

DIVERSOS ASPECTOS DE LA PROPAGACION DE GRIETAS POR FATIGA

Juan J. Gil Martínez / Jaime Domínguez

E.T.S. Ingenieros Industriales de Sevilla

Resumen.- Centrandose en la fase de propagación se pretende constatar las diferencias entre los distintos modelos analíticos presentados, así como la eficacia para tener en cuenta el efecto de retardo en el crecimiento, producido por sobrecargas, de los modelos de interacción analizados.

LISTA DE SIMBOLOS

a : Longitud de la grieta.
 a_{ol} : Longitud de la grieta correspondiente a un ciclo de sobrecarga.
 a_p : Longitud de la zona afectada por la sobrecarga.
 B : Espesor de la probeta.
 da/dN : Velocidad de crecimiento de la grieta.
 K_c : Factor de intensidad de tensiones critico.
 K_{th} : Factor de intensidad de tensiones umbral.
 P_{max} : Carga maxima aplicada sobre la probeta.
 P_{min} : Carga minima aplicada sobre la probeta.
 P_o : Carga de apertura de la grieta.
 R : Parametro de asimetria del ciclo, definido por P_{min}/P_{max} .
 r_{ol} : Tamaño de la zona plastica creada por un ciclo de sobrecarga.
 S_{oi} : Tension de apertura de la grieta correspondiente a un ciclo i .
 S_{oi}^* : Tension de apertura de la grieta modificada correspondiente a un ciclo i .

S_{ool} : Tension de apertura de la grieta correspondiente a un ciclo de sobrecarga.
 W : Ancho de la probeta.
 Δa : Incremento de la longitud de la grieta.
 ΔK : Rango del factor de intensidad de tensiones.
 ΔK_{eff} : Rango efectivo del factor de intensidad de tensiones.
 ΔP : Rango de carga aplicado.
 σ_y : Limite elastico.

1. INTRODUCCION

El empleo de la Mecanica de la Fractura como herramienta de diseño a fatiga tendrá un uso cada vez mayor debido a la importancia y responsabilidad, que tienen las estructuras y componentes sometidos a cargas variables en la industria.

Por esta razon el conocimiento de las características, tanto de los materiales como de los modelos analiticos que intentan describir el fenomeno de la fatiga, es esencial en el diseño.

Con este motivo, este trabajo pretende, centrandose en la fase de propagación, contrastar una serie de modelos propuestos por distintos investigadores, en los que se describe a través de una expresión formal, la relación entre la velocidad de crecimiento de la grieta (da/dN) y el rango del factor de intensidad de tensiones (ΔK), con el fin de centrar el posterior interés hacia uno u otro modelo.

Del mismo modo, se intenta contrastar la eficacia de dos métodos, que modificando el rango del factor de intensidad de tensiones, pretenden tener en cuenta los efectos de interacción producidos por sobrecargas, tales como el modelo de retardo de Willemborg [5] y el modelo de "Crack closure" propuesto por Elber [6].

La selección de los modelos intenta cubrir los distintos enfoques del problema de forma representativa.

2. DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL Y PROBETA.

El material seleccionado para este trabajo es la aleación de aluminio 2219-t851, utilizada en el programa "Round-Robin Crack Growth Predictions on Center-Crack Tension Specimens Under Spectrun Loading" [2], siendo las características del mismo [1,4]:

Factor de Intensidad Crítico (K_c) = 60.ksi in.

Factor de Intensidad Umbral (K_{th}) = .7ksi in.

Límite Elástico (σ_y) = 52.ksi

1 ksi in. = 1.09 MPa m

1 ksi = 6.93 MPa

La probeta empleada 2 corresponde al tipo "center crack tension (CCT)", con unas dimensiones, ancho (W) de 6. in. (152.4 mm) y espesor (B) de .25 in. (6.35 mm). La grieta central está mecanizada por electrodescarga (EDM) presentando una longitud total ($2a$) de .25 in. (6.35 mm).

La expresión del factor de intensidad de tensiones puede expresarse [1]:

$$\alpha = 2a/W$$

$$\Delta P = P_{\max} - P_{\min} \quad R > 0$$

$$\Delta P = P_{\max} \quad R \leq 0$$

$$\Delta K = \Delta P \sqrt{\pi \alpha / 2W \cos(\pi \alpha / 2) / B} \quad (1)$$

Expresión válida para $2a/W \leq .95$.

3. DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS DE CRECIMIENTO

Aunque todos los modelos propuestos pueden definirse como modificaciones de la ecuación propuesta por París:

$$da/dN = C (\Delta K)^M \quad (2)$$

Sus diferencias para tener en cuenta el efecto de la asimetría del ciclo son apreciables.

Los modelos son:

A. Modelo propuesto por Broeck y Schijve [3]:

$$da/dN = C_1 \Delta K \exp(-C_2 R) / (1-R) \quad (3)$$

Donde C_1 y C_2 son parámetros del modelo.

B. Modelo propuesto por Forman [3]:

$$da/dN = C (\Delta K)^M / ((1-R)K_c - \Delta K) \quad (4)$$

Donde C y M son parámetros del modelo.

C. Modelo de Walker, modificado por Annis

$$[1] : da/dN = C_1 \left[\frac{\Delta K_{\text{eff}} - K_{\text{th}}}{1 - (K_{\text{max}}/K_c)^2} \right]^{C_2} \quad (5)$$

Donde:

$$\Delta K_{\text{eff}} = (1 - P_0/P_{\max}) K_{\max} \quad (6)$$

C_1 y C_2 son parámetros del modelo. P_0 es la carga aplicada sobre la probeta que produce la apertura de la grieta (concepto del "Crack closure" propuesto por Elber [7]).

4. AJUSTE DE PARÁMETROS DE LOS MODELOS

Para determinar los parámetros de los distintos modelos se han usado los resultados del programa de ASTM E24.04.04 [1], donde se presentan conjunto de datos ($da/dN - \Delta K$) para distintos valores de R . A partir de estos datos se procedió a determinar los valores de los parámetros como una función de R , aplicando la teoría de mínimos cuadrados. El siguiente paso fue tomar los valores anteriores como iniciales y minimizar la norma del error entre los datos ajustados y los experimentales. Para ello se empleó una función objetivo del tipo:

$$F.OBJ. = \sum_{i=1}^n A_i (\log(x_{ei}) - \log(x_{ai})) \quad (7)$$

Donde x_{ei} representa el dato experimental,

y x_{ai} el valor ajustado. De esta manera se intenta minimizar la diferencia entre los resultados experimentales y los ajustados, especialmente en la zona de bajos ΔK , en la que se consume un alto porcentaje de la vida de un componente.

Este ultimo aspecto es de interés en la posterior simulación de los modelos, y es decisivo en el modo de tratar los resultados experimentales con objeto de conseguir un mejor ajuste de los mismos.

Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 1.

5. MODELOS DE INTERACCION DE CARGAS.

Para tener en cuenta los efectos de interacción de cargas, en el caso de registros con R variable, se seleccionaron los modelos ya comentados anteriormente y que a continuación se procede a describir.

Modelo de Willemborg [5]:

En este modelo se intenta describir el retardo del crecimiento de la grieta a través del concepto de tensión efectiva, que resulta de reducir la tensión real aplicada, teniendo lugar de esta forma el retardo.

Este modelo, trabaja en términos de longitud total, así resulta una expresión para la

zona afectada por la sobrecarga:

$$a_p = a_{o1} + r_{o1} \quad (8)$$

Donde r_{o1} representa el tamaño de zona plástica producida por la sobrecarga.

El retardo disminuye a medida que la grieta crece a través de la zona afectada, llegando a ser nulo cuando la longitud de la grieta en un ciclo determinado (a_i) mas su zona plástica asociada (r_{yi}) iguala a a_p . (Figura 1)

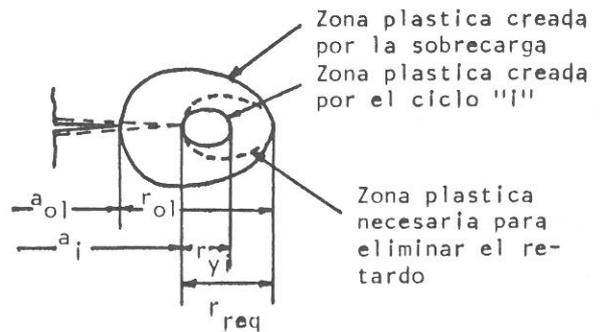


Figura 1.

A continuación se describen las expresiones que nos dan la magnitud del retardo.

TABLA 1. Valores de los parámetros ajustados.

		R = -1.	R = .1	R = .3	R = .5	R = .8
A	$C_1 (10^8)$.45801	.65774	.43577	.38405	.26260
	C_2	2.02	1.31270	2.20104	2.55372	3.03452
B	$C (10^7)$	14.3717	1.37964	2.4199	1.88941	$1.9490 \cdot 10^{-3}$
	M	2.49698	3.36782	2.96189	3.	7.
C	$C_1 (10^8)$	59.0768	2.54827	2.98848	2.8871	.21031
	C_2	1.96377	3.01	2.63	2.70646	4.52999

Nota: Estos valores corresponden a los parámetros con K y a en unidades Ksi in. y in. respectivamente.

Así, para una longitud de grieta a_i , posterior a la aplicación de una sobrecarga, la tensión requerida (S_{req}) para producir una zona plástica r_{req} , que elimine el retardo viene dada:

$$\begin{aligned} a_p &= a_i + r_{req} = a_i + (k_{req}/\sigma_y)^2/2\pi \\ &= a_i + (S_{req}\sqrt{\pi a_i} \lambda/\sigma_y)^2/2\pi \quad (9) \end{aligned}$$

Resolviendo para S_{req} :

$$S_{req} = \sigma_y \sqrt{2(a_p - a_i)/a_i} / \lambda \quad (10)$$

A partir de la cual se define una tensión de reducción S_{red} :

$$S_{red} = S_{req} - S_{max_i} \quad (11)$$

De esta forma, las tensiones efectivas vienen expresadas:

$$\begin{aligned} S_{max_i\,eff} &= S_{max_i} - S_{red} \geq 0 \\ S_{min_i\,eff} &= S_{min_i} - S_{red} \geq 0 \end{aligned} \quad (12)$$

Modelo de "Crack closure" [6]:

Este modelo se basa en el concepto de rango efectivo de tensiones, definido:

$$\Delta S_{eff} = S_{max} - S_o \quad (13)$$

Donde S_o es la tensión de apertura de la grieta, esto es, aquella tensión para la cual los labios de la grieta se encuentran totalmente separados.

Este concepto fué inicialmente propuesto por Elber [7] y a partir de él se ha desarrollado el modelo de interacción que se describe.

Basado en lo anterior, se define el factor de apertura (C_f) que nos relaciona la tensión de apertura (S_o) con la tensión máxima aplicada (S_{max}):

$$C_f = S_o / S_{max} \quad (14)$$

Factor que normalmente se expresa como una función de R.

De esta forma sustituyendo (14) en (13) tendremos:

$$\Delta S_{eff} = S_{max} (1 - C_f) \quad (15)$$

Así, el modelo intenta tener en cuenta el

efecto del retardo a través de la corrección de la tensión de apertura correspondiente a una S_{max_i} de un ciclo posterior a la sobrecarga. (Figura 2).

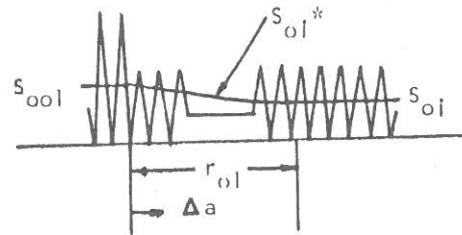


Figura 2.

Así en 6 se propone una expresión del tipo:

$$\begin{aligned} S_{oi}^* &= S_{ool} - (S_{ool} - S_{oi}) (\Delta a / r_{ol})^b \\ 0 &\leq \Delta a \leq r_{ol} \end{aligned} \quad (16)$$

Donde el parámetro b es un coeficiente de ajuste, siendo igual a 1 en el caso de la aleación de aluminio que tratamos (2219-t851).

6. SIMULACION.

A efectos de contrastar la eficacia de los modelos, se eligieron dos ensayos reseñados [2] definidos en la tabla 2.

Así, por medio de la implementación de un programa de ordenador, se procedió a la integración ciclo a ciclo de cada uno de los modelos sin tener en cuenta los efectos de interacción, y considerándolos a través de la rutina de Willenborg ó del "Crack closure" respectivamente.

El resumen de los resultados se presenta en la tabla 3.

TABLA 2. Datos relativos a los ensayos.

Denominación	Pmax.	Longitud inicial	Longitud final	Numero de ciclos
M-88 (1)	45 Kp.	.150 in.	Fallo	380443
M-86 (2)	60 "	.153 "	"	36367

Nota: Kp.= 1000 libras (1 libra = .456 kg.)

TABLA 3. Vida en ciclos predicha por cada modelo ($N_{predicho} / N_{ensayo}$).

MODELO	Sin Retardo		Con Willemborg		Con Crack Clos.	
	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
A	224400 (.589)	24835 (.683)	1600200 (4.21)	71634 (1.97)	1878000 (4.93)	170434 (4.686)
B	148500 (.390)	11684 (.321)	709500 (1.864)	27934 (.768)	538756 (1.416)	24761 (.681)
C	129900 (.341)	9884 (.272)	534300 (1.404)	20085 (.552)	1279200 (3.36)	47050 (1.294)

7. ANALISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES.

Ala vista de los resultados presentados se pueden deducir algunos aspectos considerados de interés, que necesitan un mayor estudio.

* La decisión de incorporar en la simulación el efecto del retardo en el crecimiento, vendrá condicionada por un estudio previo de la historia de cargas. Asi, recientes estudios sobre el tema [8], apuntan una magnitud minima de sobrecarga que justifique su empleo.

Respecto a este aspecto, se podria caracterizar el registro de cargas a traves de un estudio estadístico, que determine una funcion de densidad de probabilidad de las variables, rango de cargas (ΔP) y parametro de asimetria (R), a partir de la cual se podria decidir la inclusion ó no de dicho efecto.

* Otro aspecto importante, es el efecto de aceleración del crecimiento, que se produce cuando el registro contiene sobrecargas negativas (de compresion), y que ninguno de los modelos de interaccion analizados en este trabajo

tiene en cuenta [9].

* Asimismo, cabe destacar la influencia en la simulación del ajuste de los distintos parametros de un modelo. Entre estos podemos diferenciar los propios del modelo (C, M, etc.), de las constantes definidas en la Mecanica de la Fractura (K_c , K_{th}).

Respecto al ajuste de los primeros puede servir de ejemplo, que el empleo del metodo de ajuste propuesto en este trabajo, presenta una ligera diferencia respecto a los resultados obtenidos por Hudson [2], relativos a los dos ensayos mencionados.

Den. Ens.	Hudson 2	Trabajo
M-86	.82	1.16
M-88	1.25	1.21

Donde los valores dados representan la relacion entre el numero de ciclos predichos y el numero de ciclos del ensayo.

Respecto a K_c y K_{th} , en la bibliografía se puede constatar la diversidad de valores que se proponen, que no muestran más que la no uniformidad que aún existe en la determinación de las mismas.

STP 595, American Society for Testing and Materials, 1976, pag. 3-23.

8. REFERENCIAS.

- [1] Hudak, Bucci, "Fatigue Crack Growth Measurement and Data Analysis", ASTM STP 738, American Society for Testing and Materials, 1981, pag. 205-251.
- [2] Chang, Hudson, "Methods and Models for Predicting Fatigue Crack Growth Under Random Loading", ASTM STP 748, American Society for Testing and Materials, 1981, pag. 3-40, pag. 53-84.
- [3] Bathias c., Bailon J.P., "La Fatigue des Materiaux et des Structures", 1980, pag. 200-234.
- [4] Klesnil M., Lukas P., "Fatigue of Metallics Materials", Materials Sciences Monographs, 7, 1980, pag. 110-126.
- [5] Fuchs H.O., Stephens R.I., "Metal Fatigue in Engineering", 1980, pag. 206-214.
- [6] Bell P.D., Wolfman A., "Mathematical Modelling of Crack Growth Interaction Effects", Fatigue Crack Growth Under Spectrum Loads, ASTM STP 595, American Society for Testing and Materials, 1976, pag. 157-171.
- [7] Elber W., "The Significance of Fatigue Crack Closure", Damage Tolerance in Aircraft Structures, ASTM STP 486, American Society for Testing and Materials, 1970, pag. 230-242.
- [8] Lankford J., Davidson D.L., Cook T.S., "Fatigue Crack Tip Plasticity", Cyclic Stress-Strain and Plastic Deformation Aspects of Fatigue Crack Growth, ASTM STP 637, American Society for Testing and Materials, 1976, pag. 36-55.
- [9] Schijve J., "Observations on the Prediction of Fatigue Crack Growth Propagation Under Variable-Amplitude Loading", Fatigue Crack Growth Under Spectrum Loads, ASTM