

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA RESISTENCIA A FRETTING FATIGA CON CONTACTO ESFÉRICO EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 7075-T6

Carlos Navarro, Bettina U. Wittkowsky, Jaime Domínguez
 Dpto. de Ingeniería Mecánica y de los Materiales
 E.S.I de Sevilla, Avda. Descubrimientos s/n, 41092 SEVILLA

Resumen. Se ha realizado una serie de ensayos de fretting fatiga en los que las superficies en contacto eran una esfera y un plano. Para ello se ha utilizado una nueva máquina que permite un continuo control y seguimiento de distintos parámetros del ensayo, carga normal, carga tangencial, desplazamientos y carga axial. El material usado en los ensayos ha sido la aleación de Aluminio 7075-T6. Se ha estudiado en estos experimentos la influencia sobre la vida a fatiga de los distintos parámetros que intervienen. Finalmente, se han utilizado cuatro criterios de fatiga multiaxial para analizar el lugar de iniciación de las grietas, tanto la principal como las secundarias, y su posterior evolución. Estos resultados se han comparado con los datos experimentales, para lo que se han estudiado mediante microscopía las probetas ensayadas.

Abstract. Systematic and controlled experiments have been carried out with a spherical-tip contact pad fretting against a flat surface. It has been used a new fretting fatigue loading system which facilitates continuous monitoring and control of such parameters as normal and tangential contact loads, and cyclic displacements in addition to the specimen fatigue loading parameters. The pad and specimen materials were both 7075-T6 aluminum alloy. The influence of a number of fretting parameters on the fatigue lifetime has been experimentally investigated. In addition, four different multiaxial fatigue criteria have been used to analyze the initiation site and evolution of the primary and secondary cracks; the experimental results have been used to validate the latter analysis. Metallographic and fractographic examinations have also been performed on the fretted specimens.

1. INTRODUCCIÓN

El término fretting fatiga hace referencia a un tipo de fatiga en la que, a las tensiones debidas a otras cargas variables, se suma el efecto perjudicial de dos superficies que están en contacto y deslizan una respecto a la otra. Además de las tensiones locales provocadas por el contacto, se puede añadir la tensión debida a las cargas cíclicas. Esta variación de tensiones genera una serie de grietas que pueden, bien simplemente deteriorar la superficie por desprendimiento de lascas o bien crecer hasta provocar la rotura del material. El fenómeno del fretting puede ser observado en servicio en piezas tales como uniones atornilladas y roblonadas, acoplamientos con ajuste en caliente, cadenas, etc.[1].

Muchos investigadores han llevado a cabo una serie de estudios experimentales, analíticos y numéricos sobre fretting fatiga desde que fue descrito por primera vez en 1911 [2], aunque todavía queda mucho por investigar.

El estudio de la iniciación y crecimiento de grietas por fretting fatiga es complejo y en él intervienen factores como la presión de contacto, la amplitud del deslizamiento relativo, las tensiones tangenciales en la superficie, el tipo de material, el coeficiente de

rozamiento, el estado y geometría de la superficie y las condiciones ambientales.

Hasta ahora se han utilizado diferentes geometrías de los elementos en contacto en los ensayos experimentales, cada una generando una distribución de tensiones muy diferente [3-10]. Los ensayos más utilizados son los que simulan las condiciones reales de trabajo [6,7] y los que emplean los denominados puentes de fretting [8-10].

Se acepta en general que el proceso de fretting fatiga debe ser estudiado considerando al menos dos fases [11-12]: (i) Iniciación de la grieta y crecimiento en las inmediaciones de las superficies de contacto, donde el campo de tensiones es multiaxial y está dominado por las presiones de contacto; en este caso las tensiones varían fuera de fase [13]. (ii) Propagación de grietas largas a través del grueso del espécimen donde las condiciones locales del contacto tienen un efecto despreciable. Esta segunda fase puede ser analizada usando los métodos usuales para grietas largas sometidas a cargas remotas (sin fretting). La fase primera, de iniciación de la grieta, es importante en fatiga a alto número de ciclos, mientras que cuando el número de ciclos hasta el fallo es pequeño, la influencia de esta fase disminuye. En este último caso la vida total

se ve poco afectada por el fretting, sin embargo, en fatiga a alto número de ciclos, el fretting cobra una importancia relevante [5], al igual que en especímenes con entalla sometidos a fatiga. Como caso extremo de fatiga a alto número de ciclos el fretting puede reducir el límite de fatiga por un factor de dos o tres [14,15].

Con objeto de estudiar los mecanismos de fretting fatiga, la primera fase mencionada anteriormente puede ser dividida a su vez en otras dos. La primera incluye el proceso inicial hasta que aparece la primera grieta o hasta que ésta avanza unos pocos granos. La segunda fase empieza cuando la grieta avanza los granos suficientes como para que el crecimiento de la grieta pueda ser considerado un problema de mecánica de medios continuos, pero todavía bajo la influencia de la variación del complejo campo de tensiones inducido por el contacto.

El propósito de este artículo es analizar algunos aspectos de la iniciación y primer crecimiento de grietas por fretting fatiga en la aleación de aluminio 7075-T6 y determinar el efecto de diferentes parámetros en la vida a fatiga. Para ello se van a analizar los resultados de unos ensayos realizados con este material donde las superficies de contacto son un plano y una esfera. Estas condiciones ideales permiten hacer un análisis tridimensional de los complejos campos de tensiones bajo el área de contacto sin que se produzcan singularidades en el borde de contacto.

2. DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL Y LOS ENSAYOS

Como ya se ha dicho, el material ensayado fue Al 7075-T6. Las superficies esféricas y las probetas fueron fabricadas a partir de barras extruídas de diámetro 25.4 y 12.7 mm, respectivamente. Las probetas eran de sección rectangular de 5x8mm. El radio de las superficies esféricas era 25.4 mm. Las superficies de contacto fueron pulidas con polvo de alumina de 0.5 μ m y luego limpiadas ultrasónicamente en alcohol puro. Las principales propiedades mecánicas del Al 7075-T6 se muestran en la tabla 1. La microestructura del material era bastante irregular y los granos eran alargados debido a la extrusión. El tamaño medio de grano era de 100x60 μ m.

Tabla 1. Propiedades mecánicas del Al 7075-T6.

UTS (MPa)	$\sigma_{v0.2}$ (MPa)	ν	E (GPa)
572	503	0.33	72
Resistencia a fatiga (Carga axial; R=-1)			ΔK_{th} (R=-1)
10 ⁶ ciclos	10 ⁷ ciclos	10 ⁸ ciclos	MPa m ^{-1/2}
214 MPa	175 MPa	140 MPa	2.2

El aparato de fretting (Fig. 1) usado fue diseñado y construido para acoplarlo a una máquina servohidráulica uniaxial de ensayo. La probeta se somete a una carga axial cíclica, P , mediante el actuador de la máquina servohidráulica de ensayo. El soporte de las piezas esféricas se monta sobre un sistema flexible que a su vez va unido a la máquina de ensayo. Esta flexibilidad, C_q , se puede ajustar para permitir la variación de la carga tangencial, Q , o el desplazamiento relativo entre la probeta y la esfera, δ , manteniendo los demás parámetros constantes. El sistema también permite aplicar y medir independientemente la carga normal, N , que es transmitida a la probeta a través de los elementos de contacto esféricos. Una descripción detallada de este sistema se puede encontrar en [16].

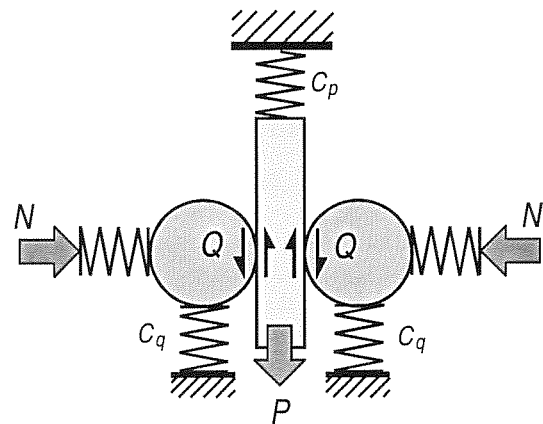


Fig 1. Esquema de la disposición del ensayo.

Las tensiones axiales aplicadas a la probeta estuvieron siempre muy por debajo del límite de fatiga. La máxima presión de contacto nunca superó el límite de fluencia del material. El coeficiente de fricción medio fue de $\mu=1.2$. Este valor muestra concordancia con los valores hallados por otros investigadores [4]. La determinación del coeficiente de fricción se explica con detalle en [16].

En todos los ensayos la frecuencia fue de 10 Hz y el coeficiente de asimetría $R=-1$. Se llevaron a cabo 2 series de ensayos, A y B, donde se analiza la influencia sobre la vida a fatiga de distintos parámetros. (1) En la serie A se estudió la influencia del cociente $Q/\mu N$ en la vida a fatiga. La amplitud de la carga tangencial y la tensión axial se mantuvieron constantes en todos los ensayos $Q = \pm 15$ N y $\sigma_{ax} = \pm 83$ MPa. En cada ensayo se variaba la carga normal, N . (2) En la serie B se analizó la influencia de los parámetros N y Q , manteniendo constante el cociente Q/N y σ_{ax} .

3. RESULTADOS

Las figuras 2 y 3 muestran la vida obtenida en los ensayos de las dos series. La figura 2 muestra los resultados de la serie A. Para el mismo valor de Q , la variación de la vida cuando varía N es muy pequeña. Un incremento de N desde 12.5 a 30 N, que hace decrecer

Q/N desde 1.2 hasta 0.5, produce un incremento en la vida a fatiga de sólo el 30%. Para estos ensayos se obtiene una buena correlación entre Q/N y la vida a fatiga usando una regresión lineal.

zona donde se iniciaron las grietas tiene aproximadamente 60 a 80 μm de largo, que es casi el ancho del anillo de deslizamiento a lo largo del eje $y = z = 0$.

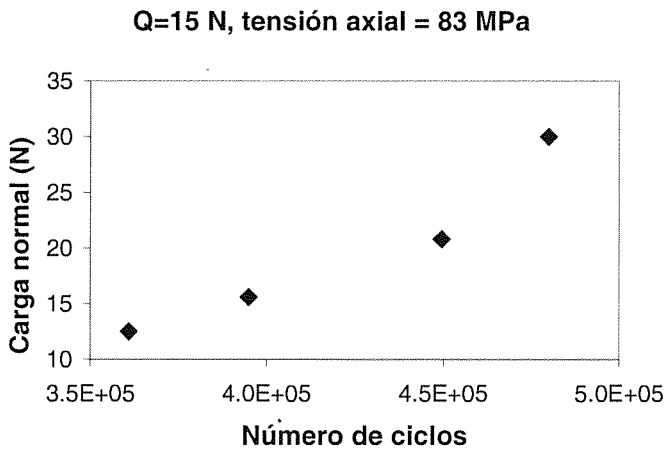


Fig 2. Resultado de ensayos. Serie A.

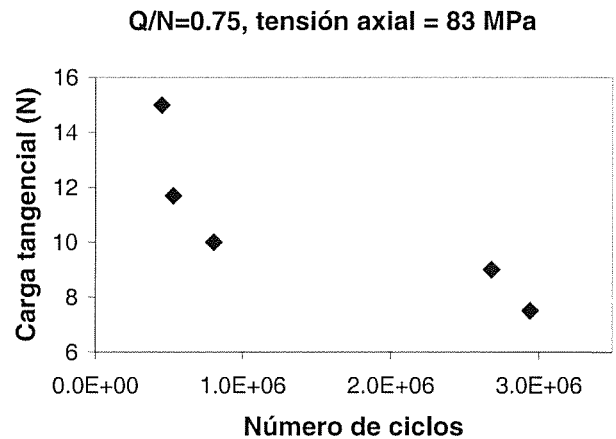


Fig 3. Resultado de ensayos. Serie B.

La figura 3 muestra los resultados de la serie B. En este caso, mientras que Q cambia su valor en la misma proporción que N , el efecto de la reducción de N será un incremento en la vida a fatiga. Aunque esta dependencia queda muy lejos de tener un comportamiento lineal. La reducción de N desde 20.8 hasta 16 (23%) hace que la vida a fatiga aumente por un factor de 1.18. Sin embargo, una reducción de 13.9 a 10.3 N (26%) incrementa la vida en un factor de 3.7. De estas dos series de ensayos se deduce que las tensiones tangenciales debidas al contacto tienen un efecto mucho mayor sobre la vida a fatiga que las tensiones normales (N). Así mismo, se observa que estas dos tensiones, tangenciales y normales, tienen un efecto contrario. En la serie A, a mayor N , mayor vida a fatiga del espécimen. Aunque este efecto es pequeño. En la serie B, a mayor Q , menor vida a fatiga, con una influencia mayor o menor dependiendo del nivel de Q .

La figura 4 muestra dos fotografías de las grietas iniciadas. La figura 4a se corresponde con la sección del eje de simetría de la zona de contacto y la 4b con una sección a 30 μm del mismo eje. La longitud de la grieta principal en la superficie es de 500 μm y su máxima profundidad es de 120 μm en el centro, siendo su forma casi semielíptica. En estas dos secciones se pueden ver otras grietas que se iniciaron cerca de la principal. Casi todas empiezan a crecer formando un ángulo pequeño con la superficie. Más tarde, algunas giran y crecen formando un ángulo recto con la dirección inicial de crecimiento (figura 4a) y otras formando 90° con la superficie. Algunas grietas convergen produciendo el desprendimiento de pequeñas partículas. Finalmente, la grieta principal, que en este caso es la única con más de 10 a 15 μm , gira y crece formando 70°-80° con la superficie después de haber crecido unos 20 μm . La

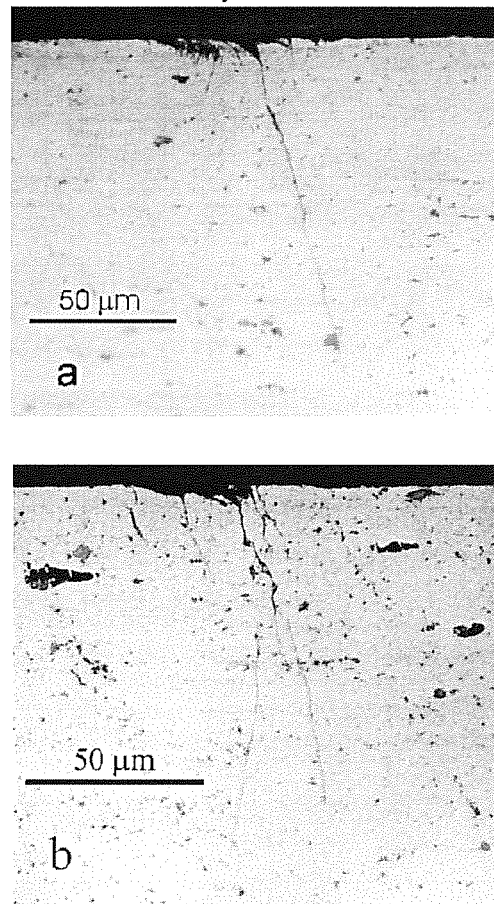


Fig 4. Grietas cercanas a la zona de iniciación.

Con el objeto de estudiar el proceso de iniciación y crecimiento, se ha realizado un análisis de las tensiones

producidas cerca de la zona de contacto durante un ensayo de fretting donde $N = 20 N$, $Q = \pm 15 N$ y $\sigma_{ax} = \pm 59 MPa$. Se han aplicado cuatro criterios de fatiga multiaxial: amplitud máxima de las tensiones tangenciales ($\Delta\tau_{max}/2$), donde $\Delta\tau_{max}$ es el valor de $\Delta\tau$ en el plano donde es máximo, la aproximación de Crossland [17], la aproximación de Crossland [18] y el parámetro de Smith, Watson y Topper [19]. Los tres primeros están relacionados con la iniciación de grietas dominada por las deformaciones tangenciales; el cuarto está relacionado con un proceso de iniciación controlado por la máxima amplitud de las tensiones normales. Para cada criterio se ha calculado su parámetro característico de tensión equivalente. Para comprobar la posible iniciación de una grieta, se ha comparado cada uno de estos parámetros con el valor del mismo parámetro que se obtiene utilizando las tensiones que se producen en el límite de fatiga. Las expresiones de estos parámetros se indican a continuación. En el caso del criterio de McDiarmid

$$\frac{\Delta\tau_{max}}{2} + \frac{t_1}{2\sigma_{TS}} \sigma_{max} \quad (1)$$

donde σ_{max} es el máximo valor que toma la tensión normal en el plano $\Delta\tau_{max}$, σ_{TS} es la tensión de rotura y t_1 el límite de fatiga a torsión. El parámetro de Crossland es

$$\sqrt{J_{2,a}} + \frac{J_{1,max}}{3} \cdot \left(\frac{3t_1}{b_1} - \sqrt{3} \right) \quad (2)$$

donde $J_{2,a}$ y $J_{1,max}$ son el segundo invariante del tensor desviador de la amplitud de las tensiones y el valor máximo del primer invariante respectivamente, b_1 es el límite de fatiga a flexión. El valor del parámetro en el límite de fatiga para los criterios anteriores es el límite de fatiga a torsión, $t_1=101 MPa$. El parámetro de Smith, Watson y Topper (SWT) es

$$SWT = \frac{\Delta\sigma_{max}}{2E} \cdot \sigma_{max1} \quad (3)$$

donde $\Delta\sigma_{max}$ es el máximo incremento de tensiones normales y σ_{max1} el valor máximo de las tensiones normales en el plano donde se produce $\Delta\sigma_{max}$. En el límite de fatiga el parámetro toma el valor

$$SWT = \frac{b_1^2}{2E} \quad (4)$$

En la figura 5 se muestran los parámetros de tensión equivalente, normalizados por sus valores en el límite de fatiga, en el plano $y=0$, y a dos profundidades: $z=0$ (figura 5a); y $z=20 \mu m$ (figura 5b), profundidad a la

cuál, la mayor parte de las grietas secundarias ya han girado. La figura 6 muestra para el mismo plano y distintas profundidades, los ángulos de los planos donde se obtienen las máximas amplitudes de las tensiones tangenciales ($\varphi \rightarrow \Delta\tau_{max}$) y tensiones normales ($\varphi \rightarrow \Delta\sigma_{max}$). Se puede observar que los tres primeros criterios dan resultados muy similares, prediciendo la iniciación de la grieta (parámetro $\approx 1.6-1.8 > 1$) en la zona de deslizamiento. Aunque el criterio de SWT da unos valores muy distintos, predice también la iniciación de la grieta en la misma zona, aunque en el borde. A la profundidad de $20 \mu m$, los valores máximos de algunos criterios siguen siendo mayores que la unidad y se producen bajo la zona central del anillo de deslizamiento.

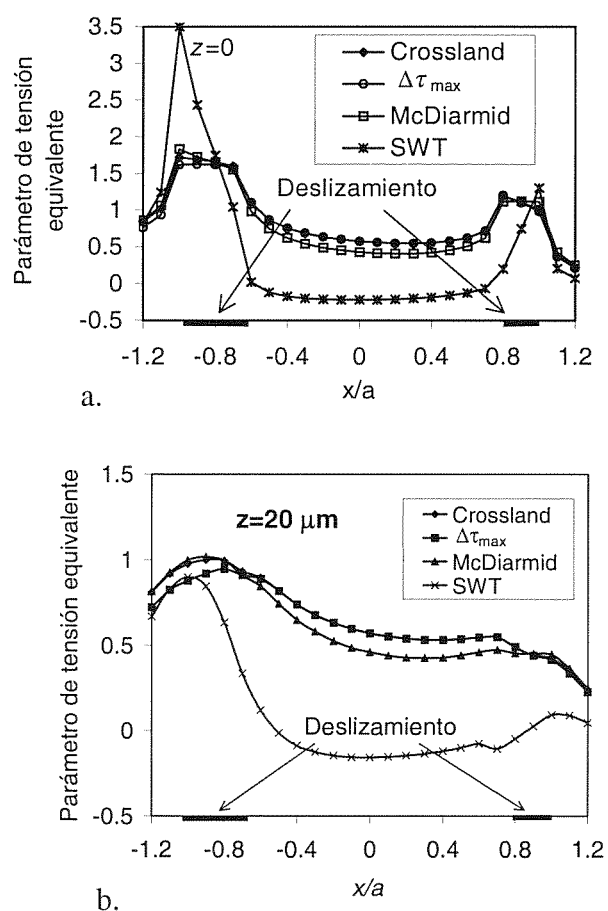


Fig 5. Criterios de fatiga multiaxial. a) en la superficie. b) a $z=20 \mu m$.

Teniendo en cuenta el lugar de iniciación de la grieta, se diría que para este material, los tres criterios dominados por las deformaciones tangenciales dan mejores resultados que el criterio de SWT. Estos tres criterios dan resultados muy similares. Sería interesante comparar estos tres criterios con resultados experimentales usando otro material con un cociente t_1/b_1 suficientemente diferente de 0.58. Para un cociente

distinto de 0.58 se espera que los tres criterios produzcan distintos resultados a lo largo del eje x .

Se puede observar en la figura 4 que todas las grietas se inician con ángulos cercanos a los ángulos donde la amplitud de las tensiones tangenciales es máxima ($\phi \rightarrow \Delta\tau_{\max}$ en la figura 6). Muchas de ellas se giran cerca de la superficie ($z > 10 \mu\text{m}$) y crecen en una dirección perpendicular a la anterior, que también es una dirección de máximo $\Delta\tau$. El giro de la grieta principal a partir de aproximadamente $20 \mu\text{m}$ es hacia la dirección que maximiza la amplitud de las tensiones normales ($\phi \rightarrow \Delta\sigma_{\max}$ en la figura 6). Una explicación a este giro es que las grietas ya no pueden seguir creciendo por deformación tangencial porque el contacto con la esfera impide que las caras de la grieta se desplacen fuera de la superficie de la probeta [3]. Por lo tanto, el crecimiento sigue una dirección perpendicular a la máxima amplitud de tensiones normales porque en esta dirección el elemento de contacto esférico prácticamente no produce interferencia con el movimiento de las caras de la grieta.

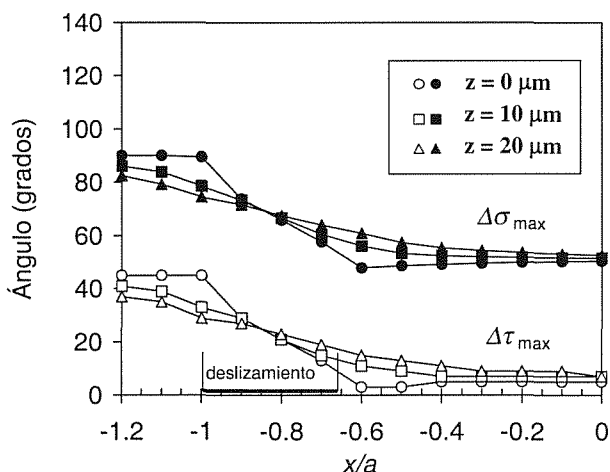


Fig 6. Ángulos críticos a distintas profundidades.

Los criterios de fatiga multiaxial también pueden ser empleados para analizar teóricamente la influencia de la carga normal y la tangencial sobre la iniciación de las grietas. En la figura 7 se muestra el valor máximo del parámetro de McDiarmid usando los valores de las cargas empleadas en la serie A de ensayos, donde sólo se modificaba la carga normal. En la figura 8 se representa el mismo parámetro de tensión equivalente pero en la serie B, en este caso se mantenía constante Q/N y se iba aumentando Q . Al igual que con los resultados experimentales se observa que en la serie A, cuando se aumenta N , disminuye el parámetro de McDiarmid, con lo que se espera que la vida sea mayor. En la serie B, cuando se aumenta Q , aumenta el parámetro de McDiarmid, es decir, la vida es más corta. También se observa que el efecto de las tensiones tangenciales sobre la vida a fatiga es mayor que el de las normales.

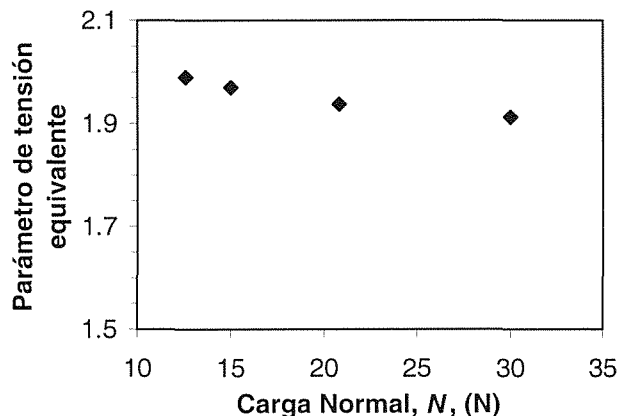


Fig 7. Parámetro de McDiarmid en la serie A.

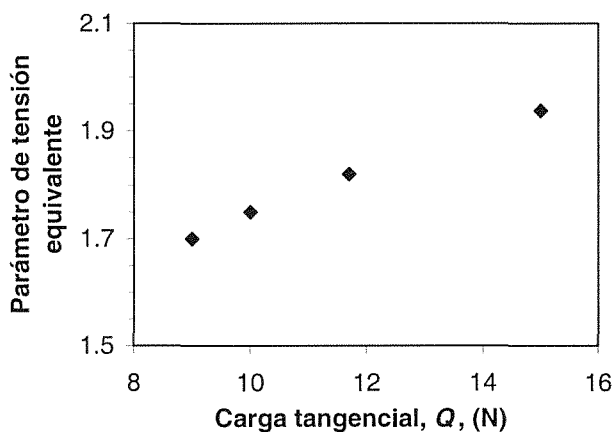


Fig 8. Parámetro de McDiarmid en la serie B.

4. CONCLUSIONES

Tres series de ensayos de fretting fatiga con contacto esférico se han llevado a cabo con el objeto de analizar el efecto de distintos parámetros sobre la vida a fatiga en la aleación de aluminio 7075-T6. Este proceso se ha correlacionado con la variación de las cargas tangenciales y normales aplicadas sobre la probeta. Los ensayos demostraron el fuerte efecto de la carga tangencial sobre la vida a fatiga, al aumentar aquella, disminuye la vida. Sin embargo, el efecto de la carga normal es muy pequeño cuando el resto de los parámetros se mantienen constantes. Una disminución de la carga normal produce una pequeña disminución en la vida a fatiga.

Del análisis de la evolución de las grietas en las primeras etapas, se observa que la mayoría se inician con ángulos cercanos al plano donde se produce el mayor incremento de tensiones tangenciales. Posteriormente, algunas de ellas giran 90° para crecer según el otro plano de máximo incremento de tensiones tangenciales. Muy cerca de la superficie, a una distancia menor que la dimensión característica microestructural, la grieta principal gira y continúa creciendo a lo largo de un plano próximo a aquél donde se produce el máximo incremento de tensiones normales.

Del análisis de los criterios de fatiga multiaxial aplicados a los casos estudiados puede verse que estos criterios permiten justificar, al menos en parte, las especiales características apreciadas en el comportamiento a fatiga de los metales ante condiciones de fretting.

5. REFERENCIAS

- [1] Waterhouse, R. B. and Lindley, T. C., *Fretting Fatigue*, ESIS Publication No 18, European Structural Integrity Society. Mechanical Engineering Publications Limited, London, 1994.
- [2] Eden, E. M., Rose, W. N. and Cunningham, F. L., "The endurance of metals," *Proc. of the Institution for Mechanical Engineers*, Vol. 4, 1911, pp. 839-974.
- [3] Yamashita, N. and Mura, T., "Contact Fatigue Crack Initiation under Repeated Oblique Force," *Wear*, Vol. 91, 1983, pp. 235-250.
- [4] Lamac, V., Dubourg, M. C. and Vincent, L., "A Theoretical Model for the Prediction of Initial Growth Angles and Sites of Fretting Fatigue Cracks," *Tribology International*, Vol. 30, 1997, pp. 391-400.
- [5] Antoniou, R. A. and Radtke, T. C., "Mechanisms of Fretting-Fatigue of Titanium Alloys," *Materials Science and Engineering*, Vol. A237, 1997, pp. 229-240.
- [6] Ruiz, C., Boddington, P.H.B. and Chen, K.C., "An Investigation of Fatigue and Fretting in a Dovetail Joint", *Experimental Mechanics*, Vol. 24, 1984, pp. 208-217.
- [7] Zhou, Z.R., Cardou, A., Fiset, M. and Vincent, L., "Single Wire Fretting Fatigue Test for Electrical Conductor Bending Fatigue Evaluation", *Wear*, Vol. 181-183, 1995, pp. 537-543.
- [8] Sato, K., "Damage Formation During Fretting Fatigue," *Wear*, Vol. 125, 1988, pp. 163-174.
- [9] Nix, K. J. and Lindley, T. C., "The Application of Fracture Mechanics to Fretting Fatigue," *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, Vol 8, 1985, pp. 143-160.
- [10] Hills, D. A. and Nowell, D., "The Development of a Fretting Fatigue Experiment with Well-Defined Characteristics," *Standardization of Fretting Fatigue Tests Methods and Equipments*, ASTM STP 1159, H. M. Attia and R. B. Waterhouse, Eds., American Society for Testing and Materials, 1992, pp. 69-84.
- [11] Endo, K. and Goto, H., "Initiation and Propagation of Fretting Fatigue Cracks," *Wear*, Vol. 38, 1976, pp. 311-324.
- [12] Sato, K., Fuji, H. and Kodama, S., "Crack Propagation Behaviour in Fretting Fatigue," *Wear*, Vol. 107, 1986, pp. 245-262.
- [13] Domínguez, J., "Cyclic Variation in Friction Forces and Contact Stresses During Fretting Fatigue," *Wear*, vol. 218, 1998, pp.43-53.
- [14] Sato, K., Fuji, H. and Kodama, S., "Crack Propagation Behaviour in Fretting Fatigue of S45C Carbon Steel," *Bulletin of JSME*, Vol. 29, 1986, pp. 3253-3258.
- [15] Hattori, T., Nakamura, M., Sakata, H. and Watanabe, T., "Fretting Fatigue Analysis Using Fracture Mechanics", *JSME International*, Series 1, Vol. 31, 1988, pp. 100-107.
- [16] Wittkowsky, B. U., Birch, P. R., Domínguez, J. and Suresh, S., "An Apparatus for Quantitative Fretting-Fatigue Testing", para ser publicado en *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 1999
- [17] McDiarmid, D.L., "Mean Stress Effect in Biaxial Fatigue where the Stresses Are Out-of-phase and at Different frequencies," in *Fatigue under Biaxial and Multiaxial Loading*, K. Kussmaul, D. McDiarmid and D. Socie, Eds., ESIS 10, Mechanical Engineering Publications, 1991, pp. 321-335.
- [18] Crossland, B., "Effect of Large Hydrostatic Pressures on the Torsional Fatigue Strength of an Alloy Steel," *Proc. of the International Conference on Fatigue of Metals*, Institution of Mechanical Engineering, London, 1956, pp.138-149.
- [19] Smith, K. N., Watson, P. and Topper, T. H., "A Stress-Strain Function for Fatigue of Metals", *Journal of Materials*, *JMSLA*, Vol. 5, 1970, pp. 767-778.