

Influencia del nódulo de grafito en la rotura por fatiga de contacto de una fundición nodular.

C. Figueroa, U. Ordóñez, M. Rodríguez, M. Jacas, Y. Pérez, R. Rivero, D. Moreno, J. T. Nóbrega de Medeiros.

Departamento de Tecnología en la Construcción de Maquinarias. Facultad de Ingeniería Mecánica.

Instituto Superior Politécnico José Antonio Echevarría.

Calle 127 s/n. CUJAE. Marianao 15. Ciudad de la Habana. Cuba.

Teléfono: (537) 27 1644E-mail E-mail: figueroa@mecanica.cujae.edu.cu.

(Recibido el 15 de Octubre de 2003; aceptado el 22 de Marzo de 2004).

Resumen

El presente trabajo muestra una metodología para calcular el número de ciclos necesarios durante la formación de grietas subsuperficiales, en las fundiciones nodulares sometidas a fatiga de contacto.

En esta metodología se tuvo en consideración que para calcular el número de ciclos totales hasta la rotura era imprescindible tener en cuenta la cantidad de ciclos hasta que la grieta se iniciara. En este sentido se utilizó la expresión propuesta por Tanaka donde se toma en cuenta la geometría de un defecto y la energía de deformación alrededor de este, la cual puede ser determinada por la expresión de Petch.

Las variaciones dimensionales que sufre el nódulo de grafito bajo la acción de las cargas de contacto fueron determinadas con precisión utilizando el método de los elementos finitos (EF).

Para determinar la cantidad de ciclos durante la propagación de la grieta se utilizó la expresión de Paris y se consideró el material con propiedades isotrópicas. El factor de intensificación de tensiones se determinó a partir de la expresión de Murakami, aquí se tuvo en cuenta que la grieta se propagaría en una dirección y ángulo determinado. Durante los cálculos se consideró que en el mecanismo de iniciación de grietas estuvo presente el movimiento de las dislocaciones cuyo factor de irreversibilidad tiene una influencia significativa.

Palabras claves: Fundiciones nodulares, elementos finitos, rotura.

1. Introducción.

Los elementos de máquinas que están sometidos a diferentes sollicitaciones, como es el caso de la fatiga mecánica y superficial pueden tener una vida limitada, por lo que es necesario hacer el pronóstico de su durabilidad. En el caso de la fatiga superficial se pueden citar como ejemplos: los engranajes, ruedas y rieles de ferrocarril o rodamientos.

Estos pronósticos se hacen en lo fundamental a partir de ensayos de laboratorio donde finalmente se obtiene una curva que describe el comportamiento de las tensiones que son aplicadas en la superficie del material con respecto al número de ciclos de aplicación de la carga, notándose en todos los casos un aumento de la vida del material cuando las tensiones aplicadas son menores. Para la obtención del comportamiento antes citado se requiere de un gran número de ensayos por lo que se debe disponer de mucho tiempo y de los recursos

necesarios. En el presente trabajo se obtiene por métodos empíricos y de simulación la cantidad de ciclos necesarios para la formación de un pitting, considerando el número de ciclos para la iniciación y propagación de una grieta de fatiga.

El modo de manifestarse la rotura por fatiga es mediante la aparición de pittings, o lo que es lo mismo la formación de pequeños cráteres en la superficie de las piezas que pueden crecer si se continúa la explotación de las mismas. La formación de estos cráteres provoca la pérdida de eficiencia en las maquinarias, producto de la aparición de vibraciones e incremento de la temperatura.

El proceso de formación del pitting ocurre de forma general a partir de una grieta que se inicia debajo de la superficie del metal y que crece bajo la acción de cargas cíclicas. Este caso por ser el más común es el que ocupa el desarrollo del presente trabajo.

El ciclo completo de formación de un pitting [1,8] está dado por las siguientes etapas:

- Período de incubación de la grieta.
- Propagación de la grieta
- Salida de la grieta a la superficie.

La vida total de un elemento mecánico que esté sometido a fatiga puede ser calculado por la suma del período que transcurre hasta que aparece la grieta (período de incubación) más el tiempo o período necesario para que la grieta se propague hasta que salga a la superficie.

$$N_T = Ni + Nf \quad (1)$$

Donde: N_T es el número total de ciclos hasta la rotura, Ni es el número de ciclos hasta que aparece la grieta, Nf es el número de ciclos durante la propagación de la grieta hasta la rotura.

En este trabajo se propone una metodología para la determinación de la vida útil de piezas de hierro nodular austemperado sometidas a fatiga de contacto en condiciones de autolubricación. Finalmente se determina un modelo numérico a partir de modelos teóricos y resultados experimentales.

2. Iniciación de una grieta de fatiga.

La incubación de una grieta por fatiga representa una de las etapas más importantes en el proceso de formación de un pitting. La posición y forma de iniciación de la grieta dependen de la microestructura del material, del tipo de carga aplicada y de la geometría de la pieza. Las grietas pueden ser iniciadas en la superficie o debajo de esta en dependencia de las condiciones de contacto. En el caso de los hierros fundidos nodulares austemperados la formación del pitting está condicionada por la presencia del grafito tanto en la superficie como debajo de esta [2]. Cuando el pitting surge de un nódulo que está en la superficie, el cráter que aparece es prácticamente de la misma magnitud del nódulo. Si se propaga una grieta que parte de un nódulo ubicado debajo de la superficie, el tamaño del cráter es considerablemente mayor.

En fatiga de contacto las tensiones se distribuyen en la superficie y debajo de esta, las mismas pueden ser normales o tangenciales. En el caso de las tangenciales, su máxima intensidad se alcanza a una determinada profundidad y es en ese lugar precisamente donde se originan las grietas que luego crecen hacia la superficie formando un determinado ángulo. La profundidad donde aparecen las máximas tensiones tangenciales va a depender de las propiedades del material, de la magnitud de las cargas y de las condiciones del contacto.

El surgimiento de la grieta de fatiga a partir del nódulo ocurre con cargas que no sobrepasan el límite

elástico del material, aunque localmente, a nivel del grano las tensiones provocan el movimiento de las dislocaciones que dan origen al surgimiento de estas.

Cuando la grieta es iniciada en el área de máximas tensiones subsuperficiales, el mecanismo de iniciación de la grieta es atribuido al movimiento de las dislocaciones a lo largo de las bandas de deslizamiento, límites de grano o en la interfase de una inclusión [3].

En este trabajo se utiliza la teoría de iniciación de grietas a partir de la interfase de una inclusión con un material homogéneo. La inclusión en este caso sería el nódulo de grafito y el lugar de inicio de la grieta, la interfase de este con el metal base.

Para el estudio del efecto que genera la presencia de una inclusión de grafito en el material que la rodea, se parte del punto de vista desarrollado por Griffith [4,9] al introducir en el material una discontinuidad o grieta que en su caso considera de forma elíptica. Para la situación que nos ocupa se asume que el nódulo de grafito constituye una grieta ya que la resistencia del mismo es muy baja con relación al metal base. También se considera que la fatiga está ocurriendo bajo cargas normales cuyos valores están por debajo del límite de fluencia, pero que sin dudas provocan una deformación en la geometría del nódulo convirtiéndolo en una elipse que puede influir decisivamente en la reducción del período de incubación de la grieta, pero que además brinda la posibilidad de hacer las suposiciones de Griffith y de calcular los parámetros geométricos necesarios y su influencia en la vida útil de la pieza.

La determinación de la energía de deformación alrededor de una grieta se determina utilizando la expresión dada por Petch [4]. En el caso de las tensiones tangenciales quedaría de la siguiente forma:

$$Wd = \frac{\pi.C^2.\tau^2}{G} \quad (2)$$

Donde: C es la semilongitud del defecto, τ tensión tangencial, G módulo de elasticidad tangencial.

El incremento ΔWd en cada ciclo de carga es obtenido sustituyendo las tensiones tangenciales por $\Delta\tau = \tau_{\max} - \tau_{\min}$ y por $2\tau_f$ que es la resistencia del material al movimiento de las dislocaciones. Entonces la expresión (2) quedaría de la siguiente forma..

$$\Delta Wd = \frac{\pi.C^2.(\Delta\tau - 2\tau_f)^2}{G} \quad (3)$$

El número de ciclos necesarios para el inicio de una grieta en la interfase metal inclusión puede ser determinado por la siguiente expresión [5].

$$Ni . \Delta Wd = 4\pi.\rho.S \quad (4)$$

Donde: N_i es el # de ciclos hasta que se inicia la grieta, S energía de fractura por unidad de área y ρ radio de la inclusión en el eje de mayor magnitud.

Durante la determinación del número de ciclos, es necesario tener en cuenta que las dislocaciones después que se agrupan son irreversibles. Por lo que el cálculo debe ser afectado por el coeficiente de irreversibilidad f . Relacionando (3) y (4) se obtiene la siguiente expresión:

$$N_i = \frac{4 \cdot \rho \cdot S \cdot G}{C^2 \cdot (\Delta\tau - 2\tau_f)^2} \cdot \frac{2-f}{f} \quad (5)$$

Para calcular el radio de curvatura de la elipse formada, luego que el nódulo ha sufrido una deformación elástica se utilizó el programa de elemento finito ALGOR, donde se simuló los niveles de deformación del defecto para 6 valores de tensiones normales de contacto (σ), cinco por debajo del límite elástico y uno por encima. Se consideraron además las propiedades del ADI.

El radio de curvatura de la elipse (ρ) se calculó utilizando la expresión (6). Los resultados se muestran en la Tabla 1.

$$\rho = \frac{b^2}{a} \quad (6)$$

Con los resultados de la simulación se hizo un análisis de regresión utilizando el programa STATISTICA obteniéndose: la expresión que permite relacionar la tensión normal aplicada (σ) con el radio de curvatura (ρ), expresión (7) y la función que relaciona la semilongitud del semieje mayor de la elipse (C) con la tensión aplicada (σ), expresión (8).

$$\rho = 0.12021 - \frac{0.03762}{\sigma} \quad (7)$$

$$C = 5.9 + 3.5 \cdot 10^{-5} \sigma \quad (8)$$

Después de obtenidas las características geométricas del nódulo, se debe utilizar la expresión (5) para calcular el número de ciclos hasta el inicio de la grieta.

2. Propagación de una grieta de fatiga bajo cargas de contacto.

La propagación de la grieta por fatiga constituye la segunda y última etapa en el proceso de rotura. En esta etapa se propone el uso de la expresión de Paris-Erdogan que relaciona la velocidad de propagación de una grieta $\frac{dc}{dN}$ con las constantes del material A y p , así como con el factor de intensificación de tensiones ΔK .

$$\frac{dc}{dN} = A(\Delta K)^p \quad (9)$$

Aplicando integral de la ecuación (9) se obtiene el número de ciclos hasta la rotura, en la cual C_0 es el semieje mayor de la elipse y C_f la longitud final de la grieta.

$$N_f = \int_{C_0}^{C_f} \frac{dc}{A(\Delta K)^p} \quad (10)$$

Para el cálculo del factor de intensificación de tensiones (ΔK), se utiliza la expresión de Murakami [6]. Aquí es preciso establecer ciertas consideraciones geométricas durante la acción de las cargas de contacto sobre la superficie del sistema nódulo de grafito-superficie de la muestra.

$$\Delta K = \sigma \alpha \sqrt{\pi \cdot c \cdot \sec\left(\frac{\pi \cdot c}{W}\right)} \quad (11)$$

En este caso σ es la tensión normal aplicada sobre la superficie de la grieta, W es la distancia que recorre la grieta hasta que sale a la superficie y c es la longitud de la grieta en su recorrido.

Tabla 1. Resultados de la simulación.

Tensión normal (σ) [MPa]	Semieje mayor (a) [mm]	Semieje menor (b) [mm]	Radio de curvatura (ρ) [mm]
80	0.0120055	0.0119621	0.011918856
100	0.0120060	0.0119783	0.011949768
150	0.0120103	0.0119675	0.011924852
200	0.0120138	0.0119500	0.011886538
300	0.0120206	0.0119349	0.011849810
700	0.0120482	0.0118482	0.011651520

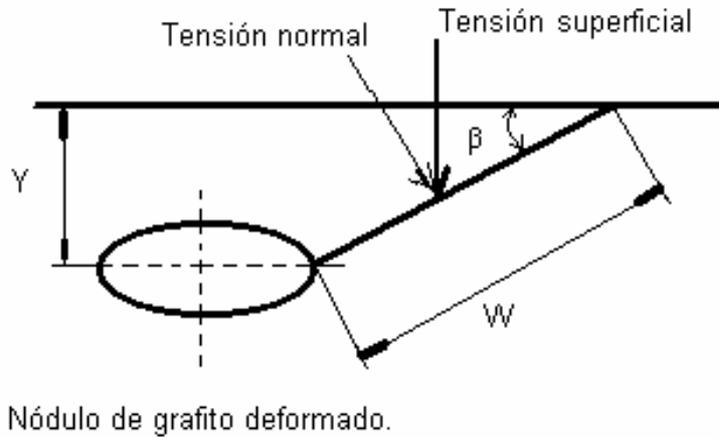


Figura 1 Consideraciones geométricas entre un nódulo y la superficie

De la Figura 1 se determina W y el valor de la tensión normal en la superficie de la grieta (σ_a). σ es la tensión en la superficie de la muestra, (Y) es la profundidad donde las tensiones son máximas. En el caso que se analiza se consideró (Y) igual a 0.02 mm tomado de los resultados experimentales de fatiga de contacto en ADI [7].

$$\sigma_a = \sigma \cdot \cos \beta \quad (12)$$

$$W = \frac{Y}{\sin \beta} \quad (13)$$

El valor de β está en rango de 25° - 30° según valores experimentales. Sustituyendo las expresiones (5) y (10) en la (1). La expresión final que se obtiene para determinar el número total de ciclos es:

$$N_T = \frac{4 \cdot \left(0.12021 - \frac{0.03762}{\sigma}\right) \cdot S \cdot G}{(5.9 + 3.5 \cdot 10^{-5} \sigma)^2 \cdot (\Delta \tau - 2\tau_f)^2} \cdot \frac{2-f}{f} + \int_{c_0}^{c_f} \frac{dc}{A \left(\sigma \cdot \cos \beta \sqrt{\pi \cdot c \cdot \sec \left(\frac{\pi \cdot c}{Y \sin \beta} \right)} \right)^P} \quad (14)$$

1. Conclusiones.

1. Se obtuvo una metodología para predecir la formación de un pitting en un hierro nodular austemperado.
2. La metodología propuesta puede ser utilizada para predecir la formación de grietas a partir de inclusiones con geometría elíptica.
3. La expresión de cálculo para determinar el número de ciclos hasta la rotura, obtenida en el presente trabajo, sirve para predecir la vida útil de elementos construidos de hierro nodular austemperado sometido a fatiga de contacto.
4. El coeficiente de irreversibilidad de las dislocaciones tiene una influencia significativa en el período de incubación de un agrieta.
5. El incremento del semieje mayor de la elipse formada en el nódulo de grafito sometido a deformación elástica no es significativo.
6. La simulación con el empleo del ALGOR mostró resultados similares a los experimentales.

5. Referencias

1. Callister. W. Materials Science and Engineering. 1992, pp345.
2. Dommarco.R.C. Rolling contact fatigue (RCF) Resistance of Austempered Ductile Iron (ADI), 1998, pp 69-74.8.
3. Glodez. S. Surface fatigue of gear teeth flanks. Computer and Structures, 73, 1999, pp 475 483.
4. Chalmers. B. Metalurgia Física. 1962, pp187-205.
5. Tanaka. K. A theory of fatigue crack initiation at inclusion. Metallurgical Transaction, 1982, 13A, 117, 23.
6. Prado. J. M. Dry sliding wear of austempered ductile iron. Materials Science and Technology. The Institute of Materials. 1995. pp340-448.
7. Figueroa. C. Estudio experimental sobre el comportamiento del hierro austemperado nitrurado (ADI) a la fatiga de contacto. Congreso Cubano de Ingeniería Mecánica. CH. 2000.
8. Houbaert Irmen. Y. Fundamentos del comportamiento mecánico de los materiales metálicos. Universidad de Gante. 1994.
9. Medeiros. J.T.N. Fadiga de Contato e Mapa de Desgaste de Discos Metálicos Não Conformes Solicitados por Contato de Rolamento Cíclico. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. Brasil. 2002.

influence of the graphite nodule in the contact fatigue failure of nodular foundry.

Abstract

The present paper states a methodology that allows to calculate the number of necessary cycles during the formation of undersurface cracks in nodular foundries subjected to contact fatigue.

In this methodology it was indispensable to keep in mind the quantity of cycles in order to calculate the number of total cycles until the crack began. In this sense the expression proposed by Tanaka was used where it takes into account the geometry of a defect and the deformation energy around the same, which can be determined by the expression of Petch. The dimensional variations that suffers the nodule of graphite subjected to contact loads action were determined using the finite elements method.

In order to determine the quantity of cycles during the crack propagation the expression of Paris was used and it was considered the material with isotropiocal properties. The escalation of tensions factor was determined starting from the expression of Murakami, keeping in mind that the crack would spread in an address and certain angle. During the calculations it was considered that in the mechanism of crack initiation it was present the movement of dislocations whose irreversibility factor has a significant influence.

Key words: Nodular foundries, finite elements, crack propagation, contact failure.