

# CARATTERIZZAZIONE MICROSTRUTTURALE E A FRATTURA DI COMPOSITI A MATRICE DI ALLUMINIO OTTENUTI PER INFILTRAZIONE A PRESSIONE AMBIENTE

*M. Faccoli<sup>1</sup>, G. M. La Vecchia<sup>1</sup>, R. Roberti<sup>1</sup>,*

*P. Cobelli<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Università degli Studi di Brescia*

*Via Branze 38 - 25123 Brescia*

*<sup>2</sup>Dipartimento di Ingegneria dei Materiali, Università degli Studi di Trento*

*Via Mesiano 77 – 38050 Trento*

## Sommario

Nel presente lavoro si è studiato il comportamento a frattura di alcuni materiali compositi a matrice di alluminio rinforzati con un'elevata frazione in volume di particelle di SiC o di Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, prodotti con la tecnica della infiltrazione a pressione atmosferica. Sono state condotte prove di tenacità alla frattura e si sono effettuate analisi microstrutturali e frattografiche volte ad indagare i meccanismi di frattura. Si è infine studiato l'effetto della permanenza in temperatura di questi materiali sul danneggiamento della microstruttura e sulla resistenza a frattura.

## Abstract

*In the present research work the fracture behaviour of some aluminum matrix composite materials characterized by a high SiC and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particles volume fraction and fabricated by a pressureless infiltration technique have been studied. Fracture toughness tests have been carried out and microstructural and fractographic analysis have been performed in order to investigate the fracture mechanisms. The effect of high temperature on microstructure and fracture toughness has also been investigated.*

## 1. Introduzione

Nell'ambito dei compositi a matrice metallica con rinforzo di particelle ceramiche è stata recentemente messa a punto una tecnologia nota come infiltrazione a pressione ambiente [1] che è risultata essere competitiva, sia dal punto di vista dei costi di processo sia dal punto di vista di alcune caratteristiche che è in grado di impartire ai prodotti; ad esempio grazie alla possibilità di garantire percentuali di rinforzo molto elevate (fino al 75%) impossibili da ottenere attraverso le tecniche tradizionali tipo metallurgia delle polveri o squeeze casting. Tale tecnologia in origine ha trovato riscontro principalmente per la produzione di compositi a matrice di alluminio e rinforzo di particelle di SiC destinati al settore elettronico (es. contenitori ermetici per componenti elettronici, supporti di circuiti compatti, substrati, etc.) mentre è recentissima l'applicazione di questi materiali anche in componenti strutturali. Ci apre la possibilità di estendere l'utilizzo di tali materiali in settori quali quello automobilistico, aeronautico e dei trasporti in generale, laddove, cioè, la riduzione del peso del componente, resa possibile dalla scelta del materiale composito rispetto al metallo o alla lega metallica tal quale, si traduce in un risparmio energetico, in un minore inquinamento ambientale e non per ultimo in un risparmio economico.

Come tutte le tecnologie di più recente messa a punto anche la tecnica dell'infiltrazione a pressione ambiente necessita di una serie di verifiche e di valutazioni dei risultati conseguibili. In particolare la possibilità di rinforzare i compositi a matrice di alluminio con elevate percentuali di rinforzo non può prescindere da una attenta valutazione della loro resistenza a frattura.

Partendo da questi presupposti nel presente lavoro sono stati sottoposti a caratterizzazione meccanica e microstrutturale tre materiali compositi ottenuti con la tecnica dell'infiltrazione a pressione ambiente, inoltre si è voluto indagare l'effetto della permanenza in temperatura di tali materiali sulla microstruttura e sul comportamento a frattura così da poter valutare la possibilità di estenderne l'utilizzo in componenti meccanici destinati ad operare anche a temperature superiori a quella ambiente.

## 2. Metodologie sperimentali

I materiali studiati sono tre compositi ottenuti mediante la tecnica di infiltrazione a pressione ambiente aventi la seguente composizione:

- composito con matrice di Al<sub>20</sub>Si<sub>5</sub>Mg rinforzato al 70% in volume con particelle SiC, fornito sotto forma di lastra di spessore pari a 1,8 mm;
- composito con matrice di Al<sub>20</sub>Si<sub>5</sub>Mg rinforzato al 65% in volume con particelle SiC, fornito sotto forma di lastra di spessore pari a 3,2 mm;
- composito con matrice di Al<sub>10</sub>Mg rinforzato al 60% in volume con particelle Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, fornito in barra a sezione quadrata di lato 30 mm.

La caratterizzazione a frattura è stata effettuata mediante prove di tenacità eseguite su campioni SENB aventi lo spessore delle lastre di partenza per quanto riguarda i compositi rinforzati con SiC e spessore di 8 mm per il composito rinforzato con Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; per tutti i campioni l'altezza è stata mantenuta pari a 10 mm. In una prima sede di prove, dopo alcuni tentativi senza successo di far propagare in fatica o con metodi alternativi una precricca i campioni sono stati intagliati con una lama diamantata; si è in tal modo ottenuto, al posto della precricca di fatica richiesta dalle normative applicabili ai materiali compatti, un intaglio con raggio di fondo pari a 0,1 mm, in base anche alla considerazione che molti Autori frequentemente riportano che raggi di fondo intaglio di piccole dimensioni hanno per lo più la medesima efficacia di una precricca.

Nel seguito, e solamente per i compositi rinforzati con SiC dei quali si aveva ancora materiale a disposizione, si è potuta ottenere la propagazione stabile di una cricca facendo ricorso ad una metodologia recentemente messa a punto [2].

Le prove sono state completate da osservazioni frattografiche volte ad indagare i meccanismi di cedimento.

Si è quindi voluto studiare l'effetto della permanenza in temperatura sulla microstruttura e sulla resistenza a frattura di questi materiali, sottoponendoli a riscaldamento in aria alle temperature di 180°C, 280°C, 380°C e 480°C per tempi di 1, 10 e 100 h e ad una temperatura di 580°C per tempi più brevi di 5, 15 e 30 minuti cos" da accelerare la cinetica delle reazioni senza danneggiare la matrice. Tutti i materiali, dopo permanenza in temperatura, sono stati osservati al microscopio ottico e successivamente si sono rilevate durezza e tenacità alla frattura di quei campioni che a livello microstrutturale sono risultati essere i più significativi.

## 3. Risultati sperimentali

La microstruttura dei tre materiali sottoposti a prova è riportata nella figura 1; i compositi rinforzati con SiC (Fig. 1a – 70% SiC, rappresentativa anche del composito al 65% di SiC) sono caratterizzati da una forte variabilità delle dimensioni delle particelle rinforzanti (da 3 a 65 µm) con predominanza delle particelle delle dimensioni maggiori e con una distribuzione omogenea delle particelle senza addensamenti e contatti tra di esse, indice di una buona bagnabilità della lega che costituisce la matrice e di una infiltrazione ben riuscita.

Nel caso del composito rinforzato con Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Fig. 1b), rispetto ai materiali precedenti, si osservano dimensioni medie delle particelle più piccole ed una loro tendenza a formare agglomerati nei quali è elevato il contatto tra le particelle medesime.

Su questi materiali sono state preliminarmente eseguite delle prove di durezza, ottenendo valori HRN pari a 72 per entrambi i compositi rinforzati con SiC e a 46,7 per quello contenente particelle di Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; i risultati di tali prove confermano, come prevedibile, che all'aumentare della percentuale di rinforzo la durezza del composito rinforzato al SiC aumenta sensibilmente, inoltre si osserva che il composito rinforzato con Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, avendo una percentuale di rinforzo confrontabile con quello al 65% di SiC, presenta rispetto a quest'ultimo una durezza molto inferiore dovuta alla minore durezza propria del rinforzo stesso; è stata inoltre effettuata un'analisi microstrutturale allo scopo di rilevare le dimensioni delle particelle rinforzanti nonché la loro distribuzione nella matrice metallica.

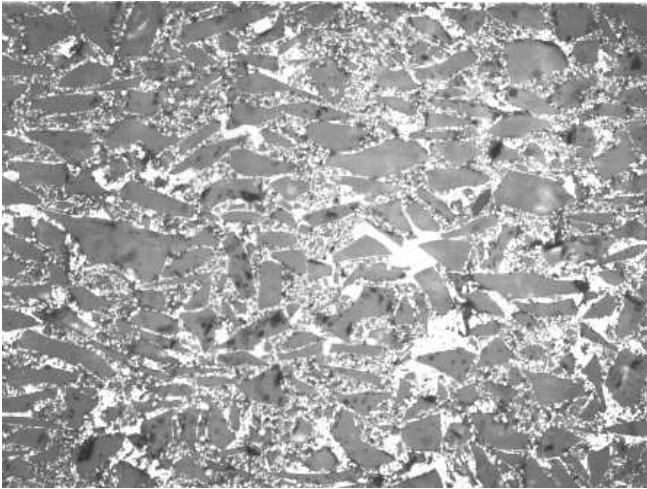
I risultati delle prove di tenacità alla frattura sono riassunti nella tabella 1.

Tabella 1

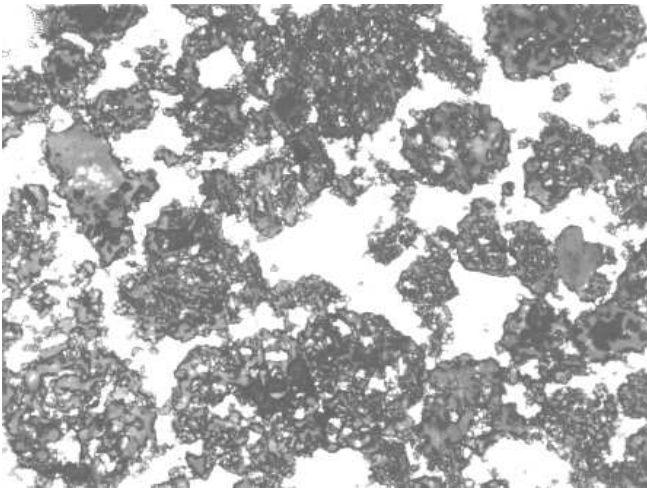
Tenacità alla frattura  $K_{Ic}$  [ $MN/m^{3/2}$ ]

Materiale	Precricca	intaglio	Valori pubblicati [3,4]
Al/70%SiC	5,8-6,2	8,3	9-10

Al/65%SiC	9,8	8,3	9
Al/60%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	---	9,3	15,1 (Al7Mg)



a)



b)

*Figura 1*

*Microstruttura dei compositi studiati: a) Al/70%SiC, b) Al/60%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>*

I valori di tenacità alla frattura ottenuti, oltre ad essere sufficientemente concordi con quelli riportati nella letteratura [3,4] sono anche allineati con la tendenza che si evince dalla variazione della tenacità alla frattura dei compositi a matrice di alluminio in funzione della frazione in volume del rinforzo [5], come messo in evidenza nella figura 2.

Allo stesso tempo si può anche concludere che il raggio di fondo intaglio impiegato nei campioni non precrickati ha in effetti la medesima efficacia di una precricka in quanto i valori di tenacità alla frattura ottenuti sottoponendo a prova i campioni intagliati si situano sia al di sopra che al di sotto rispetto a quelli misurati con i campioni precrickati. Da questo punto di vista quanto verificato con le prove effettuate è in accordo con le conclusioni cui sono pervenuti altri Autori [6,7].

In conseguenza di quanto sopra considerato si può pertanto ritenere che i dati ottenuti per i campioni di composito rinforzato con SiC, compresi quelli riportati in letteratura, siano tutti appartenenti alla medesima popolazione; in tal modo il valore medio per i due compositi rinforzati rispettivamente con una frazione in volume del 65% e del 70% di SiC si otterrebbe una tenacità alla frattura  $K_{Ic}$  pari a 9,4 e 7,9 MN/m<sup>3/2</sup>, con una deviazione standard di 0,9 e 1,8. Questi valori, se da un lato sono in accordo con quanto osservabile dai dati di letteratura (Fig. 2) circa la correlazione fra tenacità alla frattura e frazione in volume di rinforzo, dall'altro lato mostrano un incremento di variabilità al crescere della frazione in volume, in modo difforme da quanto emerge dai dati di letteratura.

A questo riguardo si può tuttavia considerare che il numero di prove effettuate è troppo piccolo per poter fare considerazioni di carattere statistico, tenuto anche conto del fatto che la variabilità dei risultati delle prove di tenacità alla frattura su materiali compositi a matrice di alluminio sembrerebbe essere maggiore nel caso di campioni contenenti una precricca rispetto a campioni intagliati [7].

Tuttavia si può anche tentare di correlare la variabilità riscontrata con le differenti condizioni sperimentali con le quali i dati sono stati ottenuti ed in particolare al diverso spessore utilizzato per i due materiali rinforzati con SiC. Infatti, si può in primo luogo ritenere che le condizioni di instabilità nei confronti della frattura si verifichino allorché all'apice della precricca o dell'intaglio si raggiunge un determinato livello di danneggiamento del materiale.

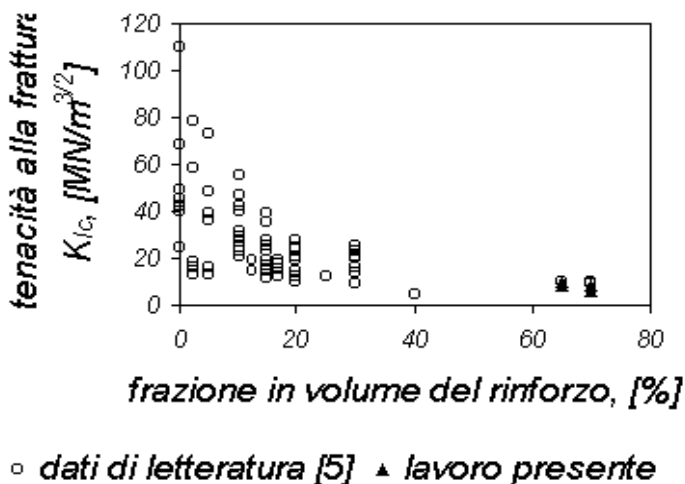


Figura 2

Tenacità alla frattura di compositi a matrice di alluminio rinforzati con particelle di SiC

In effetti i materiali compositi al crescere della deformazione mostrano un progressivo incremento del danneggiamento interno inteso come numero di siti dove si osservano o decoesione delle particelle o frattura delle stesse [5] e pertanto è pensabile che lo stesso tipo di danneggiamento venga accumulato all'apice della precricca o dell'intaglio al procedere della sollecitazione applicata al campione. Allo stesso tempo si deve anche considerare che l'osservazione delle superfici di frattura mette in evidenza l'assenza delle caratteristiche tipiche che inquadrano una frattura come dipendente da un meccanismo di tipo "weakest link". Di conseguenza si può pensare che per i materiali compositi ad alta percentuale di rinforzo quali quelli studiati il meccanismo che controlla la frattura sia paragonabile a quello individuato per gli acciai ferritici nella zona bassa della transizione, vale a dire un meccanismo di danneggiamento critico [8] secondo il quale non è il danneggiamento di un singolo punto, quello più debole, a causare la frattura fragile, bensì l'attivazione di un certo numero critico di siti.

L'approccio statistico proposto da Landes [8] per interpretare la variabilità della tenacità alla frattura fragile quando il meccanismo che la controlla è quello che prevede il raggiungimento di un danneggiamento critico porta a concludere che le deviazioni standard della tenacità alla frattura misurata con due popolazioni di campioni di spessore differente sono diverse e sono fra loro in relazione secondo la seguente equazione:

$$\sigma_2 = \sigma_1 \sqrt{B_1/B_2}$$

nella quale  $s$  e  $B$  sono rispettivamente deviazione standard e spessore dei campioni mentre gli indici 1 e 2 si riferiscono alle due popolazioni di campioni. Di conseguenza la deviazione standard di una popolazione di risultati ottenuti con campioni di più piccolo spessore risulta più elevata per campioni di più piccolo spessore.

Nel caso dei campioni utilizzati per il presente lavoro la differenza di spessore porta ad avere una differenza della deviazione standard del 33% superiore per i campioni in composito rinforzato con il 70 % di SiC rispetto a quelli rinforzati con il 65%. Tale differenza non spiega completamente la maggiore variabilità misurata; tuttavia per poter accertare in modo più accurato quale possa effettivamente essere l'influenza dello spessore sulla variabilità delle misure di tenacità alla frattura di compositi a matrice di alluminio che vadano soggetti a frattura fragile con un meccanismo di danneggiamento critico sono state programmate prove con popolazioni di campioni di sufficiente numerosità.

Per quanto concerne la tenacità alla frattura del composito rinforzato con particelle di  $Al_2O_3$  nella Fig. 3 il valore ottenuto è

posto a confronto con quello di compositi con matrice uguale o simile e con percentuali simili di rinforzo. Il dato ottenuto mostra un comportamento più fragile rispetto a quello che ci si potrebbe attendere dal confronto con i valori di letteratura; tuttavia a questo riguardo si è potuto accertare che nel caso dei campioni utilizzati la microstruttura presenta, come mostrato nella Fig. 1b, particelle di rinforzo con dimensioni medie piccole e che tendono a formare agglomerati nei quali è elevato il contatto tra le particelle medesime, mentre per i compositi dei quali è riportata in letteratura una tenacità alla frattura più elevata le particelle di rinforzo sono simili a quelle osservate nei materiali utilizzati per le prove contenenti SiC.

L'effetto peggiorativo della formazione di agglomerati e della presenza di estese aree di contatto fra le particelle di rinforzo sulla tenacità alla frattura è ben documentata in letteratura [5] e giustifica in maniera esauriente la bassa resistenza alla frattura fragile riscontrata per il composito rinforzato con particelle di Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> studiato.

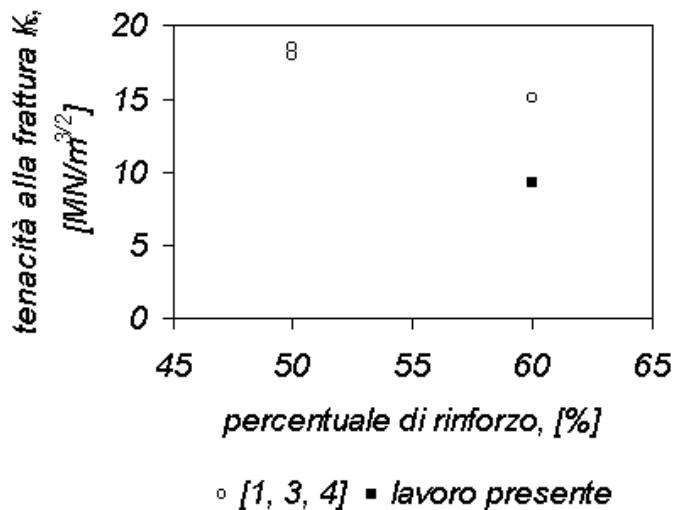


Figura 3

Tenacità alla frattura di compositi a matrice di alluminio rinforzati con particelle di Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

#### 4. Conclusioni

Si sono sottoposti a prova di tenacità alla frattura materiali compositi a matrice di alluminio rinforzati con un'elevata frazione in volume di particelle di SiC o di Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, prodotti con la tecnica della infiltrazione a pressione atmosferica.

La tenacità alla frattura misurata è stata confrontata con i valori riportati in letteratura. Nel caso dei compositi rinforzati con SiC i bassi valori ottenuti per il materiale rinforzato con il 70% di particelle è stato interpretato sulla base di una maggiore variabilità dei dati connessa con l'impiego di una precricca nei campioni e con la crescente deviazione standard che caratterizza le popolazioni di valori di tenacità alla frattura al diminuire dello spessore nel caso di frattura fragile governata da un meccanismo di danneggiamento critico. La più bassa tenacità alla frattura del composito rinforzato con particelle di Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> rispetto ai valori di letteratura è invece stata messa in relazione alla differente microstruttura ed in particolare alla presenza di agglomerati di particelle e di estese aree di contatto fra le medesime.

E' infine stata utilizzata con successo una nuova metodologia di precricatura recentemente proposta.

#### 5. Bibliografia

- [1] A. W. Urquhart, "Novel reinforced ceramics and metals: a review of Lanxide's composite technologies", *Material Science and Engineering*, A144 (1991), 75 – 82
- [2] V.M. Sglavo et al., comunicazione privata
- [3] "High-reinforcement-content metal matrix composites", *Automotive Engineering*, June 1995, 83-85
- [4] G.H. Schiroky, D.V. Miller, M.K. Aghajanian, A.S. Fareed, "Fabrication of CMCs and MMCs using Novel Processes", *Key Engineering Materials Vols.127 – 131*, (1997), 141-152

[5] J.J. Lewandowski, P.M. Singh, "Fracture and fatigue of DRA Composites", ASM Handbook, vol.19, 895 –904

[6] R. Ragazzini, E. Di Russo, F. Pinna, F. Zanada, in "I compositi a matrice metallica: fabbricazione, proprietà e applicazioni", Milano, AIM, 1992, 169-189

[7] M. Fontana, E. Gariboldi, G. Silva, M. Vedani, "Proprietà meccaniche di leghe estruse in alluminio rinforzate con particelle di allumina", La Metallurgia Italiana, 87, 8-9, 1995, 413-419

[8] J.D. Landes, "A two criteria statistical model for transition fracture toughness", Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct., 16, 11, 1993, 1161-1174

## Atti del convegno

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

Versione HTML realizzata da

