

TRANSIÇÃO DÚCTIL-FRÁGIL

FRATURA DÚCTIL E FRATURA FRÁGIL

No processo de fratura, um sólido sofre uma divisão em duas ou mais partes, com a formação de superfícies livres decorrentes do rompimento de ligações atômicas. A nível atômico, o rompimento das ligações se dá num mesmo plano cristalográfico, podendo ocorrer por cisalhamento, quando a fratura se dá no mesmo plano da tensão ou por clivagem, quando a fratura é normal ao plano da tensão.

Diversas são as possibilidades de classificação do comportamento em fratura dos metais e ligas metálicas. Se o critério utilizado for o da energia absorvida no processo de fratura, pode-se caracterizar a fratura como frágil, quando associada a pequena quantidade de energia absorvida no processo de fratura, ou tenaz, quando a fratura é precedida pelo consumo de quantidades de energia relativamente elevadas.

Uma maneira muito empregada para classificar o comportamento em fratura dos metais refere-se à deformação plástica que ocorre nas regiões circunvizinhas às superfícies de fratura. Por esta classificação, fratura dúctil é aquela em que há intensa deformação plástica precedendo a fratura, enquanto que fratura frágil é aquela em que a quantidade de deformação precedendo a fratura é muito pequena ou mesmo nula. Como a deformação plástica se dá com consumo de energia, a fratura dúctil ocorre após substancial consumo de energia, estando associada a um comportamento tenaz. Já na fratura sem deformação plástica, o consumo de energia é pequeno, caracterizando um comportamento frágil.

Os comportamentos frágil e dúctil (tenaz) são manifestações dos micro-mecanismos de fratura operantes. Assim, a fratura dúctil normalmente ocorre por cisalhamento enquanto que a fratura frágil normalmente ocorre por clivagem. Há entretanto, situações em que fraturas frágeis não ocorrem por clivagem, como é o caso das fraturas intergranulares, em que a ruptura se dá por decoesão nos contornos de grão, caso dos aços fragilizados por revenido, ou mesmo por cisalhamento nos contornos de grão, caso das ligas com precipitação em contornos de grão.

Os metais e ligas metálicas ao trabalharem à temperatura ambiente ou temperaturas moderadamente elevadas normalmente apresentam uma resistência a fratura relativamente elevada, o que se traduz em um elevado consumo de energia para que o processo de fratura possa ocorrer. Nessas condições, a fratura ocorre por cisalhamento e o comportamento é dúctil. Com o abaixamento da temperatura de trabalho, certos metais e suas ligas podem apresentar uma tendência a fraturar por clivagem, consumindo uma quantidade de energia significativamente inferior àquela consumida em temperaturas mais elevadas, conseqüentemente apresentando um comportamento frágil. Nestas condições, o risco de fratura em estruturas construídas com estes metais é muito maior. Deve ser ressaltado que o modo de fratura dos metais não depende unicamente de suas características intrínsecas como limite de escoamento, capacidade de encruamento, ductilidade, mas também de fatores externos como temperatura, modo e velocidade de carregamento, estado de tensões atuante. Da combinação destes fatores é que pode resultar um determinado comportamento para o metal.

PRINCÍPIOS DE MECÂNICA DA FRATURA

Entendimento dos mecanismos de fratura, uma vez que materiais de comportamento normalmente dúctil apresentam fratura frágil sob certas condições.

Mecânica da fratura: Quantificação das relações entre as propriedades do material, nível de tensões, presença de trincas e seus mecanismos de propagação.

⇒ previsão de falhas estruturais

Concentradores de Tensão

- Resistência a fratura ⇒ força de coesão atômica

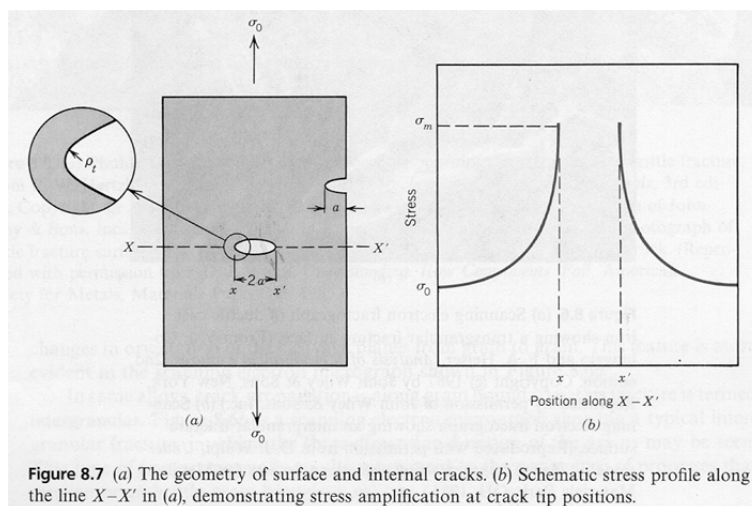
Teoricamente ⇒ $F_c \cong \frac{E}{10}$

Valores experimentais ⇒ F_c 10 a 1000 vezes inferior ao valor teórico.

MODELO DE GRIFFITH

- Pequenas trincas no interior do material atuando como concentradores de tensão diminuem a força externa necessária para a separação dos átomos por um efeito de amplificação da força externa aplicada.

- O efeito das trincas depende do tamanho e orientação da trinca em relação ao esforço aplicado.



Se a trinca tem uma forma elíptica, a tensão máxima na ponta da trinca será dada por:

$$\sigma_m = 2\sigma_0 \left(\frac{a}{\rho_t} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Onde

σ_m - tensão máxima σ_0 - tensão nominal aplicada

a - meio comprimento de trinca ρ_t - raio de curvatura da trinca

Para uma trinca (microtrinca) muito longa, onde ρ_t é pequeno, verifica-se que $\left(\frac{a}{\rho_t}\right)^{\frac{1}{2}}$ poderá ter um valor elevado, o que acarreta um valor de $\sigma_m \gg \sigma_0$.

A relação $\frac{\sigma_m}{\sigma_0}$ é denominada de K_t , fator de concentração de tensões:

$$K_t = \frac{\sigma_m}{\sigma_0} = 2 \left(\frac{a}{\rho_t} \right)^{\frac{1}{2}}$$

O que é simplesmente uma medida do grau em que uma tensão externa aplicada é amplificada na ponta de uma pequena trinca.

⇒ A concentração de tensões não é exclusividade das microtrincas ou defeitos. Furos, cantos, reduções bruscas de seção e entalhes inerentes a geometria dos componentes, atuam como concentradores de tensão.

⇒ O efeito da concentração de tensões é mais significativo em materiais frágeis.

Teoria de Griffith da Fratura Frágil

- i) Durante a propagação da trinca há liberação de energia elástica de deformação acumulada no material deformado elasticamente.
- ii) Aumento da “energia superficial do sistema” uma vez que no processo de propagação são geradas novas superfícies livres.

Griffith desenvolveu um critério de propagação utilizando como modelo uma trinca elíptica. O critério tem como base o balanço entre a energia de deformação elástica e a energia de geração de nova superfície obtendo-se a relação:

$$\sigma_c = \left(\frac{2 \cdot E \cdot \gamma_s}{\pi \cdot a} \right)^{\frac{1}{2}}, \text{ onde:}$$

σ_c - tensão crítica para a propagação da trinca

E - módulo de elasticidade

γ_s - energia superficial específica

a - meio comprimento de uma trinca interna

Note que na expressão acima não há o termo ρ_f (raio de curvatura da trinca), assumindo-se que ρ_f é suficientemente pequeno de modo a elevar a tensão local acima da resistência coesiva do material.

Este desenvolvimento só é aplicável a materiais completamente frágeis, onde não há deformação plástica. A maioria dos materiais apresentam alguma plastificação na ponta da trinca.

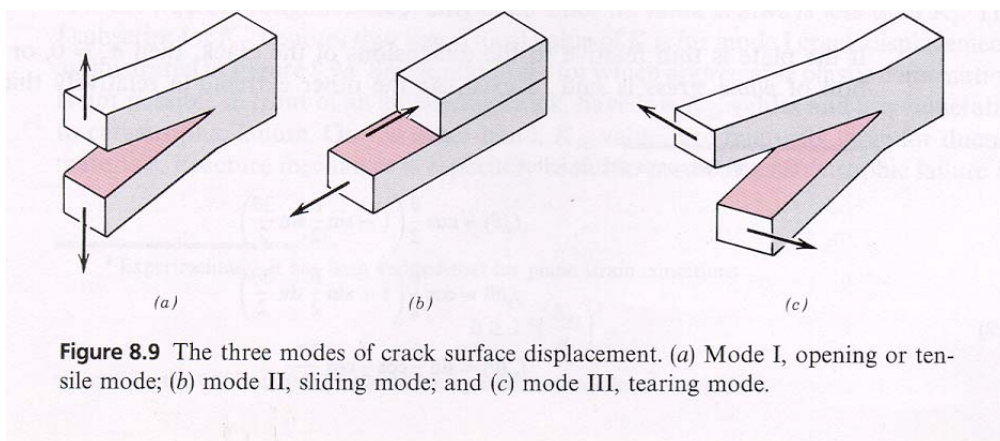
O efeito da plastificação implica no consumo de energia para a deformação plástica diminuindo a energia total disponível para o processo de propagação da trinca. Neste caso, Irwin propõe que o termo γ_s seja substituído por $(\gamma_s + \gamma_p)$, onde γ_p representa a energia de deformação plástica definindo o termo $G = 2(\gamma_s + \gamma_p)$ que corresponde a taxa de liberação de energia de deformação para um valor crítico G_c . No caso de materiais muito dúcteis poderá ocorrer que $\gamma_p \gg \gamma_s$.

ANÁLISE DE TENSÕES DE TRINCAS

Modos de Propagação

A trinca em um componente pode se propagar de três modos:

Modo I – Abertura; Modo II – deslizamento e Modo III – rasgamento.



Considerações sobre o modo de propagação permitem observar que o modo mais fácil ou que exige menor gasto de energia é o modo I.

Considerando então um a chapa larga com uma trinca superficial, onde as dimensões da chapa são muito superiores à da trinca e o modo I de abertura pode-se descrever pelos princípios da teoria elástica as tensões atuantes na ponta da trinca por:

$$\sigma_x = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} f_x(\theta);$$

$$\sigma_y = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} f_y(\theta) e;$$

$$\tau_{xy} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} f_{xy}(\theta)$$

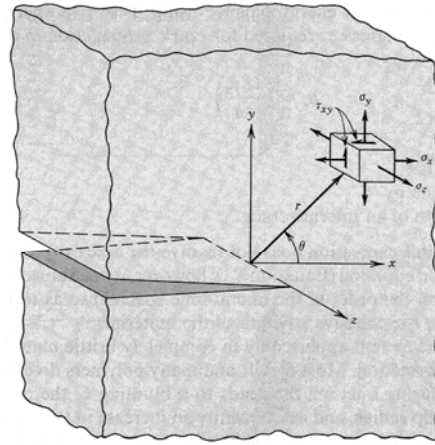


Figure 8.10 The stresses acting in front of a crack that is loaded in a tensile mode I configuration.

Se a placa é fina em relação as dimensões da trinca temos que $\sigma_z = 0$, ou seja, uma condição de tensão plana.

Se por outro lado a placa for espessa em relação a trinca temos que $\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y)$, ou uma situação de deformação plana, desde que $\epsilon_z = 0$, onde ν é o coeficiente de Poisson.

A existência de uma tensão no eixo Z (σ_z) implica em uma restrição à deformação plástica naquele eixo, dessa forma, se a deformação se distribui no plano X, Y temos a condição de deformação plana com $\epsilon_z = 0$ e $\sigma_z \neq 0$.

K - fator de intensidade de tensões, indica a distribuição de tensões na ponta da trinca. Seu valor depende: Da tensão aplicada; do tamanho e da posição da trinca, bem como da geometria do componente.

TENACIDADE A FRATURA

De acordo com o critério de Griffith, uma trinca irá se propagar quando um valor crítico de tensão denominado de σ_c for alcançado.

De modo similar, uma vez que as tensões nas vizinhanças da ponta da trinca possam ser definidas em termos do fator de intensidade de tensões, existe um valor crítico para este parâmetro que pode ser usado para especificar uma condição de fratura frágil.

Este valor crítico é denominado de tenacidade à fratura K_c sendo expresso por:

$$K_c = Y \cdot \sigma \sqrt{\pi \cdot a} \quad (MPa\sqrt{m})$$

Y - parâmetro adimensional dependente da geometria da peça e do componente.

σ - Tensão aplicada.

a - meio comprimento de uma trinca interna ou o comprimento de uma trinca superficial. Portanto:

Tenacidade a Fratura – é uma medida da resistência do material à fratura frágil em presença de trincas.

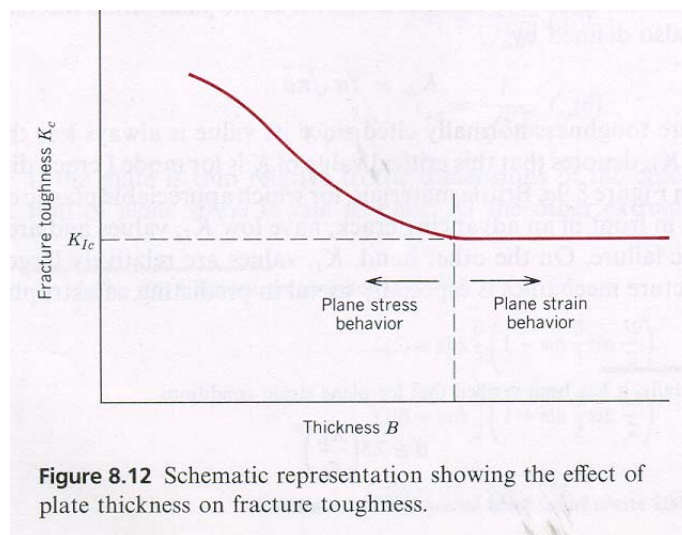
Para pequenas espessuras K_c é dependente e diminui com o aumento da espessura. K_c passa a ser independente da espessura quando se atinge a condição de deformação plana, dada por:

$$B = 2,5 \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_y} \right)^2$$

B - Espessura da chapa

K_{Ic} - Tenacidade a fratura em deformação plana no modo I de propagação.

σ_y - Tensão de escoamento do material.



Portanto, a constante K_c para grandes espessuras é conhecida como: Tenacidade à fratura em deformação plana K_{Ic} sendo definida por:

$$K_{Ic} = Y \cdot \sigma \sqrt{\pi \cdot a}$$

logo, $K_{Ic} < K_c$.

Desse modo, materiais frágeis apresentam baixos valores de K_{Ic} , sendo portanto sensíveis à fratura frágil.

Materiais dúcteis normalmente apresentam K_{Ic} elevado. A mecânica da fratura é útil em prever a falha catastrófica para materiais de ductilidade intermediária.

Os fatores K e K_{Ic} estão relacionados um ao outro do mesmo modo que uma tensão aplicada e a tensão de escoamento do material. Ou seja, o material pode ser submetido a diversos níveis de tensão até um valor específico em que o escoamento ocorre. O mesmo ocorre com K , sendo o K_{Ic} específico para cada material.

O K_{Ic} pode ser influenciado por:

- temperatura
- velocidade de deformação
- microestrutura

Ex.: O aumento do tamanho de grão diminui o K_{Ic} .

PROJETO COM O USO DA MECÂNICA DA FRATURA

Considerando um componente estrutural devem ser observadas três variáveis:

- tensão aplicada (σ)
- tamanho da trinca (a)
- Y conhecido

Supondo que K_{Ic} e a sejam especificados, pode-se definir pelo projeto um valor de σ_c dado por:

$$\sigma_c \leq \frac{K_{Ic}}{Y \cdot \sqrt{\pi \cdot a}}$$

Por outro lado, se o nível de tensões e a tenacidade a fratura em deformação plana são estabelecidos por uma situação de projeto, o tamanho máximo admissível de defeito será:

$$a_c = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma \cdot Y} \right)^2$$