

Análisis por método de elementos finitos de la nucleación de grietas por fatiga superficial debido a tensiones de contacto

Carlos Figueroa Hernández

Correo electrónico: carlosrfh@tesla.cujae.edu.cu

Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, La Habana, Cuba

Artículo Original

Reyniel Gómez González

Correo electrónico: reyniel@dcrhmail.cujae.edu.cu

Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, La Habana, Cuba

Lídice Pascual Expósito

Correo electrónico: lidicep@uclv.edu.cu

Universidad Central de Las Villas, Villa Clara, Cuba

Jesús González Rodríguez

Correo electrónico: karlosrfh@gmail.com

Universidad Hermanos Saíz, Pinar del Río, Cuba

Resumen

El presente trabajo muestra el uso del método de elementos finitos para simular los procesos de iniciación de grietas de fatiga superficial en diferentes materiales tales como: acero, hierro fundido y un polímero. La simulación se realizó utilizando cuatro valores de tensiones de contacto por debajo del límite de rotura para cada material en los cuales fueron inducidos defectos en forma de poros con diámetros de 0,003 y 0,009 mm. Como resultado de la modelación se obtuvo la longitud mayor y menor de los semiejes y el radio de curvatura de la elipse generada en el defecto inducido. Este último parámetro condiciona de manera significativa el proceso de iniciación de grietas de fatiga de contacto, al mismo se aplicó un proceso de regresión lineal, obteniéndose los modelos matemáticos respectivos con una correlación superior al 97 %.

Palabras claves: fatiga de contacto, nucleación de grietas, defectos, simulación

Recibido: 2 de octubre del 2014

Aprobado: 6 de noviembre del 2014

INTRODUCCIÓN

La fatiga de contacto se puede definir como la acumulación de daños superficiales, debido a pequeñas deformaciones plásticas que ocurren en un material incluso por debajo del límite elástico, generando microgrietas que pueden conducir a la falla del mismo a través de un micropitting. Este tipo de falla en un principio es macroscópicamente invisible, con una propagación relativamente rápida, por lo que es considerada como peligrosa.

El proceso de formación del micropitting ocurre a partir de una grieta que se inicia y crece por la acción de las cargas

cíclicas [1, 2] El núcleo de la misma puede estar localizado debajo de la superficie del material, porque los valores máximos de esfuerzos tangenciales se encuentran a una determinada profundidad, la que depende de la tensión de rotura del material y de los esfuerzos aplicados.

Las tensiones que surgen durante el contacto tienen un carácter puramente local y disminuyen rápidamente a medida que se alejan de dicho lugar [3]. Hertz utilizó el concepto de potencial de campo y estableció que la presión de contacto de dos cuerpos sólidos y elásticos se distribuye a través de un área de contacto infinitamente pequeña. Suponiendo un

contacto estático, en ausencia de fricción, la presión actúa en forma de un potencial de campo elástico, en el que las tensiones compresivas están asociadas a la magnitud de las deformaciones elásticas que se producen en la zona de contacto. En la solución obtenida por Hertz, las tensiones y deformaciones en la región de contacto dependen de la geometría del mismo, así como de las propiedades elásticas de los cuerpos. Estos modelos concebidos para un contacto estático y elástico, se pueden extrapolar al contacto cíclico. En el presente trabajo se trataron de simular estas condiciones a través de un programa de elemento finito [4], y resultaron afectados de manera intencionada los materiales ensayados con la presencia de un defecto en forma de poro, en consecuencia con la influencia que tienen los defectos microestructurales en el surgimiento y propagación de grietas de fatiga de contacto. Los cambios en la geometría de los defectos, en específico, la longitud y el radio de redondeo en el extremo del mismo son factores que muestran una influencia significativa en el cálculo de la vida útil de los elementos sometidos a fatiga superficial.

MATERIALES Y MÉTODOS

Mecánica de la fractura y su aplicación en la fatiga de contacto

La resistencia teórica a la fractura de un material es aproximadamente la décima parte de su módulo de elasticidad, pero en la práctica la resistencia de algunos cristales y materiales frágiles, en general, tiende a ser menor que este valor. Griffith [5] supuso que un material macroscópicamente homogéneo debía contener pequeños defectos, lo cual produciría una concentración de tensiones lo suficientemente grande como para alcanzar el esfuerzo de fractura ideal en pequeñas zonas del material, y advierte que debe existir una tensión y una longitud críticas para que la grieta se propague. Como primer paso asumió que el defecto de un material sería de forma elíptica con eje mayor o igual al eje mayor de la elipse (figura 1). Entonces, si una tensión actuara de forma perpendicular a este, el valor concentrado del esfuerzo en la punta de la elipse sería:

$$t_{11} = t \left(1 + 2\sqrt{\frac{C}{\dots}} \right) \quad (1)$$

$$\dots = \frac{b^2}{C} \quad (2)$$

donde:

σ : Tensión normal.

C : Semieje mayor de la elipse.

ρ : Radio del defecto en el eje de mayor magnitud.

b : Semieje menor de la elipse.

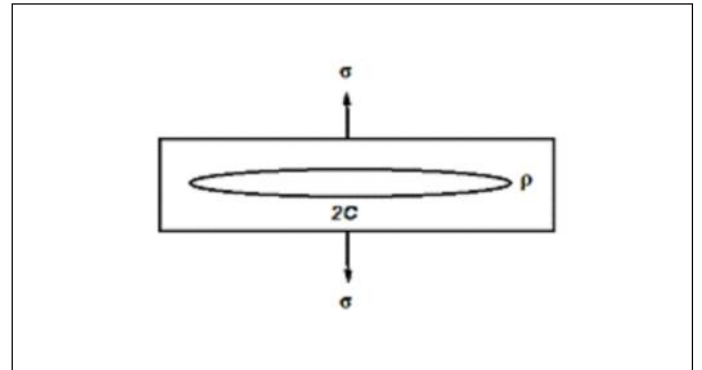


Fig. 1. Configuración geométrica del modelo de Griffith

El radio de curvatura es un parámetro de importancia para calcular el número de ciclos de fatiga superficial durante la nucleación de la grieta (expresión 3). [6, 7].

$$N_i \cdot \Delta W_d = 4f \cdot \dots \cdot S \quad (3)$$

siendo:

N_i : Número de ciclos hasta que se inicia la grieta.

ΔW_d : Incremento de la energía de deformación alrededor de la grieta en cada ciclo de carga.

S : Energía de fractura por unidad de área.

Modelación de la deformación de los defectos microestructurales utilizando el ANSYS

Tanto los poros, como las grietas [8, 9] constituyen zonas o lugares propicios para la iniciación de la rotura pues se comportan como espacios vacíos dentro del material. El efecto que produce la carga puede ser tal, que tiende a deformarlos generando geometrías aguzadas, las que producen un incremento de la concentración de tensiones, que favorecen el proceso de nucleación y propagación de grietas (figura 2).

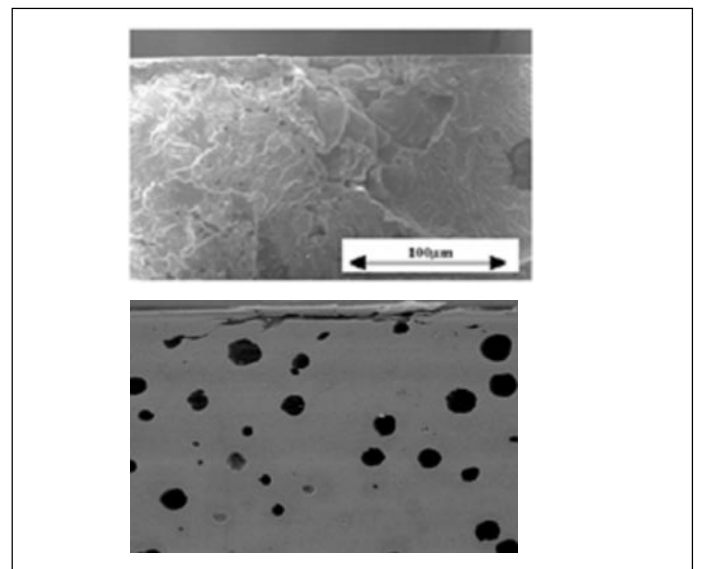


Fig. 2. Presencia de poros y grietas como elementos nucleadores

La presencia de los nódulos y las láminas de grafito [10, 11] en el caso de los hierros fundidos nodular, laminar y esferoidal luego de ser sometidos a procesos de deformación superficial, pueden cambiar la geometría y convertirse en centros nucleadores de grietas (figura 3).

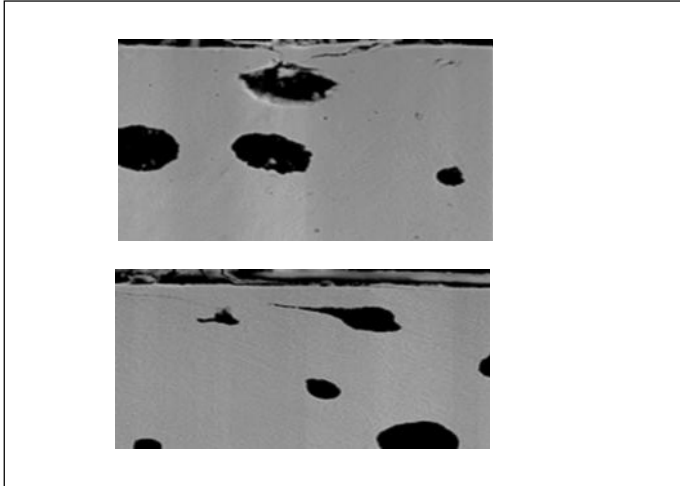


Fig. 3. Nódulos de grafito contribuyendo a la nucleación y propagación de grietas

Como principio, para simular la deformación del defecto y considerando las experiencias expuestas anteriormente se propone que el mismo tenga forma esférica, el cual pasa a una geometría elíptica en la medida que la magnitud de la carga se incrementa (figura 4). Se determinaron los semiejes de la elipse generada en el defecto inducido y se calculó el radio de curvatura.

Diseño del defecto

El defecto se dibuja en forma de un espacio vacío esférico con radios de 0,003 y 0,009 mm. Estos valores fueron seleccionados considerando que los defectos en forma de poros, generalmente pueden tener esa magnitud.

Estos agujeros son ubicados a una distancia de la superficie de 0,02 mm, magnitud que es definida teniendo en cuenta que las tensiones tangenciales alcanzan aproximadamente su máximo valor en ese lugar [12].

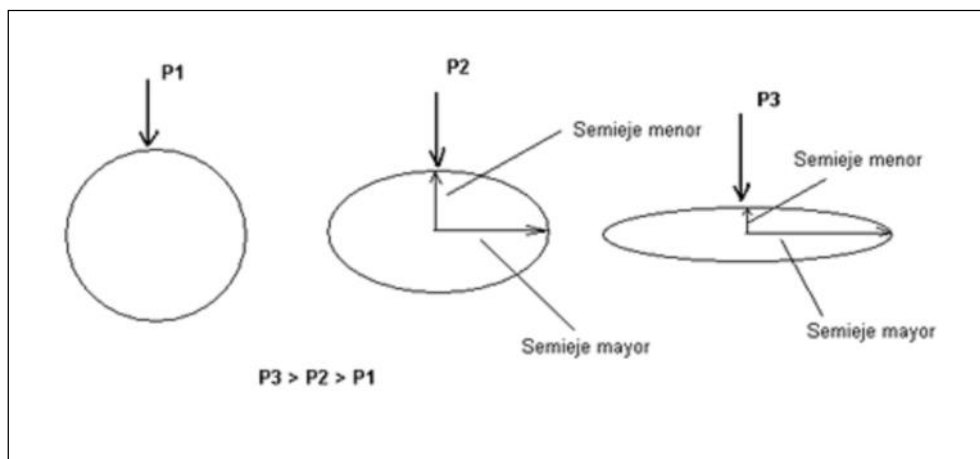


Fig. 4. Fundamento del proceso de simulación

Características de los materiales

Se tiene en cuenta el módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson para el acero, el hierro fundido y el plástico según sea el caso. Las propiedades de los materiales seleccionados son:

Acero 1020 Módulo de elasticidad (E: 207 GPa), coeficiente de Poisson (ν : 0,3), resistencia a la rotura ($\sigma_{\text{máx}}$: 380 MPa).

Hierro fundido perlítico G 4000 (E: 175 GPa, ν : 0,2, $\sigma_{\text{máx}}$: 276 MPa).

Cloruro de polivinilo rígido (E: 5 GPa, ν : 0,4, $\sigma_{\text{máx}}$: 50 MPa).

Aplicación de la carga

La simulación se realizó utilizando el acero (1020), el hierro fundido (G 4000) y un polímero (cloruro de polivinilo rígido) con el objetivo de abarcar tres materiales de amplio uso en la industria [13]. Se aplicaron cuatro cargas cuyos valores fueron seleccionados por debajo del límite de rotura de cada material.

RESULTADOS

En la figura 5 se muestra el modelo obtenido con los resultados de las deformaciones máximas y mínimas en las zonas más críticas del defecto que son los puntos de contacto de la elipse con los ejes de coordenadas.

En las tablas 1- 6 se muestran los resultados de la simulación para cada material. El radio de curvatura de la elipse en su extremo se calculó utilizando la expresión (2).

Con estos valores se hizo un análisis de regresión utilizando el programa STADISTICA, y se obtuvieron las expresiones que permiten relacionar la tensión normal aplicada con el radio de curvatura (figura 6,7 y 8).

En la regresión lineal se obtuvo para todos los casos un coeficiente de correlación superior a 0,97.

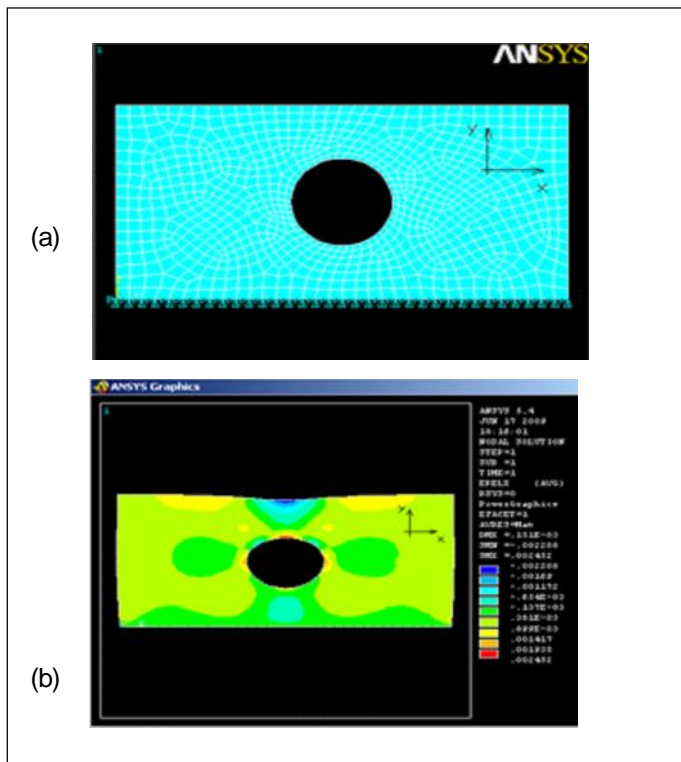


Fig. 5. Resultados de la simulación gráfica: a) Mallado sin aplicar la carga; b) Con carga

Tensión normal (σ) (MPa)	Semieje mayor (mm)	Semieje menor (mm)	Radio de curvatura (ρ) (mm)
180	0,003 336 5	0,002 963 15	0,002 631 575
250	0,003 467 5	0,002 949	0,002 508 032
350	0,003 654 5	0,002 928 5	0,002 346 726
450	0,003 841 5	0,002 908	0,002 201 343

Tensión normal (σ) (MPa)	Semieje mayor (mm)	Semieje menor (mm)	Radio de curvatura (σ) (mm)
180	0,003 688	0,002 932	0,002 330 971
250	0,003 955 5	0,002 905 5	0,002 134 223
350	0,004 337 5	0,002 868	0,001 896 35
450	0,004 719 5	0,002 83	0,001 696 981

Tensión normal (σ) (MPa)	Semieje mayor (mm)	Semieje menor (mm)	Radio de curvatura (ρ) (mm)
180	0,006 004 5	0,002 7605	0,001 269 108
250	0,007 173	0,002 667	0,000 991 619
350	0,008 842	0,002 534	0,000 726 21
450	0,010 511	0,002 400 5	0,000 548 226

Tensión normal (s) (MPa)	Semieje mayor (mm)	Semieje menor (mm)	Radio de curvatura (r) (mm)
180	0,009 490 5	0,008 992 35	0,008 520 347
250	0,009 681	0,008 989 4	0,008 347 207
350	0,009 953 5	0,008 985 15	0,008 111 008
450	0,010 226	0,008 980 9	0,007 887 401

Tensión normal (σ) (MPa)	Semieje mayor (mm)	Semieje menor (mm)	Radio de curvatura (mm)
180	0,010 003 5	0,008 976 9	0,008 055 654
250	0,010 394	0,008 967 9	0,007 737 467
350	0,010 951 5	0,008 955 05	0,007 322 551
450	0,011 509	0,008 942	0,006 947 551

Tensión normal (σ) (MPa)	Semieje mayor (mm)	Semieje menor (mm)	Radio de curvatura (ρ) (mm)
180	0,012 438	0,008 974 5	0,006 475 45
250	0,013 775	0,008 964 55	0,005 833 985
350	0,015 685	0,008 950 4	0,005 107 406
450	0,017 595	0,008 936	0,004 538 34

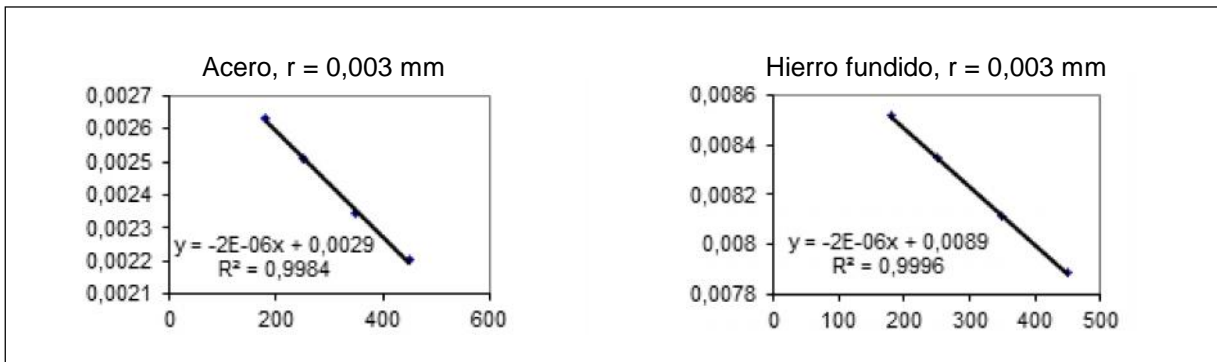


Fig. 6. Comportamiento del radio de curvatura para el acero y el hierro fundido

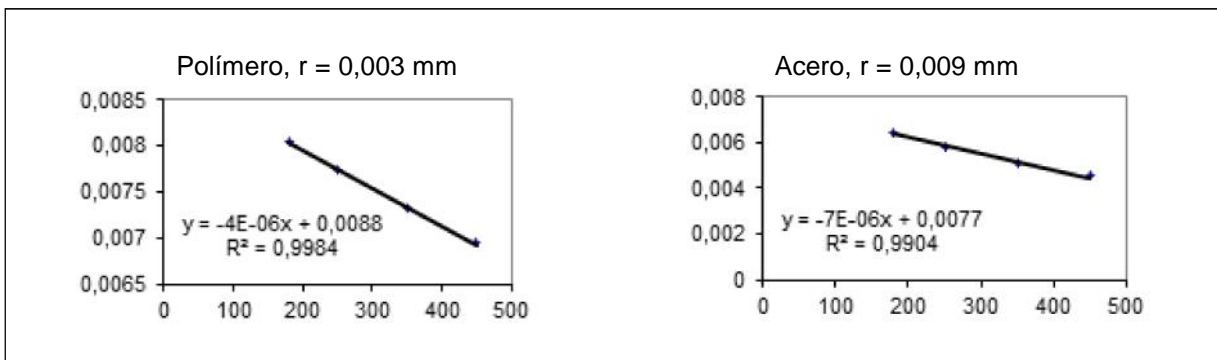


Fig. 7. Variación del radio de curvatura para el polímero y el acero

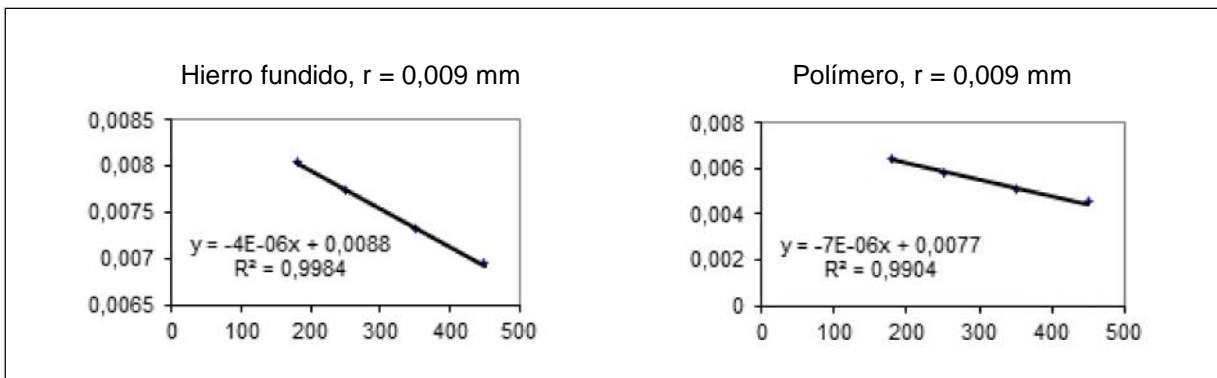


Fig. 8. Relación entre la tensión y el radio de curvatura para el hierro y el polímero

DISCUSIÓN

En los resultados tabulados se pudo constatar la correspondencia entre los esfuerzos aplicados y las variaciones de los semiejes mayores y menores de la elipse generada, así como los radios de redondeo en función de las propiedades de los materiales. Esta interdependencia queda expresada a través de los gráficos y modelos obtenidos donde se destaca un coeficiente de regresión cercano a 1, al mismo tiempo se puede apreciar una proporcionalidad entre la tensión aplicada y la disminución del radio de curvatura del defecto.

Los valores obtenidos del radio de curvatura en la punta de la elipse para el caso del acero con defecto de 0,03 mm muestran que un incremento de la carga aplicada desde

180 hasta 450 MPa provoca una reducción de 15 % del radio de curvatura. Este análisis para el hierro fundido evidencia una reducción del 26 %, y en el polímero un 55 %. Estos resultados están en correspondencia con la diferencia entre las propiedades mecánicas de los tres materiales.

En el caso del defecto inducido con valor de 0,09 mm para el acero se aprecia una reducción del radio de redondeo en la punta de la elipse de un 12 %, bajo las mismas condiciones el hierro fundido se redujo un 14 % y el polímero 30 %. Este comportamiento refleja la diferencia entre las propiedades de los materiales y la influencia de la presencia de un defecto con una dimensión mayor de 0,03mm.

El análisis de los semiejes mayores para las cargas aplicadas desde 180 hasta 450 MPa y los defectos con

diámetros de 0,03 y 0,09 mm en el caso del acero, hierro fundido y polímero, muestran incremento de la longitud de los semiejes entre el 15 y 29 %. Este es un parámetro que define en el incremento de los valores de las tensiones en la punta de una grieta según puede ser observado en la ecuación (1).

Los diagramas obtenidos de la simulación muestran un cambio apreciable en la geometría del defecto inducido para las cargas seleccionadas, esto corrobora que el método propuesto en alguna medida puede simular las condiciones reales del efecto que provoca en los materiales las tensiones superficiales durante la fatiga de contacto. Por otro lado se puede determinar la magnitud geométrica del radio de redondeo del defecto que puede ser sustituido en la expresión (3) la cual es utilizada para el cálculo de la vida útil de los elementos mecánicos sometidos a fatiga superficial.

Los gráficos del proceso de simulación mostraron resultados similares a los obtenidos en los ensayos de fatiga de contacto realizados sobre un hierro nodular (figura 3), corroborándose la efectividad del método propuesto para evaluar los fenómenos de agrietamiento.

CONCLUSIONES

1. El modelo obtenido por elemento finito contribuye a evaluar los procesos de incubación de grietas de fatiga de contacto para el acero, hierro fundido y un polímero considerando la presencia de defectos en forma esférica.
2. Los principios de la mecánica de la fractura y la teoría de Hertz sobre las tensiones de contacto pudieron ser validados con el uso del ANSYS.
3. El cálculo del radio de curvatura de la elipse generada durante la simulación por elemento finito es una contribución significativa para determinar los ciclos necesarios durante la nucleación de una grieta.
4. El mecanismo de deformación de los nódulos de grafito sometidos a tensiones de contacto muestra semejanza con los resultados obtenidos durante la simulación por elemento finito.

REFERENCIAS

1. **FIGUEROA HERNÁNDEZ, Carlos.** "Estudio experimental sobre el comportamiento del hierro austemperado nitrurado (adi) a la fatiga de contacto". *Ingeniería Mecánica*. La Habana, vol. 4. núm. 4, octubre-diciembre, pp. 21-26, 2001. ISSN:1815-5944. Disponible en Web: <http://www.ingenieriamecanica.cujae.edu.cu/index.php/revistaim/article/view/323> [consultado abril 2014].
2. **BRANDÃO, José. A.** "The prediction of micropitting initiation on gear teeth: a numerical model and its correlation with experimental data". *Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões*. Mecânica Experimental, 2009, vol 17, pp 1-12. ISSN:1646-7078. Disponible en Web: http://www-ext.lnec.pt/APAET/pdf/Rev_17_A1.pdf [consultado mayo 2014].
3. **MEDEIROS NÓBREGA, João Teleforo.** "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*. São Paulo. Brasil, 2002., vol 0214 pp 1-2. ISSM: Disponible en Web: http://www.lfs.usp.br/publicacoes/pt_2002.html [consultado agosto 2014].
4. **MICHELE, Cerullo.** "Application of Dang Van criterion to rolling contact fatigue in wind turbine roller bearings". *13th International Conference on Fracture*. June 16-21, 2013, Beijing, China. Department of Mechanical Engineering, Technical University of Denmark, Lyngby 2100, Denmark. Disponible en Web: <http://www.gruppofrattura.it/ocs/index.php/ICF/icf13/paper/download/10955/10334> [consultado mayo 2014].
5. **CHALMERS, Bruce.** "Metalurgia Física". Versión en español. Depósito Legal. M. 9422. 1968. Aguilar, S.A. de Ediciones, Juan Bravo, 38, Madrid (España), 1968.
6. **FIGUEROA HERNÁNDEZ, Carlos.** "Modelos matemáticos para el cálculo de la fatiga de contacto a partir de la formación de un micropitting". *Ingeniería Mecánica*. La Habana, vol. 13. núm. 3, septiembre-diciembre, pp. 33-37, 2010. ISSN:1815-5944. Disponible en Web: http://revistascientificas.cujae.edu.cu/Revistas/Mecanica/Vol-13/3-2010/05_2010_03_33_37.pdf [consultado septiembre 2014].
7. **KATO, T.** "Investigation of influence of white layer geometry on spalling property in railway wheel steel". *Wear*. May 2011, vol 271, issues 1-2, 18, pp. 400-407 *Proceedings of the 8th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail / Wheel Systems*, Florence, 2009. ISSN: 0043-1648. Disponible en Web: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164810003583> [consultado mayo 2014].
8. **DE LA GUERRA OCHOA, Eduardo.** "Cálculo de la resistencia a la fatiga superficial en superficies con lubricación elastohidrodinámica mediante el criterio de Dang Van". *XVIII Congreso de Ingeniería Mecánica CNIM 2010. Ciudad Real. España. Noviembre 2010*. ISSN: 2278 - 0149. Disponible en Web: <http://www.uclm.es/actividades/2010/CongresoIM/pdf/cdarticulos/085.pdf> [consultado julio 2014].
9. **GOUTAM, Nayak.** "Estimation of rolling contact fatigue in railway vehicles". *National Conference on Recent Advances in Mechanical Engineering" RAME 2013*. Special Issue, vol. 1, núm. 1, January 2014. ISSN: 2278-0149. Disponible en Web: http://www.ijmerr.com/New/%289%29_67-72.pdf [consultado marzo 2014].
10. **MORENO, Dagoberto.** "Consideraciones sobre la rotura por fatiga de contacto en el hierro nodular austemplado". *Ingeniería Mecánica*. La Habana, núm. 3, pp.15 - 20, 2004. ISSN: 1815-5944 Disponible en Web: <http://revistascientificas.cujae.edu.cu/.%5CRevistas%5CMecanica%5CVol-7%5C3->

2004%5C02_15-20_ConsideracionesDagoberto6.pdf [consultado agosto 2014].

11. **FIGUEROA HERNÁNDEZ, Carlos.** "Rolling contact fatigue wear of nitriding austempered ductile iron (adi-adi) discs". *XVI Congreso Brasileño de Ingeniería Mecánica*. Universidad de Uberlandia. Brasil. 2001. ISBN: 85-85769-06-06. Disponible en Web: <http://www.abcm.org.br/pt/wp-content/anais/cobem/2001/pdf/S03-Tribology.pdf> [consultado mayo 2014].
12. **GONZÁLEZ RODRÍGUEZ, Jesús.** "Modelación de la fatiga de contacto a partir de la influencia de defectos microestructurales en la formación del micropitting". Tutor: Figueroa Carlos. Tesis de Maestría, Centro Universitario de Pinar del Río, 2009.
13. **CALLISTER, William.** *Materials Science and Engineering*. Estados Unidos, pp. 340-345, 1992. ISBN: 0-471-32013-7

AUTORES

Carlos Figueroa Hernández

Ingeniero Mecánico, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Auxiliar, Facultad de Ingeniería Mecánica, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, La Habana, Cuba

Reyniel Gómez González

Ingeniero Mecánico, Máster en Ciencias, Profesor Asistente, Centro de Estudio de Matemática para Ciencias Técnicas, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, La Habana, Cuba

Lídice Pascual Expósito

Licenciada en Ciencias Jurídicas, Máster en Ciencias, Profesora Auxiliar, Facultad de Ciencias Sociales, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Villa Clara, Cuba

Jesús González Rodríguez

Licenciado en Construcción de Maquinarias, Máster en Ciencias, Profesor Auxiliar, Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Hermanos Saíz, Pinar del Río, Cuba

Analysis of Cracks Nucleation of Contact Fatigue Using a Finite Element Program

Abstract

This paper shows the use of the Finite Element Method to simulate the processes of cracks initiation during the surface fatigue in different materials such as: steel, cast iron and polymer. The simulation was carried out using four values of contact tensions below the break limit for each material in which were induced defects like pores with diameters of 0,003 and 0,009 millimeters. As a result of the simulation was obtained the larger and smaller longitude of the semiaxes and the curvature radius of the generated ellipse in the induced defect. This last parameter has a significant influence at the process of cracks initiation of contact fatigue, to the same one lineal regression process was applied, being obtained the respective mathematical models, with a superior correlation to 97 %.

Key words: contact fatigue, crack nucleation, defects, simulation