

MODELADO DE LOS MECANISMOS DE PROPAGACIÓN DE FISURAS EN FUNDICIONES MODULARES AUSTEMPERIZADAS UTILIZANDO EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS DE CONTORNO

Jhony E. Ortiz, Adrián P. Csilino, José L. Otegui

División de Soldadura y Fractomecánica - INTEMA

Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Mar del Plata – CONICET

Av. Juan B. Justo 4302 (7600) Mar del Plata, Argentina

e-mail: jortiz@fi.mdp.edu.ar / FAX: +54 (223) 4810046

RESUMEN

En este trabajo se utiliza el método dual de los elementos de contorno (DBEM) para modelar los micromecanismos de propagación de fisuras por fatiga en fundiciones nodulares austemperizadas (ADI). El desarrollo del trabajo pone énfasis en los distintos procedimientos implementados para la evaluación de los efectos de la interacción entre fisuras, microfisuras y nódulos de grafitos. Los resultados obtenidos concuerdan con las observaciones experimentales y permiten validar los modelos teóricos de mecánica de fractura propuestos en la literatura.

ABSTRACT

In this work the Dual Boundary Element Method (DBEM) is used to model the micro mechanics of fatigue crack propagation in austempered ductile iron (ADI). Emphasis is put in devising accurate procedures for the evaluation of the interaction effects between cracks, microcracks and graphite nodules. Obtained results are in agreement with experimental observations, allowing to validate theoretical fracture mechanics models proposed in the literature.

INTRODUCCIÓN

Las fundiciones nodulares austemperizadas (ADI) son materiales compuestos de nódulos de grafito insertos en una matriz de ausferrita. Esta microestructura dota a las ADI de excelentes propiedades mecánicas, convirtiéndolas en un material versátil, apto para numerosas aplicaciones ingenieriles[1]. Las propiedades de las ADI depende fuertemente de la cantidad, tamaño y forma de los nódulos de grafito, estos parámetros son caracterizados por el conteo nodular(nod/mm^2), el tamaño del nódulo y la nodularidad. En la **Figura 1** se muestra una micrografía estándar de ADI 60-100%. Esto es, sesenta nódulos por mm^2 , con 100% de nodularidad (nódulos equiaxiales).

En el estudio realizado por Greno[2] respecto a la morfología de la propagación de fisuras por fatiga en ADI, se demuestra que el camino preferencial de propagación intercepta los nódulos de grafito. Al mismo tiempo se observa que la interface grafito-matriz es extremadamente irregular, con vértice agudos que en ciertos casos constituyen inminentes microfisuras que emanan de los nódulos. En su trabajo Greno propone que estas microfisuras interactúan y propagan simultáneamente a la fisura principal, disminuyendo de esta forma la energía elástica disponible para la propagación de la fisura principal.

En este trabajo mecanismos de propagación de fisuras por fatiga en ADI han sido numéricamente modelados usando el Método Dual de los Elementos de Contorno (DBEM).

El DBEM es una técnica numérica muy bien establecida en el área de la mecánica de fractura ya que elimina el problema del remallado, que es típico de los métodos de dominio y otras formulaciones de los elementos de contorno[3]. Se propone aquí adecuar la herramienta para modelar la propagación por fatiga de sistemas fisura-microfisura. Para detalles adicionales sobre la formulación del DBEM y su implementación el lector puede referirse a los trabajos [4] y [5].

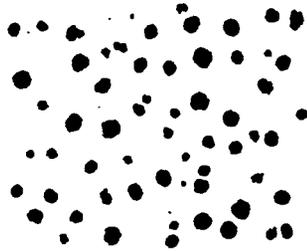


Figura 1: Micrografía ADI 60-100%

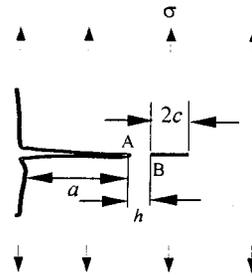


Figura 2: Microfisura en la vecindad del vértice de fisura principal

EVALUACIÓN DEL FACTOR DE INTENSIDAD DE TENSIONES

La propagación de fisuras por fatiga en el campo de la mecánica de fractura lineal elástica está gobernado por el factor de intensidad de tensiones K . El modelado numérico de este fenómeno requiere así de una metodología eficaz para la evaluación de K , sobre el que descansan las predicciones sobre la dirección y magnitud de la extensión de la fisura. Al mismo tiempo el modelo numérico debe contar con la versatilidad necesaria para actualizar la geometría del modelo acompañando el progreso de las fisuras.

El factor de intensidad de tensiones K es evaluado en este trabajo a partir de los desplazamientos relativos de la caras de las fisuras en la zona vecina a su vértice[6]. Esta técnica es muy versátil, apta para evaluar K en fisuras muy próximas y de fácil implementación, pero su eficiencia depende fuertemente de la precisión de los desplazamientos calculados sobre las caras de la fisura. Con el objeto de lograr una mejor representación del campo de desplazamientos en la zona del vértice de fisura se implementaron elementos especiales, los que incorporan el comportamiento singular de los campos de desplazamientos y tracciones del vértice de fisura en sus funciones de forma. El procedimiento usado por Yamada [7] para elementos finitos fue utilizado en este trabajo para derivar las funciones de forma especiales para el campo de desplazamientos en elementos discontinuos. La precisión de los elementos especiales para problemas de fisuras y microfisuras fue evaluada comparando los resultados obtenidos con los reportados por Rubinstein [8]. Los modelos numéricos fueron construidos siguiendo el criterio de Dutta [9], quien sugiere que para obtener el comportamiento fisura-microfisura la longitud de fisura a es al menos 20 veces mas grande que la longitud de la microfisura $2c$, ver **Figura 2**. Las diferencias entre los valores de K computados y referenciados para el vértice de fisura A son mostrados en la **Figura 3**, para un amplio rango de posiciones relativas de la microfisura, h/c . Los valores estimados han sido obtenidos para longitud del elemento especial de $L/a < 0.01$. Similares resultados fueron obtenidos para el vértice B de la microfisura. Vale la pena notar que no existe referencia para este último caso. Para longitudes del elemento especial

$L/c < 0.05$ la variación en los resultados es menor al 1%. Para todos los casos los mejores resultados fueron obtenidos cuando los desplazamientos del nodo más cercano al vértice de fisura fueron considerados para el cálculo de K .

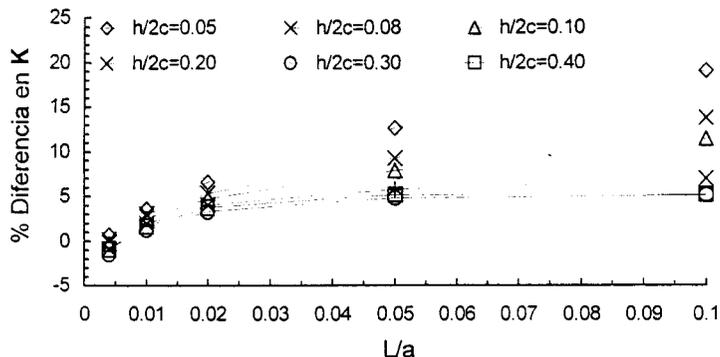


Figura 3: Comparación de los resultados con la solución de Rubinstein [8]

ANÁLISIS DE EXTENSIÓN DE FISURAS

El análisis incremental de extensión de fisuras asume una discretización lineal por tramos que sigue la propagación de la fisura. Para cada incremento de extensión de fisura, el DBEM es aplicado para desarrollar el análisis de tensiones y el cómputo de K para cada una de las fisuras en el modelo. La magnitud y la dirección de la extensión de las fisuras son calculadas en cada incremento, las que se introducen en el modelo agregando nuevos elementos a continuación del antiguo vértice de fisura. Los pasos antes señalados son entonces repetidos hasta que las fisuras alcanzan una longitud especificada. El criterio de la mínima densidad de energía de deformación debido a Sih[10] es usado en este trabajo para calcular la dirección local del crecimiento de fisura. Con el propósito de asegurar la unicidad del camino de propagación independientemente de la discretización utilizada en el modelo se emplea un algoritmo predictor-corrector propuesto por Portela [4].

La fórmula de propagación de fisuras por fatiga debida a Klesnil y Lukas [11] fue seleccionada para relacionar la tasa de propagación da/dN , con el rango del factor de intensidad de tensiones $\Delta K = K_{max} - K_{min}$, ya que la misma considera el régimen cerca al umbral:

$$\frac{da}{dN} = C \cdot (\Delta K^m - \Delta K_{th}^m) \quad (1)$$

donde el término ΔK_{th} corresponde al valor umbral de K , por debajo del cual las fisuras no propagan. C y m son constantes del material.

El efecto del cierre parcial de fisuras (crack closure) sobre tasa de propagación es considerado al definir en el rango del factor de intensidad de tensiones efectivo:

$$\Delta K_{eff} = K_{max} - K_{op} \quad (2)$$

donde K_{op} corresponde al valor de K en el que la fisura se abre en forma completa.

Finalmente, la magnitud de la extensión de la fisura es calculada combinando las expresiones (1) y (2), escritas en forma incremental:

$$\Delta a = C \cdot (\Delta K_{eff}^m - \Delta K_{th}^m) \cdot \Delta N \quad (3)$$

RESULTADOS Y DISCUSION

Campo de tensiones en la microestructura ADI

Previo al análisis de propagación de fisura por fatiga se estudio la distribución de tensiones en la microestructura de las ADI con el objeto de estimar posiciones preferenciales de iniciación de microfisuras en los nódulos, y la desviación standard de los valores de K para fisuras y microfisuras.

Para todos los modelos los nódulos de grafito fueron considerados como agujeros circulares, es decir, una esfericidad del 100%, despreciando la resistencia del grafito frente a la de la matriz. La razón r/d , donde r es el radio del nódulo y d la distancia mínima promedio entre los centros de los nódulos fue tomada como parámetro característico del problema. Un análisis estadístico de mediciones sobre micrografías estándar ADI usando un software en procesamiento de imagen [12] muestra que, para un amplio rango de conteo nodular (60 a 600 nódulos/mm²), tanto el valor promedio de r/d así como la desviación estándar son casi constantes. El referido valor corresponde a $r/d=0.25$ con una desviación estándar del 35%. Los modelos en BEM fueron generados aleatoriamente para geometrías con valores de r/d en el rango de 0.1 a 0.3. Los resultados del análisis estadístico conjuntamente con el uso de funciones de peso permitió estimar la desviación de los valores K debido al efecto de los nódulos. Los resultados del análisis indican [13]:

- Una desviación estándar del 10% para valores de K en las microfisuras emanantes de los nódulos con una longitud menor a un radio de nódulo ($c < r$). Esta desviación crece hasta el 20% para longitudes de microfisuras de $c=2r$.
- Los niveles de K para una simple fisura en un material homogéneo son más altos que los correspondientes a la misma fisura embebida en una microestructura ADI. La diferencia es menor del 10%, para longitudes de fisura de $2a > 40d$. Esta diferencia se reduce al 7% para fisuras de longitud $2a > 100d$.

Propagación de fisuras por fatiga

Con el propósito de estudiar el efecto del mecanismo de interacción entre fisura y microfisuras en ADI, se estudió una serie de modelos consistentes en una fisura principal que propaga dentro de un arreglo de nódulos con microfisuras (ver **Figura 4**). Los niveles de carga son tales que el nivel inicial de ΔK para las microfisuras están muy cerca al umbral de propagación. Las constantes del material para la ley de propagación fueron seleccionados de acuerdo a los resultados experimentales $C=4.43 \cdot 10^{-10}$, $m=1.85$ y $\Delta K_{th}=5 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$.

La evolución de ΔK para el modelo de la **Figura 4** son reportados en **Figura 5**. Es importante notar como al aproximarse la fisura principal a la microfisura A , el efecto de interacción causa un sustancial incremento en el ΔK en la microfisura, que propaga en el sentido inverso al crecimiento de fisura principal hasta unirse a la misma. Tan pronto ambas coalescen, la microfisura B sobre el lado opuesto del nódulo toma el rol dominante como fisura principal. El mecanismo se repite sucesivamente dando a los vértices B , D , F y H el rol de fisura dominante. Al mismo tiempo, las microfisuras A , C , E y G han incrementado substancialmente sus niveles de ΔK como una consecuencia de la interacción con la fisura principal, propagando hacia esta. Las microfisuras I , J , K y L no toman parte en la propagación principal, sin embargo presentan el mismo comportamiento general de las otras microfisuras. Se verifica de esta forma que más de una microfisura propaga simultáneamente hacia el vértice de la fisura dominante, justificando la presencia de las bifurcaciones observadas durante los experimentos [2].

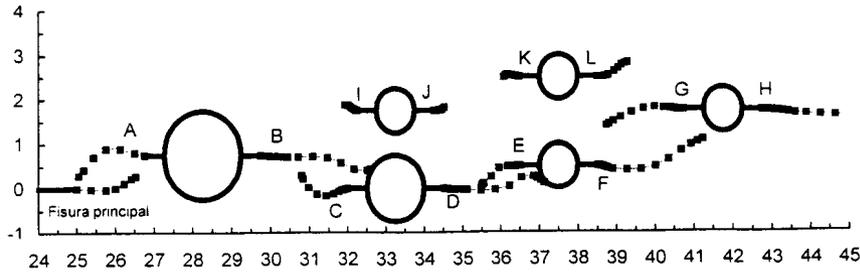


Figura 4: Evolución de la propagación de fisuras en arreglo general de nódulos

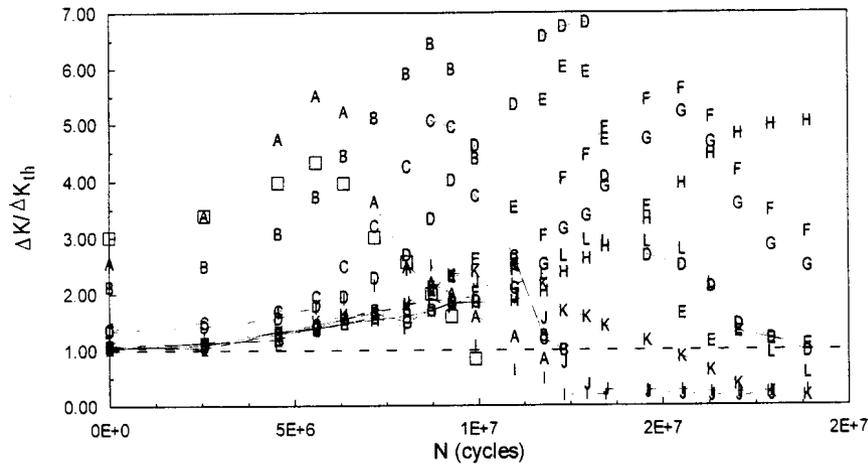


Figura 5. Evolución de ΔK para un arreglo general de nódulos

Una limitación en el análisis anterior está dado porque solo un número reducido de nódulos es considerados en los modelos. El efecto de la estructura de las ADI es considerado mediante los resultados del estudio presentado en la sección anterior. En este sentido es importante notar que los efectos de las desviaciones calculadas para los valores de K sobre el mecanismo de propagación observado dependen del nivel de carga aplicada. Para niveles de carga que inducen niveles de ΔK cercanos a ΔK_{th} , el rango de desviación puede situar al nivel de ΔK bajo el umbral de propagación produciendo el arresto del mecanismo. Por otro lado, cuando la diferencia entre el nivel de carga aplicada ΔK y ΔK_{th} aumenta, el efecto de los límites de la desviación en ΔK son menos importante. Aunque podría este afectar la tasa de propagación general, la probabilidad de que el mecanismo se detenga disminuye. Al mismo tiempo es importante no olvidar la naturaleza tridimensional del problema. Las fisuras largas o cortas tienen diferente comportamiento debido al tamaño relativo de sus frentes de fisura. La presencia de irregularidades causa un efecto más atenuado para un frente amplio que para un tamaño de frente reducido. Por ello, se puede decir que el incremento en el valor del FIT calculado para la fisura principal presenta solamente un efecto local que podría ser casi

imperceptible si solamente la presencia de un solo nódulo cerca del frente de la fisura es considerado. La tasa de propagación de la fisura principal corresponde a un promedio de todos los fenómenos que simultáneamente toma lugar a lo largo de toda la extensión del frente de fisura.

CONCLUSIONES

El BEM fue exitosamente empleado en este trabajo para estudiar el micromecanismo de propagación de fisuras por fatiga en fundiciones nodulares austemperizadas. La herramienta de modelado está basada sobre la formulación dual del DBEM, con elementos especiales contiguos al vértice de fisura y la fórmula de desplazamiento usada para computar el factor de intensidad de tensiones. Este procedimiento permite estimar la evaluación de los efectos de interacción entre fisuras, microfisuras y nódulos de grafito con precisión. El método propuesto prueba ser una herramienta potente para ayudar a entender mecanismos de propagación, habiéndose obtenido resultados que concuerdan con observaciones experimentales y permiten validar los modelos de mecánica de fractura propuesto en la literatura.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la Agencia de Promoción Científica de la República Argentina (PICT 12-04586) y a la Organización de Estados Americanos (OEA) por el financiamiento del presente trabajo. Se agradece también al Prof. M.H. Aliabadi (Universidad de Londres) por facilitar el código de DBEM.

REFERENCIAS

- [1] *Ductile iron data for design engineers*, QIT-Fer & Titane, (1990)
- [2] G.L. Greno, J.L. Otegui and R.E. Boeri, "Mechanisms of fatigue crack growth in Austempered Ductile Iron", *Int. J. of Fracture*, 21, 35-43, (1999)
- [3] M.H. Aliabadi, "Boundary element formulations in fracture mechanics", *Appl. Mech. Rev.*, 50/2, 83-96, (1997)
- [4] A. Portela, M.H. Aliabadi and D.P. Rooke, "The dual boundary element method: effective implementation for crack problems", *Int. J. Num. Meth. Engng.*, 33, 1267-1287, (1992)
- [5] A. Portela, M.H. Aliabadi and D.P. Rooke, "Dual boundary element incremental analysis of crack propagation", *Computers & Structures*, 46/2, 237-247, (1993)
- [6] M.H. Aliabadi and D.P. Rooke, *Numerical Fracture Mechanics*, Kluwer Academic Publishers, London, (1994)
- [7] Y. Yamada, Y. Ezawa and I. Nishiguchi, "Reconsiderations on singularity or crack tip elements", *Int. J. Num. Meth. Engng.*, 14, 1525-1544, (1979)
- [8] A. Rubinstein, "Macrocrack interaction with semi-infinite microcrack array", *Int. J. of Fracture*, 27, 113-119, (1985)
- [9] B. Dutta, S. Maiti and A. Kakodkar, "Analysis of crack-microcrack interactions and doubly kinked cracks using multiples singular point elements", *Engng. Fract. Mech.*, 38/23, 215-223, (1991)
- [10] G.C. Sih, *Mechanics of Fracture Initiation and Propagation*, Kluwer Academic Publishers, (1991)
- [11] M. Klesnil M. and P. Lukas, "Influence of strength and stress history on growth and stabilisation of fatigue cracks", *Engng. Fract. Mech.*, 4, 77-92, (1972)
- [12] Image-Pro Plus, Media Cybernetics Inc., USA
- [13] J. Ortiz, "Desarrollo de una herramienta computacional para el modelado de propagación de fisuras múltiples por fatiga", Tesis de Maestría, UNMdP, Argentina, (2000)