

Influencia del apantallamiento en la propagación subcrítica de fisuras en materiales de circona

D. Casellas*, A. Feder*, L. Llanes* y M. Anglada*

Resumen Se ha estudiado el aumento en el tiempo a rotura bajo la aplicación de una carga constante debido a la presencia de apantallamiento. Este tiempo se evaluó considerando una función matemática que describe el apantallamiento desarrollado en propagación subcrítica y los valores obtenidos se comparan con resultados experimentales correspondientes a materiales Y-TZP/PSZ. Se concluye que la pendiente inicial de la curva de apantallamiento ejerce gran influencia en la vida a fatiga del material.

Palabras clave Apantallamiento. Propagación subcrítica. Fatiga. Circona. Y-TZP/PSZ.

Influence of crack shielding on subcritical crack growth in zirconia ceramics

Abstract The increase in fatigue life under a constant applied load, due to the presence of crack shielding, was studied. Time to failure was estimated by using a mathematical function that describes the crack shielding developed during subcritical crack growth. Such results were compared with experimental fatigue lives obtained in Y-TZP/PSZ materials. From this it may be concluded that the initial slope of crack shielding curves greatly influences the time to failure.

Keywords Crack shielding. Subcritical growth. Fatigue. Zirconia. Y-TZP/PSZ.

1. INTRODUCCIÓN

Los avances en el desarrollo de materiales cerámicos avanzados, con importantes aumentos en la tenacidad de fractura han permitido obtener materiales con elevada resistencia a fractura y baja densidad. De esta manera, se abren nuevos caminos en el área de diseño de componentes estructurales, donde estas cerámicas avanzadas pueden ser opciones interesantes en ciertas aplicaciones. Esta posibilidad ha llevado a la comunidad científica a profundizar en el conocimiento de los distintos procesos de propagación subcrítica de fisura que pueden ocurrir bajo distintas sollicitaciones mecánicas, procesos que conllevan una disminución de la resistencia mecánica del material en función del tiempo.

Para el caso de aplicación de una carga constante, tiene lugar el crecimiento subcrítico de fisuras debido a la acción combinada del medio (donde el principal agente agresivo es el vapor de agua) y la carga aplicada, fenómeno conocido en la li-

teratura cerámica como fatiga estática^[1]. Éste era conocido y estaba bien documentado para cerámicas tradicionales (vidrios, mullita, alúmina, etc.), por lo que su presencia en cerámicas avanzadas, entre ellas la circona, no fue una sorpresa.

Una característica de las cerámicas de circona es la posibilidad de desarrollar apantallamiento por el mecanismo de transformación de fase, que es la responsable del aumento de tenacidad observado en estos materiales^[1]. La operatividad de tal mecanismo en los procesos de propagación subcrítica influye en gran manera en las propiedades mecánicas del material, puesto que aumenta el límite de fatiga, los valores de K umbrales de propagación, y la vida a fatiga. Por tanto, el estudio de estos efectos se plantea como una interesante opción para diseñar estrategias que permitan optimizar la respuesta mecánica del material. Sin embargo, en general, el efecto del apantallamiento se trata de forma cualitativa o bien se realizan suposiciones muy simples para evaluarlo cuantitativamente. Esto se

(*) Dept. de Ciència dels Materials i Enginyeria Metal·lúrgica, Universitat Politècnica de Catalunya, E.T.S.E.I.B., Avda. Diagonal, 647, 08028 Barcelona (España).

debe a que en el proceso de apantallamiento interviene gran cantidad de variables y, para poder describirlo con una precisión aceptable, hay que determinarlas experimentalmente. Por tanto, el estudio cuantitativo del efecto del apantallamiento es un aspecto interesante para profundizar en el conocimiento de la respuesta mecánica de estos materiales.

Así pues y, basándose en lo expuesto anteriormente, el objetivo de este trabajo se centra en determinar la influencia del apantallamiento en la resistencia a propagación subcrítica, en términos del aumento en el tiempo a rotura bajo una carga constante, de cerámicas de zircona.

2. PROPAGACIÓN SUBCRÍTICA EN CERÁMICAS

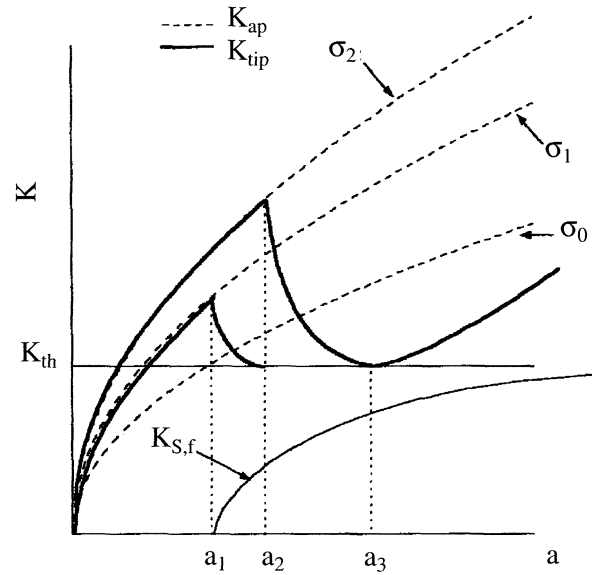
La posibilidad de desarrollar apantallamiento durante la propagación subcrítica produce una disminución en el factor de intensidad de tensiones en la punta de la fisura (K_{tip}), reduciendo el valor aplicado externamente (K_{ap}) mediante un factor de apantallamiento ($K_{S,f}$):

$$K_{tip} = K_{ap} - K_{S,f} \quad (1)$$

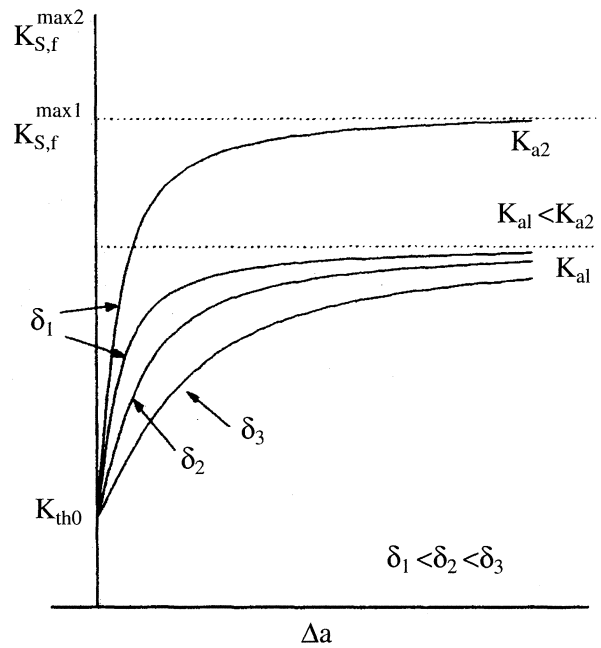
En la figura 1(a) se esquematiza el desarrollo de este fenómeno de crecimiento subcrítico de fisuras cuando se produce apantallamiento. Así, si se supone una fisura de longitud a_1 que aún no ha desarrollado apantallamiento a su alrededor, cuando se aplica una tensión inicial σ_1 , de manera que K_{tip} es mayor que el umbral de propagación (K_{th}), la fisura comienza a crecer. A medida que ésta se va propagando, empieza a desarrollar apantallamiento a su alrededor, por lo que K_{tip} disminuye y puede llegar a igualarse a K_{th} . Si eso ocurre, la fisura se detiene (a_2) y, para que siga propagando, es necesario aumentar la tensión aplicada. El caso límite es para una tensión σ_2 , donde la fisura crece hasta a_3 , momento en que se propaga inestablemente hasta la rotura.

Como puede verse en la figura 1(a), el progresivo desarrollo del apantallamiento implica un aumento en el nivel de tensión necesario para que la fisura inicial se propague, pasando de σ_0 , cuando no hay apantallamiento, a σ_2 . De esta manera, el límite de fatiga, que correspondería a σ_2 en la figura 1, se puede aumentar considerablemente en función del grado de apantallamiento presente.

Respecto a la velocidad de propagación bajo una carga constante (da/dt), viene definida por el parámetro K_{tip} , mediante la expresión:



(a)



(b)

Figura 1. (a) Crecimiento subcrítico de fisura cuando existe apantallamiento. σ_0 es el límite de fatiga en ausencia de apantallamiento, mientras que σ_2 es el límite de fatiga cuando éste está completamente desarrollado. (b) Influencia de K_a y δ en el apantallamiento desarrollado durante la propagación subcrítica.

Figure 1. (a) Subcritical crack growth in presence of crack shielding. σ_0 is the fatigue limit without shielding effects, meanwhile σ_2 is the fatigue limit when crack shielding has been completely developed. (b) Influence of K_a and δ in the crack shielding produced during subcritical crack growth.

$$\frac{da}{dt} = B_e (K_{ap} - K_{S,f})^{m_e} \quad (2)$$

donde B_e y m_e son constantes que dependen del material. Para calcular el tiempo a rotura en presencia de apantallamiento, t_f' , hay que resolver la ecuación anterior, llegándose a la expresión:

$$t_f' = \frac{1}{B_e} \int_{a_0}^{\infty} \frac{da}{(K_{ap} - K_{S,f})^{m_e}} \quad (3)$$

Para valores del exponente m_e muy elevados y para relaciones a_0/a_f bastante diferentes a la unidad, el límite superior de la integral se puede considerar como ∞ sin perder exactitud en el cálculo.

Como puede verse, la dificultad principal en la resolución de la ecuación anterior es conocer la función que describe la variación del apantallamiento con la longitud de la fisura, $K_{S,f}(a)$. Los primeros intentos para solucionar esta cuestión se deben a Dauskardt y col.^[2], que propusieron una relación muy sencilla para el apantallamiento. Supusieron que éste es proporcional al K_{ap} máximo, y que no depende de la longitud de la fisura. La utilidad de esta expresión es que simplifica mucho el cálculo de la velocidad de propagación y de la estimación de la vida a fatiga. Esta suposición es válida como primera aproximación del proceso, y permite obtener un límite superior para la presencia de apantallamiento. Por tanto, una descripción más precisa de la interacción entre el apantallamiento desarrollado y las velocidades de propagación de fisuras pasa inevitablemente por conocer con bastante exactitud la función $K_{S,f}(a)$.

Por analogía con los procesos de fractura, se supone que el apantallamiento desarrollado durante la propagación subcrítica de una fisura por fatiga es progresivo y similar al desarrollado durante el proceso de fractura (curva-R) y que es independiente de la longitud inicial de la fisura. A partir de los estudios del comportamiento de curva-R obtenido en un trabajo previo en materiales de circonita^[3], se utiliza la siguiente función para describir $K_{S,f}$:

$$K_{S,f} = K_a \arctan\left(\frac{\Delta a}{\delta}\right) \quad (4)$$

donde K_a y δ son parámetros que están relacionados con el valor máximo de $K_{S,f}$ ($K_{S,f}^{\max}$) y la pendiente inicial del apantallamiento, respectivamente. El interés en el uso de esta ecuación es que describe la presencia de $K_{S,f}^{\max}$ y, que variando K_a

y δ por separado se pueden modificar $K_{S,f}^{\max}$ y la pendiente inicial de la curva respectivamente. Así, al aumentar K_a , $K_{S,f}^{\max}$ también aumenta. Respecto a δ , cuanto mayor es este parámetro menor es la pendiente inicial de la curva de apantallamiento. En la figura 1(b) se esquematiza la influencia de estos parámetros en la forma de la curva de apantallamiento.

3. RESULTADOS EXPERIMENTALES DE PROPAGACIÓN SUBCRÍTICA

Para comparar experimentalmente el efecto del apantallamiento en la respuesta mecánica de cerámicas, se determinó la vida a fatiga de un material de circonita que desarrolla apantallamiento por transformación de fase en notable extensión. Este material es una Y-TZP/PSZ, obtenida por tratamiento térmico a 1.650 °C durante 2 h, de una circonita de grano fino estabilizada con un 2,5 % molar de Y_2O_3 ^[3]. Se construyeron las curvas de resistencia mecánica en función del tiempo (curvas S-t) normalizadas para fisuras grandes (de 85 a 130 μm de profundidad) no apantalladas. Estas fisuras se obtuvieron tratando a 1.200 °C durante 12 min fisuras de indentación originadas aplicando 620 N con un penetrador Vickers. En la construcción de estas curvas se usaron 30 probetas a dos niveles de carga distintos, del 80% y 60% del valor de la tensión de rotura. Las curvas S-t normalizadas obtenidas se muestran en la figura 2, en la que

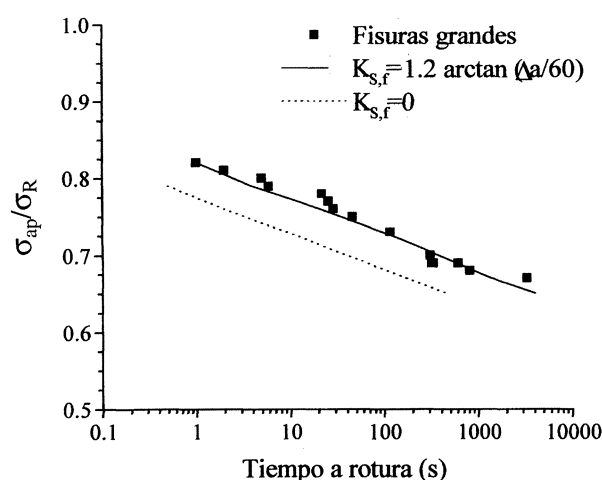


Figura 2. Curva S-t normalizada para fisuras grandes ($a_0 \sim 85\text{-}130 \mu\text{m}$). Se incluyen los cálculos de t_f' y t_f , suponiendo que $K_{S,f}$ sigue la ecuación (4) y que $K_{S,f} = 0$.

Figure 2. Normalized S-t curves for large cracks ($a_0 \sim 85\text{-}130 \mu\text{m}$). There are also included the calculation of t_f' and t_f , assuming that $K_{S,f}$ follows equation(4) and that $K_{S,f} = 0$.

se incluyen resultados de los cálculos efectuados y que se analizarán en el próximo apartado.

A partir de la curva S-t mostrada en la figura 2, es posible obtener B_e y m_e siguiendo el procedimiento descrito en la referencia 4. El valor obtenido de B_e es de $6,0 \cdot 10^{-28}$, mientras que el valor de m_e es 31 ± 4 .

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para evaluar el efecto de los parámetros K_a y δ en la vida a fatiga se calcularon los tiempos a rotura en presencia y ausencia de apantallamiento, t_f' y t_f respectivamente. Para obtener t_f' se resolvió numéricamente la ecuación (3), teniendo en cuenta que el apantallamiento lo describe la función (4) para distintos valores de K_a y δ , mientras que para determinar t_f se resolvió la ecuación (3) suponiendo que $K_{S,f}=0$. De esta manera, el cociente entre estos tiempos, t_f'/t_f , informa sobre el aumento en el tiempo a rotura debido a la presencia de apantallamiento. Los cálculos se realizaron para fisuras de $90 \mu\text{m}$, usando $m_e=30$, con el fin de poder compararlos con los resultados expuestos en la figura 2.

Los resultados de estos cálculos se muestran en la figura 3, donde se pone en evidencia que el parámetro δ ejerce gran influencia en el cociente t_f'/t_f . Así, para un nivel de K dado, se observa que para aumentar la vida a fatiga es más eficaz incrementar la pendiente inicial de la curva de apantallamiento, reduciendo el valor de δ , que intentar alcanzar valores elevados de apantallamiento máximo, aumentando K_a .

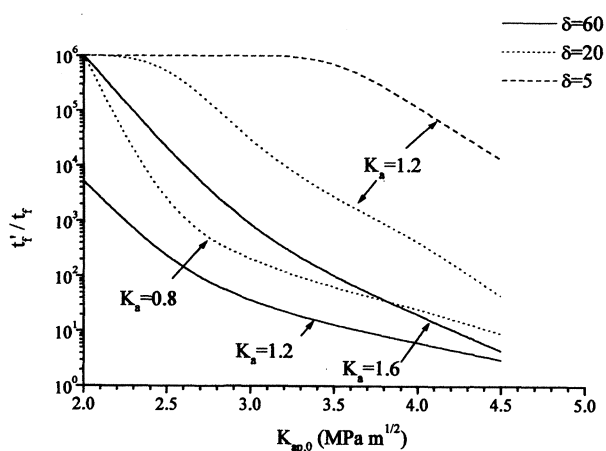


Figura 3. Cociente de tiempos a rotura, en presencia y ausencia de apantallamiento, t_f' y t_f respectivamente.

Figure 3. Times to failure ratio with and without crack shielding, t_f' and t_f respectively.

Además, los resultados obtenidos evidencian que el proceso de propagación subcrítica se desarrolla sin alcanzarse el valor máximo de apantallamiento.

Para comprobar experimentalmente el efecto del apantallamiento en el comportamiento del material, se determinó la función $K_{S,f}$ a partir de los resultados de propagación subcrítica de fisuras superficiales, obtenido en trabajos previos^[5]. Mediante estos resultados se pudo calibrar el parámetro δ en $60 \mu\text{m}$ y K_a en $1,2 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$. A partir de estos valores se obtuvo el tiempo a rotura bajo una carga constante, integrando la ecuación (3) y los resultados se expresan en la curva S-t mostrada en la figura 2. Una vez conocida la función de apantallamiento, se calculó el valor máximo de apantallamiento desarrollado en propagación subcrítica, y se muestra en la tabla I. Este valor no es el máximo posible, que se sitúa en $1,7 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, pero es elevado y afecta en gran manera al comportamiento del material. Esto se corrobora a partir de los cálculos efectuados con la ecuación (3) suponiendo que no existe apantallamiento ($K_{S,f}=0$) y que se muestra en la figura 2. Puede verse como la capacidad para desarrollar apantallamiento durante el crecimiento de fisura incrementa claramente la vida a fatiga del material en aproximadamente un orden de magnitud.

5. CONCLUSIONES

A partir de los cálculos de tiempo a rotura bajo una carga constante y de los resultados experimentales de propagación subcrítica, se ha demostrado la elevada influencia del apantallamiento en la vida a fatiga del material. Además, se concluye que la pendiente inicial de la curva de apantallamiento ejerce gran influencia en el aumento del tiempo a rotura, y que es más efectivo obtener curvas de apantallamiento que aumenten rápidamente en vez de intentar conseguir valores elevados de apantallamiento máximo. Por último, destacar que durante el crecimiento de fisura, no se alcanza el

Tabla I. Apantallamiento máximo desarrollado en propagación subcrítica, $K_{S,f}^{\text{max}}$

Table I. Maximum crack shielding during subcritical crack growth

	$K_{S,f}^{\text{max}}$ (MPa $\sqrt{\text{m}}$)	$K_{S,f}^{\text{max}}$ (MPa $\sqrt{\text{m}}$) (ec. (4))
Fisuras grandes	1,2 - 1,4	1,7

valor máximo de apantallamiento, aunque la magnitud del apantallamiento generado es considerable y modifica en gran manera la resistencia a propagación subcrítica.

Agradecimientos

Este trabajo se ha financiado parcialmente a través de la Generalitat de Catalunya (proyecto N° 1999SGR00129) y de la CICYT (proyecto N° MAT97-0.923). Uno de los autores (D.C.) desea agradecer a la Generalitat de Catalunya la beca FI concedida.

REFERENCIAS

- [1] D. MUNZ y T. FETT, *Ceramics, Mechanical Properties, Failure Behaviour, Materials Selection*, Springer Verlag, Berlín (Alemania), 1999.
- [2] R.H. DAUSKARDT, D.B. MARSHALL y R.O. RITCHIE, *J. Am. Ceram. Soc.* 73 (1990) 893-903.
- [3] D. CASELLAS, J. ALCALÁ, L. LLANES y M. ANGLADA, propuesto para publicación en *J. Mater. Sci.* (2000).
- [4] D. CASELLAS, L. LLANES y M. ANGLADA, *Proc. 7th International Fatigue Congress*, Beijing (P.R. China), 1999, X.R. Wu and Z.G. Wang (Eds.), 1999, pp. 1527-1532.
- [5] D. CASELLAS, A. FEDER, L. LLANES y M. ANGLADA, 6^a *Reunión Nacional de Materiales*, San Sebastián (1999).