Parte 2 Mecánica de fractura
(continuación)

TEMA 4 MECÁNICA DE FRACTURA ELASTOPLÁSTICA

Materiales bajo esfuerzo
Maestría en Ingeniería Mecánica
Profesor: Libardo Vanegas Useche
24 de octubre de 2013

CONTENIDO

- Introducción
- La integral *J*
- Condiciones de dominio de *J*
- Desplazamiento de abertura en punta de grieta (CTOD) (CTOD stands for crack tip opening displacement)
- Curva de diseño CTOD
- Equivalencias entre los parámetros fractomecánicos
- Taller - requisitos de tamaño de probeta
- Ejemplo - aplicación de la curva de diseño CTOD
- Comentarios sobre la mecánica de fractura elastoplástica

INTRODUCCIÓN

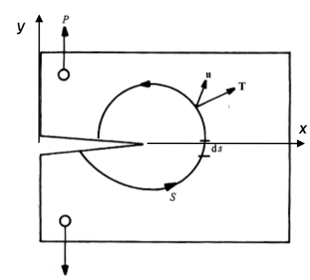
- Los parámetros ***K*** y ***G*** de la **LEFM** están limitados por la condición de **fluencia a pequeña escala** (la zona plástica debe ser pequeña comparada con algunas dimensiones de la pieza (ej.: *a* y *W – a*))
- Esta condición generalmente no se cumple en materiales de **gran tenacidad** y **baja resistencia de fluencia** (por ejemplo, aceros suaves y medios y aceros para recipientes a presión), ya que presentan gran fluencia antes de la fractura
- Para estos materiales se puede usar la **mecánica de fractura elastoplástica**, la cual es válida tanto para fluencia a pequeña escala como para fluencia a gran escala
- El concepto de tenacidad a la fractura se puede extender para la fractura elastoplástica. El parámetro correspondiente a *K* para caracterizar la fractura monotónica no lineal es la **integral *J***, propuesta por Rice (1968). También se cuenta con el concepto de **desplazamiento de abertura en punta de grieta (CTOD)**

LA INTEGRAL *J*...

- Considere un cuerpo agrietado sujeto a una carga monotónica. La **integral de línea** *J* (relacionada con la energía en la vecindad de una grieta) a lo largo de un contorno Γ que encierra la punta de la grieta está dada por:

$$J = \int_{\Gamma} \left(w dy - \mathbf{T} \cdot \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial x} ds \right)$$

u es el vector desplazamiento
x y *y* son coordenadas cartesianas
s es la longitud del arco a lo largo del contorno
T es el vector de tracción que actúa sobre el contorno
w es la densidad de energía de deformación del material = $\int \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}$



La integral *J* es válida si no ocurre descarga, ya que se asume que la curva esfuerzo - deformación es reversible

Rice (1968) demostró que *J* es la tasa de cambio de la energía potencial con respecto al aumento de la grieta para un material no lineal elástico y que *J* equivale a *G* para un material lineal elástico

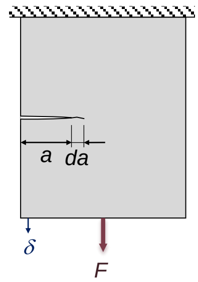
J es independiente de la trayectoria

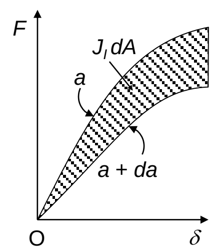
...LA INTEGRAL *J*

- La integral *J* es la **tasa de reducción de la energía de deformación, *U*, por aumento de tamaño de grieta**:

$$J_I = -\frac{\partial U}{\partial A} = -\frac{\partial U}{t_h \partial a}$$

- donde *a* es la longitud de la grieta y t_h es el espesor del elemento
- Para el caso de material (o fractura) **lineal elástico** $-\partial U/\partial A = G_I$, entonces $J_I = G_I$. Por lo tanto, es de esperar que exista un valor crítico de J_I, denominado J_{Ic}, con el cual se tendría un crecimiento de grieta. En el control de fractura se espera entonces que $J_I < J_{Ic}$
- El criterio de fractura $J_I = J_{Ic}$ es más universal que el de $G = G_c$, ya que es aplicable también cuando se tiene una deformación plástica apreciable

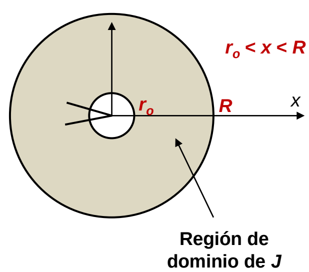


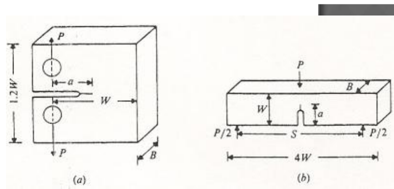


CONDICIONES DE DOMINIO DE *J*

- *J* es válido en una zona anular.
- *R* se determina con base en un error máximo (p. ej. 10%) de las ecuaciones de singularidad HRR (Hutchinson (1968) y Rice y Rosengreen (1968)), para la geometría de probeta en consideración.
- r_o es del orden de $3\delta_t$ (McMeeking (1977) y McMeeking y Parks (1979)) o 20-25% del tamaño de la zona plástica para fluencia a pequeña escala.
- Para fluencia a gran escala, *R* depende drásticamente de la configuración de la probeta. Por ejemplo, *R* es tan pequeño como 1% de (*W* - 2*a*) para una probeta a tensión con una grieta central o 7% de (*W* - *a*) para una probeta a flexión o una probeta de tracción compacta.
- Por esto, los métodos estándar para determinar J_{Ic} requieren del uso de probetas a **flexión** o **de tracción compactas** con **grietas muy largas:** con $a/W > 0.5$ (ASTM E-813).
- Con base en esta información puede demostrarse que el mínimo *W* – *a* (o su equivalente) requerido para obtener un J_{Ic} válido es:

$$W - a = 25\frac{J_{Ic}}{S_y}$$

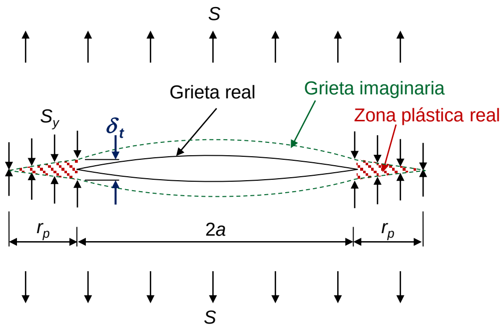




Detalles adicionales se suministran en Suresh (1998), pp. 310-312

DESPLAZAMIENTO DE ABERTURA EN PUNTA DE GRIETA (CTOD)

Recordemos el modelo de Dugdale (esfuerzo plano):



Dugdale demostró que el desplazamiento en la punta original de la grieta (CTOD) está dado por:

$$\delta_t = \frac{8 S_y\, a}{\pi E} \ln\left[\sec\left(\frac{\pi S}{2 S_y}\right)\right]$$

Expandiendo en forma de una serie:

$$\delta_t = \frac{8 S_y\, a}{\pi E}\left[\frac{1}{2}\left(\frac{\pi S}{2 S_y}\right)^2 + \frac{1}{12}\left(\frac{\pi S}{2 S_y}\right)^4 + \cdots\right]$$

Si $S << S_y$

$$n\delta_t = \frac{S^2 \pi a}{S_y E} = \frac{K_I^{\,2}}{S_y E} = \frac{G_I}{S_y}$$

El criterio de fractura **elastoplástica** CTOD (Wells) consiste en que el crecimiento de grieta ocurre cuando δ_t alcanza un valor crítico δ_c. Por lo tanto, para evitar la falla:

$$\delta_t < \delta_c$$

δ_c se considera una **propiedad del material** (que depende de la microestructura, temperatura, rapidez de aplicación de la carga, espesor de la probeta de ensayo, **geometría de la probeta**, etc.) y se conoce como **tenacidad de fractura CTOD**

Nota: $1 \le n \le 3$!! (1 para esf. p.) (para def. p. es usualmente 2)

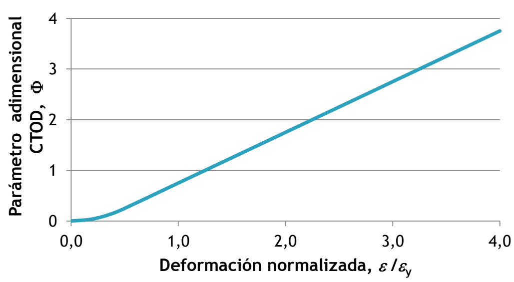
CURVA DE DISEÑO CTOD

Mediante extenso trabajo experimental, Burdekin y Dawes han propuesto una **curva de diseño** con los parámetros adimensionales: Φ y $\varepsilon/\varepsilon_y$.

$$\Phi = \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_y}\right)^2, \quad \text{para} \quad \frac{\varepsilon}{\varepsilon_y} \le 0.5$$

$$\Phi = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_y} - 0.25, \quad \text{para} \quad \frac{\varepsilon}{\varepsilon_y} > 0.5$$

$$\text{donde} \quad \Phi = \frac{\delta_c}{2\pi\, \varepsilon_y a_m}$$



δ_c: CTOD crítico
a_m: tamaño de grieta admisible equivalente (conservativo)
ε: deformación aplicada alrededor de la grieta (calculada sin tener en cuenta la presencia de la grieta)
$\varepsilon_y = S_y / E$: deformación de fluencia

EQUIVALENCIAS ENTRE LOS PARÁMETROS FRACTOMECÁNICOS

- Recordemos que:

$$K = \sqrt{E'G} \qquad K_c = \sqrt{E'G_c}$$

- **Cuando se tiene un comportamiento elástico lineal (zona plástica muy pequeña)**:

$$J_I = G_I = \frac{K_I^{\,2}}{E'} = nS_y\delta_t \qquad E' = \frac{E}{1-\nu^2} \quad \text{(deformación plana)}$$

$$J_{Ic} = G_{Ic} = \frac{K_{Ic}^{\,2}}{E'} = nS_y\delta_c \qquad E' = E \quad \text{(esfuerzo plano)}$$

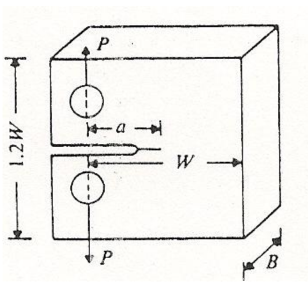
- Estas relaciones **no** son válidas para fluencia a gran escala

TALLER 1 - REQUISITOS DE TAMAÑO DE PROBETA

Fuente: Suresh (1998)

Para un **acero** de baja resistencia (S_y = 350 MPa) y alta tenacidad (de ensayos anteriores se sabe que K_{Ic} = 175 MPa·m$^{0.5}$), determinar el mínimo tamaño de una probeta de tracción compacta que cumpla con la norma:

(a) ASTM E-399 (para determinar K_{Ic}).
(b) ASTM E-819 (para determinar J_{Ic}).



Tome E = 207 GPa y ν = 0.28

Ecuaciones:

$$t_h, a, W-a > 50\, r_y = 50\frac{1}{6\pi}\left(\frac{K_{Ic}}{S_y}\right)^2 \approx 2.5\left(\frac{K_{Ic}}{S_y}\right)^2 \qquad W-a \geq 25\frac{J_{Ic}}{S_y} \qquad \frac{a}{W} > 0.5 \qquad J_{Ic} = \frac{K_{Ic}^{\,2}}{E}(1-\nu^2)$$

SOLUCIÓN

(a) Para realizar un ensayo **válido** para determinar K_{Ic} se requiere que exista fluencia a pequeña escala y que predomine deformación plana. Esto se satisface con el **criterio del espesor**:

$$t_h, a, W-a > 50\, r_y = 50\frac{1}{6\pi}\left(\frac{K_{Ic}}{S_y}\right)^2 \approx 2.5\left(\frac{K_{Ic}}{S_y}\right)^2$$

Entonces, t_h, a y $W - a \geq$ 2.5·(175/350)^2 = 625 mm.
Por lo tanto, es **difícil llevar a cabo este ensayo**

(b) Para realizar un ensayo **válido** para determinar J_{Ic}, se toma a/W > 0.5 y se debe cumplir que:

$$W-a \geq 25\frac{J_{Ic}}{S_y}$$

Para fluencia a pequeña escala, J_{Ic} y K_{Ic} están relacionados como vimos:

$$J_{Ic} = \frac{K_{Ic}^2}{E}(1-\nu^2)$$

Por lo tanto: $$W-a \geq 25\frac{K_{Ic}^2}{ES_y}(1-\nu^2)$$

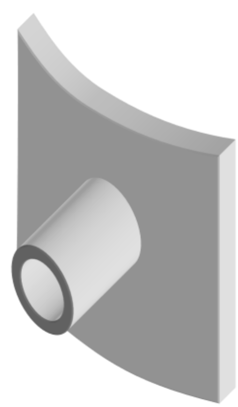
$W - a \geq$ 9.7 mm. Entonces, **es fácil llevar a cabo el ensayo**

Conclusión: para materiales con una alta tenacidad a la fractura y baja resistencia de fluencia, la medición de J_{Ic} suministra una método adecuado para estimar la tenacidad a la fractura

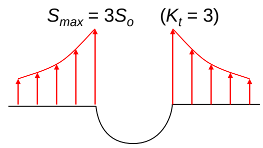
EJEMPLO 1 - APLICACIÓN DE LA CURVA DE DISEÑO CTOD

Un recipiente a presión de acero con S_y = 450 MPa y 50 mm de espesor se somete durante el servicio a un esfuerzo circunferencial máximo de (2/3)S_y = 300 MPa (filosofía de diseño estándar). Se sueldan grandes tuberías en agujeros circulares en las paredes del recipiente, usando un metal de soldadura de igual resistencia. Asuma que los esfuerzos residuales en la soldadura son eliminados. Si los métodos de detección de defectos disponibles pueden detectar grietas de 10 mm en la soldadura, **calcule el valor de δ_c requerido en ésta.** La curva de diseño del Welding Institute está dada por:

$$\frac{\delta_c}{2\pi\,\varepsilon_y a_m} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_y} - 0.25$$



SOLUCIÓN



El esfuerzo aplicado es: $S_o = \frac{2}{3} S_y$

Debido a la concentración de esfuerzos en el agujero circular, el esfuerzo local es: $S_{\max} = 3\frac{2}{3} S_y = 2S_y$

Note que con este nivel de esfuerzo los esfuerzos residuales desaparecen

Como $S = E\varepsilon$: $E = \frac{S}{\varepsilon} = \frac{S_y}{\varepsilon_y}$ se asume que $\frac{S}{S_y} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_y} = 2$

La curva de diseño es:

$$\frac{\delta_c}{2\pi\, \varepsilon_y \bar{a}_m} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_y} - 0.25$$ donde $$\varepsilon_y = \frac{S_y}{E} = \frac{450\text{ MPa}}{207\times 10^3\text{ MPa}} = 2.17\times 10^{-3}$$

Reemplazando

$$\frac{\delta_c}{2\pi\,(2.17\times 10^{-3})(10\text{ mm})} = 2 - 0.25$$ Entonces: $\delta_c = 0.24\text{ mm}$

COMENTARIOS SOBRE LA MECÁNICA DE FRACTURA ELASTOPLÁSTICA

- Parámetros que se pueden emplear: δ_t (CTOD) y J (integral J)
- Comentarios, ventajas y desventajas de δ_t
  - δ_t se usa para investigación microestructural (UK)
  - Físicamente es más fácil trabajar con el concepto de δ_t
  - Ha sido usado con éxito en algunos casos
  - Es difícil relacionar δ_t con K de una manera rigurosa
  - Está relacionado con la microestructura pero depende en gran medida de resultados empíricos. Entonces, peligro potencial si el mecanismo de falla cambia (depende del mecanismo de fractura)
  - Puede requerir de FEA
- Comentarios, ventajas y desventajas de J
  - J se usa para diseño macroscópico (EEUU)
  - Se interpreta como teóricamente razonable
  - No hay cambio de mecanismo (el mecanismo de fractura puede ignorarse)
  - Normas completadas y aceptadas