

**IGF 11 - XI Convegno Nazionale
Gruppo Italiano Frattura
Brescia, 4-6 luglio 1995**

**Tenacità a frattura di materiali compositi a matrice metallica ottenuti
mediante la tecnologia dello Squeeze Casting: analisi numerica e sperimentale**

M. Gambardella, M. Marchetti, L. Zizi

Dipartimento Aerospaziale
Università "La Sapienza" di Roma

Sommario

Il presente lavoro si propone una analisi sperimentale e numerica per la determinazione della tenacità a frattura di un materiale composito in lega di alluminio Al 2014 T6 rinforzata con fibre corte di allumina in percentuale volumetrica del 20%.

In particolare si vuole evidenziare come la tenacità a frattura, caratteristica del materiale, sia legata, nel caso degli MMCs, oltre che ai fattori dai quali comunemente dipende, anche dalla tecnologia di produzione adottata.

I dati sperimentali, relativi a prove condotte sia su provini CT che su provini a flessione, sono stati poi confrontati con quelli ottenuti numericamente mediante un codice di calcolo agli elementi finiti.

L'analisi sperimentale ha messo in evidenza la notevole fragilità del materiale esaminato, caratterizzato da bassi valori della tenacità a frattura. Con l'analisi numerica si è ottenuto un buon riscontro con i risultati ottenuti sperimentalmente nel caso delle provette a flessione, mentre per i provini CT i risultati si discostano leggermente da quelli sperimentali.

1. Introduzione

I materiali compositi a matrice metallica (MMCs) rappresentano attualmente una classe di materiali particolarmente attraenti per l'industria aerospaziale ed autoveicolistica, ed in tutti quei settori dove è richiesta leggerezza, buona rigidità, basso coefficiente di dilatazione termica e resistenza all'usura.

E' un dato acquisito che una dispersione controllata di fibre corte ceramiche in una matrice in lega di alluminio può migliorare le proprietà specifiche come il modulo elastico, la resistenza meccanica alle alte temperature, la resistenza all'usura. Tuttavia, una caratteristica comune dei compositi rinforzati in modo discontinuo è rappresentata da livelli di tenacità, anche largamente inferiori a quelli della matrice monolitica.

Un miglioramento di queste proprietà (intendendo per tenacità la capacità di un metallo di assorbire energia e deformarsi plasticamente prima di fratturarsi) costituisce un problema di non facile soluzione a causa dei numerosi parametri fra loro interagenti che influenzano la tenacità: tipo e rapporto lunghezza /diametro del rinforzo, frazione in volume, orientazione delle fibre, composizione chimica della lega, tecnologia di fabbricazione del composito, trattamento termico, caratteristiche strutturali della lega etc.

Attualmente non esiste una norma che prescriva il metodo di misura della tenacità alla frattura di un MMC. Un fattore che ha fortemente ostacolato questo aspetto, è la nota difficoltà che si incontra nella fase di innesco della cricca di fatica [1] e in particolare modo quando le provette hanno spessore inferiore a 6 mm. Questa è una caratteristica che molti MMCs hanno in comune con materiali fragili come i ceramici. Per compositi PRM/WRM (rinforzati con particelle/whiskers), recenti studi hanno fatto riferimento, per le prove meccaniche, alle norme esistenti per i materiali metallici, come la ASTM E 399, riguardante la misura della tenacità a frattura in condizioni di deformazione piana, e la ASTM E 813, riferita alla misura del J-integral.

Alcuni studi [1] hanno mostrato inoltre la validità della prova anche senza il precriccaggio, nel qual caso però i valori della tenacità alla frattura variano in funzione del raggio di curvatura dell'intaglio.

2. Squeeze Casting

La tecnologia dello Squeeze Casting, impiegata per la produzione del composito in matrice metallica dal quale poi sono stati ricavati i provini, viene utilizzata soprattutto dall'industria automobilistica, principalmente per ottenere componenti finiti privi di porosità.

Essa consiste nel costringere mediante una adeguata pressione (che può variare da 10 a 100MPa) una lega metallica, portata ad una temperatura superiore (100-200°C) a quella di fusione, ad infiltrarsi in una preforma in fibra posta in uno stampo ad una temperatura prefissata. La sua densità può variare da 0.15 a 1 g/cm³ in corrispondenza di frazioni volumetriche di rinforzanti dell'ordine del 4-30%.

L'infiltrazione avviene in un intervallo di tempo di qualche secondo e la successiva completa solidificazione sotto pressione richiede qualche minuto (in funzione del metallo impiegato), cosicché il contatto tra bagno metallico e fibre è piuttosto breve e non consente che si verifichino in modo significativo eventuali indesiderate reazioni chimiche all'interfaccia fibra/matrice. L'elevata velocità di solidificazione, frutto del buon scambio termico con lo stampo, consente inoltre di ottenere matrici metalliche con microstruttura fine.

L'infiltrazione è governata da un insieme piuttosto ampio di parametri di processo che devono essere accuratamente tenuti sotto controllo per poter sfruttare appieno le potenzialità offerte dalla tecnologia dello Squeeze Casting; i più importanti sono:

- la temperatura del metallo fuso, della preforma e dello stampo;
- la velocità di iniezione del metallo, la pressione finale di squeeze ed il modo in cui essa varia durante l'infiltrazione;
- il tempo di permanenza del composito all'interno della cavità dello stampo.

3. Materiale impiegato e prove sperimentali

Il materiale utilizzato è un composito a matrice in lega di alluminio Al 2014-T6, rinforzato con fibre corte di allumina Al₂O₃.

Le principali caratteristiche meccaniche del composito e quelle della lega, nonché la composizione chimica di quest'ultima sono riportate in tab.I, II. Il composito è stato appunto ottenuto con la tecnologia dello Squeeze Casting, mediante infiltrazione di una preforma contenente una frazione in volume del 20% di fibre corte di Al₂O₃ legate con SiO₂.

	Si %	Fe %	Cu %	Mn %	Mg %	Zn %	Ti %	Cr %
Al 2014	0.5+1.2	0.7max	3.9+5.0	0.4+1.2	0.2+0.8	0.25 max	0.15 max	0.1 max

Tab. I Composizione chimica della lega matrice Al 2014 [2].

Materiale	σ_R (MPa)	$\sigma_{0.2\%}$ (MPa)	ϵ (%)	E (GPa)	K_{IC} (MPam ^{1/2})
2014-T6	483	414	13	72.4	23.2
2014+20%Al ₂ O ₃ -SiO ₂ -T6	343	327	0.5	92	

Tab. II *Caratteristiche tensili del materiale composito sperimentato e della lega matrice [3].*

Provini a flessione:

I provini sono stati ricavati da una billetta di forma prismatica e dimensionati (fig. 1) in accordo con quanto previsto dalla norma ASTM E399. Le prove sono state condotte con una macchina INSTRON 8500-8501 a controllo computerizzato.

Per la determinazione del K_{IC} , è stata seguita la procedura riportata nelle suddette norme, quindi eseguendo inizialmente un precriccaggio a fatica con:

rapporto di carico: $R=0.1$;
carico massimo: $P_{max}=1.5$ KN;
frequenza: $f=20$ Hz;
ambiente: aria di laboratorio.

Non verificandosi con tali valori l'innescò della cricca di fatica, il valore del carico massimo è stato portato a 1.8 KN, con la conseguenza che dopo un certo numero non elevato di cicli, avveniva la rottura di schianto dei provini. Si è proceduto quindi alla prova senza il precriccaggio a fatica [1].

Provini CT:

I provini sono stati ricavati dalle stesse billette utilizzate per i provini a flessione, ed anche questi sono stati dimensionati (fig. 1) in accordo con quanto previsto dalla norma ASTM E399, di cui si è anche seguita la procedura sperimentale. Le prove sono state condotte con una macchina ITALSIGMA FP 100K.

Anche per questi provini, si è tentato di eseguire un precriccaggio a fatica con:

rapporto di carico: $R=0.5$;
carico massimo: $P_{max}=1.2$ KN;
frequenza: $f=10$ Hz;
ambiente: aria di laboratorio.

Anche per questi provini, si è verificato lo stesso problema riscontrato in quelli a flessione, si è proceduto quindi alla prova senza il precriccaggio a fatica [1].

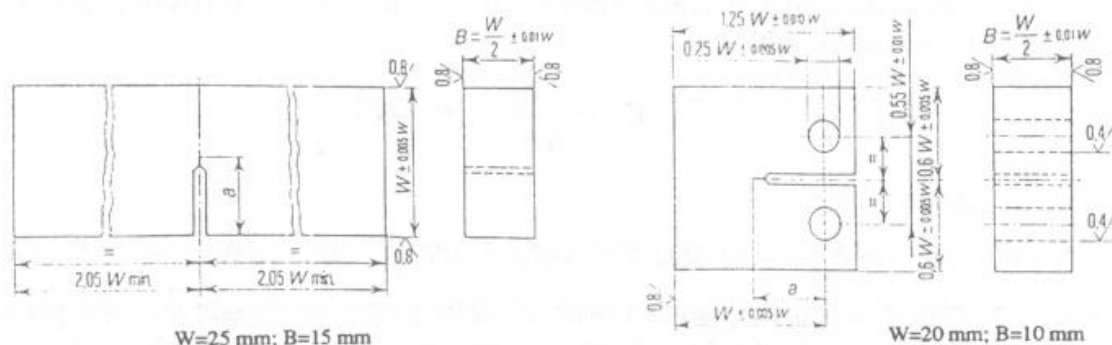


Fig. 1 Geometria e dimensioni dei provini impiegati per la determinazione del K_{IC} .

4. Risultati sperimentali

Nei grafici I e II, sono riportate le curve carico-apertura dell'apice della cricca. Si osserva una bassa dispersione di dati, evidenziata dai valori del carico di rottura molto vicini tra loro. Da ogni curva è possibile ricavare un valore provvisorio della tenacità alla frattura, K_Q , da sottoporre a verifica. Tale valore si calcola applicando l'equazione normalizzata secondo la specifica ASTM e cioè

$$K_Q = \frac{P_Q S}{BW^{1/2}} \cdot f(a/W) \quad (1)$$

nella quale la funzione di forma per i provini a flessione risulta:

$$f(a/W) = 2.9(a/W)^{1/2} - 4.6(a/W)^{2/5} - 37.6(a/W)^{7/2} + 38.7(a/W)^{9/2}$$

Calcolata la grandezza $2.5(K_Q/\sigma_y)^2$, se questa è minore sia dello spessore B che della lunghezza a della fessura, allora K_Q è uguale a K_{IC}

Sono riportati di seguito i risultati ottenuti dalle prove effettuate su tre provini. Il valore di $f(a/W)$ è lo stesso per tutti i provini, con $a/W = 0.45$, ed è di 2.28.

N° Provino	Carico di rottura (KN)	P_Q (KN)	K_Q (MPa $m^{1/2}$)	$2.5(K_Q/\sigma_y)^2$ (m)
1	3.585	3.585	13.84	0.00447
2	3.323	3.117	12.03	0.00338
3	3.617	3.393	13.1	0.004

Tab. III Risultati delle prove sperimentali a flessione per la determinazione del K_{IC}

Analogo procedimento è stato seguito per i provini a trazione, per i quali l'equazione normalizzata è:

$$K_Q = \frac{P_Q}{BW^{1/2}} \cdot f(a/W) \quad (2)$$

dove in questo caso:

$$f(a/W) = 29.6(a/W)^{1/2} - 185.5(a/W)^{3/2} + 655.7(a/W)^{5/2} - 1017(a/W)^{7/2} + 638.9(a/W)^{9/2}$$

Sono riportati di seguito i risultati ottenuti dalle prove effettuate su sette provini. Il valore di $f(a/W)$, pari ad 8.34, è lo stesso per tutte i provini, con $a/W = 0.45$.

N. Provino	Carico di rottura (KN)	P_Q (KN)	K_Q (MPa m ^{1/2})	$2.5(K_Q/\sigma_y)^2$ (m)
1	1.853	1.746	13.5	4.95 e-03
2	1.677	1.546	12.9	3.88 e-03
3	1.760	1.483	12.36	3.57 e-03
4	1.841	1.579	13.1	4.0 e-03
5	1.675	1.610	13.43	4.2 e-03
6	1.741	1.528	12.74	3.8 e-03
7	1.816	1.527	12.73	3.7 e-03

Tabella IV Risultati delle prove sperimentali a flessione per la determinazione del K_{Ic}

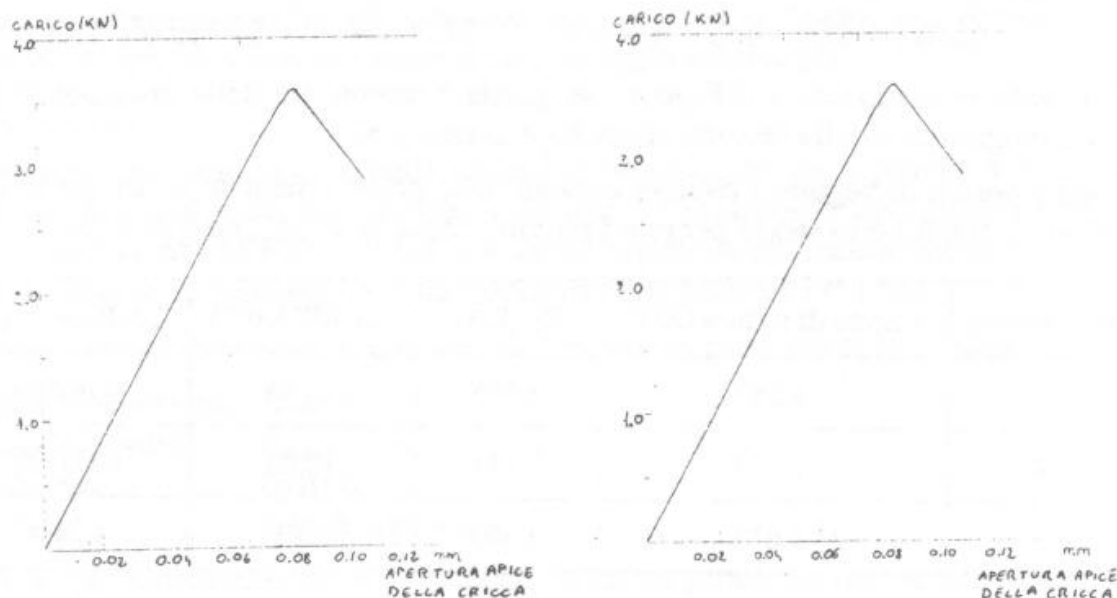


Grafico I Curve carico-apertura apice della cricca (Provini a flessione).

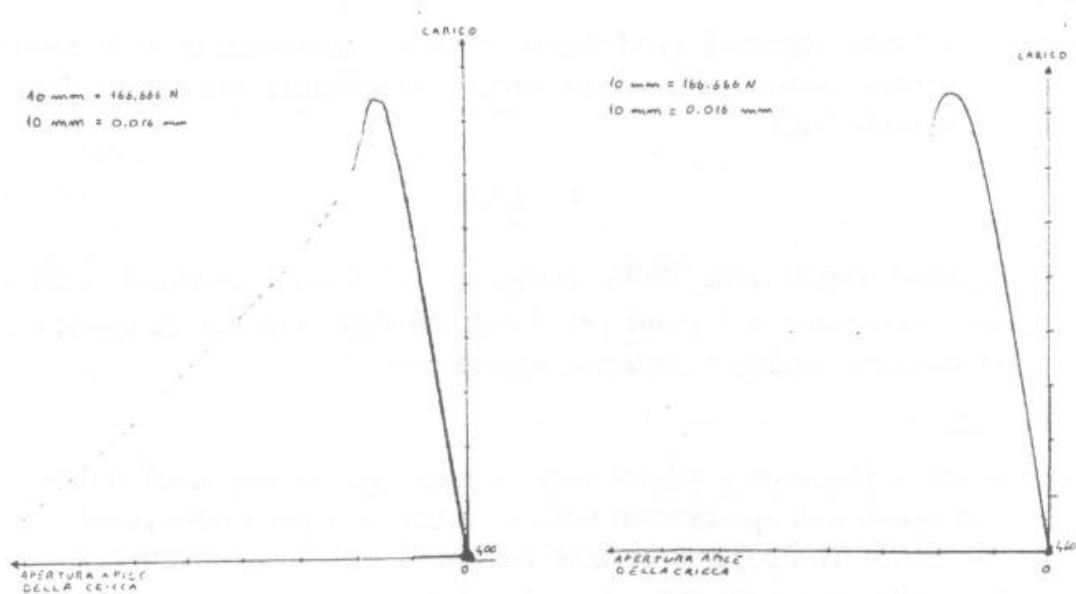


Grafico II Curva carico-apertura apice della cricca (Provini CT).

5. Analisi numerica

Il procedimento presentato nel paragrafo precedente è stato applicato per la determinazione agli elementi finiti del fattore di intensità degli sforzi, mediante una versione del programma MARC, sviluppata da P.V. Marcall e soci [6]. Sono stati scelti, ai fini del confronto, i dati relativi alle prove sperimentali condotte sui provini a flessione.

Non è stato utilizzato un modello di mesh molto raffinato (fig. II), ma sono state comunque rispettate le dimensioni reali del provino.

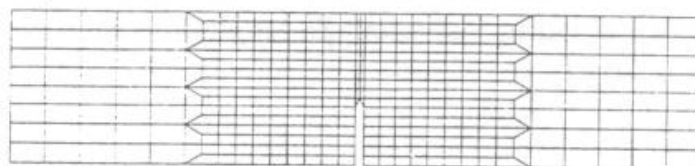


Fig. II Mesh del provino a flessione.

Elementi:

Sono stati utilizzati elementi quadrilateri distorti isoparametrici a 8 nodi. Le coordinate possono essere espresse in termini di quantità modali mediante le funzioni di interpolazione:

$$x = \sum_{i=1}^8 x_i \phi_i \quad (3)$$

con ϕ_i funzioni quadratiche dello spazio ϵ, η . Questi elementi utilizzano l'integrazione Gaussiana a 9 punti per il calcolo della matrice di rigidezza, di massa e per valutare i carichi volumetrici equivalenti.

Vincoli e carichi:

Per le provette a flessione i vincoli sono di appoggio su due nodi (come nella prova sperimentale) e di spostamenti nulli in direzione x per i nodi posti lungo la direzione di carico (propagazione della cricca). I carichi applicati sono quelli corrispondenti alla rottura del materiale, ottenuti sperimentalmente.

Risultati:

Ad ogni elaborazione, il programma agli elementi finiti impiegato fornisce come uscita il valore della variazione di energia potenziale elastica, dal quale si può ricavare il valore del J-Integral con la seguente relazione:

$$J = \frac{\Delta U}{\Delta a \cdot t} \quad (4)$$

dove ΔU è appunto la variazione di energia potenziale elastica, mentre Δa (nelle elaborazioni effettuate si è posto $\Delta a = 0.02$) è l'incremento subito dalla cricca, t invece è lo spessore del provino, posto uguale a $t = 15$. Da questo valore del J-Integral si può risalire al valore del fattore di intensità degli sforzi con la relazione

$$K_I = \left(\frac{E \cdot J}{1 - \nu^2} \right)^{1/2} \quad (5)$$

con $E = 92 \text{ GPa}$ e $\nu = 0.33$.

	Prova 1	Prova 2	Prova 3
Variazione dell'energia ΔU	0.07014816	0.06029650	0.0714060
J-INTEGRAL	1.67	1.43563	1.7
$K_I = \sqrt{\frac{J \cdot E}{1 - \nu^2}}$	13.13	12.17	13.24
Errore %	5.1	1.1	1

Tab. V Confronto tra i risultati numerici e sperimentali per i provini a flessione.

6. Conclusioni

Dai risultati ottenuti, si possono trarre le seguenti conclusioni:

- la tecnologia dello Squeeze Casting, consente di ottenere materiali compositi del tipo net-shape con bassi costi del prodotto finito, grazie alla rapidità di produzione (elevata cadenza) ed alla facilità del controllo dei principali parametri che intervengono nella produzione;
- alcune caratteristiche meccaniche della lega non rinforzata, migliorano con l'aggiunta del rinforzo (come il coefficiente di espansione termica e la rigidità), mentre altre caratteristiche meccaniche, quali appunto la tenacità a frattura, peggiorano.

L'infragilimento del materiale dovuto all'inserimento delle fibre, confermato anche da una analisi frattografica che mostra una morfologia della superficie di frattura tipica dei materiali fragili, ne rappresenta il principale limite.

Bibliografia

- [1] B. Roebuck, T.A.E. Gorley, L.N. McCartney, "Mechanical property test procedures for metal matrix composites", Institute of Metals, London 1987.
- [2] ASM HANDBOOK, 1991.
- [3] R. Ragazzini, E. Di Russo, F. Pinna, F. Zanda, "Valutazione della tenacità a frattura di compositi a matrice di alluminio con rinforzo discontinuo, mediante provette intagliate di differente geometria", Alures ISML, Novara.
- [4] ASTM E 399-83, "Plane-strain fracture toughness of metallic materials".
- [5] ASTM E 813-87, " J_{IC} , a measure of fracture toughness".
- [6] Manuale MARC K5.