

EVALUACIÓN DE LA TENACIDAD DE FRACTURA EN CARBUROS CEMENTADOS TENACES

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 plantean y analizan diversos factores asociados a la determinación de la tenacidad de fractura, K_{Ic} , de carburos cementados tenaces. En el sistema WC-Co, la existencia de un camino libre medio de la fase ligante elevado imposibilita obtener fisuras bien desarrolladas a partir de una indentación. Por lo tanto, la utilización de métodos basados en la formación de fisuras por esta técnica queda descartada. Una alternativa es el método en el que se usan probetas entalladas y prefisuradas mediante compresión cíclica axial (SENB). La fiabilidad de este procedimiento se sustenta en un análisis de mecánica de la fractura elástica lineal combinando K_{Ic} , resistencia a rotura, y el tamaño del defecto natural crítico obtenido a partir del correspondiente análisis fractográfico. Sin embargo, la implementación efectiva de esta metodología requiere un costo de esfuerzo de trabajo y medios alto, ya que implica tiempos prolongados de máquina de fatiga y cargas elevadas de compresión para la formación de la fisura en la punta de la entalla. Además, el efecto de las tensiones residuales originadas durante el proceso de prefisuración debe ser eliminado. Otra posibilidad y la solución que se presenta en este trabajo es el uso de la técnica que emplea barras prismáticas entalladas en V con un factor de intensidad de tensiones modificado, el cual considera los efectos de curvatura de la entalla y se calibra empíricamente en términos de parámetros microestructurales tomando como referencia los resultados obtenidos con el método SENB.

Abstract. This paper describes an examination of the different aspects related to the fracture toughness measurement for tough cemented carbides. In the WC-Co system, the existence of a high binder mean free path makes impossible to obtain developed cracks out of an indentation. Therefore, methods based on the use of indentation techniques must be dismissed. A reliable alternative is to employ the SENB method where the samples are notched and pre-cracked by the application of cyclic compressive axial loads. This assertion is sustained through fracture mechanics analysis combining fracture toughness evaluation, flexural strength measurement and fractographic examination. However, the effective implementation of this methodology requires a high cost in terms of working time and equipment, given that it needs high compressive loads for the crack nucleation at the notch and long periods of cycling tests. Moreover, residual stress effects induced by the precracking procedure must be relieved. Another possibility and the solution presented in this work consists on use of the single edge V-notched beam (SEVNB) technique, but including a modification of the stress intensity factor shape which considers notch radius effects and it is empirically calibrated by recourse to microstructural parameters on the basis of the results determined using the SENB technique.

1. INTRODUCCIÓN

La tenacidad de fractura es una de las características más importantes a tener en consideración cuando se elaboran herramientas para el conformado y mecanizado de metales con carburos cementados WC-Co. Esto se debe principalmente al alto riesgo de fractura frágil que presentan las herramientas fabricadas con estos materiales. El empleo de la Mecánica de la Fractura Elástica Lineal (MFEL) en el análisis de la rotura de carburos cementados a lo largo de los años setenta permitió en parte eliminar las limitaciones existentes, particularmente la naturaleza empírica de este parámetro. Ejemplos pioneros del empleo de este enfoque para evaluar K_{Ic} en metales duros son el trabajo de Kenny [1], junto con otros publicados por Chermant y col. [2], Exner y col. [3], Lueth [4], e Ingelström y Nordberg [5].

Para evaluar K_{Ic} en materiales frágiles existen diversas metodologías que involucran diferentes técnicas de prefisuración, geometrías de las muestras y configuraciones de la grieta. Sin embargo, ninguna de ellas está internacionalmente normalizada para estos materiales [6]. Entre las técnicas más utilizadas se encuentran la de microfractura por indentación (IM) [7], la de resistencia a la rotura de probetas indentadas (IS) [8], la que utiliza una fisura superficial semicircular sometida a flexión (SCF) [9], las que emplean barras con entallas Chevron (CNB) [10], las entalladas en V (SEVNB) [11] y el método basado en probetas entalladas y prefisuradas mediante compresión cíclica, electroerosión, etc. (SENB) [12].

En metales duros con contenido de cobalto y tamaño de grano elevado, es decir, con una contigüidad de la fase

carburo baja, es imposible obtener fisuras bien desarrolladas a partir de una indentación. Por lo tanto, debe descartarse la utilización de métodos basados en la formación de fisuras por indentación. El objetivo de este trabajo es investigar en detalle la fiabilidad y viabilidad de los métodos SEVNB y SENB en términos teóricos y prácticos, así como proponer modificaciones que permitan una implementación óptima de los mismos.

2. PARÁMETROS MICROESTRUCTURALES

Es ampliamente conocido que existe un vínculo estrecho entre la microestructura de los WC-Co y sus propiedades mecánicas. Sin embargo, existe controversia a la hora de definir la forma de relacionarlas y cual es el parámetro microestructural único, si es que existe, que pudiese ser utilizado para describir satisfactoriamente esta dependencia con todas y cada una de las características mecánicas.

Las características más comunes a la hora de definir la estructura de los carburos cementados son la fracción de volumen y las dimensiones físicas de cada una de las fases. En general, es difícil y engorroso poder cambiar una característica microestructural de manera independiente en una serie de experimentos diseñados para determinar el efecto de ésta sobre las propiedades. Desde este punto de vista parámetros normalizadores como la contigüidad de la fase carburos, C_{WC} , y el camino libre medio de cobalto, λ_{Co} , se utilizan con frecuencia para lograr este objetivo.

La contigüidad es una medida del grado de contacto entre los granos de carburos. Roebuck y Almond propusieron una ecuación para calcularla en función de la fracción en volumen de cobalto, V_{Co} ($C_{WC}V_{Co}^{0,45} = 0,2$). Sin embargo, en su ecuación no se considera la influencia del tamaño de grano medio, d_{WC} , aunque su efecto en la C_{WC} y el λ_{Co} es reconocido [14,15]. A partir de una recopilación exhaustiva de los resultados experimentales de contigüidad de la fase carburo existentes en la literatura, se encontró una ecuación empírica que relacionara la C_{WC} con el d_{WC} y el V_{Co} . Para ello, el procedimiento fue el siguiente. Primero, con los datos recopilados se obtuvo una ecuación semejante a la de Roebuck y Almond con la que se lograba un mejor ajuste (figura 1). A continuación, se definió la función:

$$Y = \frac{C_{WC} V_{Co}^{0,85}}{0,07} \quad (1)$$

Seguidamente, se intentó relacionar los valores de Y con el d_{WC} . Finalmente, a partir del mejor ajuste de los resultados de $Y = f(d_{WC})$ y la ecuación 1 fue posible obtener la relación deseada:

$$C_{WC} = \frac{0,07}{V_{Co}^{0,85}} \left[0,8 + 3,1 \exp \left(-\frac{d_{WC} - 0,4}{0,22} \right) \right] \quad (2)$$

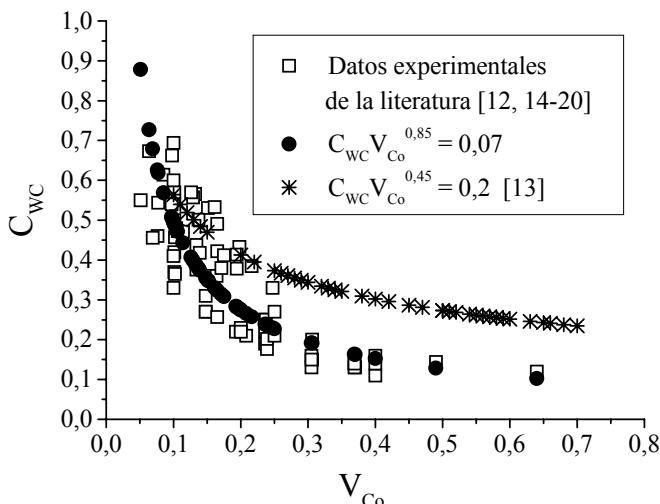


Figura 1. Ajuste de los datos de contigüidad presentados en la literatura en función del contenido de cobalto.

En la tabla 1 se presentan los resultados de los parámetros microestructurales correspondientes a los materiales investigados. En la misma se muestran los valores de C_{WC} obtenidos por vías diferentes, estimados a partir de la ecuación 2 y evaluados mediante el método del intercepto lineal, observándose una concordancia excelente entre sus valores.

	16F	16M	27C
V_{Co} (%)	16,3	16,4	27,4
d_{WC} (μm)	0,50	1,06	1,66
λ_{Co} (μm)	0,25	0,30	0,76
C_{WC} (ecuación 2)	0,61	0,32	0,18
C_{WC} (Intercepto lineal)	0,64	0,30	0,19

Tabla 1. Parámetros microestructurales de las calidades de carburos cementados WC-Co estudiadas en este trabajo.

3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

3.1. Evaluación de la tenacidad de fractura

Método SENB

Esta técnica consiste en someter a flexión hasta la rotura una probeta que presenta una entalla prefisurada en su base. Se utilizaron probetas prismáticas de dimensiones de 45x10x5 mm. En esta investigación la entalla se

mecanizó con un disco de diamante de 0,3 mm de espesor, hasta obtener relaciones entre la longitud de la misma y la altura de la probeta (a/W) de 0,3 aproximadamente. Por su parte, la prefisura se generó mediante la aplicación de esfuerzos compresivos cíclicos axiales con una relación de carga $R=10$, frecuencia de 18 Hz y tensión máxima de 830 MPa para las calidades 16F y 16M, mientras que para la 27C fue de 780 MPa. Los ensayos de prefisuración se realizaron en control de carga, en una máquina servohidráulica INSTRON con una célula de carga de 100 kN.

En la literatura se indica que la aplicación de cargas cíclicas es un procedimiento altamente efectivo para generar fisuras agudas en materiales frágiles [21]. Sin embargo, durante este proceso se generan tensiones residuales de tracción delante de la punta de la entalla cuyo efecto persiste incluso cuando el campo nominal de compresión ya no se aplica. Este hecho es también reconocido en carburos cementados WC-Co [21,22]. En consecuencia, se espera que estas tensiones residuales afecten las medidas de la tenacidad de fractura, y por tanto su comprensión y la búsqueda de procedimientos que permitan “anular” su influencia son de gran interés en el marco de este trabajo.

El estudio del tamaño de la zona afectada por las tensiones residuales y el efecto de éstas sobre la K_{Ic} se realizó mediante la aplicación de cargas cíclicas de tracción en flexión por cuatro puntos, con una separación entre puntos de apoyo exteriores e interiores de 40 y 20 mm respectivamente. Para ello se utilizó una máquina servohidráulica con célula de carga de 20 kN y control digital. Se aplicó un cociente de carga de 0,1 y frecuencias entre 0,5 y 10 Hz. La temperatura fue de 20 °C y la humedad relativa del 40 %. El crecimiento de las fisuras se evaluó mediante dos métodos complementarios. Uno de ellos consistió en el registro continuo utilizando un microscopio óptico de larga distancia focal a una magnificación de 1000X, mientras que el otro se llevó a cabo mediante seguimiento discontinuo empleando otro microscopio óptico convencional, y para lo cual las muestras tuvieron que ser desmontadas del sistema de ensayo.

Por su parte, la tenacidad de fractura se determinó tanto en muestras que presentaban las prefisuras iniciales solamente, $K_{Ic \text{ con res}}$, como en probetas con fisuras posteriormente propagadas y por tanto sin el efecto de las tensiones residuales provenientes del proceso de prefisuración por compresión cíclica, $K_{Ic \text{ sin res}}$. Estos ensayos permiten evaluar cualitativa y cuantitativamente las tensiones residuales. La velocidad de aplicación de la carga a la que se realizó el ensayo para determinar K_{Ic} fue un valor tal que para cada muestra correspondía una velocidad mínima de incremento de K de 2,75 MPa $m^{1/2}/s$. Para determinar la tenacidad se utilizó el factor de intensidad de tensiones dado por Tada y col. [23] y se utilizaron cuatro

muestras, como mínimo, en cada uno de los materiales y casos estudiados.

Método SEVNB

Este método consiste en someter a flexión hasta la rotura una probeta que presenta una entalla muy aguda en forma de V en su base. Para realizar estos ensayos se emplearon los restos de las barras rectangulares utilizadas en el método SENB, las cuales presentan dimensiones de 22x10x5 mm.

Las entallas se mecanizaron primero con un disco de diamante de 0,3 mm de espesor y luego la agudización final se realizó manualmente al pulir el fondo de las mismas con una cuchilla que contenía pasta de diamante sobre su superficie cortante. Se utilizaron probetas con relaciones a/W entre 0,2 y 0,5. Las medidas de la K_{Ic} se realizaron con la configuración del ensayo de flexión en tres puntos, con una separación entre puntos de apoyo exterior de 20 mm.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la tabla 2 se resumen los resultados obtenidos con las dos metodologías de ensayo investigadas. Los valores de K_{Ic} , obtenidos con la técnica SENB, aumentan con un decremento de la contigüidad de la fase carburo (resultado esperado, ver por ejemplo la Ref. [24]). Además, queda claro que los valores de K_{Ic} dependen del procedimiento de ensayo utilizado y que existen tensiones residuales de tracción generadas durante el proceso de prefisuración por compresión cíclica, cuyo efecto en este caso es eliminado una vez se han propagado las prefisuras entre 0,6 y 0,8 mm dependiendo del material.

Es imprescindible comentar que la magnitud y extensión de la zona afectada por estas tensiones deben estar directamente relacionadas al número de ciclos de compresión aplicados, con la relación entre el esfuerzo nominal aplicado en compresión y la resistencia a compresión de cada uno de las calidades de metal duro, así como a las características microestructurales de estos materiales. Sin embargo, un conocimiento detallado de la influencia de cada uno de estos parámetros no constituyó uno de los objetivos de este trabajo.

La tendencia opuesta exhibida por los resultados con el procedimiento SEVNB se debe a las limitaciones experimentales implícitas a la aplicación de esta técnica a los materiales de grano muy fino. La aplicación de este método ofreció valores de K_{Ic} directamente proporcionales al ancho de la punta de la entalla. Sin embargo, éstos siempre son más altos que los determinados con el método SENB, siendo la diferencia relativa mayor para el material de grano más fino (el cual en este caso, también es el de mayor C_{WC}).

	Calidades de WC-Co		
	16F	16M	27C
Método de ensayo	Tenacidad de fractura (MPam ^{1/2})		
SENB	8,6 ± 0,7 ⁽¹⁾ 9,2 ± 0,6 ⁽²⁾	9,2 ± 0,9 ⁽¹⁾ 10,5 ± 0,8 ⁽²⁾	10,8 ± 1,0 ⁽¹⁾ 14,7 ± 1,0 ⁽²⁾
SEVNB ⁽³⁾	(19 μm) 18,7 ± 0,9 (45 μm) 23,2 ± 0,8 (68 μm) 28,3 ± 0,2	(15 μm) 15,2 ± 0,4 (19 μm) 16,4 ± 0,9 (23 μm) 16,5 ± 0,5 (70 μm) 20,6 ± 0,3	(18 μm) 15,0 ± 0,4 (30 μm) 15,6 ± 0,9 (37 μm) 16,2 ± 0,5 (45 μm) 16,4 ± 0,3 (50 μm) 17,5 ± 0,3

- (1) Prefisuras obtenidas por compresión cíclica.
(2) Prefisuras inducidas como en (1) y posteriormente propagadas bajo fatiga tensil.
(3) Valores correspondientes a diferentes diámetros de la entalla en V (datos entre paréntesis).

Tabla 2. Valores de tenacidad de fractura para cada calidad y método de ensayo evaluado.

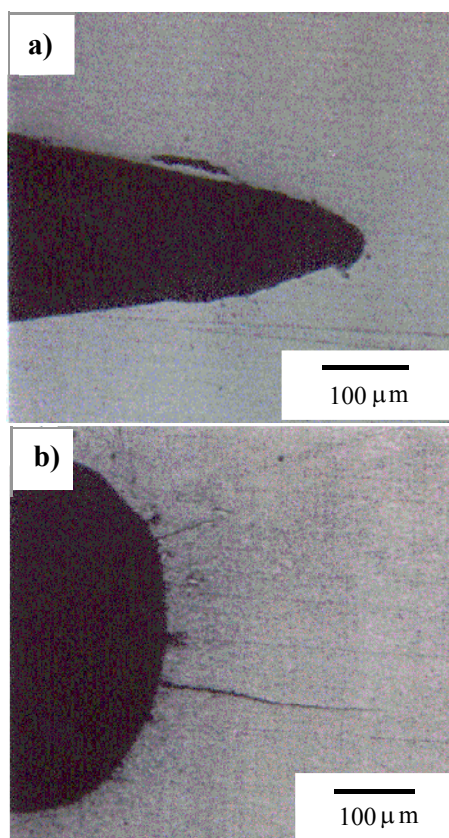


Figura 2. a) Entalla en V de diámetro 23 μm aproximadamente; y b) prefisura fina, aguda y pasante obtenida por compresión cíclica.

La razón principal para las diferencias anteriores podría relacionarse, siguiendo lo planteado en un trabajo reciente donde se utiliza el método SEVNB para evaluar la tenacidad de fractura en cerámicas [11], con el requisito empírico de que el ancho del fondo de la entalla debe ser menor a dos veces el tamaño de la unidad microestructural del material (el d_{WC} en el presente trabajo) para conseguir valores de K_{Ic} válidos con este método. En este estudio, como resultado del procedimiento manual usado para producir la entalla en V, se logró un ancho del fondo de la entalla de sólo 15 μm como mínimo. Así, el valor del fondo de la entalla límite alcanzado es treinta y ocho, catorce y once veces la unidad microestructural de los grados 16F, 16M y 27C, respectivamente. Por consiguiente, se infiere que los resultados obtenidos, con excepción de los del grado 27C, son poco fiables en términos absolutos. Tomando lo anterior en consideración, puede comentarse que las entallas en V no resultan lo bastante estrechas, con respecto a las unidades microestructurales que se analizan, para las tres calidades de metal duro. Esto se puede observar además si éstas (figura 2a) se comparan con las fisuras obtenidas con el método SENB (figura 2b).

4.1. Fiabilidad de los valores de tenacidad de fractura evaluados

En el apartado anterior se sugiere al método SENB como la técnica más eficaz, entre las evaluadas en esta investigación, para obtener valores fiables de K_{Ic} . Esta recomendación se sustenta principalmente con argumentos tanto conceptuales como técnicos; es decir, es un método que utiliza una prefisura fina, libre de tensiones residuales, y se realiza bajo un estado de tensión completamente definido. Por otro lado, no puede inferirse la fiabilidad precisa de los valores de K_{Ic} con una valoración comparativa entre las metodologías de ensayo. Desde este punto de vista, la información requerida puede lograrse si se realiza una comparación directa entre los tamaños de los defectos críticos medidos experimentalmente y los estimados, usando un análisis en el marco de la MFEL, a partir de resultados experimentales de resistencia a la rotura transversal (tabla 3) y de tenacidad de fractura. Con el propósito de estimar los tamaños de los defectos que determinan la rotura, se utiliza el factor Y que corresponde a la solución de un defecto circular embebido en la muestra, es decir $2/\pi$.

La comparación entre el tamaño del defecto crítico estimado con este modelo, para las tres calidades estudiadas, y los valores obtenidos experimentalmente se muestra en la tabla 3. Los tamaños de estos defectos críticos, determinados experimentalmente, son indicados en términos de $2a$, siendo a el radio del defecto circular cuya área de la sección transversal es equivalente a la de los defectos de forma irregular observados al analizar las muestras rotas. A partir de esta comparación se puede indicar que existe una

concordancia aceptable entre estos valores, a pesar de lo simple e ideal del modelo utilizado. Además, está claro que para valores de K_{Ic} superiores a los obtenidos usando el método SENB se obtendrán sobreestimaciones del tamaño del defecto crítico. Semejante hallazgo brinda apoyo adicional a la viabilidad de esta técnica para proporcionar valores de K_{Ic} fiables para los carburos cementados WC-Co.

		16F	16M	27C
Defecto circular	$(2a)_{\text{experimental}} (\mu\text{m})$	8-14	14-34	30-42
	$(2a)_{\text{estimado}} (\mu\text{m})$	18	53	49
Resistencia a la rotura transversal (MPa)		2742	1813	2629

Tabla 3. Resistencia mecánica y tamaño de defecto crítico (experimental y estimado con un modelo de MFEL).

4.2. Implementación efectiva del método SEVNB: modificación del factor de intensidad de tensiones

La distribución de tensiones alrededor de la punta de una grieta tiene una singularidad de raíz cuadrada y está caracterizada por el factor de intensidad de tensiones, K_I , según:

$$\sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \frac{1 + \left(\frac{r}{a}\right)}{\left(1 + \left(\frac{r}{2a}\right)\right)^{1/2}} \quad (3)$$

$$\sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \quad (r \ll a)$$

donde a es la mitad de la longitud de la fisura y r la distancia a partir de la punta de la misma.

En la punta de una entalla no hay singularidad; sin embargo, la distribución de esfuerzos alrededor de ésta puede expresarse por un factor de intensidad de tensiones similar al de una grieta desplazando el origen de coordenadas de la punta hacia el interior una distancia $\rho/4$, siendo ρ el diámetro de la entalla. El esfuerzo vertical a lo largo del eje X y en la vecindad de la punta de la entalla, $\sigma_{y,n}$, se expresa aproximadamente como:

$$\sigma_y = \frac{K_{I,n}}{\sqrt{2\pi r}} \frac{1 + \left(\frac{\rho}{2r}\right)}{\left(1 + \left(\frac{\rho}{4r}\right)\right)^{3/2}} \quad (0 \leq r \leq \rho/4) \quad (4)$$

donde $K_{I,n}$ es el factor de intensidad de tensiones para la entalla.

Usami y col. [25] han descrito la relación que existe entre la tenacidad de fractura de una probeta fisurada y una entallada basándose en el criterio de esfuerzo de fractura local para la rotura inestable por clivaje. Su idea consiste en que la grieta propagará de forma inestable cuando el esfuerzo de tracción local, en un punto situado a una distancia r_0 de la punta de la grieta, exceda un esfuerzo crítico σ_{cr} . Por lo tanto, la relación entre la tenacidad de fractura de una grieta, K_{Ic} , y la asociada a una entalla $K_{c,n}$, es obtenida a partir de las ecuaciones (3) y (4) como:

$$\frac{K_{c,n}}{K_{Ic}} = \frac{\left(1 + \frac{\rho}{4r_0}\right)^{3/2}}{1 + \frac{\rho}{2r_0}} \quad (5)$$

Según la calibración realizada en este trabajo para esta técnica empleando el SENB como técnica referencia, se encontró que los valores de la distancia crítica para los carburos cementados WC-Co viene dada por un parámetro microestructural complejo que empíricamente se ajusta al producto $4\lambda_{Co}(1-C_{WC})$ y que varía entre 0,4 y 2,5 μm . En esta investigación, el factor de intensidad de tensiones modificado (SEVNB modificado) se estima a partir de la ecuación 5, utilizando un diámetro de entalla de $\sim 20\mu\text{m}$, así como los parámetros microestructurales y los valores de tenacidad obtenidos con el método SEVNB.

En la figura 3 se muestra una comparación entre las tres metodologías utilizadas para evaluar la K_{Ic} en este trabajo. A partir de ésta se puede indicar que los resultados de tenacidad de fractura obtenidos con el SEVNB modificado son satisfactorios no solo para WC-Co tenaces sino también para el resto de calidades investigadas. Estas modificaciones permiten la implementación efectiva de una técnica cuyo costo de equipamiento y de recursos humanos es mucho menor que los necesarios para llevar a cabo el método SENB.

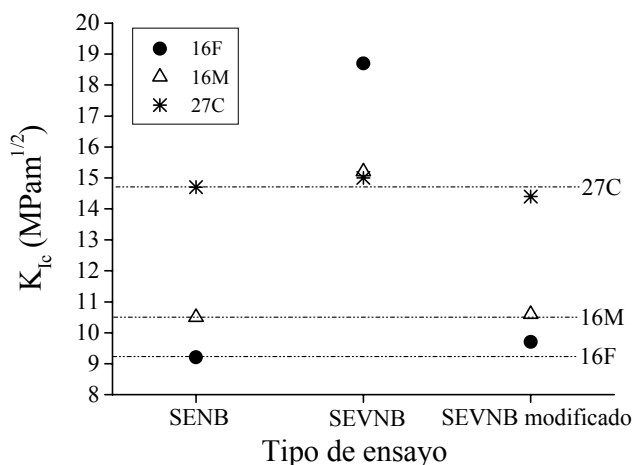


Figura 3. Medidas de tenacidad de fractura para las técnicas de ensayo investigadas: **a)** SENB, **b)** SEVNB, y **c)** SEVNB modificado.

5. SUMARIO

Del estudio presentado anteriormente, sobre la evaluación de la K_{Ic} en WC-Co tenaces, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

1. El método SENB resulta el más convenientes para obtener resultados de K_{Ic} fiables en los carburos cementados WC-Co. Sin embargo, los valores de K_{Ic} medidos con el SENB dependen fuertemente de las tensiones residuales de tracción inducidas durante el proceso de prefisuración y cuyo efecto debe ser eliminado. La fiabilidad de esta técnica se sustenta en la buena concordancia que existe entre los tamaños de defectos críticos medidos y estimados, estos últimos obtenidos a partir de un análisis de MFEL.
2. El empleo de la técnica SEVNB utilizando un factor de intensidad de tensiones modificado, en el que se introducen los efectos de curvatura de la entalla y una calibración empírica en términos de parámetros microestructurales, se plantea en este trabajo como una alternativa fiable y viable a la vez para evaluar la tenacidad de fractura de la mayoría de los WC-Co comerciales.

6. 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.

7. REFERENCIAS

- [1] Kenny, P., Powder Metall., 14, 22-38 (1971)
- [2] Chermant, J. L., Deschanvres, A. e Iost, A., Mat. Res. Bull., 8, 925-934 (1973)
- [3] Exner, H. E., Walter, A. y Pabst, R., Mater. Sci. Eng., 16, 231-238 (1974)

- [4] Lueth, R. C. en *Fracture Mechanics of Ceramics*, eds. R. C. Bradt, D. P. Hasselmann y F. F. Lange, Plenum Press, New York, USA, 791-806 (1974)
- [5] Ingelström, N. y Nordberg, H., Eng. Fract. Mech., 6, 597-607 (1974)
- [6] Roebuck, B., Gee, M. G. y Morrell, R., Powder Metall., 39, 213-218 (1996)
- [7] Anstis, G. R., Chantikul, P. y Lawn, B. R., J. Am. Ceram. Soc., 64, 533-538 (1981)
- [8] Chantikul, P., Anstis, G. R., Chantikul, P., Lawn, B. R. y Marshall, D. B., J. Am. Ceram. Soc., 64, 538-546 (1981)
- [9] Getting, R. J. y Quinn, G. D., en *Fracture Mechanics of Ceramics*, eds. R. C. Bradt, D. P. H. Hasselmann, D. Munz, F. F. Lange, M. Sakai, y V. Ya. Shevchenko, Plenum Press, New York, USA 203-218 (1996)
- [10] Munz, D., Bubsey, R. T. y Shannon, J. L., J. Am. Ceram. Soc., 63, 300-305 (1983)
- [11] Kübler, J., en *9th Cimtec-World Ceramics Congress, Ceramics: Getting into the 2000's - Part A*, ed. P. Vicenzini, Techna Srl, Faenza, Italia, 625-632 (1999)
- [12] Pickens, J. R. y Gurland, J., Mater. Sci. Eng., 33, 135-142 (1978)
- [13] Roebuck, B. y Almond, E. A., Int. Mater. Rev., 33, 90-110 (1988)
- [14] Upadhyaya, G. S., Noyes Publications, New Jersey, USA (1998)
- [15] Lee, H. C. y Gurland, J., Mater. Sci. Eng., 33, 125-133 (1978)
- [16] Nakamura M. y Gurland, J., Metall. Trans. A., 11A, 141-146 (1980)
- [17] Bolton D. y Keely, R. J., Int. J. Refract. Met. Hard Mater., 103-111 (1982)
- [18] Fry P. R. y Garret, G. G., en Proc. Int. on Speciality Steels and Hard Materials, eds. N. P. Comins y J. B. Clark, Pergamon, London, UK, 375-381 (1983)
- [19] Knee, N. y Plumbridge, W. J., en Proc. 6th Int. Conf. Fracture, eds. S. R. Valluri, D. M. R. Taplin, P. Ramarao, J. F. Knott y R. Dubey, New Delhi, India, 4, 2685-2692 (1984)
- [20] Sigl L. S. y Fischmeister, H. F., Acta Metall., 36, 887-897 (1988)
- [21] James, M. N., Human, A. M. y Luyckx, S., J. Mater. Sci., 25, 4810-4814 (1990)
- [22] Godse, R., Gurland, J. y Suresh, S., Mater. Sci. Eng., A105/106, 383-387 (1988)
- [23] Tada, H., Paris, P. C. e Irwin, G. R., Paris Productions Incorporated (and Del Research Corporation), St. Louis, USA, 2.13-2.15 (1973)
- [24] Ravichandran, K. S., Acta Metall. Mater., 42, 143-150 (1994)
- [25] Usami, S., Kimoto, H., Takahashi, I. y Sida, S., Eng. Fract. Mech., 23, 4, 745-761 (1986)

