

VALUTAZIONE DELLA TENACITA' A FRATTURA DI COMPONENTI CERAMICI STRUTTURALI

Lucio NOBILE

Dipartimento DISTART. Università di Bologna. Viale Risorgimento,2. 40136 Bologna

Sommario

Si propone una legge di scala per la valutazione della tenacità a frattura desunta attraverso prove di flessione su provini intagliati. Essa è basata sul modello di Dugdale per tenere conto della zona di processo che si sviluppa all'apice della fessura. Si mostra che all'aumentare delle dimensioni dei provini il valore calcolato della tenacità a frattura tende al valore effettivo. L'impiego di tale legge consente la determinazione corretta della tenacità a frattura dei materiali fragili.

-

Abstract

The size effect relation for single edge notched beam (SENB) specimens is proposed. The derivation depends on the assumptions made with regard to process zone size as the load increases. This study shows that the larger the specimen, the more reliable is the measured toughness value. The proposed relation enables a more realistic approach for estimating correct fracture toughness in brittle materials.

1.Introduzione

L'impiego di materiali innovativi (ceramici, compositi fragili), che la attuale tecnologia rende disponibili, per la realizzazione di componenti strutturali è determinato dalle buone caratteristiche meccaniche, dalla bassa densità, e dalla facile disponibilità di materie prime con conseguente riduzione dei costi di produzione. Pertanto, tali materiali si configurano come potenziali sostituti delle leghe per impieghi strutturali ad elevate temperature nel settore automobilistico ed aerospaziale. Tra le caratteristiche meccaniche emergono l'elevato modulo elastico, la durezza, la resistenza all'usura, e le discrete prestazioni alle elevate temperature. Tuttavia, a fronte di tali caratteristiche meccaniche questi materiali presentano una intrinseca fragilità, della quale è imperativo avere una cognizione quantitativa al fine di determinare i limiti e la validità di impiego. Questo ha determinato l'interesse nei confronti di metodologie di prove volte alla determinazione dei parametri di frattura che richiedono campioni di dimensioni ridotte, costi accettabili di preparazione, e che forniscono risultati sufficientemente attendibili. Estesa attenzione nella letteratura tecnica ha ricevuto il metodo del "Single Edge Notched Beam"(SENB). Una notevole rilevanza sperimentale è rappresentata dall'influenza degli effetti dimensionali sul valore della tenacità a frattura [1,2,3,4]. Per una corretta determinazione del parametro di frattura di componenti strutturali è pertanto necessario correlare i dati rinvenuti dalle prove eseguite su provini di diverse dimensioni.

La presenza di una zona di processo, che si sviluppa all'apice della fessura e sede di deformazioni permanenti, altera la distribuzione delle tensioni considerata nella Meccanica della Frattura Elastica Lineare. Quest'ultima considera solo i termini singolari della soluzione ed introduce una approssimazione accettabile solo per zone di processo di limitata estensione. Negli altri casi i termini non singolari legati alla presenza di tale zona influenzano il valore della tenacità a frattura, determinando un effetto di scala.

In questa nota è analizzato l'effetto di scala causato da tali tensioni non singolari per il caso di provini

intagliati inflessi. L'analisi è riferita a provini con dimensioni variabili proporzionalmente.

2. Estensione della zona di processo

Nel modello di Dugdale [5], il problema della estensione della zona di processo all'aumentare del carico è riferito schematicamente alla fessura fittizia, di estensione uguale alla somma della estensione iniziale c della fessura reale e della lunghezza indeterminata della zona di processo. Si ipotizza che in questa zona siano applicate le tensioni di richiusura, la cui distribuzione dipende dal materiale e dal legame costitutivo. Per semplicità, si assume una distribuzione triangolare con valore massimo uguale alla resistenza a trazione. La condizione da applicare è quella di annullamento della singolarità all'estremità della fessura fittizia

$$K_I^a - K_I^r = 0. \quad (2.1)$$

K_I^a è il fattore di intensificazione degli sforzi relativo al carico ed espresso nella seguente forma

$$K_I^a = \sigma \sqrt{a} F(a/W), \quad (2.2)$$

ove a è la lunghezza della fessura fittizia, W è altezza del provino,

$$F(a/W) = 1.93 - 3.07 \frac{a}{W} + 14.53 \left(\frac{a}{W}\right)^2 - 25.07 \left(\frac{a}{W}\right)^3 + 25.8 \left(\frac{a}{W}\right)^4, \quad (2.3)$$

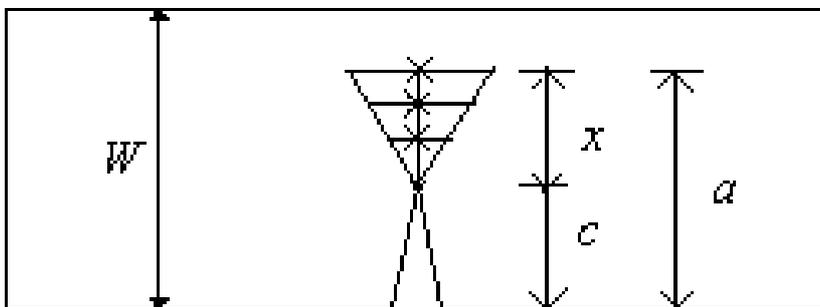
e

$$\sigma = \frac{3PL}{2BW^2}. \quad (2.4)$$

Nell'eq. (2.4) P è il carico, L e B sono rispettivamente la luce e la larghezza del provino .

K_I^t è il fattore di intensificazione degli sforzi relativo alle tensioni di richiusura. Adottando la soluzione di Bueckner [6] per il provino prismatico, lo stress intensity factor è espresso nella seguente forma approssimata

$$K_I^t = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \int_0^a M(x) \sigma(x) dx \quad (2.5)$$



con x distanza dall'apice della fessura

(Figura 1)

Figura 1. Tensioni di richiusura nella zona di processo.

La funzione $M(x)$ è approssimata nella seguente forma

con $m_1 = .6147 + 17.1844r^2 + 8.7822r^6$ e $m_2 = .2502 + 3.2889r^2 + 70.0444r^6$ coefficienti dipendenti dal

rapporto $r = a/W$ e $\sigma(x)$ la tensione di richiusura. Ipotizzando una distribuzione lineare delle tensioni di richiusura, con valore massimo uguale alla resistenza a trazione,

$$\sigma(x) = \sigma_t [1 - x/(a-c)],$$

lo stress intensity factor è

con $G\left(\frac{a-c}{W}\right) = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{a-c}{W}} + \frac{1}{15} m_1 \sqrt{\left(\frac{a-c}{W}\right)^3} + \frac{1}{35} m_2 \sqrt{\left(\frac{a-c}{W}\right)^5}$. Applicando il criterio di Dugdale (eq. 2.1) si ottiene

$$\frac{\sigma}{\sigma_t} = \sqrt{\frac{32}{\pi}} \sqrt{\frac{W}{a}} \frac{G\left(\frac{a-c}{W}\right)}{F(a/W)} \quad (2.8)$$

Attraverso tale equazione è possibile calcolare l'estensione della zona di processo in funzione del carico applicato fino al valore del carico critico di frattura.

In fig.2 sono riportati i legami carico-estensione al variare del rapporto c/W .

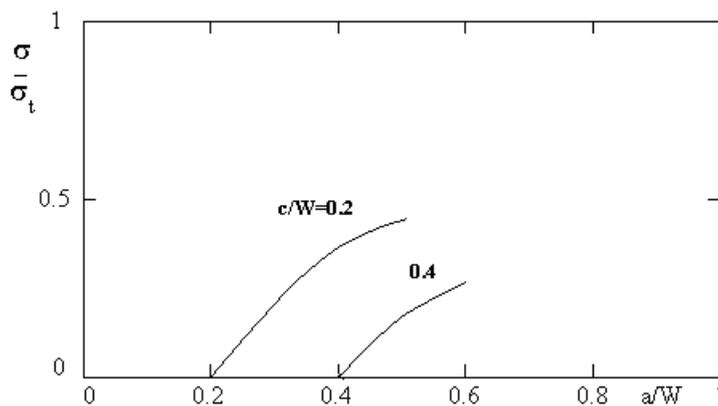


Figura 2. Carico in funzione della estensione relativa della fessura

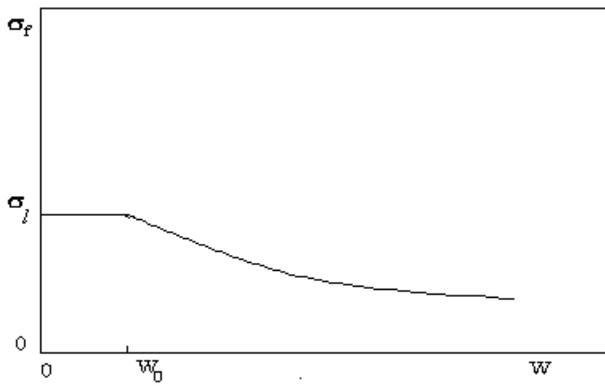
Se la lunghezza della fessura originaria si mantiene costante durante il processo di carico, la zona di processo si estende finchè non si raggiunge la crisi.

3. Analisi dell'effetto di scala

In assenza della zona di processo

$$K_{IC} = \sigma_f \sqrt{c} F(c/W), \quad (3.1)$$

con σ_f resistenza a frattura, corrispondente alla propagazione della fessura.

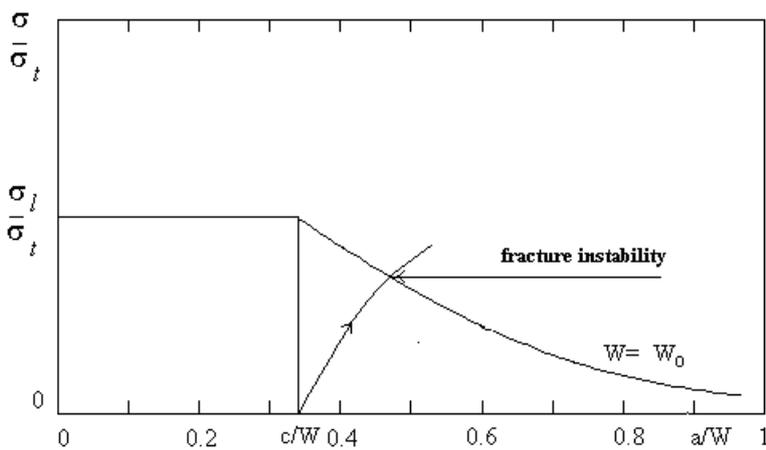


Per $c \rightarrow 0$, il limite superiore per σ_f è finito ed è indicato con σ_l (Figura 3). Il valore limite W_0 è funzione del rapporto c/W , che in questa analisi è costante.

Figura 3. Tensione in funzione dell'altezza per un assegnato rapporto c/W .

Se si indica con c_0 la lunghezza della fessura originaria in corrispondenza del valore limite W_0 , lo stress intensity factor critico apparente è

$$K_{IC}^0 = \sigma_l \sqrt{c_0} F\left(\frac{c}{W}\right) \quad (3.2)$$



La presenza della zona di processo altera il valore della resistenza a frattura convenzionale (Figura 4).

Figura 4. Influenza della zona di processo sulla resistenza a frattura.

L'estensione della zona di processo, in corrispondenza della propagazione della fessura, può essere calcolata come soluzione del sistema costituito dalle seguenti equazioni

$$\frac{\sigma}{\sigma_t} = \frac{K_{IC}^0}{\sigma_t W_0 \sqrt{\frac{a_0}{W_0} F\left(\frac{c}{W}\right)}} \quad (3.3)$$

$$\frac{\sigma}{\sigma_t} = \sqrt{\frac{32W_0}{\pi a_0}} \frac{G\left(\frac{a_0}{W_0}, \frac{c}{W}\right)}{F\left(\frac{a_0}{W_0}\right)} \quad (3.4)$$

L'uguaglianza del valore della tenacità a frattura apparente per un valore costante dell'altezza e per valori diversi dell'estensione della fessura porge

$$K_{IC}^0 = \sigma_t \sqrt{c_0} F\left(\frac{c}{W}\right) = \sigma_f \sqrt{a_0} F\left(\frac{a_0}{W_0}\right). \quad (3.5)$$

Pertanto, il valore della resistenza a frattura reale è

$$\sigma_f = \sigma_t \frac{\sqrt{\frac{c_0}{W_0}} F\left(\frac{c}{W}\right)}{\sqrt{\frac{a_0}{W_0}} F\left(\frac{a_0}{W_0}\right)}, \quad (3.6)$$

ed il valore della tenacità a frattura reale è

$$K_{IC}^e = K_{IC}^0 \frac{\sqrt{\frac{c}{W}} F\left(\frac{c}{W}\right)}{\sqrt{\frac{a_0}{W_0}} F\left(\frac{a_0}{W_0}\right)}. \quad (3.7)$$

Per un valore diverso $c > c_0$

$$K_{IC}^e = K_{IC}^0 \frac{\sqrt{\frac{c}{W}} F\left(\frac{c}{W}\right)}{\sqrt{\frac{a}{W}} F\left(\frac{a}{W}\right)}. \quad (3.8)$$

Attraverso le equazioni (3.7) e (3.8) è possibile ricavare la prima legge di scala

$$K_{IC} = K_{IC}^0 \frac{\sqrt{\frac{a}{W}} F\left(\frac{a}{W}\right)}{\sqrt{\frac{a_0}{W_0}} F\left(\frac{a_0}{W_0}\right)}. \quad (3.9)$$

Per un valore $c < c_0$

$$K_{IC} = \sigma_t \sqrt{c} F\left(\frac{c}{W}\right). \quad (3.10)$$

Attraverso le equazioni (3.2) e (3.10) è possibile ricavare la seconda legge di scala

$$K_{IC} = K_{IC}^0 \sqrt{\frac{W}{W_0}} \quad (3.11)$$

E' altresì possibile esprimere la prima legge di scala in funzione delle resistenze a frattura convenzionali come

$$K_{IC} = K_{IC}^0 \frac{\sigma_f^J}{\sigma_c} \sqrt{\frac{W}{W_0}} \quad (3.12)$$

con σ_f^J resistenza a frattura convenzionale relativa al valore c .

4. Confronto teorico-sperimentale

Allo scopo di verificare la validità e l'accuratezza delle leggi di scala proposte è stato effettuato un confronto tra i risultati teorici e quelli sperimentali (Tabella I). I risultati sperimentali sono relativi ad un materiale ceramico (HP-Si₃N₄) e sono riportati in [2].

Tabella I. Confronto teorico-sperimentale

BxWxL (mm)	K _{IC} teorico (MPa√m)	K _{IC} [2] (MPa√m)	σ_f^J (MPa)	n
1x2x8	5.58	5.64 ⁺ -0.47	71.16	10
1.5x3x12		6.835 ⁺ -0.22	70.42	5
2x4x16	6.41	6.45 ⁺ -0.44	57.21	5
3x6x24	5.71	5.71 ⁺ -0.16	41.61	4
4x8x32	5.26	5.73 ⁺ -0.00	33.21	1

Dal confronto si evince che i risultati sperimentali sono in accordo con quelli previsti in base alle leggi di scala proposte.

Ringraziamenti

Lavoro svolto con il contributo del MURST.

Bibliografia

1. H. Fu and A.G. Evans, *Fracture in Engineering Materials*, ed. A.G. Evans, Noyes Publications, Park Ridge, N.J., p.71,1984.
2. Y. Bao, Z. Jin and X.Li, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.48, N.1, p.85,1994.
3. H.J. Schindler, *International Journal of Fracture*, 82,: R3-R10,1996.
4. L. Nobile, Atti del XII Congresso Nazionale dell'Associazione Italiana di Meccanica Teorica ed Applicata, Vol. V, p.159, Napoli 3-6 ottobre 1995.
5. D.S. Dugdale, *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, 8, p.100, 1960.
6. H. Bueckner, *ZAMM*, 50, p. 529,1970.

Atti del convegno

[[Precedente](#)] [[Successiva](#)]

Versione HTML realizzata da

