999), p. 377-383.
4. S. Mhiaoui, F. Sar, and J. Gasser, "Electrical and thermal conductivities and thermopower of some lead free solders (LFS) in the liquid and solid state"; *J. of non-crystalline solids*, Vol. 353 (2007), p. 3628-3632.
5. Y. He, "Rapid thermal conductivity measurement with a hot disk sensor Part 2. Characterization of thermal greases"; *Thermochimica Acta*, Vol. 436 (2005), p. 130-134.
6. T. Ghrib, N. Yacoubi and F. Saadallah, "Simultaneous determination of thermal conductivity and diffusivity of solid samples using the "Mirage effect" method"; *Sensors and actuators A*, Vol. 135 (2007), p. 346-354.
7. K. Minato, H. Serizawa and K. Fukuda, "Thermal conductivity of technetium"; *J. of alloys and compounds*, Vol. 257 (1998), p. 274-278.
8. Y. Kim, N. Oh, S. Oh and I. Moon, "Thermal conductivity of W-Cu composites at various temperatures". *Materials letters*, Vol. 51 (2001), p. 420-424.
9. A. Rudajevová, F. von Buch and B. Mordike, "Thermal diffusivity and thermal conductivity of MgSc alloys". *J. of alloys and compounds*, Vol. 292 (1999), p. 27-30.
10. L. Weber, and R. Tavangar, "On the influence of active element content on the thermal conductivity and thermal expansion of Cu-X (X=CR, B) diamond composites"; *Scripta Materialia*, Vol. 57 (2007), p. 988-991
11. W. dos Santos, "Thermal properties of melt polymers by the hot wire technique"; *Polymer testing*, Vol. 24 (2005), p. 932-941.
12. A. Franco, A. "An apparatus for the routine measurement of thermal conductivity of materials for building application based on a transient hot-wire method"; *Applied thermal engineering*, Vol. 27 (2007), p. 2495–2504.
13. A. Mlavsky, "Measurement of thermal conductivity at high temperatures"; *Advanced Energy Conversion*, Vol. 2 (1962), p. 23-28.
14. X. Tan, P. Conway and F. Sarvar, "Thermo-mechanical properties and regression models of alloys: AISI 305; CK 60, CuBe2 and Laiton MS 63"; *J. of materials processing technology*; Vol. 168 (2005), p. 152-163.

- 15.H. Kuhn, A. Käufler, D. Ringhand and S. Theobald, “A new high performance copper based alloy for electro-mechanical connectors”; *Mat.-wiss. u Werkstofftech*, Vol. 38 (2007), p. 624-634.
- 16.H. Koeppen and L. Muller, “Alloys C17400 and C17410 - New beryllium copper alloys for connector applications”; *IEEE transactions on components, hybrids and manufacturing and technology*, Vol. 9 (1986), p. 310-316.
- 17.S. Ishino, A. Kurui, S. Ichikawa, T. Inaba and T. Hasegawa, “The effect of transmutation and displacement in irradiated copper for heat-sink materials”; *J. of nuclear materials*, Vol. 215-219 (2000), p. 283-287.
- 18.S. Raj, L. Ghosn, C. Robinson and D. Humphrey, “High heat flu exposures of coated GRCop-84 substrates”; *Materials Science and Engineering A*, Vol. 457 (2007), p. 300-312.
- 19.J. Miettinen, “Thermodynamic - kinetic model for the simulation in binary copper alloys and calculation of thermophysical properties”; *Computational Materials Science*, Vol. 36 (2006), p. 367 – 380.
- 20.Y. Touloukian, R. Powell, C. Ho and P. Klemens, “Thermophysical properties of matter: Thermal conductivity of metallic elements and alloys”; 1971, Plenum Press.
- 21.Metals Handbook, “Properties and selection: Non-ferrous alloys and special-purpose materials”, 10th Ed. Vol. 2; 1990, ASM International.
- 22.E. Brandes and G. Brook, “Smithells metals reference book, 7th Ed; 1999, Buterwoth - Heinemann.
- 23.Metals Handbook, “Properties and selection: Non-ferrous alloys and special-purpose materials”, 10th Ed. Vol. 3; 1990, ASM International.
- 24.M.J. Goglia, G.A. Hawkins and J.E. Deverall, “Determination of thermal conductivity of copper and deoxidized copper-iron alloys”; *Anal. Chem*, Vol. 24 (1952), p. 493 – 496.
- 25.www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d_429.html