COMPORTAMIENTO A FATIGA DE CARBUROS CEMENTADOS WC-CO: INFLUENCIA DEL MODO DE SOLICITACIÓN Y DE LA MICROESTRUCTURA

Y. Torres, M. Anglada y L. Llanes

Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica,
E.T.S.E.I.B., Universitat Politècnica de Catalunya, 08028 Barcelona, España

Resumen. En este trabajo se evalúa la influencia del modo de solicitación y de la microestructura en el comportamiento a fractura y fatiga de dos calidades de carburos cementados WC-Co con distintos contenidos de fase ligante y tamaño de carburo medio. La caracterización mecánica incluye la evaluación de la energía de fractura y la cinética de propagación de grietas grandes por fatiga (PGGF) bajo modos de carga diferentes: I, II, y mixto I+II. Para ello, se utilizan probetas entalladas y prefisuradas sometidas a flexión, simétrica o asimétrica según sea el caso, en cuatro puntos. Los resultados obtenidos permiten concluir que: 1) independientemente del modo de solicitación (puro o mixto) existe un fenómeno real de degradación mecánica bajo cargas cíclicas de los carburos cementados, 2) el umbral de propagación en modo I representa la condición crítica para el comienzo de la PGGF en estos materiales, y 3) el efecto del modo de carga, la energía de fractura y la sensibilidad a fatiga aumentan tanto con el contenido de cobalto como con el tamaño de carburo medio.

Abstract. The influence of loading mode and microstructure on the fracture and fatigue behavior of WC-Co cemented carbides was investigated. Microstructural variables included cobalt volume fraction and carbide grain size. Experimental characterization was conducted in terms of fracture energy and fatigue crack growth (FCG) under different loading modes: I, II, and mixed I+II. In doing so, precracked samples were subjected to four-point bending, under symmetric or asymmetric conditions depending on the loading mode to impose. The obtained results allow to conclude that: 1) there exist a real mechanical degradation phenomenon under cyclic loads for cemented carbides, 2) crack growth threshold in mode I represents the critical condition for FCG initiation in these materials; and 3) loading mode effects, fracture energy and fatigue sensitivity rise with increasing binder content and carbide grain size.

1. INTRODUCCIÓN

Los carburos cementados WC-Co se utilizan fundamentalmente en la elaboración de herramientas para el conformado y mecanizado de metales. En servicio éstas se encuentran sometidas a esfuerzos que pueden originar la rotura prematura o el recambio de las mismas. Sin embargo, el estudio del comportamiento mecánico ha sido relativamente escaso e incompleto y se limita en la mayoría de los casos a la evaluación de la tenacidad de fractura y del límite de fatiga en modo I de carga (por ejemplo, Refs. [1,2]). Además, es un hecho bien establecido que los defectos naturales preexistentes en las herramientas y componentes estructurales reales fabricados con estos materiales se encuentran sometidos en raras ocasiones a modos de carga puros (I, II ó III), lo cual remarca la carencia de información [3]. En consecuencia, un diseño más eficiente podría resultar de caracterizar el comportamiento a fractura y fatiga bajo condiciones de ensayo más complejas y representativas de las aplicaciones de los WC-Co.

En la línea de lo expuesto en el párrafo anterior, el objetivo de este trabajo se enmarca en la evaluación de la energía de fractura, G_c, y la cinética de propagación de grietas grandes por fatiga (PGGF) bajo modos de carga diferentes: I, II, y mixto I+II, además de discutir el papel de la microestructura en cada caso.

2. ENERGÍA DE FRACTURA BAJO MODOS DE SOLICITACIÓN MIXTO

Un cuerpo fisurado puede estar sometido a cualquiera de los tres modos básicos de fractura existentes: el modo I (o de abertura), el modo II (o de deslizamiento), y el modo III (o de desgarre); o incluso a combinaciones de éstos. La aproximación a la fractura basada en el factor de intensidad de tensiones, K, está relacionada con la que se fundamenta en criterios energéticos. Para materiales que experimentan un comportamiento lineal y elástico, como es el caso de los carburos cementados WC-Co, existe una unívoca relación entre K y la energía disponible para la fractura, G.

Para condiciones de deformación plana, y bajo los modos de solicitación de interés en este trabajo, estas relaciones se expresan de la siguiente forma:

$$G_I = \left(1-\nu^2\right)\frac{K_I^2}{E} \qquad \text{(modo I)} \qquad (1)$$

$$G_{II} = \left(1 - \nu^2\right)\frac{K_{II}^2}{E} \qquad \text{(modo II)} \qquad (2)$$

donde ν y E son el coeficiente de Poisson y el modulo elástico del material compuesto, respectivamente. En presencia de modos de carga puros la fractura ocurre cuando G_I y G_{II} alcanzan su correspondiente valor crítico G_{Ic} y G_{IIc}. Por otra parte, en modo mixto I+II la energía disponible para la fractura viene dada por la suma de las energías correspondientes a los dos modos de carga,

$$G = G_I + G_{II} = \frac{1-\nu^2}{E}\left(K_I^2 + K_{II}^2\right) \qquad (3)$$

ocurriendo la rotura inestable en este caso cuando $G = G_{I+IIc}$. A diferencia de para modos de solicitación puros, predecir la condición crítica de rotura bajo solicitaciones mixtas no es una tarea sencilla y prueba de ello son las distintas teorías propuestas. Éstas pueden clasificarse según cuatro criterios diferentes: el de la extensión coplanar de la grieta [4], el de la tensión principal máxima [5], el de la densidad de energía de deformación mínima [6], y el de la velocidad de liberación de energía de deformación máxima [7]. Sin embargo, ninguno de estos criterios de rotura es completamente consistente con los resultados obtenidos experimentalmente para las diferentes familias de materiales.

Desde este punto de vista, la literatura existente sobre fractura en modo mixto de materiales frágiles indica que la forma de la envolvente de fallo que mejor ajusta los resultados experimentales puede representarse genéricamente por:

$$\left(\frac{K_I}{K_{Ic}}\right)^n + \left(\frac{K_{II}}{K_{IIc}}\right)^n = 1 \qquad (4)$$

donde n es una constante que se obtiene experimentalmente y que para materiales frágiles toma valores entre 1 y 2 [8,9], mientras que el valor de K_{IIc} dependerá del criterio de fractura utilizado para describir la fractura [4-7].

3. METODOLOGÍAS DE ENSAYO UTILIZADAS PARA CARACTERIZAR EL COMPORTAMIENTO MECÁNICO EN MODO MIXTO

Existen diversas geometrías de probetas para estudiar el comportamiento a fractura y fatiga bajo modo mixto de carga, aunque no existe ninguna metodología de ensayo normalizada. En el trabajo de Richard [10], por ejemplo, se presentan algunas de las variantes empleadas comúnmente. En muchas de éstas es necesaria la prefisuración del material, lo cual es un aspecto crítico cuando se habla de materiales frágiles.

Las técnicas de indentación han sido empleadas en un gran número de investigaciones para obtener fisuras superficiales que permitan introducir condiciones de modo mixto (por ejemplo, Refs. [11,12]). Sin embargo, a pesar de ser utilizadas frecuentemente por su fácil implementación experimental, es evidente que el desarrollo de esfuerzos residuales asociados al flujo plástico del material debajo de la huella de indentación afecta marcadamente el comportamiento a fractura posterior de las fisuras inducidas. El desarrollo analítico de factores de intensidad de tensiones para distintas geometrías de fisuras en presencia de tales esfuerzos es una tarea particularmente complicada.

Una alternativa a la utilización de las técnicas de indentación es el empleo de probetas prismáticas prefisuradas sometidas a flexión asimétrica en cuatro puntos (figura 1) [13,14]. En este caso, a pesar de que el proceso de prefisuración del material frágil es mucho más complejo, la técnica presenta una serie de ventajas que estriban fundamentalmente tanto en la facilidad para introducir las condiciones de esfuerzo en modo mixto en la punta de la fisura, como en el conocimiento de la forma de los factores de intensidad de tensiones K_I y K_{II},

$$K_I = \frac{2Ps}{W^2 b}\sqrt{\pi a}\ F_I\left(\frac{a}{W}\right) \qquad (5)$$

$$K_{II} = \frac{P}{3Wb}\sqrt{\pi a}\ F_{II}\left(\frac{a}{W}\right) \qquad (6)$$

donde P es la carga aplicada y b el espesor de la muestra, mientras que F_I y F_{II} son las correspondientes constantes geométricas [14].

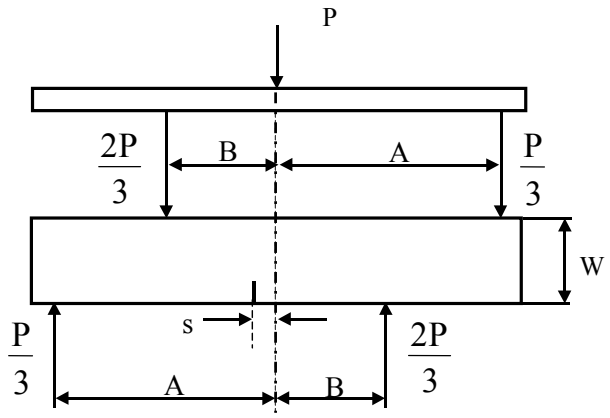


Figura 1. Esquema del ensayo de flexión asimétrico en cuatro puntos. La relación entre K_{II} y K_I puede controlarse variando la distancia s, permaneciendo constante el esfuerzo de cizalladura K_{II}.

4. ASPECTOS EXPERIMENTALES

En este trabajo se estudian dos calidades de carburos cementados con distintos contenidos en volumen de cobalto (16 y 27 %) y tamaños de carburo medio (0,5 y 1,7 μm). En la nomenclatura utilizada para definirlos (16F y 27C) el número contabiliza el contenido en volumen de la fase ligante, mientras que la letra se refiere al tamaño de la fase cerámica en términos de fino y grueso respectivamente. El coeficiente de Poisson de los metales duros estudiados es constante e igual a 0,21, mientras que sus módulos elásticos toman valores de 541 y 465 GPa, respectivamente.

La caracterización mecánica incluye la evaluación de la energía de fractura y de la cinética de PGGF bajo tres modos de carga diferentes (I, II, y I+II). Para llevar a cabo estos experimentos es necesario prefisurar el material, acción que se realizó mediante la aplicación de cargas cíclicas de compresión a probetas prismáticas entalladas, con dimensiones de 45x10x5 mm. Además, con el objetivo de eliminar el efecto de las tensiones residuales que se almacenan durante la prefisuración, todas las prefisuras se propagaron adicionalmente 1 mm aproximadamente (bajo fatiga a tracción) hasta alcanzar la zona no afectada por dichas tensiones. Los estudios en modo I se realizaron bajo flexión simétrica por cuatro puntos (con una separación entre puntos de apoyo exteriores e interiores de 40 y 20 mm respectivamente), mientras que los de modo II y mixto I+II se llevaron a cabo utilizando la configuración asimétrica (figura 1). Según esta metodología el modo II puro se implementa para s = 0, mientras que para s > 0 la solicitación aplicada pasa a ser mixta I+II, siendo menor la relación G_{II}/G_I a medida que s aumenta. En este trabajo la energía de fractura se evaluó para s = 0, 1 y 2 mm, mientras que la caracterización de la PGGF se llevó a cabo para s = 0 y 2 mm y una única relación de esfuerzos R = 0,4, con el propósito en este caso de minimizar el rozamiento entre los labios de la fisura. Adicionalmente, se determinó la sensibilidad a fatiga en modo I, II y I+II, definidas aquí como G_{Ith}/G_{Ic}, G_{IIth}/G_{IIc} y G_{I+IIth}/G_{I+IIc}, respectivamente.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la tabla 1 se muestran los resultados de la energía de fractura para los materiales y condiciones de ensayo evaluadas.

		16F	27C
G_{Ic} (J/m^2)		149,9 ± 0,6	444,2 ± 2,0
G_{IIc} (J/m^2) s = 0		124,6 ± 1,1	397,2 ± 3,5
G_{I+IIc} (J/m^2)	s = 1 mm	136,8 ± 1,4	426,2 ± 5,3
	s = 2 mm	237,7 ± 1,4	734,3 ± 4,6

Tabla 1. Resultados de la energía de fractura para los diferentes modos de carga estudiados.

De los resultados obtenidos, es interesante resaltar algunos aspectos: 1) los valores de la energía de fractura determinados difieren dependiendo del modo de solicitación aplicado; 2) se observa, independientemente del modo de carga bajo consideración, un incremento de la energía de fractura con el aumento del contenido de cobalto y el tamaño de carburo medio; y 3) la desviación estándar de G_{IIc} y G_{I+IIc} es mayor que la de G_{Ic}, debido a que la alineación de las muestras en el ensayo asimétrico es más crítica que en el ensayo simétrico [8].

En un intento por predecir los resultados experimentales obtenidos (figura 2) se pudo constatar, para ambas calidades de WC-Co, que la forma de la envolvente de fallo bajo modo mixto que mejor ajusta los mismos es del tipo genérico descrito por la ecuación (4) para el caso particular de n = 2 y utilizando el criterio de la densidad de energía de deformación mínima (donde K_{IIc}= 1,054 K_{Ic}) [6].

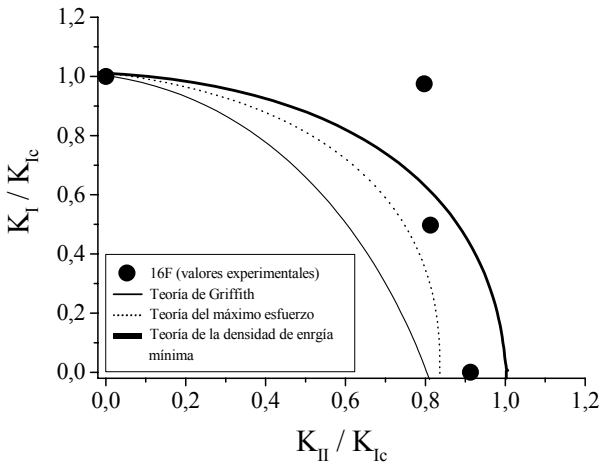


Figura 2. Predicción de la variación de K_I/K_{Ic} vs K_{II}/K_{Ic} según algunos de los criterios de rotura existentes en la literatura y comparación con los resultados experimentales para la calidad 16F.

Los resultados experimentales correspondientes a la evaluación de la PGGF en modo mixto de carga se presentan en las figuras 3 a 6. En las figuras 3 y 4 se ilustra la comparación entre la cinética de propagación en modo I, II y mixto I+II para los dos grados de metal duro investigados en este trabajo. Es importante indicar que los valores de G_{max}, para las condiciones de ensayo evaluadas, han sido obtenidos a partir de las ecuaciones (1) a (3), dependiendo del modo de carga.

Por su parte, en la figura 5 se representa la relación entre la energía de fractura correspondiente al umbral de modo mixto, G_{th} (fuerza motriz efectiva necesaria para el comienzo de la propagación de las fisuras por fatiga), y el ángulo de fase [$\phi = \tan^{-1}(\sqrt{G_{II}/G_I})$]. Finalmente, en la figura 6 se grafica la dependencia entre la sensibilidad a fatiga y el ángulo de fase.

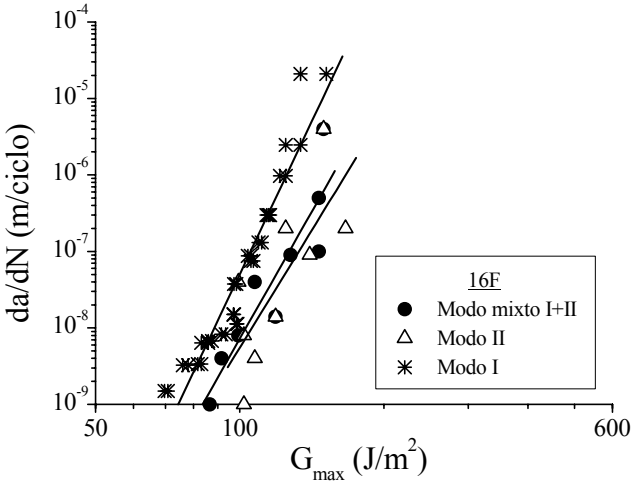


Figura 3. Comparación entre la cinética de PGGF en modo I, II y mixto I+II para la calidad 16F.

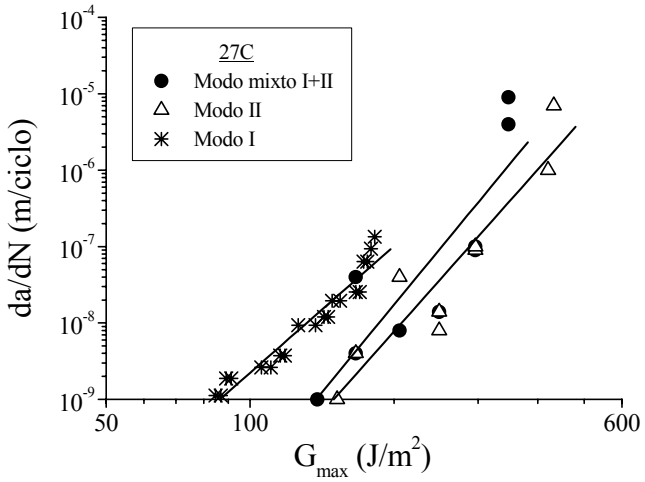


Figura 4. Comparación entre la cinética de PGGF en modo I, II y mixto I+II para la calidad 27C.

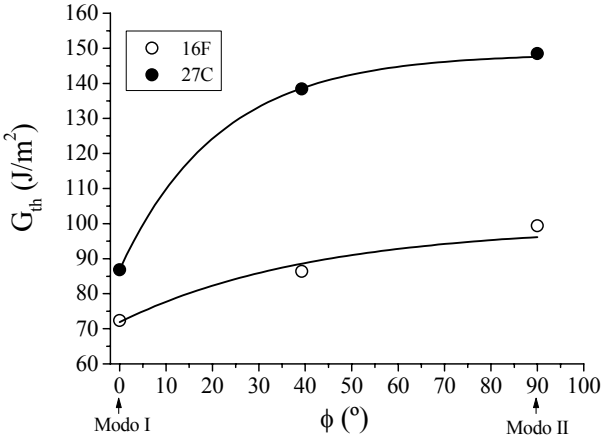


Figura 5. Variación de la energía de fractura correspondiente al umbral de propagación según el modo de solicitación para los dos materiales estudiados.

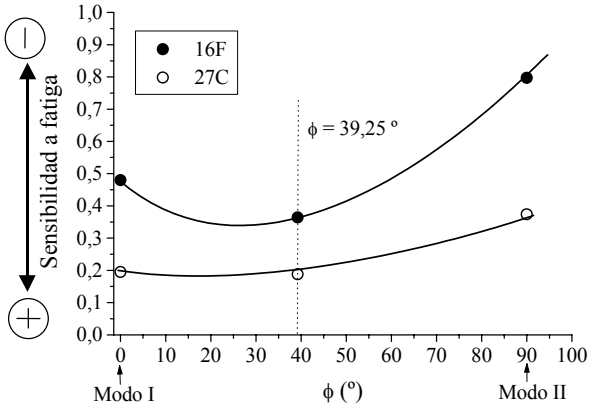


Figura 6. Variación de la sensibilidad a fatiga en función del modo de solicitación para las calidades de carburo cementado WC-Co estudiadas.

Los resultados del umbral de propagación de fisuras por fatiga muestran que la extensión de las grietas bajo modos de solicitación complejos comienza para valores de G mucho más bajos (entre 19 y 80 %) que aquellos donde G_{max} tiende a G_{IIc} y G_{I+IIc}. Los mismos aumentan a medida que el ángulo de fase y el contenido de cobalto se incrementan, resultando en que el umbral de propagación en modo I puro sea la condición crítica para que comience el crecimiento subcrítico de grietas grandes por fatiga.

Por otra parte, se observa que existe una dependencia marcada, siguiendo una ley potencial, entre da/dN y G_{max} (del tipo $da/dN = C\ G^m_{max}$ con rangos de m entre 5 y 13 según la microestructura y el modo de solicitación); y que la influencia del modo de solicitación en la PGGF es más representativa a medida que aumenta el contenido de la fase ligante.

Otro de los resultados interesantes se encuentra relacionado con la sensibilidad a fatiga, la cual aumenta con el contenido de cobalto y el tamaño de carburo medio independientemente del modo de solicitación (figura 6), aunque sin mostrar una dependencia clara entre estos parámetros para un material en particular.

El aumento de la energía de fractura y la sensibilidad a fatiga con el incremento del contenido de cobalto, independientemente del modo de solicitación, se atribuye a que la fase ligante dúctil es la responsable tanto de la formación de los ligamentos que apantallan las tensiones en la punta de la grieta, como de la susceptibilidad a la degradación bajo cargas cíclicas de los carburos cementados WC-Co [15].

Es conocido que la variación de comportamiento en el umbral de propagación en modo mixto depende críticamente del grado de apantallamiento de la punta de la fisura (dado por el cierre de grieta en modo I [16,17], y por el rozamiento entre las caras de la fisura en modo II [14,18-20]). Éste reduce localmente la fuerza motriz efectiva necesaria para el avance de la fisura y su efecto es menor a medida que el tamaño de las grietas disminuye, llegando incluso a ser despreciable para fisuras microestructuralmente pequeñas o defectos naturales [17,21]. La influencia del rozamiento en los resultados obtenidos en este trabajo, especialmente en el grado con mayor tamaño de carburo y que exhibe un comportamiento de curva-R más pronunciado [22], es evidente si se considera que en los ensayos de tenacidad y de PGGF se emplean fisuras cuyas longitudes superan claramente el milímetro [14], incluso aplicando una relación de esfuerzos relativamente elevada.

En este marco de ideas, Ritchie y col. indicaron para una aleación Ti-6Al-4V que el umbral de propagación de grietas cortas era significativamente menor que el obtenido con fisuras grandes, atribuyéndole un papel prominente al apantallamiento de la fisura en el comportamiento en modo mixto de grietas grandes [21]. A pesar de que en la literatura no existen en este campo datos para grietas microestructuralmente pequeñas, estos autores señalan que la disminución del umbral de propagación puede ser mayor para defectos de este tipo. Además, concluyen que para fisuras tanto grandes como cortas el umbral en modo I correspondiente es la condición crítica para el crecimiento de éstas por fatiga [21]. Bajo estas premisas y tomando en consideración el caso particular de los carburos cementados WC-Co, materiales en los que se ha demostrado la similitud en el comportamiento a fatiga en la región umbral de grietas grandes y de defectos naturales bajo solicitaciones en modo I [23], se puede plantear que para cualquier tipo de defecto presente y combinación de la solicitación mecánica cíclica aplicada, el umbral de propagación en modo I puede utilizarse como un parámetro efectivo en el diseño y control de la calidad de estos materiales.

6. SUMARIO

Del estudio presentado anteriormente, sobre la influencia del modo de solicitación y la microestructura en el comportamiento a fractura y fatiga de carburos cementados WC-Co, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

1. La envolvente de fractura en modo mixto I+II de carburos cementados WC-Co se describe satisfactoriamente utilizando la expresión matemática $(K_I/K_{Ic})^2 + (K_{II}/K_{IIc})^2 = 1$ y el criterio de la densidad de energía de deformación mínima.

2. La energía de fractura y la sensibilidad a la propagación de grietas grandes por fatiga aumenta tanto con el contenido de la fase ligante como con el tamaño de carburo medio, independientemente del modo de solicitación.

3. La influencia del modo de solicitación en la propagación de grietas grandes por fatiga es más representativa a medida que aumenta el contenido de cobalto.

4. El umbral de propagación de fisuras grandes por fatiga en modo I resulta ser el parámetro crítico de fatiga asociado al diseño y control de calidad de herramientas o componentes fabricados con carburos cementados WC-Co.

7. AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología (MCYT) en el marco del proyecto N° MAT2000-1014-C02-01. Adicionalmente, los autores agradecen la colaboración de DURIT Ibérica, ente proveedora de los materiales estudiados.

8. REFERENCIAS

[1] Roebuck, B. y Almond, E. A., "Deformation and fracture processes and the physical metallurgy of WC-Co hardmetals", Int. Mater. Rev., 33, 90-110 (1988)

[2] Schleinkofer, U., Sockel, H. G., Schlund, P., Görting, K. y Heinrich, W., "Behaviour of hard metals and cermets under cyclic mechanical loads", Mater. Sci. Eng., A194, 1-8 (1995)

[3] Merrill, J., "Fracture toughness of a cermet and an HSLA steel", Tesis Doctoral, Washington State University, USA (1998)

[4] Erdogan, F. y Sih, G. C., "On the crack extension in plates under plane loading and transverse load", J. Basic Eng., 85, 519-527 (1963)

[5] Paris, P. C. y Sih, G. C., "Stress analysis of cracks", Special Technical Publication 381, ASTM, Philadelphia, USA, 30-81 (1965)

[6] Sih, G. C., "Strain energy density factor applied to mixed mode crack problems", Int. J. Fract., 10, 305-322 (1974)

[7] Hussain, M. A., Pu, S. L. y Underwood, J., "Strain energy release rate for a crack under combined mode I and mode II", en *Fracture analysis*, Special Technical Publication 560, ASTM, Philadelphia, USA, 2-28 (1974)

[8] Tikare, V. y Choi, S. R. "Combined mode I and mode II fracture of monolithic ceramics", J. Amer. Ceram. Soc., 76, 2265-2272 (1993)

[9] M Margevicius, R. W., Riedle, J. y Gumbsch, P., "Fracture toughness of polycrystralline tungsten under mode I and mixed mode I/II loading", Mater. Sci. Eng., A270, 197-209 (1999)

[10] Richard, H. A., "Specimens for investigating biaxial fracture and fatigue processes", en *Biaxial and Multiaxial fatigue*, eds. M. W. Brown y K. J. Miller, Mech. Eng. Publications, UK, 217-229 (1989)

[11] Petrovic, J. J., "Mixed mode fracture of hot-pressed Si_3N_4", J. Am. Ceram. Soc., 68, 348-355 (1978)

[12] Marshall, D. B., "Mechanisms of failure from surface flaws in mixed-mode loading", J. Am. Ceram. Soc., 64, 656-660 (1981)

[13] Maccagno, T. M. y Knott, J. F., "Brittle fracture under mixed mode I/mode II loading", en *Fracture Control of Engineering Structures*, ed. H. C. van Elst y A. Bakker, Warley, UK, 1453-1464 (1986)

[14] Suresh, S., Shih, C. F., Morrone, A. y O´Dowd, N. P., "Mixed-mode fracture toughness of ceramic materials", J. Am. Ceram. Soc., 73, 1257-1267 (1990)

[15] Llanes, L., Torres, Y. y Anglada, M., "On the fatigue crack growth behavior of WC-Co cemented carbides: kinetics description, microstructural effects and fatigue sensitivity", Acta Mater., 50, 2381-2393 (2002)

[16] Campbell, J. P. y Ritchie, R. O., "Mixed-mode, high-cycle fatigue-crack growth thresholds in Ti-6Al-4V; I. A comparison of large-and short-crack behavior", Eng. Fract. Mech., 67, 209-227 (2000)

[17] Campbell, J. P. y Ritchie, R. O., "Mixed-mode, high-cycle fatigue-crack growth thresholds in Ti-6Al-4V; II. Quantification of crack-tip shielding", Eng. Fract. Mech., 67, 229-249 (2000)

[18] Tong, J., Yates, J. R. y Brown, M. W., "A model for sliding mode crack closure; Part I: theory for pure mode II loading", Eng. Fract. Mech., 52, 599-611 (1995)

[19] Tong, J., Yates, J. R. y Brown, M. W., "A model for sliding mode crack closure; Part II: mixed mode I and II loading and application", Eng. Fract. Mech., 52, 612-623 (1995)

[20] Tschegg, E. K. Stanzl, S. E., Mayer, H. R. y Czegley, M., "Crack face interactions and near-thresholds fatigue crack growth", Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct., 16, 71-83 (1992)

[21] Nalla, R. K., Campbell, J. P. y Ritchie, R. O., "Effects of microstructure on mixed-mode, high-cycle fatigue crack-growth thresholds in Ti-6Al-4V", Fat. Fract. Eng. Mater. Struct., 25, 587-606 (2002)

[22] Torres, Y., Casas, B., Casellas, D., Anglada, M. y Llanes, L., "Comportamiento de curva-R de fisuras pequeñas: modelización e implementación en el análisis de la fractura de carburos cementados WC-Co", *Anales de Mecánica de la Fractura*, 19, 239-244 (2002)

[23] Torres, Y., Anglada, M. y Llanes, L., "Fatigue mechanics of WC-Co cemented carbides", Int. J. Refract. Met. Hard Mater., 19, 341-348 (2001)