

Resistencia a la propagación de fisuras por fatiga en carburos cementados

Y. Torres*, S. Rodríguez*, L. Llanes* y M. Anglada*

Resumen

En el presente trabajo se caracteriza el crecimiento por fatiga de fisuras grandes para dos calidades distintas de metal duro WC-Co, ambos con un 10 % en peso de cobalto pero con distintos tamaños de grano: 0,8 y 2,5 μm . La descripción de las cinéticas de propagación, obtenidas bajo diferentes relaciones de carga aplicada, se realiza mediante formas alternativas a la ecuación de Paris. Así, se utiliza un modelo que tiene en cuenta tanto el máximo como el rango de intensidad de tensiones aplicado, K_{max} y ΔK respectivamente, mediante ecuaciones del tipo $da/dN = f(K_{\text{max}}, \Delta K)$. Se observa una significativa dependencia con respecto a K_{max} , lo cual es un claro indicio de la prominencia de modos estáticos de rotura. Bajo estas consideraciones, se determina la sensibilidad a fatiga en presencia de fisuras. Finalmente, mediante análisis fractográfico, se estudian los mecanismos de daño asociados a la propagación por fatiga de fisuras, en los regímenes estable e inestable.

Palabras clave Fatiga. Propagación. Carburos cementados. WC-Co. Compresión cíclica.

Fatigue crack propagation resistance of cemented carbides

Abstract

It is studied the fatigue crack growth behavior of two grades of WC-Co cemented carbides, both with a 10%_{wt} of Co but with different carbide grain size, 0,8 and 2,5 μm . Crack growth kinetics, measured under different load ratios, is described using an alternative form to the Paris equation. Hence, it is used a model that takes into account both maximum and range of the applied stress intensity factor, K_{max} and ΔK respectively, within an equation of the form $da/dN = f(K_{\text{max}}, \Delta K)$. It is observed a significant dependence with respect to K_{max} , yielding evidence of the prominence of static modes of rupture. Under these considerations, the fatigue crack growth sensitivity of the materials studied is evaluated. Finally, the damage mechanisms associated with stable and unstable fatigue crack propagation are analyzed

Keywords

Fatigue. Crack propagation. Cemented carbides. WC-Co. Cyclic compression.

1. INTRODUCCION

El metal duro es el material más antiguo e importante de la familia de los carburos cementados. Es un material metalo-cerámico, relativamente frágil, compuesto por carburo de wolframio y, como ligante, el cobalto. Los metales duros se ven sometidos a sollicitaciones complejas de desgaste, mecánicas y térmicas. En el caso particular de las mecánicas, en muchas ocasiones, éstas tienen un carácter cíclico. Su conocimiento, así como el de la posible degradación por fatiga que resulta de ellas, es muy importante, ya que es un fenómeno crítico que limita el tiempo de vida de muchas he-

rramientas y componentes elaborados con estos materiales.

En la literatura se encuentra poca información sobre la fatiga de carburos cementados; la mayor parte de la investigación, realizada por Sockel *et al.* se restringe a la confección de curvas S-N (esfuerzo-número de ciclos)^[1-3]. Se encuentran, además, trabajos donde se estudia la fatiga del metal duro bajo la óptica de la propagación de fisuras; sin embargo, la mayor parte de ellos lo hacen en los términos habituales de caracterización de dicho fenómeno en metales, esto es, da/dN vs ΔK ^[4]. El hecho de que estos trabajos indiquen una dependencia significativa con la razón de carga

(*) Universitat Politècnica de Catalunya, Departament de Ciència dels Materials i Enginyeria Metal·lúrgica; Avda. Diagonal, 647, 08028 Barcelona (España).

$$\left(R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \right),$$

en combinación con la fragilidad intrínseca de los metales duros, sugiere que la descripción de la cinética de propagación de fisuras por fatiga de estos materiales se asemeje más a la utilizada para materiales cerámicos que para metálicos, donde el factor de intensidad de tensiones máximo, K_{\max} , juega un papel dominante. El objetivo de este trabajo es, precisamente, evaluar esta alternativa.

2. PARTE EXPERIMENTAL

Se caracterizan dos calidades distintas de metal duro, GD13 y GD20. Ambos contienen un 10 % en peso de cobalto pero un tamaño medio de granos de carburo de 0,8 y 2,5 μm respectivamente. La dureza Vickers (para 300 N) de estos materiales es de 1.545 y 1.396 HV y la resistencia a la rotura transversal (flexión a cuatro puntos y velocidad de aplicación de carga de 100 N/s) es de 2.742 y 1.813 MPa respectivamente.

La prefisuración de las muestras se realizó mediante la aplicación de cargas cíclicas de compresión. Para ello, se utilizó una máquina de ensayos servohidráulica INSTRON con célula de carga de 100 kN y con control digital, de la serie 8500. El esfuerzo máximo aplicado para nuclear las prefisuras, evaluado con respecto a la sección transversal en el plano de la entalla, fue de 830 MPa. Los ensayos se realizaron bajo control de carga, con una onda sinusoidal y una razón de carga $R=10$. Una consecuencia negativa importante de este método de prefisuración en materiales frágiles es el hecho de que se origina una zona de tensiones delante de la punta de la fisura^[5 y 6]. El estudio de las mismas y de la propagación de fisuras se realizó mediante la aplicación de esfuerzos de flexión por cuatro puntos. Para estos ensayos se utilizó una máquina servohidráulica INSTRON con célula de carga de 20 kN y control digital, de la serie 8500. Se aplicaron razones de carga aplicada, distintas ($R=0,1, 0,4, 0,7$) a frecuencias entre 0,5 y 10 Hz.

Se determinó además, la tenacidad de fractura en muestras que solo presentaban las prefisuras iniciales ($K_{IC\text{con res}}$) y en muestras a las que se les habían eliminado las tensiones residuales provenientes de la prefisuración, ($K_{IC\text{sin res}}$). Finalmente, se determinó la sensibilidad a fatiga en presencia de fisuras (K_0)/(K_{IC}) para cada material y valor de R (donde K_0 , corresponde al valor umbral del factor de intensidad de tensiones para la propagación de fisuras por fatiga a velocidades de propagación de 10^{-9} m/ciclo). Con ayuda de la microscopía electrónica de barrido, MEB, se realizó el análisis fractográfico.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Prefisuración por compresión cíclica

En la tabla I se muestran los resultados obtenidos, en el proceso de prefisuración, por compresión cíclica de las dos calidades estudiadas

En ambos casos las fisuras propagan establemente hasta los 400.000 ciclos, valor a partir del cual no se observa crecimiento de las mismas. La prefisuración mediante compresión cíclica generó tensiones residuales en la zona próxima a la punta de la fisura. Cuando el esfuerzo máximo aplicado durante la prefisuración se encuentra más próximo del valor de resistencia a fractura del material, como ocurre en el GD20, se producen daños mayores por deformación inelástica que provocan el aumento de las tensiones residuales. Además, los resultados indican que el grado GD20, al tener mayor K_{IC} , es capaz de absorber energía por otros procesos de deformación diferentes a la fisuración, tales como la transformación de fase del cobalto. Finalmente, se obtuvo que después de propagar las fisuras en fatiga tensil, una longitud promedio de 0,63 y 0,71 mm, respectivamente, para estos dos materiales, se logra salir de la zona afectada por el proceso de prefisuración y de esta forma se evaden las tensiones residuales.

Tabla I. Prefisuración por compresión cíclica: resultados experimentales

Table I. Cyclic compression precracking: experimental results

	σ_{\max} compresión / σ_{fractura}	Long. inicial de la fisura nucleada (mm)	Long. final de la fisura nucleada (mm)	$K_{IC\text{sin res}}$ (Mpa·m ^{1/2})	Subestimación de la $K_{IC\text{sin res}}$
GD13	0,30	0,150	0,39	9,21	7,0 %
GD20	0,46	0,025	0,10	10,54	12,3 %

3.2. Propagación por fatiga de fisuras grandes

En la figura 1, se observa el efecto de R sobre las curvas de propagación de fisuras^[4 y 7]. En esta línea, se evidencia que, para los dos materiales, el efecto de R es más pronunciado al representar los datos en función de ΔK (Fig. 1a) que en función de K_{\max} (Fig. 1b). Además, se ha trazado la recta de regresión que ajusta mejor cada serie de datos para R constante, y se indica el parámetro m (correspondiente a expresiones del tipo $da/dN = C\Delta K^m$ y/o $da/dN = C'K_{\max}^m$, donde $C' = f(C, R, m)$ ^[8 y 9]). Para la construcción de las curvas, se consideró que los puntos asociados a velocidades de propagación inferiores a 10^{-9} m/ciclo corresponden a la etapa umbral de la propagación y no fueron incluidos en el cálculo de la recta de regresión.

Se representó, para cada material y distintos valores de n , la velocidad de propagación de grieta normalizada por el factor $(1-R)^n$ con respecto a K_{\max} . Este análisis permite buscar los parámetros de ajuste para describir las cinéticas de propagación en la forma $da/dN = C''\Delta K^n K_{\max}^m$ ^[10 y 11]. Se obtuvieron distintos gráficos según el valor de n escogido. El análisis de la correlación del conjunto de puntos de cada gráfico permitió encontrar el valor numérico de n óptimo que mejor ajustaba los datos experimentales (Fig. 2). Más tarde, se representaron conjuntamente todos los datos para estos valores de n (Fig. 3). El valor de m asociado se obtuvo entonces a partir de la pendiente de la nueva recta de regresión, pues esta pendiente es la suma

de los parámetros n y m . De esta forma se obtuvo, en cada caso, la mejor ecuación $da/dN = f(K_{\max}, \Delta K)$ posible (ecs. 1 y 2, Tabla II).

En la figura 3 se observa que, para ambos materiales, la dispersión de los datos en torno a la recta de regresión es muy pequeña, lo cual demuestra que la descripción de los datos en función de K_{\max} y ΔK para los exponentes n y m hallados en el análisis es satisfactoria. Se obtiene, además, que la propagación de fisuras en estos materiales depende en mayor medida de K_{\max} y que, al aumentar la tenacidad de fractura, esta dependencia disminuye, en otras palabras que la componente estática de la sollicitación juega un papel más determinante en la propagación de fisuras en estos materiales.

En la tabla III se presentan los resultados obtenidos para cada uno de los materiales, y para cada uno de los valores de R bajo los cuales se realizaron los ensayos. En la misma se observa que la sensibilidad a fatiga para un mismo material disminuye cuando R aumenta, como era de esperarse. Además, la sensibilidad para $R=0,1$ aumenta a medida que el tamaño de grano es mayor. Sin embargo para $R=0,4$ y $R=0,7$ no se observan diferencias significativas entre las dos calidades de metal duro. Esto demuestra que al aumentar R los modos estáticos prevalecen sobre los dinámicos en ambos materiales.

En la figura 4, se muestran las micrografías correspondientes a las superficies de fractura de la calidad GD20 en la zona de propagación estable para $R=0,1$ y $R=0,7$ sobre una misma muestra de este material. Como se puede observar claramente, a

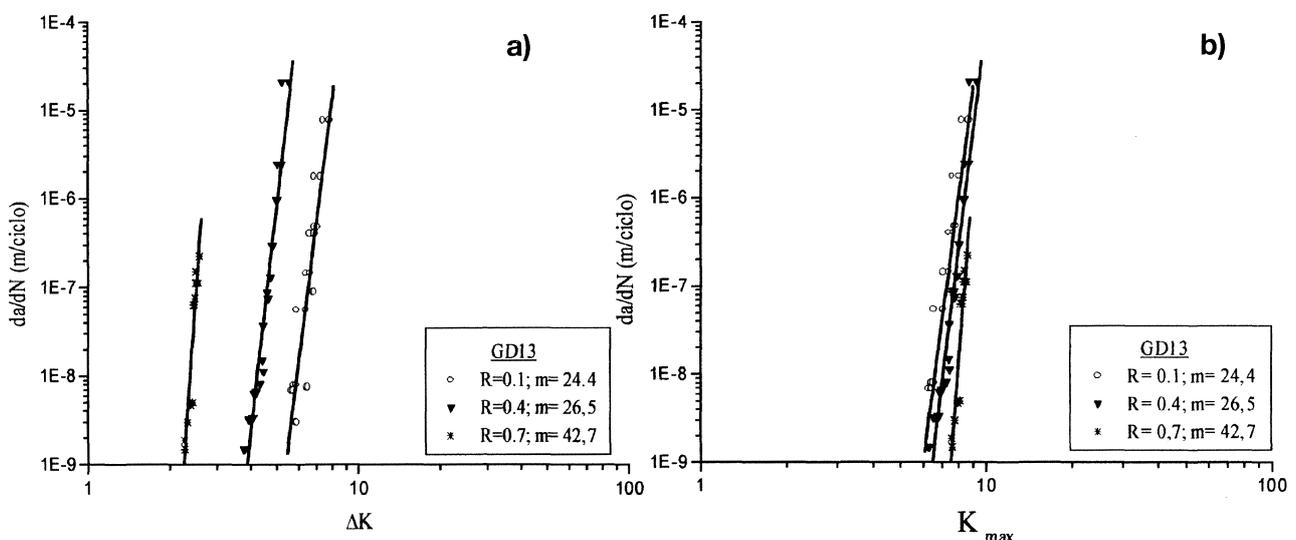


Figura 1. Velocidad de propagación de fisuras por fatiga para la calidad GD13 en función de: a) ΔK y b) K_{\max} .

Figure 1. Fatigue growth rate for GD13 material in terms of: a) K_{\max} and b) ΔK .

Tabla II. Cinética de propagación de figuras por fatiga, en términos de $da/dN = C'' \Delta K^n K_{max}^m$, para ambos materiales estudiados

Table II. Fatigue crack growth kinetics, in terms of $da/dN = C'' \Delta K^n K_{max}^m$, for both studied materials

Ecuación 1 → GD13	Ecuación 2 → GD20
$\frac{da}{dN} = 1E(-32) \cdot K_{max}^{24} \cdot \Delta K^5$	$\frac{da}{dN} = 1E(-22) \cdot K_{max}^{12} \cdot \Delta K^4$

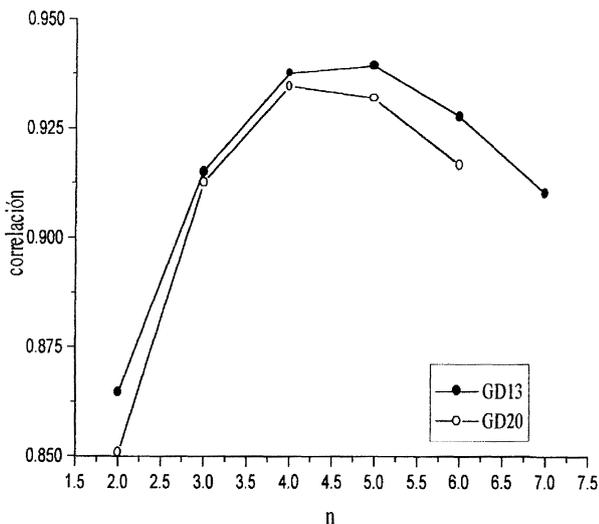


Figura 2. Análisis de correlación del exponente n para la calidad GD13 y GD20.

Figure 2. Correlation analysis n exponent for GD13 GD20 grades.

medida que aumenta la relación de esfuerzos aplicados, aparecen y predominan, microcavidades (*dimples*, los cuales se señalan con flechas) y clivaje, mecanismos de fractura propios de la rotura inestable. En cambio, cabe destacar también, que en estos materiales no se aprecia la existencia de estriaciones, rasgo característico de las superficies de rotura por fatiga en materiales dúctiles. Todo lo anterior concuerda y corrobora la mayor depen-

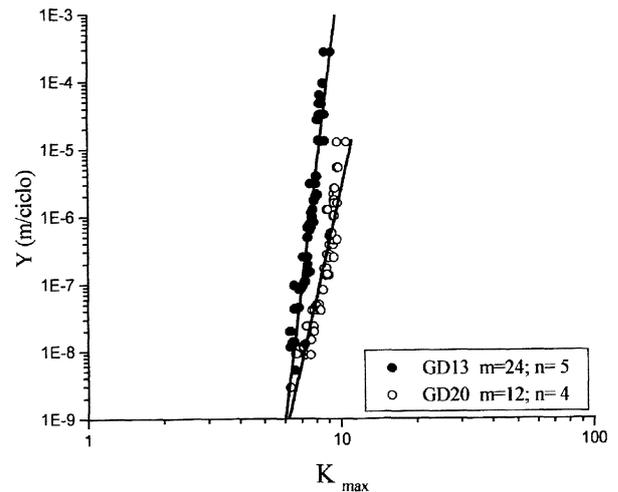


Figura 3. Crecimiento de grietas por fatiga en las calidades GD13 y GD20: experimental y un mejor ajuste a $Y = f(K_{max})$.

Figure 3. Fatigue crack growth for GD13 and GD20 grades: experimental and best fitting to $Y = f(K_{max})$.

dencia que presenta da/dN con K_{max} (componente estática de la sollicitación).

4. CONCLUSIONES

A continuación se ofrecen las conclusiones obtenidas de esta investigación:

- La compresión cíclica es un método de prefisuración altamente efectivo en materiales frágiles aunque induce tensiones residuales. Estas tensiones deben ser eliminadas mediante fatiga tensil antes de evaluar la propagación por fatiga de fisuras y evaluar la tenacidad de fractura del material.
- La propagación de fisuras en el metal duro puede caracterizarse mejor por una variante alternativa de la conocida ecuación de Paris en la que se considera el aporte de la componente cíclica y estática de la sollicitación [$da/dN = f(K_{max}, \Delta K)$].

Tabla III. Sensibilidad a fatiga de los dos materiales estudiados en los ensayos a distintas razones de carga R

Table III. Fatigue sensitivity for the materials under study for different load ratios

	K_{IC} (MPa·m ^{1/2})	K_0 R=0,1 (MPa·m ^{1/2})	K_0 R=0,4 (MPa·m ^{1/2})	K_0 R=0,7 (MPa·m ^{1/2})	K_0/K_{IC} R=0,1	K_0/K_{IC} R=0,4	K_0/K_{IC} R=0,7
GD13	9,21	6,02	6,47	7,55	0,65	0,70	0,82
GD20	10,54	6,30	7,27	8,70	0,60	0,69	0,82

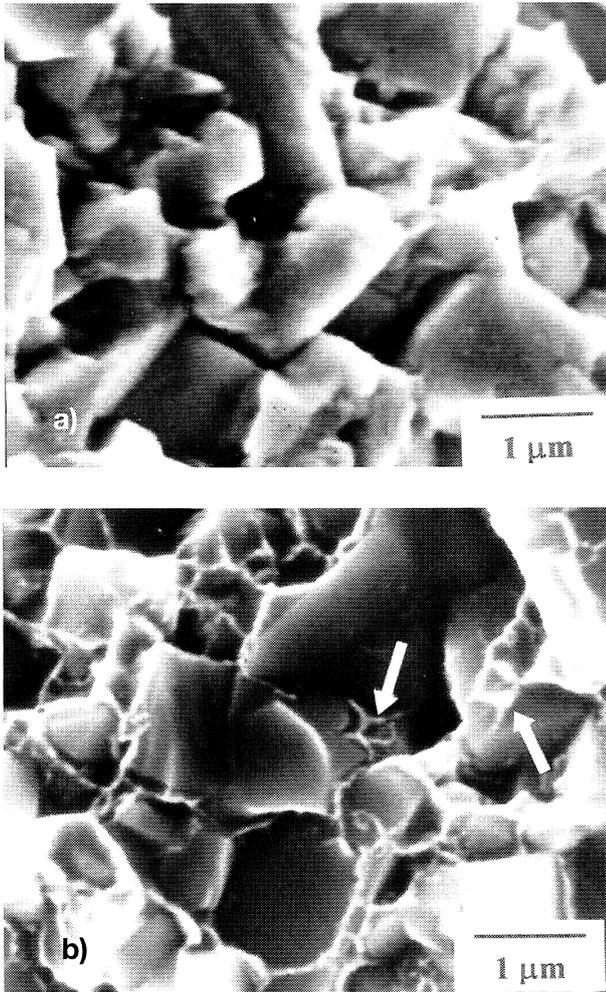


Figura 4. Micrografías correspondientes a las superficies de fractura, de la calidad GD20, en la zona de propagación estable para: a) $R=0,1$ y b) $R=0,7$.

Figure 4. Fracture surfaces for GD20 grade within the stable crack growth regime.

- En las dos calidades de metal duro estudiadas se observa que la componente estática (K_{max}) de la sollicitación predomina sobre la componente dinámica (ΔK) en el proceso de propagación de fisuras.
- En las micrografías de los materiales estudiados se observa que al aumentar la relación de esfuerzos R , se incrementa la presencia de meca-

nismos de fractura propios de la rotura bajo cargas monotónicas.

Agradecimientos

Los autores agradecen el soporte financiero proporcionado por la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (CICYT) en el marco del proyecto N(MAT97-0923. Este trabajo de investigación ha sido desarrollado con la colaboración de DURIT Ibérica. Los autores agradecen especialmente a M. Marsal en el análisis por MEB. Uno de los autores (Y.T) agradece a la Agencia Española de Cooperación Internacional (AECI) por la financiación de sus estudios de doctorado

REFERENCIAS

- [1] U. SCHLEINKOFER, H.G. SOCKEL, K. GÖRTING y W. HEINRICH, *Mater. Sci. Eng.* A209 (1996) 103-110.
- [2] U. SCHLEINKOFER, H.G. SOCKEL, K. GÖRTING y W. HEINRICH, *Int. J. Ref. Hard Mater.* 15 (1997) 103-112.
- [3] U. SCHLEINKOFER, H.G. SOCKEL, P. SCHLUND, P. KINDERMANN, A. IMBERGER, J. WERNER, K. GÖRTING y W. HEINRICH, *World Congress on Powder Metallurgy & Particulate Materials* (1996) 85-96.
- [4] N. KNEE y W.J. PLUMBRIDGE, *Proc. Conf. Advances in Fracture Research*, 4 (1984) 2685-92.
- [5] M.N. JAMES, A.M.HUMAN y S. LUYCKX, *J. Mater. Sci.* 25 (1990) 4810-4814.
- [6] R. GODSE, J. GURLAND y S. SURESH, *Mater. Sci. Eng.* A105/106 (1988) 383-387.
- [7] P.R. FRY y G.G. GARRETT, *Proc. Int. Conf. Specialty Steels and Hard Materials*, Eds. N.P. Comins, J.B. Clark (1983) 375-81.
- [8] Y. HIROSE, M.-H. BOO, H. MATSUOKA y Y.-C. PARK, *J. Soc. Mater. Sci. Japan*, 46 12 (1997) 1402-08.
- [9] S. ISHIHARA, T. GOSHIMA, T. YOSHIMOTO y T. SABU, *Fatigue '99*, 3 Eds. X.R.Wu.Z.G. Wang (1999) 1811-16.
- [10] C.J. GILBERT y R.O. RITCHIE, *Fatigue Fract. Eng Mater. Struct.* 20 10 (1997) 1453-66.
- [11] R.O. RITCHIE, C.J. GILBERT y J.M. McNANEY, *Int. J. Sol. Struct.* 37 (2000) 311-329.