EFECTOS PLÁSTICOS DE ESCALA Y MECÁNICA DE LA FRACTURA

Javier Gil Sevillano

CEIT (Centro de Estudios e Investigaciones Técnicas de Guipúzcoa) y Escuela Superior de Ingenieros (Universidad de Navarra), San Sebastián.

Resumen. Varias interpretaciones o modelos explicativos de fenómenos relacionados con la Mecánica de la Fractura, de aceptación general hasta ahora, han de revisarse a la luz de efectos de escala en el comportamiento plástico, a los que sólo recientemente se ha prestado atención.
En particular, la simple consideración de la influencia del gradiente plástico sobre la resistencia a la deformación en la zona plástica de una grieta permite predecir la existencia general de un umbral de propagación de grietas por fatiga del orden de magnitud correcto.

Abstract. Several commonly accepted models or interpretations of Fracture phenomena need revision in view of the existence of important size effects in plasticity when the plastic volumes are very small (linear size below 10 μm). In particular the sole consideration of the plastic gradient in the plastic zone ahead of a crack leads to the prediction of a threshold for the propagation of cracks by fatigue with an order of magnitude in agreement with the experimental results.

1. Introducción.

Comparando la atención prestada a los efectos de tamaño en la fractura frágil con la que se les ha dedicado en la plasticidad tradicional, ésta ha sido insignificante. Sin embargo, el auge reciente de las microtecnologías (microelectrónica, MEMS, mecanizado de ultraprecisión, etc.) ha suscitado en los últimos seis años un interés creciente por caracterizar la especificidad de la plasticidad confinada en pequeños volúmenes. Las observaciones experimentales y los modelos numéricos basados en dislocaciones han puesto rápidamente de manifiesto que, por debajo de 10 μm, la plasticidad tradicional, independiente de la escala, resulta inadecuada y hace falta entonces recurrir a teorías de la plasticidad más elaboradas, en cuyas ecuaciones aparezca una distancia característica, real o efectiva, del material (Fleck y col., 1994). Aunque las nuevas teorías de plasticidad del continuo dependientes del tamaño están en elaboración y necesitan todavía mucha validación experimental (Needleman y van der Giessen, 2000), es posible avanzar ya algunas consideraciones sobre repercusiones de los efectos plásticos de tamaño en varios aspectos relacionados con la Mecánica de la Fractura.

2. Dos tipos diferenciados de efectos plásticos de escala.

Se pueden distinguir dos tipos de efectos de escala en la plasticidad (Gil Sevillano, 2000). Un primer tipo lo constituyen los efectos *intrínsecos* de tamaño: por debajo de cierto tamaño de los dominios plásticos, el comportamiento de los materiales cristalinos se desvía del comportamiento habitual observado en procesos o ensayos que implican volúmenes plásticos de gran tamaño. En concreto, cuando el tamaño del dominio plástico está restringido por barreras estructurales o por superficies libres muy próximas, la resistencia plástica aumenta respecto al comportamiento macroscópico ("smaller is harder", al menos a temperaturas moderadas) y la capacidad de endurecimiento por deformación se debilita o desaparece. En la vertiente microestructural de los tamaños, la mayoría de estos efectos son bien conocidos y constituyen la base de la Ingeniería de Materiales (control de las propiedades a través del control de la microestructura).
Un segundo grupo de efectos de escala aparece cuando las condiciones de contorno o las heterogeneidades internas del material provocan patrones heterogéneos de deformación plástica, es decir, gradientes espaciales mesoscópicos de deformación. En los materiales cristalinos, los gradientes espaciales de deformación plástica exigen el almacenamiento de una densidad de dislocaciones proporcional a esos gradientes, las llamadas *dislocaciones geométricamente necesarias*, DGN, por oposición a las dislocaciones que también se almacenan durante la deformación plástica en ausencia de gradientes (dando por descontado el gradiente plástico microscópico asociado a cada línea de dislocación deslizada): las *dislocaciones almacenadas estadísticamente*. En muchos casos, la escala

dimensional del problema determina el valor de los gradientes de deformación, por lo que el efecto de la densidad de DGN sobre la resistencia plástica comienza a ser dominante para tamaños pequeños (de nuevo "smaller is harder"). Estos efectos, en general muy importantes y casi omnipresentes, no son efectos de tamaño *per se* y podemos denominarlos *extrínsecos*, porque el gradiente plástico que los origina se impone externamente o se origina internamente en el transcurso de la deformación plástica impuesta externamente.

3. Repercusiones en la Mecánica de la Fractura.

Transiciones inducidas por el tamaño.

Como ocurre con muchas otras propiedades físicas, la variación de la relación superficie-volumen al variar la escala puede provocar una transición de comportamiento. En el caso de la rotura frágil, se trata de una transición de tipo frágil-dúctil, ligada a la diferente evolución de la energía de rotura, proporcional a la sección, L^2 y la energía elástica disponible, proporcional al volumen, L^3 (si ésta es la única fuente disponible para propagar una grieta), con el tamaño lineal de la pieza, L. Este tipo de transición fue señalado por Kendall (1978) en un artículo con el sugerente título "On the impossibility of comminution of small particles".

Del mismo tipo (efecto intrínseco de tamaño) es también la transición de comportamiento dúctil-frágil al reducir el tamaño y pasar de un comportamiento "normal" a un comportamiento tipo "whisker", transformación estudiada por Griffith (1920). En este caso, la transición está ligada a la interferencia entre el volumen o superficie media por defecto (microgrieta o núcleo de fractura equivalente) y el volumen o superficie de la pieza.

Ambos tipos de efectos de escala, de indudable interés en problemas de fractura ligados a microtecnologías, han sido revisados recientemente por Puttick (1993).

La tensión máxima en la proximidad del borde de la grieta: repercusión sobre la fractura frágil.

La zona plástica (ZP) asociada al borde de grietas bajo carga en materiales cristalinos es frecuentemente físicamente pequeña (inferior a las 10 μm anteriormente señaladas) y contiene gradientes plásticos cualquiera que sea el modo de carga, gradientes que serán muy fuertes cuando el tamaño de la ZP sea también pequeño. Pueden esperarse, por tanto, efectos intrínsecos de tamaño y efectos debidos al gradiente plástico.

Los efectos intrínsecos se manifestarán cuando, aproximadamente,

$$L_{ZP} < 30\rho^{-1/2} \tag{1}$$

Siendo $\rho^{-1/2}$ la distancia promedio entre las dislocaciones en la ZP (Gil Sevillano, 2000). Los efectos esperados son,

(i) un incremento relativo de la resistencia plástica,

$$\sigma - \sigma_\infty \propto L_{ZP}^{-4/3} \tag{2}$$

donde σ_∞ es la resistencia para tamaño muy grande y

(ii) un debilitamiento de la capacidad de acumulación estadística de dislocaciones. Este segundo efecto, en el límite, equivale a decir que el endurecimiento será sólo debido a la acumulación de DGN,

$$\sigma = \sigma_0 + \alpha G b(\rho^{-1/2}) \tag{3}$$

$$\rho \cong \rho_o + \rho_g = \rho_o + M_g\,\eta_{ef} \tag{4}$$

donde M_g es un factor geométrico del orden de la unidad y η_{ef} una función del gradiente de deformación plástica (Fleck y Hutchinson, 1997). G es el módulo elástico a cortadura apropiado para el cálculo de la energía de las dislocaciones, b el vector de Burgers, ρ_o la densidad inicial de dislocaciones y α una constante de valor próximo a la unidad.

El tamaño aproximado de la zona plástica en modo I, sin tener en cuenta efectos de escala, es, para un factor de intensidad de tensiones K_I aplicado

$$L_{ZP} = (K_I/\sigma)^2/2\pi \tag{5}$$

El gradiente, en primera aproximación, viene dado por

$$\eta_{ef} \approx \varepsilon^* / L_{ZP} = 2\pi\,\varepsilon^* (\sigma/K_I)^2 \tag{6}$$

donde ε^* es una deformación promedio efectiva en la zona plástica. Si se ignoran los efectos de escala, la máxima tensión tractiva al frente del borde de la grieta es unas 4 veces el límite elástico del material para tamaño grande (McMeeking, 1977). De acuerdo con las ecuaciones anteriores, la ecuación constitutiva del material en la zona plástica está perturbada por los efectos de escala y la resistencia a la deformación plástica puede ser ahora mucho mayor que en la hipótesis de gran tamaño. El efecto será máximo para materiales intrínsecamente resistentes o previamente endurecidos (alto valor de σ_0 ó ρ_0) y frágiles (bajo valor de K_{Ic}), en los que el tamaño crítico de la zona plástica será muy pequeño.

La conclusión, teniendo en cuanta los dos tipos de efectos, es que los modelos actuales de predicción de fractura frágil de metales (en particular, los modelos probabilísticos de predicción de fractura por clivaje en los aceros) deben ser revisados. En concreto, los campos de tensiones y los parámetros locales de fractura utilizados hasta ahora son incorrectos (¡se han ajustado - utilizando campos y valores de resistencia local sin considerar efectos de escala - para reproducir convenientemente los valores experimentales!). Ya se han publicado algunos cálculos de campos de tensiones en la zona plástica que utilizan teorías de la plasticidad no convencionales (Xia y Hutchinson, 1996, Huang y col., 1997).

Crecimiento de cavidades: repercusiones sobre la fractura dúctil.

Las consideraciones anteriores afectan también a los análisis de la propagación dúctil de grietas. Adicionalmente, hay que tener en cuenta que, además del gradiente general asociado a la zona plástica de la macrogrieta, hay que considerar también los gradientes plásticos locales asociados al crecimiento de cada hueco producido por cavitación nucleada en partículas de segundas fases (Fleck y Hutchinson, 1997).

Una componente casi olvidada del umbral de propagación de grietas por fatiga.

El modelo más simple para explicar la propagación de grietas por fatiga es el de acumulación de enromamiento de la grieta con creación irreversible de nueva superficie libre en la parte de apertura de los ciclos y agudización de la grieta en la parte de cierre de los ciclos de carga alternada. Suponiendo que el avance por ciclo es proporcional a la apertura del borde de la grieta,

$$da/dN \approx \Delta CTOD \cong \Delta K^2/E\sigma \qquad (7)$$

donde E es el módulo de Young, σ la resistencia a la deformación plástica y ΔK el rango de apertura del factor de intensidad de tensiones, se llega a la "ecuación de Paris" con exponente 2. No se predice ningún umbral de propagación a partir de cálculos como la ec. (7) basados en la plasticidad tradicional. El umbral de fatiga, ΔK_{th}, se suele explicar principalmente por contribuciones al cierre anticipado de la grieta provocadas por tensiones residuales sobre la zona plástica y por rugosidad de las superficies de fractura, etc. ("crack closure effects").

Indudablemente, los fenómenos de cierre de la grieta contribuyen a la existencia de un umbral de propagación. Sin embargo, el efecto del tamaño de la zona plástica sobre σ por acumulación de DGN, ecs. (3-4), da lugar a la predicción de un umbral aunque no existieran otras contribuciones al mismo (Ocaña Arizcorreta y Gil Sevillano, 1998). Se debe hacer notar que los modelos de apertura de la grieta basados en plasticidad mediante dislocaciones discretas dan lugar automáticamente a la predicción de un umbral porque deben incorporar los efectos del gradiente plástico para ser consistentes (v. g., Riemelmoser y col., 1998), pero estos modelos son todavía demasiado simples para hacer predicciones razonablemente cuantitativas.

Mediante las ecs. (3-7) y aproximaciones plausibles se llega a un valor del umbral muy razonable comparado con los valores experimentales. En concreto, para el límite $L_{ZP} \rightarrow 0$, la contribución de las DGN domina en (3) y (4). La resistencia a la deformación plástica tiende a infinito más fuertemente que la tensión inducida por la singularidad de la grieta (Lipkin y col., 1996) y determina la condición umbral, $da/dN \rightarrow 0$. Operando con las ecs (4) a (6), para ese límite se llega a la expresión

$$\Delta K_{th} = \alpha G(2\pi\, M_g\, \varepsilon^*\, b)^{1/2} \qquad (8)$$

Teniendo en cuenta que la deformación al frente de la grieta en función de la distancia normalizada por el CTOD es casi independiente de las características del material (al menos para la plasticidad convencional, McMeeking, 1977, Gu, 1987), la ec. (8) predice una contribución al umbral (normalizado éste por $Gb^{1/2}$) prácticamente independiente de la naturaleza de los materiales,

$$\Delta K_{th}/Gb^{1/2} = \alpha(2\pi\, M_g\, \varepsilon^*)^{1/2} \cong 2.50\,(M_g\, \varepsilon^*)^{1/2} \qquad (9)$$

Para aceros ferríticos (G = 64 GPa, b = 0.248 nm, Frost y Ashby, 1982), suponiendo $(M_g\ \varepsilon^*) = 8$ (las deformaciones logarítmicas máximas junto al borde de la grieta son mayores de 5), $\Delta K_{th} = 7$ MPa $m^{1/2}$, un valor muy razonable comparado con valores experimentales del umbral medido con niveles altos de la relación de cargas, R (es decir, sin contribución de mecanismos de "cierre de la grieta").

4. Conclusiones.

1. Varias interpretaciones o modelos explicativos de fenómenos relacionados con la Mecánica de la Fractura, de aceptación general, han de revisarse a la luz de efectos de escala en la plasticidad, hasta ahora casi desapercibidos.

2. En particular, la influencia del gradiente plástico sobre la resistencia a la deformación en la zona plástica de una grieta permite predecir la existencia de un umbral de propagación de grietas por fatiga cuyo orden de magnitud es comparable con los valores observados experimentalmente.

Referencias.

Fleck, N. A., Muller, G. M. y Ashby, M. F., Acta Metall. Mater., 42, 475 (1994).

Fleck y Hutchinson, J. W., Adv. Appl. Mech., 33, 295 (1997).

Gil Sevillano, J., "Dislocations 2000", National Institute of Standards and Technology (NIST), Gaithersburg, Md., USA (2000), pendiente de publicación.

Griffith, A. A., Phil. Trans. Roy. Soc., A221, 163 (1920).

Gu, I., J. Eng. Mater. Technol., 109, 216 (1987).

Huang, Y., Zhang, L., Guo, T. F. y Hwang, K. C., J. Mech. Phys. Solids, 45, 439 (1997).

Kendall, K., Nature, 272, 510 (1978).

Lipkin, D. M., Clarke, D. R. y Beltz, G. E., Acta Mater., 44, 4051 (1996).

McMeeking, R. M., J. Mech. Phys. Solids, 25, 357 (1977).

Needleman A. y van der Giessen, "Dislocations 2000", National Institute of Standards and Technology (NIST), Gaithersburg, Md., USA (2000), pendiente de publicación.

Ocaña Arizcorreta, I. y Gil Sevillano, J., J. Phys. IV France, 8, Pr4-129 (1998).

Puttick,K., "The Energetics of Fracture. The Griffith Centenary Meeting", p. 16. The Institutte of Materials, London (1993).

Riemelmoser, F. O., Pippan, R. y Stüwe, H. P., Acta Mater., 46, 1793 (1998).

Xia, Z. C. y Hutchinson, J. W., J. Mech. Phys. Solids, 44, 1621 (1996).

Agradecimientos.

A lo largo de estos casi 20 años son muchísimas las personas de las que he aprendido lo poco que sé de Mecánica de la Fractura y también muchas las que han colaborado especialmente conmigo. En particular quisiera mencionar a los iniciadores de todo esto en España, Profs. M. Fuentes y M. Elices, al Prof. M. Sellars (U. Sheffield), que nos dio el primer curso de iniciación a la MF en San Sebastián y a mis colegas y amigos J. M. Rodríguez Ibabe, A. Martín Meizoso, J. M. Martínez Esnaola e I. Ocaña, a los que muchas veces he conducido por caminos equivocados.