

Determinación de coeficientes de transferencia de calor en moldes de *investment casting* con virutas de cobre

Emmanuel Norberto Garza Collazo^A, José Hilario García-Duarte^B, José Roberto Benavides-Treviño^A, Marco Antonio Loudovic Hernández-Rodríguez^A, Arturo Juárez-Hernández^A

^A UANL-FIME

^B Consultores en Conformado y Procesos de Manufactura S.A. de C.V.

artjua@yahoo.com

RESUMEN

Se modifican moldes “investment casting” con virutas de cobre para incrementar su conductividad térmica, favorecer la tasa extracción de calor durante la solidificación y modificar las propiedades finales del material vaciado, disminuyendo el DAS (dendritic arms pacing). Se midió la velocidad de enfriamiento y se calcularon coeficientes de transferencia por módulo inverso de un software comercial PROCAST y mediante un modelo analítico. Los resultados muestran que la adición de refuerzos metálicos incrementa el coeficiente de transferencia de calor debido al incremento de la conductividad térmica del molde.

PALABRA CLAVE

Investment casting, virutas de cobre, coeficiente de transferencia de calor.

ABSTRACT

Investment casting molds were modified with the insertion of copper chips for increasing their thermal conductivity, promote heat extraction during solidification, and modify casting final properties, decreasing the DAS (dendritic arm spacing). Cooling rate was measured and the heat transfer coefficients were calculated by inverse module with a commercial software PROCAST and through an analytical model. Results show that the addition of copper chips increases the heat transfer coefficient due to an increase in mold thermal conductivity.

KEYWORDS

Investment casting, copper chip, heat transfer coefficient.

INTRODUCCIÓN

Actualmente en México el desarrollo tecnológico se encuentra en aumento, existe en el país una creciente demanda de productos especializados como moldes permanentes, álabes de turbina y moldes para inyección por sectores económicos de gran tamaño como automotriz, aeronáutica/aeroespacial y los que requieren

las industrias de los plásticos. La fabricación de moldes metálicos es un área poco explotada dentro del país, ya que pocas empresas se dedican a la fabricación de dichos componentes¹⁻⁴ y muchas de ellas emplean métodos costosos, como el maquinado mediante control numérico; por lo que en el presente trabajo se estudia un parámetro de fabricación que influye en las propiedades mecánicas de moldes obtenidos directamente de la fundición, minimizando los trabajos de maquinado. Dicho parámetro es el coeficiente de transferencia de calor, h , el cual depende de diferentes parámetros de proceso^{5,6} y durante la solidificación es el que controla la evolución de las características macro y micro estructurales como el tamaño de grano y el espaciamiento interdendrítico.⁷

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Para determinar el coeficiente de transferencia de calor, h , en moldes de *investment casting*, se fabricaron tres moldes cilíndricos en diferentes condiciones, modificando en uno de ellos el material del molde mediante adición de virutas de cobre. La temperatura se midió utilizando termopares tipo k situados a diferentes profundidades (figura 1). El estudio de solidificación se realizó con una aleación de aluminio 356, cuya composición química se reporta en la tabla I y las condiciones de vaciado se muestran en la tabla II.

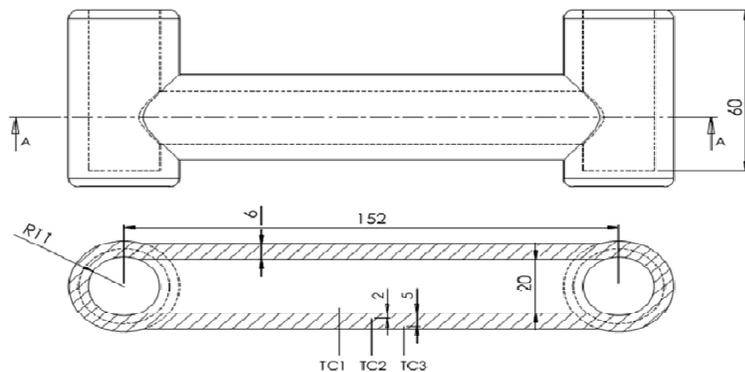


Fig.1. Ubicación de termopares a diferentes profundidades.

Tabla I. Composición química de aleación 356 (% en peso).

Al 356	Si	Fe	Mg	Mn	Ti	Sr	Cu	Zn	Al
% en peso	7.73	0.15	0.35	0.02	0.12	0.02	0.02	0.02	Bal.

Tabla II. Contenido de vaciado experimental.

	Condición espesor	T, molde (°C)	T, vaciado (°C)	T, ambiente (°C)	Tiempo de vaciado (s)	Tiempo de enfriamiento (s)
M6	Molde 6 mm	570	713	30	2	674
MC6	Molde 6 mm + (22%) viruta	341	704			
M8	Molde 8 mm	253	743			

Previo a la realización del experimento se efectuaron tres simulaciones del caso de estudio por medio de análisis de del software comercial PROCAST, los datos de entrada del valor de, h , fueron datos supuestos, posteriormente con los historiales térmicos experimentales se prepararon casos con el método inverso y con estos se obtuvieron los coeficientes de transferencia de calor correspondientes. Adicionalmente, se comparó con el modelo general de conducción de calor (ecuación 1) en coordenadas cilíndricas, estado estable, una dimensión y con conductividad térmica constante, para el cálculo de flujos de calor (ecuación 2) y de resistencia térmica para obtener los coeficientes de transferencia de calor analíticamente (ecuación 3).

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(k \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho C \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

$$q_r = - \frac{k T_1 - T_2}{r \ln \left(\frac{r_1}{r_2} \right)} \quad (2)$$

$$h = \frac{1}{\frac{2\pi r_1 L (T_{\infty 1} - T_2)}{q} - \frac{r_1 \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right)}{k}} \quad (3)$$

Para obtener la conductividad térmica de un material compósito, en este caso del molde con virutas metálicas, se aplicó el modelo de conducción en serie de Tsao,⁸ determinado por la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{k_c} = \frac{1 - \theta}{k_m} + \frac{\theta}{k_f} \quad (4)$$

Donde k_c es la conductividad del molde compuesto, k_m la conductividad del metal, k_f la conductividad del cerámico y θ el porcentaje de cerámico.

Simulación en PROCAST

Se revisó un modelo computacional con el software comercial PROCAST, donde se utilizaron las propiedades termofísicas de la aleación y molde bajo estudio, finalmente el software fue alimentado con las curvas de enfriamiento experimentales en la posición de los termopares, para así calcular el coeficiente de transferencia promedio, figura 2.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Enfriamiento

A continuación se presentan las conductividades térmicas de los moldes y sus constituyentes, siendo para el molde convencional, $k = 0.65 \text{ W/m K}$ y para el molde con 22% de viruta, $k = 0.83 \text{ W/m K}$. En las figuras 3, se muestran los perfiles de enfriamiento con sus respectivas velocidades, dT/dt , de los tres ejemplares vaciados.

En la figura 3a muestra la solidificación del metal en el aluminio 356, la temperatura de *liquidus* es de 614°C y la temperatura de *solidus* de 514°C ,⁹ en este primer caso M6, inicia cuando la velocidad de enfriamiento toma un valor

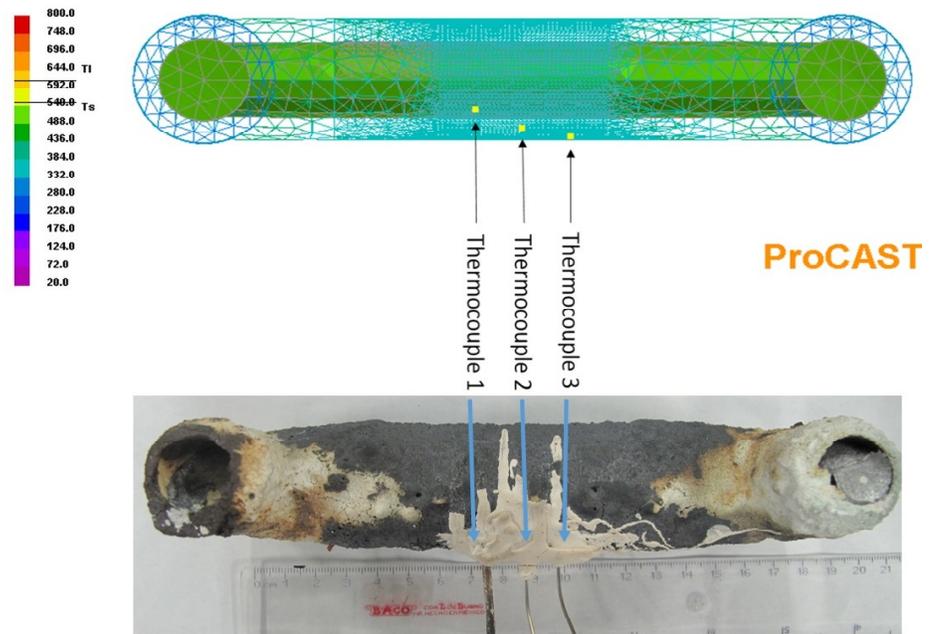


Fig. 2. Arreglo virtual de termopares durante el proceso de enfriamiento.

inicial de $1\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ hasta alcanzar el subenfriamiento, posteriormente la velocidad de enfriamiento disminuye debido a la recaescencia, hasta alcanzar los 550°C , a los 380 segundos se observa el efecto de la recaescencia debido al calor latente de fusión causada por la precipitación de $\alpha\text{ Al}$, presentándose una meseta hasta los 500 segundos donde el metal solidifica, disminuyendo la velocidad de enfriamiento, aproximándola a cero, finalmente la curva decae a velocidad constante. La figura 3b, MC6, se muestra una disminución en la temperatura de 704°C a 586°C durante los primeros 30 segundos de enfriamiento teniendo velocidades de $3.5\text{ }^{\circ}\text{C/s}$, favoreciendo la nucleación de partículas sólidas debido al sub enfriamiento, en seguida se presenta un incremento en la temperatura debido a la recaescencia a los 30 segundos subsecuentes, y posteriormente un descenso en la temperatura donde se observa una velocidad de enfriamiento de $0.5\text{ }^{\circ}\text{C/s}$. En la figura 3c, M8, se muestra el historial térmico del metal vaciado en molde convencional de 8 mm de espesor, en él se observa una caída inicial de temperatura de 155°C dentro de los primeros 34 segundos a una velocidad de $4.5\text{ }^{\circ}\text{C/s}$, la velocidad de enfriamiento es más alta que en los casos anteriores esto es debido a que se tiene mayor espesor y una masa mayor de extracción de calor además de que inicialmente estaba a 253°C y posteriormente la velocidad disminuye hasta 0.01°C/s , siendo la velocidad la más baja observada en estos casos, promoviendo una solidificación prácticamente isotérmica, por la meseta que se presenta en la curva de los 154 segundos a los 274 segundos. Finalmente a los 550°C la velocidad vuelve a incrementar hasta los 0.8°C/s para terminar en los 0.3°C/s a los 674 segundos.

COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA

En la figura 4a, muestra M6, se observa al inicio un valor máximo de coeficiente de transferencia, posteriormente desciende hasta los 70 segundos de

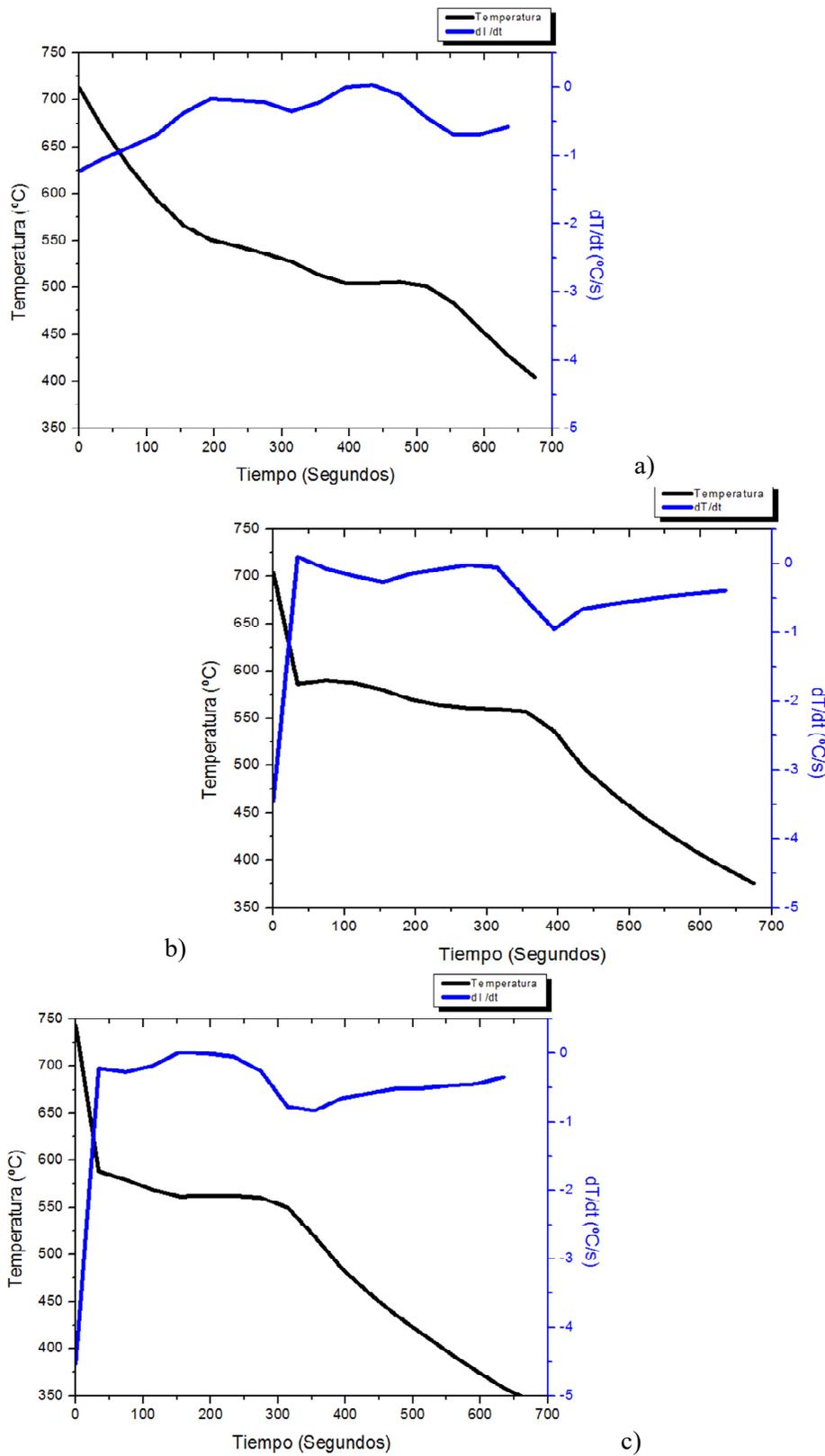


Fig. 3. Enfriamiento de aluminio y primera derivada de la curva en molde convencional de a) M6 b) MC6 c) M8

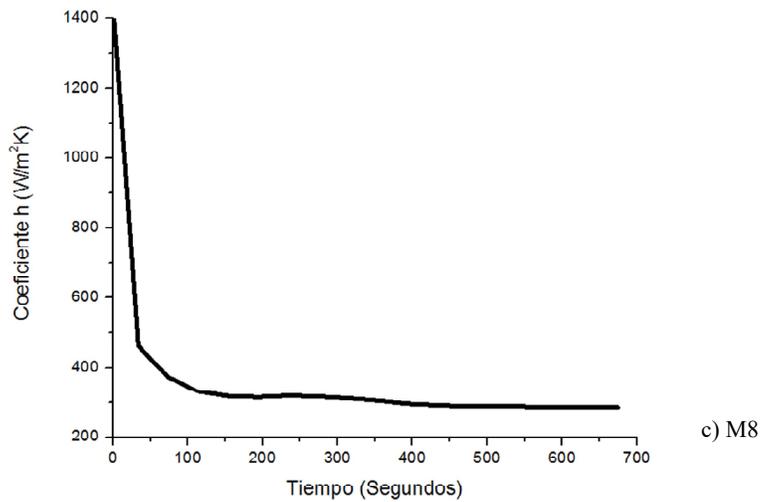
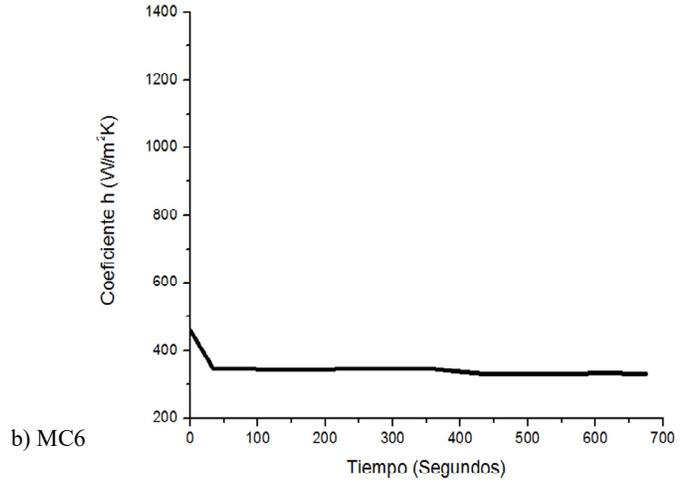
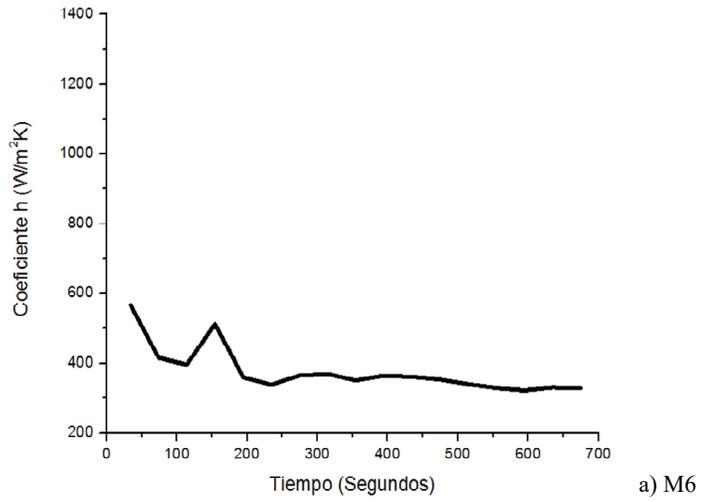


Fig. 4. Coeficiente de transferencia de calor, h , durante el enfriamiento de casting en molde para a) M6, b) MC6 y c) M8

enfriamiento para incrementarse de una forma importante y volver a descender después de los 150 segundos de enfriamiento, fluctuando entre los 320 y 370 W/m² K. Es de esperarse encontrar el valor máximo al comienzo del vaciado, cuando el metal está a la temperatura máxima, sin embargo, es durante el periodo de los 74 a 114 segundos es donde el coeficiente incrementa de 396 a 513 W/m² K, siendo el incremento visiblemente mayor durante el historial térmico, una razón de este incremento es el contacto físico entre la superficie del metal y la superficie del molde. La figura 4b, muestra MC6, existe un comportamiento muy parecido, un máximo al inicio, que rápidamente disminuye para mantenerse fluctuando entre valores de 343 y 346 W/m² K entre los 34 y 354 segundos, respectivamente. En la figura 4c, muestra M8, el valor inicial en el coeficiente resultó de 1444 W/m²K, sin embargo al transcurrir más de 30 segundos, disminuyó a 460 W/m² K, posteriormente disminuye hasta llegar a un valor de 316 W/m² K, esto es debido que al inicio se tiene un metal caliente con una masa de molde más grande que en los casos anteriores teniendo un flujo mayor de calor y disminuyendo de manera importante en la medida que se va calentando el molde.

De acuerdo al diseño de experimentos, en la tabla III se muestran los resultados de coeficientes promedio de transferencia de calor obtenidos por PROCAST. Se observan diferencias entre los coeficientes obtenidos mediante método analítico y mediante módulo inverso, siendo el ejemplar convencional de M6, en el que se observa mayor similitud, existiendo solo una diferencia de 40 W/m² K en promedio. Existen diferentes razones por las cuales los coeficientes calculados analíticamente se aproximen a los obtenidos por módulo inverso: i) Exactitud de las curvas de enfriamiento calculadas por el software; entre mayor sea la diferencia en las curvas de enfriamiento/calentamiento real y calculadas, mayor será el error entre el coeficiente calculado y el real, ii) Consideración de propiedades constantes en el tratamiento analítico, iii) Uso de ecuaciones para análisis de transferencia de calor en estado estable iv) PROCAST calcula un coeficiente promedio de transferencia pero la realidad es que el valor de *h* cambia en la medida que la temperatura del molde y del metal cambian, v) La temperatura inicial del molde y la masa, el mayor valor de, *h*, se observa en el M8 donde la cantidad de masa es mayor y la temperatura inicial del molde es menor esto provoca una mayor fuerza motriz *dT/dt*.

Tabla III. Resultados promedio de coeficientes de transferencia de calor

Ejemplar	Analítico W/ m ² K	Modulo Inverso W/ m ² K
M6	600-339	379
MC6	460-346	405
M8	1400-316	146

CONCLUSIONES

Se determinaron coeficientes de transferencia de calor en moldes de *investment casting* convencionales y reforzados con fibras metálicas de cobre durante el proceso de solidificación de una aleación de aluminio 356.

Los comportamientos de los flujos de calor y de los coeficientes de transferencia en los cálculos analíticos de los diferentes moldes dependen de las velocidades de enfriamiento en el metal, siendo estas velocidades dependientes de las temperaturas iniciales de los moldes y de la capacidad de los moldes para conducir el calor.

Los coeficientes obtenidos de forma analítica difieren a los obtenidos por modulo inverso debido a la suposición de propiedades constantes en los cálculos, al uso de ecuaciones para estado estable, a la exactitud entre las curvas de enfriamiento reales y a el hecho de que son valores promedio.

Se concluye que la adición de refuerzos metálicos incrementó la conductividad del material base, el coeficiente de transferencia de calor y la extracción de calor.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al CONACYT por el apoyo para este proyecto.

REFERENCIAS

1. INEGI Boletín de Prensa Núm. 514/14 19 de Noviembre, 2014. Aguascalientes, Ags.
2. Plan Nacional de Vuelo Industria Aeroespacial Mexicana MAPA DE RUTA 2014. PROMEXICO.
3. Información obtenida en coordinación con los presidentes de los clústeres aeroespaciales, ProMéxico y las Secretarías de comercio de los estados (SEDECOS).
4. Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT).
5. R. Colas. Modelling heat transfer during hot rolling of steel strip, Modelling Simul. Mater. Sci. Eng. 3 (1995) 437-453. Printed in the LK
6. Estimation of Transient Temperature Distribution during Quenching, via a Parabolic Model Lozano. Journal of Mechanical Engineering 61(2015)2, 107-114
7. M.C. Flemings, 1974, Solidification Processing, New York, McGraw-Hill.
8. T.N.G. Tsao Thermal Conductivity of Two Phase Materials, J. Industrial and Engineering Chemistry, (1961). 395-397.
9. X. Jiana, H. Xua, T.T. Meeka y Q. Hanb. Effect of power ultrasound on solidification of aluminum A356 alloy. a Material Sci. and Eng. Department, University of Tennessee, Knoxville, TN 37996, USA. b Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN 37831-6083, USA