

Influencia de la velocidad de deformación sobre el endurecimiento cíclico de Zircaloy-4 en la zona de envejecimiento por deformación.

M. AVALOS, M. G. MOSCATO, I. ALVAREZ-ARMAS Y
A. F. ARMAS

INSTITUTO DE FÍSICA ROSARIO, CONICET
UNIVERSIDAD NACIONAL DE ROSARIO,
BV. 27 DE FEBRERO 210 BIS, 2000 ROSARIO, ARGENTINA
e-mail: armas@ifir.ifir.edu.ar

Introducción

Diferentes aspectos del fenómeno de envejecimiento por deformación dinámico en Zirconio y algunas de sus aleaciones han sido informados en la literatura. Se han aportado evidencias sobre la existencia de "mesetas" o picos en el diagrama límite de fluencia-temperatura como, asimismo, endurecimiento y sensibilidad a la velocidad de deformación anormales. En nuestro laboratorio se ha encontrado [1] que, como otro aspecto de este fenómeno, la aleación Zircaloy-4 presenta un endurecimiento cíclico lineal en la zona donde han sido reportados comportamientos unidireccionales anómalos. El endurecimiento cíclico lineal es fuertemente dependiente de la temperatura y presenta un pico en las cercanías de los 773 K. En el presente trabajo se estudia el comportamiento de este pico en ensayos con diferentes velocidades de deformación.

Procedimiento Experimental

Probetas de fatiga de bajo número de ciclos fueron maquinadas a partir de barras de Zircaloy-4 con la siguiente composición química (en wt.%): Sn-1.37, Fe-0.14, Cr-0.10, C-0.01, O-0.14, N-0.004, H-20 ppm, Zr-balance. Se realizaron ensayos cíclicos controlados por deformación total usando una onda triangular en una máquina Instron modelo 1362. La deformación total usada en los ensayos fue $\Delta \epsilon_t = 0.01$. Con el fin de analizar la dependencia del endurecimiento cíclico con la velocidad de

deformación, los ensayos se realizaron con las siguientes velocidades: $\dot{\epsilon}_t = 2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$

y $\dot{\epsilon}_t = 2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ para todo el rango de temperaturas considerado.

Resultados y Discusión

La figura 1 muestra el comportamiento cíclico del Zircaloy-4 a varias temperaturas. La variación de la tensión pico de tracción de los lazos de histéresis es graficada en función de $N + \frac{3}{4}$ (donde N es el número de ciclos) para diferentes temperaturas. De esta forma un 1 en la abscisa representa $\frac{1}{4}$ de ciclo y la ordenada correspondiente es la tensión de fluencia para $\epsilon_t = 0.5\%$.

En este trabajo se analizará exclusivamente el comportamiento cíclico observado dentro del rango de 623-823 K debido a que en ese rango es donde se manifiesta el fenómeno de endurecimiento cíclico lineal. Como se puede observar en la Figura 2, dentro de este rango el comportamiento cíclico presenta tres regiones: una primera etapa con una velocidad de endurecimiento cíclico alta pero decreciente, una segunda etapa caracterizada por un comportamiento lineal de la tensión pico de tracción y una tercera etapa representada por un período decreciente de endurecimiento aparentemente consecuencia de la aparición de la fisura del espécimen.

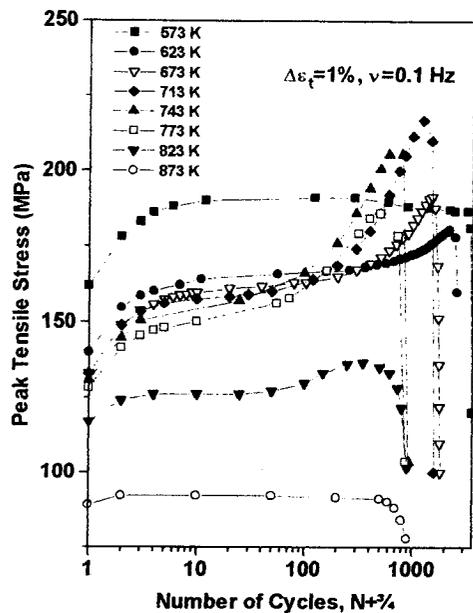


Figura 1

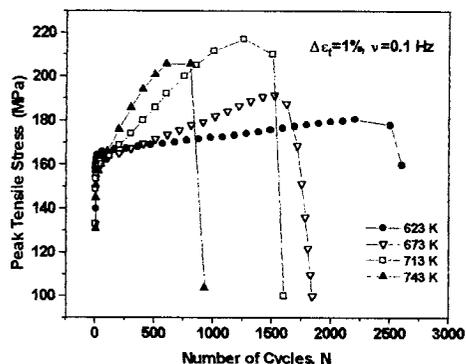


Figura 2

Para la segunda etapa vale una relación de la forma

$$\sigma = a + bN \quad (\text{con } \sigma \text{ en MPa}),$$

Los parámetros a y b son dependientes de la temperatura del ensayo.

En la Figura 3 se puede observar el comportamiento del límite de fluencia en función de la temperatura y del endurecimiento

por deformación obtenidos para este material durante ensayos unidireccionales. Ambas magnitudes fueron normalizadas con respecto al módulo de Young, E , para tener en cuenta la variación del mismo con la temperatura. Es notable la “meseta” que se presenta en el límite de fluencia y el leve máximo observado en el endurecimiento por deformación entre 673 y 823 K. Como es sabido ambos comportamientos son manifestaciones del fenómeno de envejecimiento por deformación (“strain aging”).

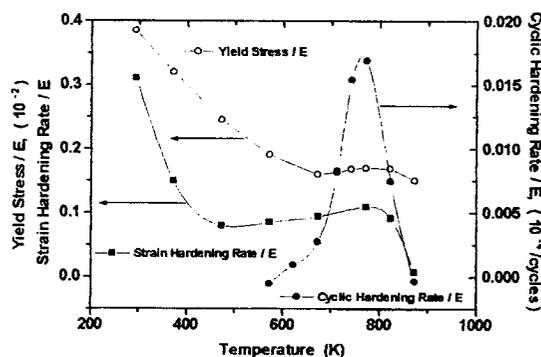


Figura 3

En esta figura también se ha graficado la velocidad de endurecimiento cíclico representada por el parámetro $b = \Delta\sigma/\Delta N$. Este parámetro corresponde a la segunda etapa de las curvas de endurecimiento cíclico obtenidas para las temperaturas de interés de este trabajo. Es notable la presencia de un pico agudo en el mismo intervalo de temperatura donde se evidencian otros aspectos del fenómeno de “strain aging”. Es evidente que el grado de endurecimiento cíclico está influenciado fuertemente por los fenómenos de “strain aging” y que el efecto más fuerte ocurre a una temperatura cercana a los 773 K. En [2] se muestra la estructura de dislocaciones característica observada en esta región de temperaturas.

La formación de estas estructuras se adjudica a un incremento en la acumulación de

dislocaciones debido a interacciones más fuertes entre dislocaciones y átomos de soluto. Su correlación con el endurecimiento cíclico observado está siendo estudiado.

Con el fin de determinar la dependencia con la velocidad de deformación de la curva de velocidad de endurecimiento cíclico vs temperatura, se realizaron ensayos con una velocidad un orden de magnitud inferior. Como para este caso el período de los ciclos era de 100 s ello traía aparejado que el ensayo, hasta la rotura, sería de muy larga duración.

Por ello los ensayos fueron realizados hasta el número de ciclos considerado suficiente para tener un amplio segmento de la etapa lineal del ensayo. La figura 4 muestra el comportamiento con la temperatura del endurecimiento cíclico para dos velocidades de deformación. Es evidente, en esta figura, el desplazamiento sufrido por los picos.

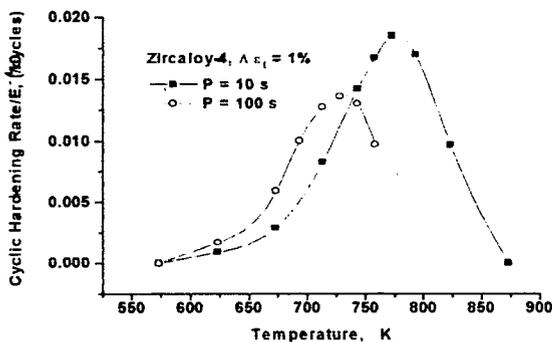


Figura 4

El corrimiento de la temperatura de pico ante un cambio en la velocidad de deformación es una clara evidencia que los mecanismos de endurecimiento cíclico son activados termicamente. Analizando el desplazamiento del pico se han obtenido valores que dan información sobre los factores que actúan en dichos mecanismos.

Para la velocidad de deformación $\dot{\epsilon}_t = 2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, el pico se ubica a 728 K y para

la velocidad $\dot{\epsilon}_t = 2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ el pico se desplaza a 775 K.

Asumiendo que los mecanismos que rigen el proceso de deformación de los ensayos cíclicos dependen de un proceso activado termicamente simple, es lógico suponer, en primera aproximación, una relación del tipo:

$$\dot{\epsilon}_t = \dot{\epsilon}_0 \times \exp(-Q/RT)$$

donde $\dot{\epsilon}_0$ es un factor preexponencial, R la constante universal de los gases, T la temperatura absoluta y Q la energía de activación del proceso.

Suponiendo una relación como la anterior y aplicando los valores experimentales de temperatura de pico para las diferentes velocidades de deformación obtenemos para la energía de activación del proceso:

$$Q = 230 \text{ KJ/mol}$$

Este valor es muy aproximado al valor obtenido ($Q = 229 \text{ KJ/mol}$) por Ritchie y Atrens [3] en su estudio sobre la difusión de O en Zr-4.

Estos resultados preliminares llevan a la conclusión que el mecanismo de endurecimiento observado en este material podría estar gobernado por la interacción de dislocaciones con átomos de oxígeno.

Referencias

- 1- A.F. Armas, I. Alvarez-Armas and G. Moscato, Dynamic Strain Aging Influence on the cyclic Behavior of Zircaloy-4, Scripta Materialia, Vol 34, pp. 281-285, 1996.
- 2- M. G. Moscato, M. Avalos, I. Alvarez-Armas, A. F. Armas, Dependencia de la subestructura de Dislocaciones con la temperatura en Zircaloy-4 deformado ciclicamente, 80ª Reunión Nacional de Física.