

Influencia de la microestructura en el inicio de una grieta de fatiga.

A. Garrido, C. Figueroa, E. Fraga, U. Ordóñez, C. Díez, G. Fernández.

Departamento de Tecnología en Construcción de Maquinarias. Facultad de Ingeniería Mecánica. ISPJAE.
Calle 114, No.11901, e/ 119 y 127 (CUJAE), Marianao, Ciudad de la Habana. Cuba.
Teléfono: (537) 2663844. E-mail: figueroa@mecanica.cujae.edu.cu

(Recibido el 25 de Diciembre de 2005, aceptado el 12 de Febrero de 2006)

Resumen.

El presente trabajo muestra la obtención de un modelo para determinar el número de ciclos hasta el inicio de una grieta, empleándose un grupo de expresiones que son utilizadas en el pronóstico de fatiga de elementos mecánicos y en la mecánica de la fractura.

En el desarrollo de la modelación se tuvo en cuenta la influencia de diferentes factores tales como: las dimensiones de los micro y macro defectos, el tamaño del grano, la presencia de fases de nitruros y carburos. También fueron consideradas diferentes propiedades de los materiales entre las que se destacan: el módulo de elasticidad de primer, segundo orden y el coeficiente de Poisson.

Para la obtención del modelo final se hizo una integración de las energías que intervienen en un proceso de rotura, pudiéndose citar entre estas: la energía de Griffith para una grieta con una dimensión determinada, el trabajo realizado por el esfuerzo en formar el núcleo, elemento donde se refleja la influencia del número de dislocaciones y el vector de Burger. También se integra la energía de deformación de la dislocación de borde. En el modelo definitivo se incluyó el factor de irreversibilidad de las dislocaciones ya que el mismo tiene una influencia significativa en los resultados.

Palabras claves: grieta, fatiga, dislocación, defecto, energía.

1. Introducción.

La formación de una grieta de fatiga siempre está acompañada de un período inicial o de incubación más uno de propagación. En el caso del primero, la estimación o cálculo del mismo es una tarea compleja, puesto que el número de factores que inciden es muy variado y su determinación experimental requiere de un equipamiento especializado para detectar con la sensibilidad adecuada la aparición de un defecto de tamaño microscópico [3, 4, 5,]

El inicio de una grieta de fatiga, se manifiesta en los elementos mecánicos a partir de un defecto que puede ser superficial o subsuperficial. El ciclo completo de iniciación y propagación de grietas de fatiga está dado por las siguientes etapas [1, 6, 12].

- ◆ Incubación de la grieta.
- ◆ Propagación de la grieta.
- ◆ Rotura del material.

La vida total (N_T) de un elemento sometido a fatiga puede ser calculada por la suma del período de incubación de la grieta (N_i) más el tiempo que le toma a la misma en propagarse hasta la rotura (N_f).

$$N_T = N_i + N_f \quad (1)$$

El objetivo del presente trabajo es determinar un modelo que permita obtener con precisión el número de ciclos necesarios hasta que comience una grieta de fatiga (N_i). Esto permitirá que se puedan hacer estimados de vida útil en elementos mecánicos sometidos a fatiga sin que sea necesario hacer experimentos costosos.

2. Consideraciones en el análisis de los mecanismos de rotura por fatiga.

El mecanismo de fractura propuesto para el análisis y obtención del modelo de iniciación de grietas es el de Cleavage, teniéndose que para n pares de dislocaciones, las cuales producen un desplazamiento nb , la longitud del núcleo formado producto de la acumulación de dislocaciones es igual a c , pudiéndose reconocer distintas contribuciones a la energía total, expresadas por unidad de espesor.

E es el módulo de elasticidad longitudinal, G es módulo de elasticidad tangencial. ν es el coeficiente de Poisson.

La energía de Griffith [2, 7] de una grieta de longitud total c bajo un esfuerzo p :

$$U_1 = -\frac{p^2(1-\nu^2)}{E} \left(\frac{c}{2}\right)^2 \quad (2)$$

El trabajo realizado por el esfuerzo en formar el núcleo:

$$U_2 = -\frac{1}{2} p n b c \quad (3)$$

La energía de deformación de la dislocación de borde "agrietada" con vector de Burger nb :

$$U_3 = +\frac{G(nb)^2}{4\pi(1-\nu)} \ln\left(\frac{2r}{c}\right) \quad (4)$$

Donde: r es tomado como la distancia sobre la cual este campo de deformación es efectivo y $c/2$ es tomado como el radio del núcleo de la dislocación de borde agrietada [7].

El número de ciclos necesarios para el inicio de una grieta puede ser determinado a través de la siguiente expresión [8, 9, 13].

$$N_i \Delta W d = 4\pi \rho \gamma \quad (5)$$

Para el caso de las tensiones tangenciales y suponiendo que en la grieta $c=nb=R$, las expresiones 2, 3, 4 se pueden escribir como sigue:

$$U_1 = -\frac{R^2 \tau_{eff}^2 (1-\nu^2)}{4G} \quad (6)$$

$$U_2 = -\frac{R^2 \tau_{eff}}{2} \quad (7)$$

$$U_3 = +\frac{GR^2}{4\pi(1-\nu)} \ln(2) \quad (8)$$

Por tanto, se puede escribir de la siguiente forma:

$$N_i \left(\frac{R^2 \tau_{eff}^2 (1-\nu^2)}{4G} + \frac{R^2 \tau_{eff}}{2} \right) = 4\pi \rho \gamma + \frac{GR^2}{4\pi(1-\nu)} \ln(2) \quad (9)$$

Teniendo en cuenta que a la energía de deformación ($\Delta W d$) estarán asociados los valores de energía U_1 y U_2 y al valor de energía superficial (γ) se le añadirá el valor de energía U_3 , la ecuación 9 una vez despejado el número de ciclos N_i quedará de la forma:

$$N_i = \frac{4\pi \gamma + \frac{GR^2}{4\pi(1-\nu)} \ln(2)}{\left(\frac{R^2 \tau_{eff}^2 (1-\nu^2)}{4G} + \frac{R^2 \tau_{eff}}{2} \right)} \quad (10)$$

Debe tomarse en consideración que la energía de fractura por unidad interfacial de área γ , no es un parámetro usual, por lo que resulta conveniente expresar su influencia de otra manera. Teniendo que:

$$\gamma = \frac{\sigma_F^2}{4E} \pi (1-\nu^2) R \quad (11)$$

R representa el tamaño del defecto (si se considera la influencia de un carburo, entonces R se corresponde con el tamaño del mismo; en caso de no encontrarse elementos formadores de carburos, R será tomado entonces como el diámetro de grano). Por tanto, la expresión 10 se puede expresar como sigue:

$$N_i = \frac{4\pi \left(\frac{\sigma_F^2}{4E} \pi (1-\nu^2) R \right) + \frac{GR^2}{4\pi(1-\nu)} \ln(2)}{\left(\frac{R^2 \tau_{eff}^2 (1-\nu^2)}{4G} + \frac{R^2 \tau_{eff}}{2} \right)} \quad (12)$$

Nótese, que dicha teoría se basa en el hecho de que se asume que el proceso de acumulación de dislocaciones es irreversible, pero teniendo en cuenta que la mayoría de las dislocaciones son reversibles, debe tenerse en cuenta el factor de irreversibilidad f . De forma experimental se han obtenido valores del factor de irreversibilidad, los mismos se encuentran en el rango de 10^{-4} para pequeñas amplitudes de deformaciones plásticas y hasta 10^{-1} para grandes amplitudes de deformaciones plásticas. Considerando el factor de irreversibilidad f la ecuación 12 se puede escribir de la siguiente forma. [3, 6].

$$N_i = \frac{4\pi \left(\frac{\sigma_F^2}{4E} \pi (1 - \nu^2) R \right) + \frac{GR^2}{4\pi(1-\nu)} \ln(2)}{\left(\frac{R^2 \tau_{eff}^2 (1 - \nu^2)}{4G} + \frac{R^2 \tau_{eff}}{2} \right)} \frac{2 - f}{f} \quad (13)$$

3. Influencia de los parámetros en el modelo.

Una vez obtenida la expresión, es necesario realizar un análisis de la influencia de cada uno de los parámetros incluidos en la expresión con el objetivo de comprobar la correcta influencia de los mismos sobre el número de ciclos [10, 11].

Una vez demostrado que la expresión propuesta responde de manera satisfactoria a la influencia de los distintos elementos tenidos en cuenta para la formulación tabla No 1, se procede a presentar el Gráfico No 1 de fatiga (*Esfuerzo vs. Número de ciclos*), el cual se obtiene a partir de los siguientes valores, Tabla no 2.

Tabla No 1. Influencia de los parámetros en el número de ciclos iniciales

Parámetro.	N_i	$\partial N_i / \partial$	$\partial^2 N_i / \partial^2$
E	$\frac{\frac{a}{E} + b}{c}$	$-\frac{a}{E^2 c}$	$\frac{2a}{E^3 c}$
G	$\frac{\frac{a + Gb}{c} + d}{E}$	$\frac{G^2 + bd + 2bc + ac}{(Gd + c)^2}$	$\frac{2c(bc - ad)}{(Gd + c)^3}$
R	$\frac{aR + bR^2}{cR^2}$	$-\frac{a}{cR^2}$	$\frac{2a}{cR^3}$
τ_{eff}	$\frac{a}{b\tau_{eff}^2 + c\tau_{eff}}$	$-\frac{a(2b\tau_{eff} + c)}{\tau_{eff}^2 (b\tau_{eff} + c)^2}$	$\frac{2a(3b^2\tau_{eff}^2 + 3bc\tau_{eff} + c^2)}{\tau_{eff}^3 (b\tau_{eff} + c)^3}$
σ_F	$\frac{a\sigma_F^2 + b}{c}$	$\frac{a\sigma_F}{c}$	$\frac{2a}{c}$

Tabla No 2. Valores de los parámetros para validar el modelo N_i

N_i	τ_{eff} (MPa)	N_i	τ_{eff} (MPa)
6.12E+04	50	4.35E+03	700
3.06E+04	100	3.81E+03	800
1.53E+04	200	3.38E+03	900
1.02E+04	300	3.04E+03	1000
7.63E+03	400	2.76E+03	1100
6.10E+03	500	2.53E+03	1200
5.08E+03	600	2,34E+03	1300

E	210000	MPa.
G	80000	MPa.
σ_F	900	MPa.
ν	0,3	-
R	25 10^{-3}	mm.
f	10^{-3}	-

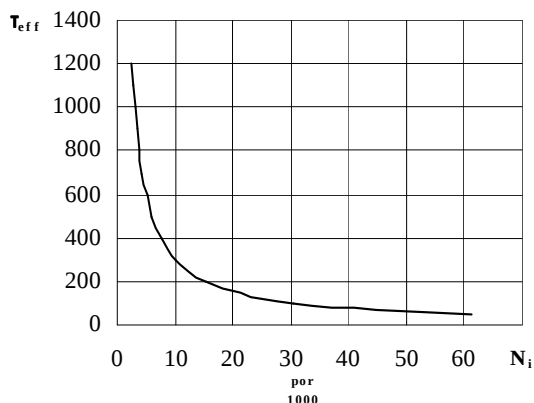


Figura 1. Representación gráfica del modelo.

4. Conclusiones.

1. Se fundamenta el desarrollo de una nueva expresión que permita calcular el número de ciclos para la iniciación de una grieta (N_i), con el objetivo de considerar otros factores que influyen en él.
2. Se ha obtenido un modelo matemático que permite calcular el período de incubación de una grieta (N_i), en función de los parámetros límite de fluencia, módulos de elasticidad de primer y segundo orden, coeficiente de Poisson, carga actuante y magnitud del defecto.
3. El análisis de cada uno de los parámetros en la expresión obtenida están acordes con la teoría reconocida en la literatura.
4. Se obtienen valores del número de ciclos necesarios para la incubación de una grieta (N_i), que están en el entorno de los obtenidos por otros autores.

5. Referencias.

1. Callister. W. Materials Science and Engineering. 1992, pp. 345.
2. Chalmers. B. Metalurgia Física. 1962, pp. 187-205.
3. Cheng W, Cheng HS, Mura T, Keer LM. Micromechanics modeling of crack initiation under contact fatigue. ASME Journal of Tribology 1994; 116: 2-8.
4. Dommarco. R.C. Rolling contact fatigue (RCF) Resistance of austempered ductile iron (ADI), 1998, pp. 69-74.
5. Figueroa Carlos, U. Ordóñez, D. Moreno. Formación de pitting en un hierro nodular austemperado. Artículo presentado en el Evento Internacional Materiales 2003. La Habana, 2002.
6. Glodež S., Z. Ren, and J. Flašker: Surface fatigue of gear teeth flanks. Computers & Structures, 1999, 73, 475-483.
7. Knott J. F, B. Met. Ph. D., A. I. M. Fundamentals of Fracture Mechanics. Department of Metallurgy and Materials Science, Cambridge University. 1973.
8. Lipp Klaus and Gottfried Hoffmann. Design for Rolling Contact Fatigue. Fraunhofer Institute for Structural Durability, Darmstadt, Germany. Marquette University, Milwaukee, Wisconsin, USA.
9. Moreno Mur Dagoberto. Influencia del nódulo de grafito en la fatiga de contacto del hierro nodular austemplado. Tesis presentada en opción al título de Ingeniero Mecánico. La Habana. 2004.
10. Paris, P. C. and Sih, G. C. M., Am. Soc. Test. Mat., Spec. Tech. Pub. No. 381, 30 (1965).
11. Pizarenko G. S., A. P. Yákovlev, V. Matvéev. Manual de Resistencia de Materiales. Editorial MIR. Moscú. 1989.
12. Shin-ichi Nishida Dr Eng. Failure Analysis in Engineering Applications. The Nikkan Kogyo Shimburng Ltd. Tokyo 1986, 1992.
13. Tanaka K, Mura T. A theory of fatigue crack initiation at inclusions. Metallurgical Transactions 1982; 13: 117-23.

Microstructure influence in the beginning of fatigue cracks.

Abstract.

The present work shows the obtaining of a model that allows determining the number of cycles until the beginning of a crack, being used a group of expressions that predict the fatigue of mechanical elements and in fracture mechanics.

In the model development the influence of different such factors as: dimensions of micro and macro defects, the size of grain, the presence of nitriles phases and carbides. Different properties of the materials were also considered among those that stand out: the module of elasticity of first and second order and the Poisson coefficient.

Key words: Crack, fatigue, dislocation, defect, energy.