

DANNEGGIAMENTO E MECCANICA DELLA FRATTURA ALL'INTERFACCIA FIBRA-MATRICE IN MATERIALI COMPOSITI

Alessandro Pegoretti, Claudio Migliaresi, Antony T. DiBenedetto*

Dipartimento di Ingegneria dei Materiali, Università degli Studi di Trento, Trento, ITALIA

**Institute of Materials Science, University of Connecticut, Storrs, USA*

Sommario

Nella presente comunicazione vengono riportati alcuni risultati relativi ad uno studio dei fenomeni di frattura localizzati nella regione interfacciale tra fibra e matrice di materiali compositi a matrice polimerica. In particolare viene presentata una modellazione agli elementi finiti del processo di trasferimento degli sforzi tra fibra e matrice. La simulazione numerica ha permesso di valutare un parametro di danneggiamento D che tiene conto della riduzione della capacità di carico dovuta alla presenza di cricche interfacciali e/o nella matrice.

Allo scopo di investigare la possibilità di definire un test di meccanica della frattura per quantificare l'adesione fibra-matrice è stato quindi valutato un tasso di rilascio di energia elastica, G , associato al fenomeno di propagazione di una cricca interfacciale. Poiché il trasferimento del carico lungo la fibra risente della presenza della rottura della fibra per una notevole distanza dal punto di frattura, la simulazione ha messo in luce che, al fine di ottenere un valore di G indipendente dalle dimensioni del campione, è necessario utilizzare dimensioni longitudinali superiori a circa 20 volte il diametro della fibra e dimensioni radiali superiori a circa 10 volte il diametro della fibra.

Abstract

In this study the finite element method is used to investigate the axial fiber stress profiles and energy changes accompanying interfacial debonding and/or matrix cracking following a single fiber fragmentation event. A damage parameter D was evaluated in order to quantify the decrease of the load-carrying capacity of the fiber due to debonding and/or matrix cracking.

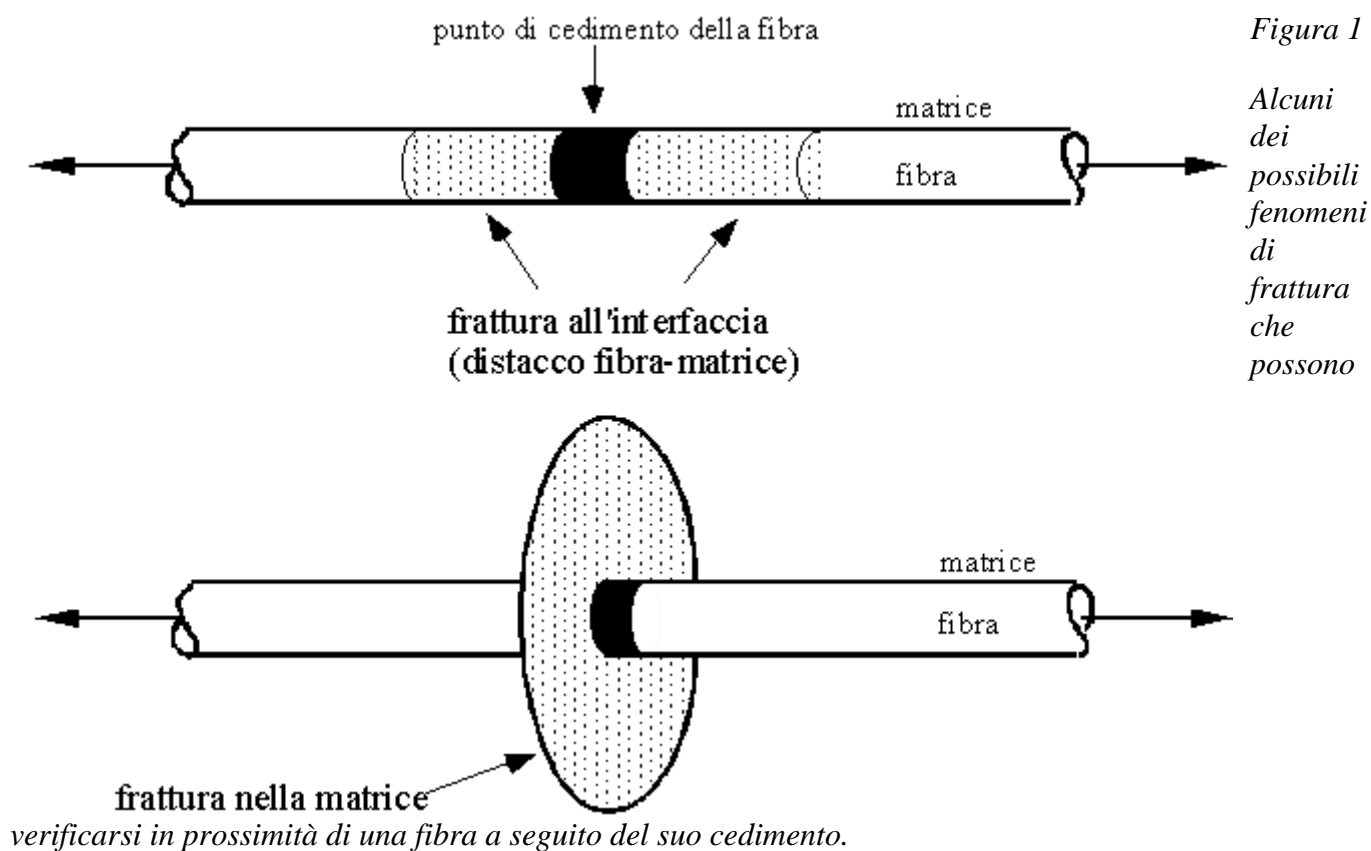
Since the stress transfer along the fiber length changes over a long distance from the broken fiber end, a study was made of the effect of model size on calculated values of the stress profiles and energy changes. The radial dimension must extend to at least 10 fiber diameters and the half-fragment length must also be greater than approximately 20 fiber diameters, before a size independent calculated value of the strain energy release rate, G , can be attained.

1. Introduzione

I fenomeni di frattura all'interfaccia fibra-matrice causati dall'energia elastica rilasciata a seguito della frattura di una fibra in un materiale composito a matrice polimerica sono attualmente oggetto di studio da parte di numerosi gruppi di ricerca [1-9]. In particolare, il crescente interesse verso approcci di tipo energetico al fenomeno del distacco fibra-matrice è principalmente legato alla necessità di mettere a punto dei test che permettano di valutare il livello di adesione tra fibra e matrice con metodologie più precise ed affidabili rispetto alle tradizionali prove di micromeccanica su microcompositi a fibra singola, ossia i test

di "frammentazione" (10, 11), "pull-out" (12), "microdebonding" (13) e "microindentazione" (14). Tutti questi metodi si basano sulla misura dello "sforzo massimo" trasferibile dalla matrice alla fibra. Tuttavia un recente programma round-robin (15) ha messo in evidenza notevoli differenze fra i valori di resistenza a taglio dell'interfaccia ottenuti in vari laboratori utilizzando test differenti ed anche fra i valori ottenuti mediante la stessa tecnica di misura. Tale situazione potrebbe essere superata, qualora fosse possibile disporre di metodiche in grado di fornire grandezze di meccanica della frattura (G_c o K_{Ic}) relative all'interfaccia fibra-matrice.

In un materiale composito sottoposto a sollecitazione meccanica, alcune fibre si rompono anche per livelli di carico inferiori alla resistenza media delle fibre stesse, e comunque considerevolmente inferiori alla resistenza complessiva del composito. Quando un filamento continuo ad elevate proprietà meccaniche (vetro, carbonio, Kevlar) si rompe all'interno di una matrice polimerica, l'energia elastica rilasciata dai costituenti del composito nella regione adiacente al punto di frattura è generalmente sufficiente per propagare delle cricche longitudinalmente all'interfaccia fibra-matrice, radialmente nella matrice, o in entrambe le posizioni [16].



Nel presente lavoro è stata eseguita una simulazione numerica agli elementi finiti campo di sforzi lungo una fibra nelle condizioni schematizzate in Figura 1, allo scopo di quantificare il danneggiamento dovuto alla presenza delle cricche interfacciali e/o radiali. Dall'analisi dell'energia elastica del sistema è stato quindi possibile definire un tasso di rilascio di energia elastica, G , correlato alla propagazione di una cricca all'interfaccia fibra-matrice.

2. Parte teorica

Il campo di sforzi e l'energia deformazionale nella regione in prossimità dell'estremità fratturata della fibra sono stati studiati tramite modellazione numerica ad elementi finiti. Il microcomposito è stato schematizzato come un cilindro di matrice contenente una singola fibra (Figura 1). Sfruttando le simmetrie del modello (assial-simmetrico) l'analisi FEM è stata eseguita su un solo quadrante avente AB e BD come assi di simmetria.

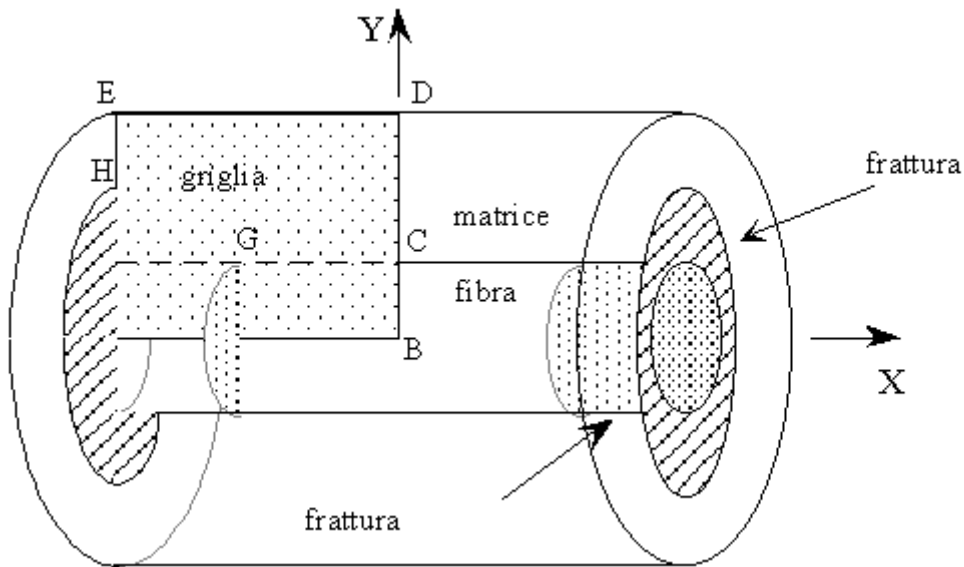


Figura 1.

Modellazione del composito a fibra singola e dei sistemi di cricche (interfacciali e radiali) che si sviluppano a seguito della frattura della fibra.

Per la modellazione sono state utilizzate le seguenti condizioni al

contorno:

- lato AB: spostamento imposto nullo nella direzione Y (per la simmetria);
- lato BCD: spostamento uniforme nella direzione X (trazione uniassiale);
- lato DE: superficie libera;
- lato EF: spostamento imposto nullo nella direzione X (per la simmetria).

La propagazione di una frattura all'interfaccia e/o nella matrice è stata simulata rilasciando progressivamente i nodi interfacciali doppi disposti lungo le linee FG (frattura all'interfaccia) e FH (frattura nella matrice). La simulazione numerica è stata condotta tramite il codice di calcolo ad elementi finiti MARC™, utilizzando elementi assial-simmetrici quadrangolari a 4 nodi con l'ipotesi di comportamento lineare elastico per fibra e matrice.

Il tasso di rilascio di energia elastica associato alla propagazione di una frattura all'interfaccia, G , è stato quindi valutato in modo simile a quanto riportato da DiBenedetto *et.al.* (17), DiAnselmo *et.al.* (18) e K.D.Jones&A.T.DiBenedetto (19). Dall'analisi FEM è stato possibile ottenere l'andamento dell'energia elastica del sistema, U , in funzione della lunghezza della cricca interfacciale x . Il tasso di rilascio di energia, G , è stato quindi definito come:

$$G = -\frac{\partial U}{\partial A} = -\frac{\partial U}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial A}$$

dove $A = 2 \pi r_f x$ è la superficie della cricca interfacciale ed r_f è il raggio della fibra. I valori di G sono stati calcolati per una deformazione del sistema pari a 0.01 ma, poiché l'analisi è lineare, è possibile ottenere il valore di G a qualsiasi livello di deformazione tramite la seguente relazione:

$$G_{\epsilon} = \left(\frac{\epsilon}{0.01} \right)^2 G$$

dove G_{ϵ} è il tasso di rilascio di energia corrispondente ad una generica deformazione ϵ [3, 4, 20].

3. Risultati e discussione

In figura 2 sono riportati gli andamenti degli sforzi assiali in una fibra di vetro S (modulo elastico $E_f = 86.9$ GPa) immersa in una matrice epossidica di (modulo elastico $E_m = 2.7$ GPa) al variare del tipo di

frattura presente nel composito. La dimensione del modello è $X = 50 d$, $Y = 10 d$ dove d è il diametro della fibra ($d = 10 \mu\text{m}$). La situazione è relativa ad una deformazione di 0.01 e gli sforzi assiali sono stati normalizzati rispetto allo sforzo che si avrebbe se la fibra non fosse fratturata e non ci fossero cricche interfaciali o nella matrice (in questo caso 869 MPa).

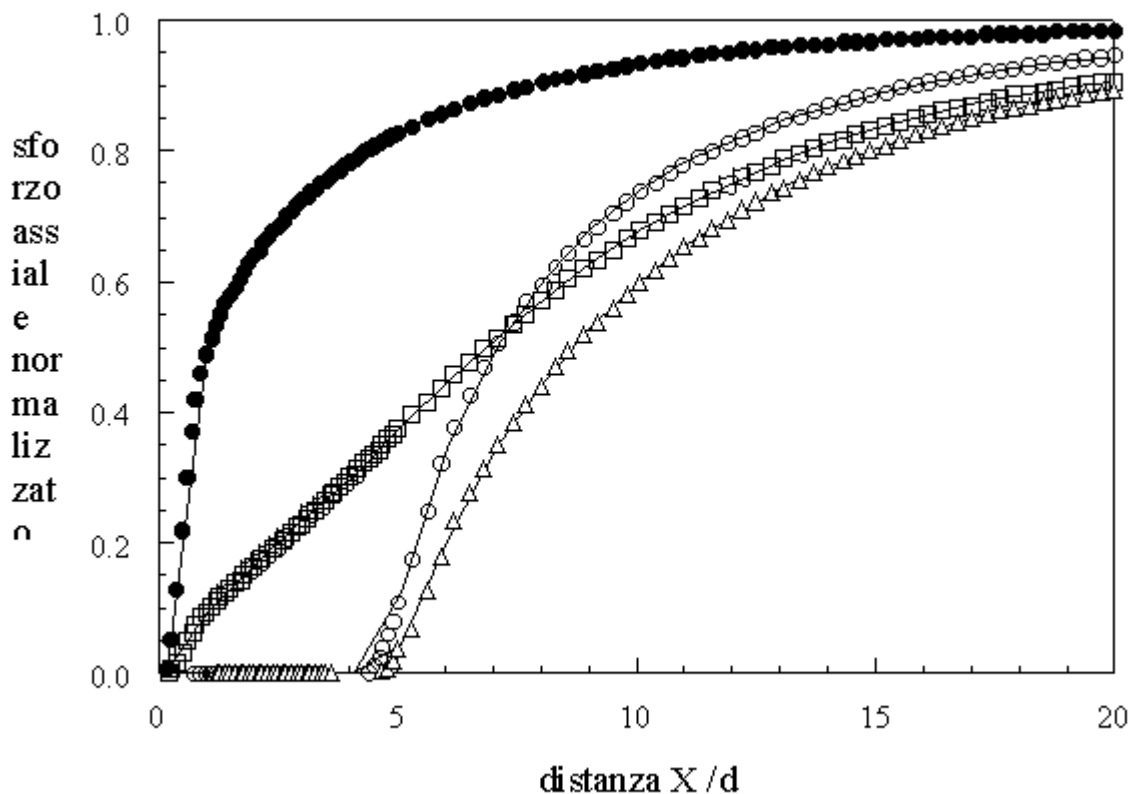


Figura 2.

Andamenti degli sforzi assiali lungo l'asse della fibra (d =diametro della fibra) per i casi: iniziale senza fratture (●), frattura interfacciale di lunghezza $5d$ (□) frattura nella matrice di lunghezza $5d$ (○) combinazione di frattura interfacciale e frattura nella matrice (▽).

Si può osservare come la presenza di fratture in prossimità delle estremità del frammento di fibra comporti una diminuzione dell'efficienza del trasferimento degli sforzi fra fibra e matrice. Tale effetto può essere quantificato tramite un parametro di danneggiamento D definito come:

$$D = \frac{\bar{\sigma}_{nd} - \bar{\sigma}_d}{\bar{\sigma}_{nd}}$$

dove $\bar{\sigma}_d$ è lo sforzo assiale medio agente sulla fibra in presenza di danneggiamento e $\bar{\sigma}_{nd}$ è lo sforzo assiale medio sulla fibra in assenza di danneggiamento. La simulazione FE ha permesso quindi di quantificare l'effetto della presenza di fratture interfacciali e/o nella matrice in termini del parametro $\langle D \rangle$ che assume il valore 0 per la situazione non danneggiata ed il valore 1 nel caso in cui il danneggiamento sia totale (completo distacco tra fibra e matrice o frattura trasversale completa). Per il caso di Figura 1, al variare della dimensione delle fratture il parametro D assume i valori riportati in Tabella 1.

Tabella 1

Parametro D in funzione del tipo di frattura e della relativa lunghezza

Dimensione della frattura (μm)	parametro D		
	Frattura all'interfaccia	Frattura nella matrice	Frattura all'interfaccia + frattura nella matrice
0	0.000	0.000	0.000
5	0.020	0.027	0.031
10	0.038	0.042	0.050
20	0.064	0.066	0.084
50	0.134	0.142	0.191
500	1.000	1.000	1.000

Consideriamo ora il caso più interessante, ossia quello del distacco fibra-matrice (frattura all'interfaccia). In questo caso l'andamento del tasso di rilascio di energia elastica in funzione della lunghezza di cricca a deformazione costante pari a 0.01 è riportato in Figura 3. In questo esempio è stata simulata una fibra di vetro S ($E_f = 86.9$ GPa) immersa in una matrice epossidica con modulo $E_m = 2.7$ GPa, utilizzato un modello di dimensioni $X = 20$ d, $Y = 10$ d, dove $d = 10$ μm .

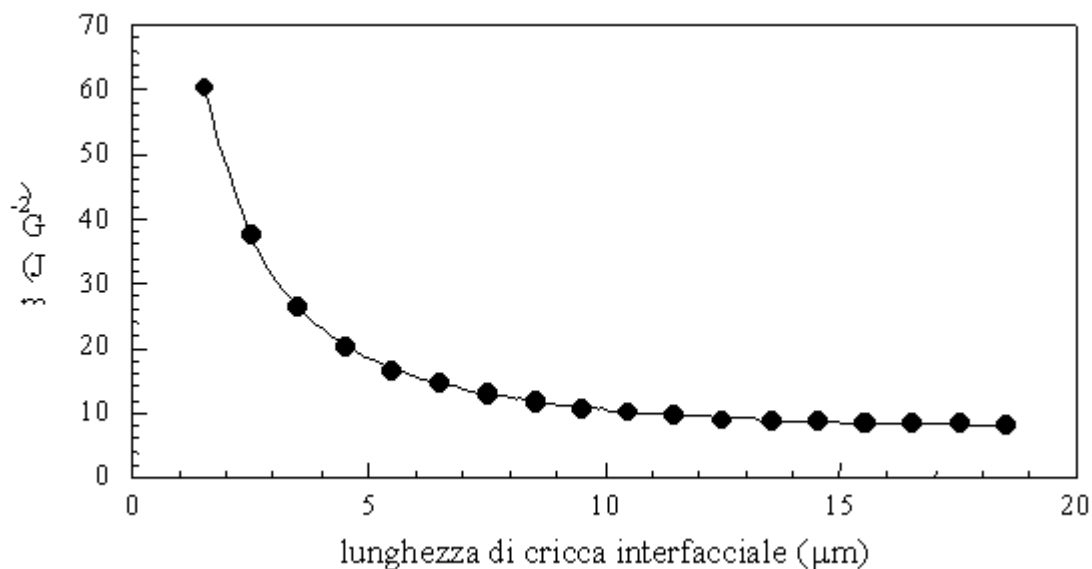


Figura 3

Esempio di andamento del tasso di rilascio di energia elastica G , in funzione della lunghezza di propagazione della frattura all'interfaccia fibra-matrice.

I valori di G ottenibili da questo tipo di simulazione sono risultati essere fortemente dipendenti dalle dimensioni del modello. In particolare, per una data lunghezza finale di cricca ($9.5 \mu\text{m}$), i valori di G sono risultati essere crescenti all'aumentare della dimensione assiale X del modello e, decrescenti all'aumentare della dimensione radiale Y , come riportato in Figura 4.

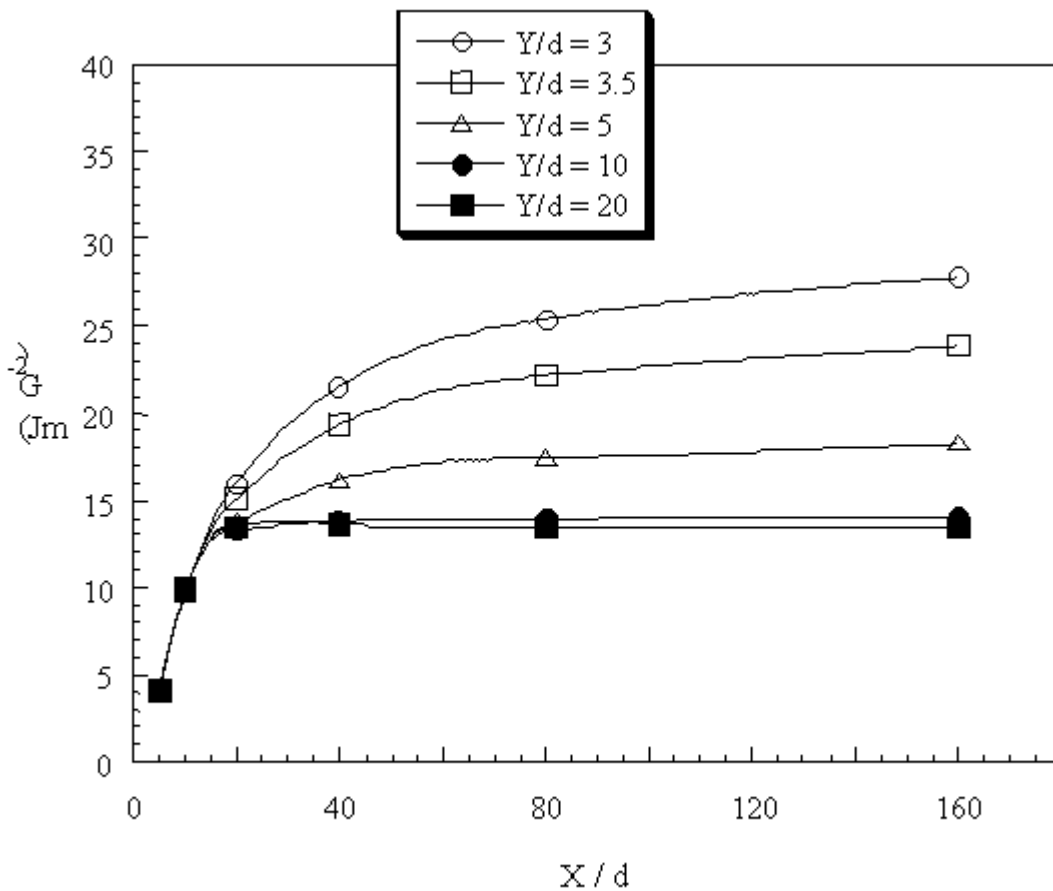


Figura 4

Valori di G in funzione delle dimensioni X ed Y utilizzate per la simulazione FE (d è il diametro della fibra) per una lunghezza di cricca interfacciale di $9.5 \mu\text{m}$.

Dalla Figura 4 risulta evidente che per ottenere valori di G indipendenti dalla dimensione del modello è necessario porsi a valori di X superiori a circa $20 d$ e ad Y superiori a circa $10 d$, dove d è il diametro della fibra. Da un punto di vista sperimentale l'osservazione precedente permette di stimare le dimensioni minime dei campioni da utilizzare per la misura del parametro G critico per la propagazione di una cricca all'interfaccia fibra/matrice.

4. Conclusioni

Mediante simulazione numerica agli elementi finiti è stato analizzato il campo di sforzi in prossimità di una fibra fratturata all'interno di una matrice polimerica. In particolare dall'esame della componente assiale dello sforzo nella fibra è stato possibile definire un parametro di danneggiamento, D , legato al tipo ed all'estensione del difetto (frattura interfacciale e/o frattura nella matrice) presente in prossimità del punto di frattura della fibra stessa.

Al fenomeno di distacco fibra-matrice è stato quindi associato un tasso di rilascio di energia elastica G , che è risultato funzione della lunghezza di arresto della cricca, e delle dimensioni del modello utilizzato rispetto al diametro della fibra. Tali osservazioni pongono le basi per un opportuno dimensionamento dei campioni da utilizzare per la misurazione del tasso critico di energia elastica per la propagazione di una

cricca all'interfaccia, ossia della tenacità a frattura dell'interfaccia stessa.

Bibliografia

1. A.T.DiBenedetto, *Comp. Sci. & Techn.*, **42**, 103 (1991)
2. A.DiAnselmo, M.L.Accorsi, A.T.DiBenedetto, *Comp. Sci. & Techn.*, **44**, 215 (1992)
3. A.Pegoretti, M.L.Accorsi, A.T.DiBenedetto, *J.Mat.Sci.*, **31**, 6145 (1996)
4. A.Pegoretti, C.Migliaresi, M.L.Accorsi, A.T.DiBenedetto, atti del 3° Convegno Nazionale AIMAT, Napoli, 1996, p. 681
5. H.D.Wagner, S.Ling, *Advanced Composites Letters*, **2**(5), 169 (1993)
6. H.D.Wagner, J.A.Nairn, and M.Detassis, *Appl. Comp. Mat.*, **2**, 107 (1995)
7. M.Detassis, E.Frydman, D.Vrieling, X.-F.Zhou, *Composites Part A*, **27**, 769 (1996)
8. T.J.Copponex, *Comp. Sci. & Techn.*, **56**, 893 (1996)
9. J.A.Nairn, *Mech.Mater.*, **13**, 131 (1992)
10. W.A.Fraser, F.H.Ancker and A.T.DiBenedetto, in Proceedings of the 30th Ann. Tech. Conf. of Reinf. Plastics - SPI, WA (1975) 22-A.
11. L.T.Drzal, M.J.Rich, J.D.Camping and W.J.Park, in Proceedings of the 30th Ann. Tech. Conf. of Reinf. Plastics - SPI, WA (1980) 20-C.
12. M.R.Piggott, P.S.Chua, D.Andison, *Polym.Comp.*, **6**, 242 (1985).
13. B.Miller, P.Muri, L.Rebenfeld, *Comp. Sci. & Techn.*, **28**, 17 (1987).
14. J.F.Mandell, D.H.Grande, T.H.Tsiang, F.J.McGarry, in Proceedings of the 7th International Conference on Composite Materials: Testing and Design, Philadelphia, ASTM STP 893, (ed. J.M.Whitney, 1986) p. 87.
15. M.J Pitkethly, J.P.Favre, U.Gaur, J.Jakubowski, S.F.Mudrich, D.L.Caldwell, L.T.Drzal, M.Nardin, H.D.Wagner, L.DiLandro, A.Hampe, J.P.Armistead, M.Desaegeer, I.Verpoest, *Comp. Sci. & Techn.*, **48**, 205 (1993).
16. J.Mullin, J.M.Berry, A.Gatti, *J.Comp.Mat.*, **2**, 82 (1968)
17. A.T.DiBenedetto, S.M.Connelly, W.C.Lee and M.L.Accorsi, *J Adhesion*, **52**, 41 (1995).
18. A.Di Anselmo, M.L.Accorsi & A.T.DiBenedetto, *Comp. Sci. & Techn.*, **44**, 215 (1992).
19. K.D.Jones, A.T.DiBenedetto, in Proceedings of the 3rd International Conference on Deformation and Fracture of Composites, Guildford, UK, March 1995, p.86.
20. A.Pegoretti, M.Fidanza, C.Migliaresi, A.T.DiBenedetto, *Composites Part A*, **29** 283 (1998)

Atti del convegno

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

Versione HTML realizzata da

