

CONSIDERACION DEL CIERRE EN LA PREDICCIÓN DEL CRECIMIENTO DE GRIETAS BAJO CARGA IRREGULAR

Gil Martínez J.J., Domínguez Abascal J.

Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Sevilla

Av. Reina Mercedes, s/n 41012-SEVILLA

Resumen: En este trabajo se pone de manifiesto la influencia de las condiciones consideradas cuando se aplica el concepto del cierre de grieta a la predicción del periodo de propagación en el caso de registros de cargas de amplitud variable.

Summary: The influence of the different stress states considered in the application of the crack closure concept to the predictions about the propagation period in fatigue under variable amplitude loads is shown in this work.

1.- INTRODUCCION

El estudio de la evolución de una grieta, cuando sobre ésta se aplican cargas de amplitud variable, resulta en principio complejo, debido a la necesidad de tener en cuenta el efecto de secuencia que se produce.

Las técnicas que normalmente se utilizan, se basan principalmente en establecer una correlación entre las características del problema particular y los datos de amplitud constante que se obtienen a partir de los ensayos.

De forma general, éstas pueden clasificarse en dos tipos:

* Aproximación estadística propuesta por Barson /1/.

* Aproximación ciclo a ciclo.

Tanto una como otra aplican las características particulares del registro de cargas, geometría, material, etc. a un determinado modelo analítico para describir el comportamiento de la grieta.

En el presente trabajo, se analiza la influencia de las condiciones consideradas, Tensión, Deformación plana o intermedias, al incluir el concepto del Cierre de grieta propuesto por Elber /2/, con objeto de describir de forma más aproximada el crecimiento de la grieta.

La simulación del mismo emplea la aproximación ciclo a ciclo, incluyendo un modelo de retardo.

El problema básico en la aplicación de este concepto es la determinación de la tensión de apertura (S_{ap}), o tensión a la cual la grieta se considera que está completamente abierta. Newman /3/ propone una aproximación analítica para su determinación, basada en la modificación del modelo de Dugdale /4/, en función de α , factor de constricción plástica, para tener en cuenta las condiciones consideradas.

Los resultados de Newman pueden ser ajustados de acuerdo con Bell y Wolfman /5/ por una expresión del tipo:

$$C_f = C_{f-1} + (C_{f0} - C_{f-1}) * (1 + R)^P \quad (1)$$

Donde C_f es la relación entre la tensión de apertura y la máxima aplicada, indicando los subíndices los valores particulares de la misma para $R = -1$ y $R = 0$, siendo R el coeficiente de asimetría del ciclo.

La relación C_f depende del parámetro α , variando éste entre $\alpha=1$ para tensión plana y $\alpha=3$ en el caso de deformación plana de acuerdo con Broeck /6/.

2.- BASE EXPERIMENTAL

Como base de datos experimentales se seleccionaron los resultados del programa de ASTM "Round-Robin Crack Growth Prediction on Center-Crack Tension Specimens Under Spectrum Loading" /7/.

El material empleado en el mismo es la aleación de aluminio 2219-T851 siendo sus características:

Factor crítico de intensidad de tensiones (K_{Ic}) : 70.8 MPa \sqrt{m}

Límite elástico (σ_e) : 358.3 MPa

La probeta empleada corresponde al tipo "Center-Crack", cuyas dimensiones se recogen en la figura 1.

Para esta geometría, el incremento del factor de intensidad de tensiones - tiene la expresión /8/:

$$\Delta K = \Delta P/B \sqrt{\pi\theta/2W \sec (\pi\theta/2)} \quad (2)$$

Donde:

$$\theta = 2a/W \quad \Delta P = M_{\max} - P_{\min}$$

Siendo P la carga aplicada sobre la probeta,

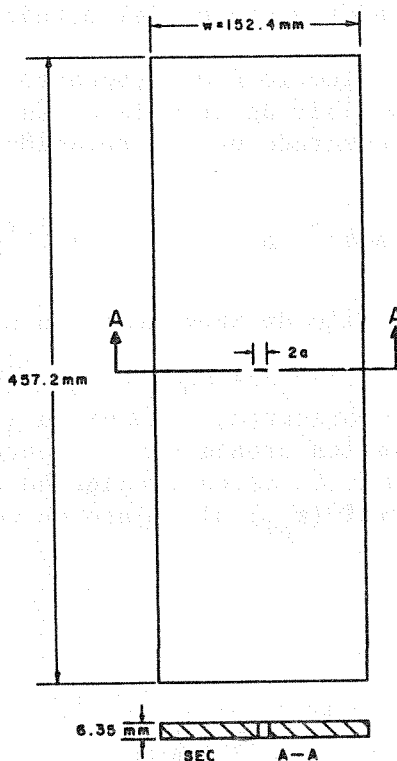


Fig. 1 Probeta "Center-Crack"

Los resultados experimentales que servirán de base de comparación pueden encontrarse en el programa de ASTM /7/.

3.- PREDICCIÓN DEL CRECIMIENTO BAJO CARGA IRREGULAR

El primer problema que se plantea al realizar una estimación del comportamiento de una grieta, es la selección de un modelo analítico que lo describa -- con la suficiente aproximación.

Debido a que no existe un criterio objetivo que permita la elección de un determinado modelo, ésta normalmente se basa en estudios comparativos entre los distintos modelos. Así, partiendo de la experiencia anterior /9, 10/ se propone para el caso particular en estudio una modificación del propuesto por Forman et al. /11/, cuya expresión es:

$$da/dN = C (\Delta K_{ef} - \Delta K_0)^n / (1 - (K_{max}/K_c)^2) \quad (3)$$

Donde ΔK_{ef} es el incremento efectivo del factor de intensidad de tensiones basado en el cierre de grieta, ΔK_0 representa las condiciones de no-propagación /3/, y C, n son constantes del modelo.

Estas constantes fueron determinadas a partir de los datos del programa de ASTM E24.04.04 /8/, mediante un ajuste inicial por mínimos cuadrados seguido de un proceso para minimizar el error entre los valores experimentales y los ajustados considerando una función objetivo del tipo:

$$F.O. = \sum |\log(da/dN)_{exp} - \log(da/dN)_{aju}| \quad (4)$$

Los valores de C y n ajustados dependen del estado que se considere.

Como modelo de retardo se seleccionó el propuesto por Bell y Wolfman /5/ - modificado ligeramente para describir de un modelo más aproximado el efecto de secuencia. Así, éste viene representado por la relación:

$$S_{api}^* = S_{aps} - (S_{aps} - S_{api})(\Delta a + r_{pi})/r_{ps} \quad (5)$$

Donde S_{aps} y r_{ps} son la tensión de apertura y la zona plástica correspondientes a una sobrecarga respectivamente, S_{api} y r_{pi} las correspondientes a cualquier ciclo posterior a la sobrecarga, y Δa es la longitud de grieta que se encuentra dentro de la zona plástica creada por la sobrecarga, según se representa en la figura 2. La modificación antes aludida ha consistido en la introducción de la zona plástica normal (r_{pi}) al objeto de considerar el final del retardo.

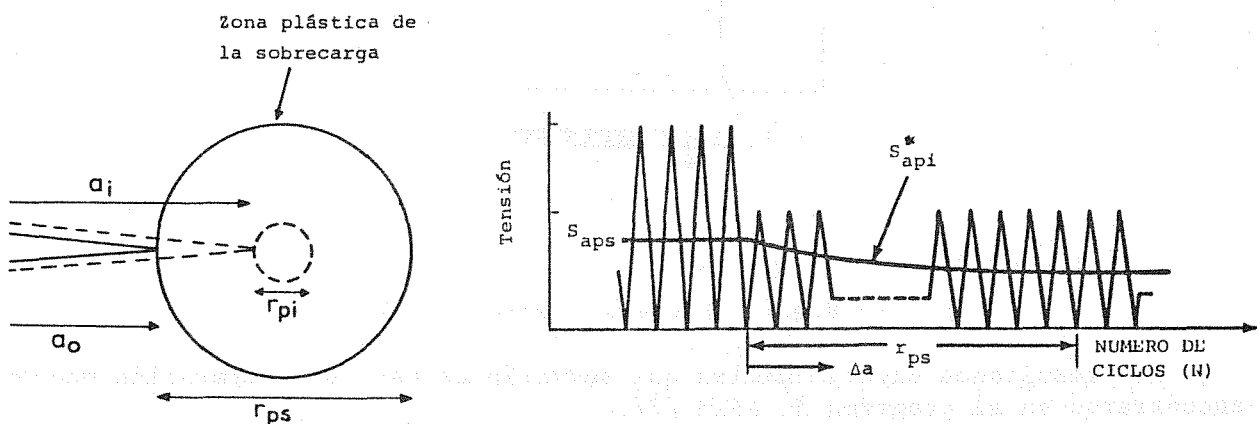


Fig. 2 Representación esquemática del modelo de retardo empleado.

4.- ESTIMACION DEL COMPORTAMIENTO DE LA GRIETA

Definidos los diversos aspectos, el proceso de simulación del crecimiento de la grieta consiste básicamente en la integración ciclo a ciclo del modelo -- analítico propuesto.

Con el fin de analizar la influencia de las condiciones consideradas, ten-

si3n, deformaci3n plana o intermedias, en el resultado de la simulaci3n, 3sta - se realiz3 para cada una de ellas seg3n el proceso siguiente:

1. Evaluaci3n de los coeficientes de la expresi3n (1) mediante ajuste de - los resultados de Newman /3/.
2. Determinaci3n, a partir de los datos experimentales de amplitud constan - te /12/, de los coeficientes C y n del modelo anal3tico de crecimiento, considerando en cada caso la expresi3n para la tensi3n de apertura an - tes ajustada.
3. Integraci3n ciclo a ciclo, de la expresi3n (3), considerando la tensi3n de apertura dada por la ecuaci3n (5).

En las tablas 1 y 2 se recogen los valores obtenidos en los pasos interme - dios del proceso indicado.

TABLA 1 - Coeficientes para el c3lculo de la tensi3n de apertura

	C_{f-1}	$C_{f0} - C_{f-1}$	P
T.P. ($\alpha = 1$)	.358	.105	2.612
$\alpha = 1,7$	.296	.089	2.983
$\alpha = 2,3$	.236	.085	3.168
$\alpha = 2,6$	.206	.076	3.385
D.P. ($\alpha = 3$)	.177	.067	3.618

TABLA 2 - Coeficientes C y n del modelo

	$C(x10^7)$	n
T.P. ($\alpha = 1$)	2.453	2.44
$\alpha = 1,7$	1.499	2.50
$\alpha = 2,3$	1.074	2.53
$\alpha = 2,6$	.886	2.55
D.P. ($\alpha = 3$)	.747	2.55

Los resultados obtenidos de la simulaci3n, expresados mediante la relaci3n entre el n3mero de ciclos predicho y el correspondiente al ensayo /7/ se presen - ta en la tabla 3 como funci3n del par3metro.

TABLA 3 - Resultados obtenidos en la simulación

Denominación ⁽¹⁾	1	1.7	2.3	2.6	3.
M-81(20.)	1.29	1.10	1.05	.98	.93
M-82(30.)	.97	.81	.77	.71	.68
M-83(40.)	1.10	.92	.85	.81	.77
M-84(20.)	1.05	.99	.91	.87	.85
M-85(30.)	.81	.75	.68	.65	.64
M-86(40.)	.75	.68	.62	.59	.58
M-88(30.)	.94	.84	.72	.59	.56
M-89(40.)	.80	.70	.59	.48	.46
M-90(20.)	1.59	1.36	1.31	1.10	1.02
M-91(30.)	1.32	1.11	1.06	.90	.84
M-92(40.)	1.34	1.12	1.07	.95	.88
MEDIA	1.08	.94	.87	.78	.74
DES.MED.	.21	.17	.18	.16	.14

(1): El valor entre paréntesis representa la tensión máxima aplicada en el ensayo (K_{si}).

5.- ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Los resultados presentados en la tabla 3 reflejan que la predicción varía significativamente dependiendo de las condiciones que se consideren para calcular la tensión de apertura correspondiente.

Aparte de las discrepancias propias motivadas por la dispersión de los parámetros que se emplean (K_c , ΔK_o , r_p , etc.), varias pueden ser las causas de -- las diferencias mostradas en los resultados. Entre éstas pueden destacarse, la aproximación del modelo de retardo empleado junto con la variación de las condi ciones a considerar para determinar la tensión de apertura.

Las hipótesis establecidas en el modelo de retardo, no permiten su aplicación de forma directa cuando los registros de cargas son de variación irregular como los empleados en este trabajo. La formulación del mismo se basaba en suponer un coeficiente de asimetría constante, como se desprende del esquema representado en la figura 2. Si se analiza la correspondiente expresión (1) de la -- tensión de apertura, se comprueba la influencia que el coeficiente de asimetría R tiene sobre éste, lo que dificulta, sin una profundización en el estudio del fenómeno de secuencia en estos casos, la aplicación del modelo de retardo.

Otro aspecto a destacar, es el relativo a la influencia de los niveles de tensión entre la sobrecarga y los ciclos aplicados con posterioridad a ésta. -- Así, la magnitud de la sobrecarga puede ser tal que desarrolle condiciones de -- tensión plana en todo el espesor, mientras que los ciclos posteriores pueden te ner una magnitud tal que sólo desarrollen condiciones de deformación plana en -- el interior de la zona afectada por la sobrecarga. De modo que las condiciones a aplicar en cada caso para calcular la tensión de apertura serían diferentes.

Aparte de estos aspectos se comprueba a partir de los resultados, que és-- tos tienden a hacerse más conservativos conforme las condiciones consideradas --

se aproximan a deformación plana. Hecho lógico, ya que ΔK_{ef} es mayor en deformación plana y por tanto el número de ciclos predicho menor.

Como conclusión final cabe apuntar, que si bien los resultados obtenidos - están en un margen aceptable, es necesario profundizar en los aspectos anteriormente señalados, con objeto de poder simular más correctamente el crecimiento - de una grieta en condiciones de carga irregular mediante la técnica utilizada.

6.- REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- /1/ J.M. Barsom, "Fatigue Crack Growth Under Variable-Amplitude Loading in Various Bridge Steels", Fatigue Crack Growth Under Spectrum Loads, ASTM STP 595, American Society for Testing and Materials, 1976.
- /2/ W. Elber, "Fatigue Crack Closure Under Cyclic Tension", Eng. Frac. Mech. 2, 37, 1970; "The Significance of Fatigue Crack Closure", Damage Tolerance in Aircraft Structures, ASTM STP 486 American Society for Testing and Materials, 1971.
- /3/ J.C. Newman, "A Crack-Closure Model for Predicting Fatigue Crack Growth Under Aircraft Spectrum Loading", Methods and Models for Predicting Fatigue Crack Growth Under Random Loading, ASTM STP 748, American Society for Testing and Materials, 1981.
- /4/ D.S. Dugdale, "Yielding of Steel Sheets Containing Slits", J. Mech. Phys. Sol., 8, 1960.
- /5/ P.D. Bell, A. Wolfman, "Mathematical Modelling of Crack Growth Interaction Effects", Fatigue Crack Under Spectrum Loads ASTM STP 595. American Society for Testing and Materials, 1976.
- /6/ D. Broeck, "Prediction of Fatigue Crack Growth", Elementary Engineering Fracture Mechanics, Martinus Nijhoff Publishers, 1982.
- /7/ J.B. Chang, C.M. Hudson, "Methods and Models for Predicting Fatigue Crack Growth Under Random Loading", ASTM STP 748, American Society for Testing and Materials, 1981.
- /8/ S.J. Hudack, R.J. Bucci, "Fatigue Crack Growth Measurements and Data Analysis", ASTM STP 738, American Society for Testing and Materials, 1981.
- /9/ J.J. Gil, J. Domínguez, "Diversos Aspectos de la Propagación de Grietas por Fatiga", Anales de Ingeniería Mecánica, No. 1, Sevilla, 1983.
- /10/ J.J. Gil, J. Domínguez, "Propagación de Grietas por Fatiga. Método de Predicción de su Duración", Proyecto Fin de Carrera, ETSII Sevilla, 1985.
- /11/ R.G. Forman, V.E., Kearney, R.M. Engle, "Numerical Analysis of Crack Propagation in Cyclic-Loaded Structures", J. Basic Eng., Trans. ASME D89, 1967.