04.82.28

RELACION ENTRE TERMIFLUENCIA Y RELAJACION DE TENSIONES EN ZIRCALOY - 4

F. Povolo y A.J. Marzocca

INTRODUCCION

Los datos obtenidos por Povolo e Higa (1), en relajación de tensiones por curvado a 673 K, en probetas planas de Zircaloy-4, tanto predeformadas 64% por laminación en frío como relevadas de tensiones, muestran que la conducta de las curvas obtenidas se pueden explicar por medio de la ecuación fenomenológica propuesta por Hart (2):

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}^{*}\left[\ln(\sigma^{*}/\sigma)\right]^{-1/\lambda} \qquad \mathrm{I}$$

donde $\dot{\varepsilon}$ es la velocidad de deformación plástica, la tensión aplicada, σ^{*} es un parámetro de endurecimiento que depende de la tensión inicial aplicada a la muestra durante la relajación y del tratamiento térmico, λ es un parámetro que varía según sea la probeta predeformada o recocida y $\dot{\varepsilon}^{*}$ está relacionado con σ^{*} por medio de una relación de traslación dada por:

$$\dot{\varepsilon}^{*} = A\ (\sigma^{*})^{1/\mu} \qquad \mathrm{II}$$

donde A es una constante y μ es la pendiente de traslación (2).

Por otra parte, los datos de termofluencia obtenidos por diversos autores, muestran que en Zr y sus aleaciones, dependen fuertemente de la estructura metalúrgica (3-5), pero desafortunadamente, los mecanismos fundamentales que controlan la termofuencia a 673 K, en este material, no están bien establecidos. En efecto, se propusieron muchos modelos microscópicos para explicar la conducta de la termofluencia de estado estacionario de aleaciones de Zr a 673 K. Sin embargo los modelos propuestos tienen validez en rangos estrechos de tensiones y temperaturas y solo algunos autores consideraron la importancia de la termofluencia primaria (6-7).

En este informe se presentan algunos datos de termofluencia en material predeformado similar al usado en relajación de tensiones por curvado.

Se mostrará que las curvas se pueden describir mediante la ecuación I con un valor λ similar al obtenido en relajación de tensiones por curvado.

RESULTADOS

Se obtuvieron datos de termofluencia a 673 K para tensiones entre 117,60 y 264,70 MPa en una máquina de termofluencia a tensión constante (8), durante tiempos del orden de 400 horas.

De esta forma se graficó $\log \sigma$ vs $\log \dot{\varepsilon}$, obteniendose diversas curvas para diferentes valores de la deformación ε (9). Las curvas individuales se vinculan a través de una relación de escala, es decir que es posible superponerlas por medio de una traslación sobre una de éstas. De tal manera se construye la curva maestra que muestra la fig. 1 donde todas las curvas se superpusieron por medio de traslación sobre la curva de $\varepsilon = 1\mathrm{x}10^{-2}$. La traslación se lleva a cabo sobre una recta de pendiente:

$$\mu = \Delta \log \sigma / \Delta \log \dot{\varepsilon} = 0.116$$

El hecho que las curvas individuales pertenezcan a una misma familia de curvas indica la presencia de una ecuación mecánica de estado.

De la comparación de la curva maestra obtenida con las curvas parametrizadas de la ecuación I, resulta un valor de $\lambda = 0.085$.

Con el valor de λ encontrado se pueden obtener los valores de σ^* y $\dot{\varepsilon}^*$ para cada curva individual. De éste análisis se obtiene la relación entre σ^* y $\dot{\varepsilon}^*$ predecida por la ecuación II con

$$A = 1.928\mathrm{x}10^{-31}\ \mathrm{MPa}^{-1/\mu}\ \mathrm{s}^{-1}$$

Como se observa en el gráfico de la fig. 2 se obtiene una relación que indica que el endurecimiento σ^* disminuye con la deformación ε según la expresión:

$$\sigma^* = B \exp(b/\varepsilon^{2/3}) \qquad \mathrm{III}$$

con b= $2.76\mathrm{x}10^{-2}$ y B= 809.45 MPa

Así, reemplazando II y III en la relación I se tiene:

$$\dot{\varepsilon} = AB^{1/\mu}\exp(b/\varepsilon^{2/3}\mu)\left[\ln B + b/\varepsilon^{2/3} - \ln\sigma\right] \qquad \mathrm{IV}$$

Esta ecuación diferencial no puede integrarse analíticamente para obtener la deformación en función del tiempo. Integrándola numéricamente se obtienen las curvas de la fig. 3 donde se las compara con los datos experimentales. De las mismas se deduce un buen ajuste dentro del error experimental.

Realizando pequeños y abruptos cambios de tensión sobre la muestra se puede medir el parámetro:

$$m = (\partial \ln\dot{\varepsilon} / \partial \ln \sigma)_T \cong (\Delta \ln\dot{\varepsilon} / \Delta \ln \sigma)_T \qquad \mathrm{V}$$

a diferentes niveles de tensiones.

Por otro lado de diferenciar la ecuación I respecto de σ se obtiene:

$$\sigma^{*} = \exp(\, 1/\lambda m + \ln \sigma\,) \qquad \mathrm{VI}$$

Así, conociendo los valores de m medidos por medio de la relación V e introduciendolos en la ecuación VI con λ = 0.085 se puede calcular el valor de antes del cambio de tensión para una deformación dada. Estos valores se pueden comparar con los que resultan de la ecuación III para una deformación dada encontrandose que se aproximan dentro de un error máximo del 10% para altas deformaciones y menor del 5% para bajas deformaciones.

La energía de activación aparente para termofluencia se mide como:

$$Q = -\left[\partial \ln\dot{\varepsilon} / \partial\,(1/KT)\right]$$

lo que se puede expresar aproximadamente:

$$Q = -\left[\Delta \ln\dot{\varepsilon} / \Delta\,(1/KT)\right] \qquad \mathrm{VII}$$

donde K es la constante de Boltsmann y T la temperatura

Esta energía de activación se midió realizando cambios abruptos de termperatura y midiendo la velocidad de deformación correspondiente para varias tensiones. Se encontró que a 673 K Q es independiente de la tensión con un valor promedio:

$$Q = (2.88 \pm 0.06) \; J/mol$$

Estas energías de activación deben tomarse con cuidado ya que su sentido físico depende del modelo elegido.

DISCUSION

Del análisis anterior surge que las curvas de termofluencia de Zircaloy-4 predeformado a 673 K pueden describirse muy bien por medio de la ecuación de estado de Hart para temperaturas homólogas altas. Dentro de este contexto cabe destacar que no se hace diferencia entre la termofluencia primaria y la estacionaria, lo que indicaría que el mismo mecanismo controlaría la curva de termofluencia desde el comienzo del ensayo.

Ya que la misma ecuación I, con valor similar de λ , describe la relajación de tensiones por curvado en el mismo material y a la misma temperatura (1), se esperaría una relación entre este último ensayo y la termofluencia.

La relajación de tensiones por curvado se midió hasta muy bajas tensiones (del orden de 20 MPa) y a más bajas velocidades de deformación ($\sim 10^{-12}$ s^{-1}) que la termofluencia.

El rango de $\dot{\varepsilon}$ de la curva maestra en termofluencia se extiende desde 10^{-4} s^{-1} a 10^{-9} s^{-1} y en relajación a tensiones de 10^{-6} s^{-1} a 10^{-12} s^{-1}. De esta forma, debido al análisis anterior, se tendría para ambos ensayos un rango de 10^{-4} s^{-1} hasta 10^{-12} s^{-1}.

En general se espera que el parámetro de endurecimiento σ^* aumente con la deformación (2). Estos datos, sin embargo, fueron tomados esencialmente a endurecimiento constante, que no es la situación de los datos de termofluencia del presente informe.

La fig. 3 muestra que σ^* decrece con ε , independientemente de la tensión aplicada. Analizando en términos de la estructura de dislocaciones, indicaría que ésta, producida por el predeformado, estaría cambiando en el tiempo hacia un equilibrio dinámico. La estructura de dislocaciones cambia de tal forma que el material predeformado se ablanda durante la termofluencia.

Dado que la base física de la ecuación de Hart no está bien establecida, aún en el modelo simple discutido en la referencia (2), no puede darse un significado preciso de la energía de activación aparente en este contexto.

Trabajos recientes indicarían que Q estaría relacionado con las energías de formación de muescas (jogs) en las dislocaciones (10).

CONCLUSIONES

El ensayo de termofluencia en Zircaloy-4, predeformado, a 673 K puede describirse muy bien por medio de la ecuación de Hart para temperaturas homólogas altas.

Ya que la misma ecuación describe la curva de termofluencia entera, no es necesario hacer distinción entre la termofluencia primaria y la estacionaria.

Se observa que tanto la termofluencia como la relajación de tensiones por curvado se describen por la misma expresión, con valor similar de λ , lo que indicaría una estrecha relación entre ambos procesos.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el Lic. E. Moyano por su ayuda en el análisis numérico de las curvas de termofluencia.

Este trabajo se realizó dentro del convenio de cooperación entre la República Argentina y la República Federal de Alemania y fué financiado en parte por la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires.

REFERENCIAS

1. F. Povolo y M. Higa, J. Nucl. Mater., 91(1980) 189.
2. E.W. Hart, C.Y. Li, H. Yamada y G.L. Wire, en: Constitutive Equations in Plasticity, Ed. A.S.Argon (MIT Press, Cambridge, 1975) p. 149.
3. K. Kallstrom, T. Andersson, y A. Hofvenstam, Zirconium in Nuclear Applications. A.S.T.M. S.T.P. 551 (American Society for Testing and Materials, 1974) p. 160.
4. K. Kallstrom, Scand. J. Met. 4(1975)65.
5. V. Fideris, Atomic Energy Rev. 13(1975) 51.
6. E.F. Ibrahim, E.G. Price y A.G. Wysiekierski, Canad. Met. Quart. 11 (1972) 1.
7. K.L. Murty, G.S. Clevinger y T.P. Papazoglou, Thermal Creep of Zircaloy-4 Cladding, Proceedings of Structural Mechanics in Reactor Technology (4th International Conference, San Francisco, Cal. August 15-19, 1977).
8. A.J. Marzocca, Creep en Zircaloy-4, Tesis de Licenciatura en Física (F.C.E.N., Universidad de Buenos Aires, Noviembre de 1979).
9. F. Povolo y A.J. Marzocca, Creep of cold-worker Zry-4 at 673 K, enviado a publicar al J. Nucl. Mater.
10. F. Povolo y A.J. Marzocca, Creep and stress-relaxation in bending, at 673 K, of cold-worked Zry-4, enviado a publicar al J. Nucl. Mat.