

ANALISI DELLA RESISTENZA A FRATTURA DI UN GIUNTO INCOLLATO IN PRESENZA DI UN DIFETTO ALL'INTERFACCIA

M. Alfano, F. Furgiuele, C. Maletta

Dipartimento di Meccanica, Università della Calabria, Via Ponte P. Bucci 44c - 87030 Arcavacata di Rende (CS), e-mail: alfano@unical.it, furgiuele@unical.it, carmine.maletta@unical.it

SOMMARIO

Nel presente lavoro viene valutata la resistenza all'adesione di giunti incollati realizzati con una resina epossidica strutturale in presenza di un difetto all'interfaccia. Gli esperimenti sono stati condotti utilizzando un provino Cracked Lap Shear (CLS) testato a flessione su quattro punti. La tenacità a frattura è stata espressa mediante il fattore critico di intensificazione delle tensioni complesso. In particolare, il modulo è stato valutato a partire dal carico critico mediante una soluzione analitica mentre la fase è stata determinata sulla base di una serie di analisi agli elementi finiti condotte con un codice di calcolo commerciale. Le superfici di frattura sono state infine esaminate al microscopio ottico.

ABSTRACT

The aim of the present paper is to evaluate the interfacial fracture toughness of an Al/Epoxy adhesive system with a crack lying at the interface. A cracked lap shear specimen loaded in four point bending is adopted and the fracture toughness is pointed out in terms of the critical complex stress intensity factor. To this aim, an analytical solution for the modulus of the complex SIF was used while finite element analyses of the fracture specimen have been carried out in order to extract the mode mixity. In addition, fracture surfaces are analyzed and the locus of failure is discussed.

1. INTRODUZIONE

L'utilizzo di giunti incollati nell'industria elettronica, automobilistica ed aerospaziale è in costante crescita grazie ai numerosi vantaggi offerti rispetto alle tradizionali tecniche di giunzione: riduzione di costi e peso, possibilità di incollare materiali differenti, ecc. Generalmente, la resistenza dei giunti incollati viene misurata mediante prove standardizzate, quali il single lap joint test, il peel test, ecc. Queste prove consentono di simulare le geometrie e gli stati tensionali che si incontrano in servizio, assumendo però che lo strato adesivo sia privo di difetti [1]. Tuttavia, al contrario, i giunti incollati presentano dei difetti, che possono insorgere generalmente durante il processo di fabbricazione o in condizioni di esercizio, e la resistenza del giunto dipende dalla posizione di tali difetti e dal percorso che essi seguono durante la fase di crescita [2-4]. La tipologia di difetto riscontrato più frequentemente si verifica all'interfaccia ed è rappresentato da vuoti o contaminazioni delle superfici dei substrati. Di conseguenza, la conoscenza della tenacità a frattura interfacciale è fondamentale durante la fase di progettazione e per tale motivo numerose ricerche sono state avviate in questo campo negli ultimi decenni [5-7]. Scopo del presente lavoro è dunque quello di investigare la resistenza a frattura di giunti Alluminio-Resina epossidica. In particolare, è stato utilizzato un provino

Cracked Lap Shear (CLS) caricato in flessione su quattro punti e la tenacità a frattura è stata espressa in termini del fattore di intensificazione delle tensioni complesso, $\tilde{K} = Ke^{i\psi}$ [8]; le superfici di frattura sono state analizzate al microscopio ottico.

2. PROCEDURA DI PREPARAZIONE DEI PROVINI

Il provino utilizzato nel presente studio è un Cracked Lap Shear (CLS) le cui dimensioni sono mostrate in Fig. 1. I substrati sono in lega di alluminio (6061-T6) mentre la resina epossidica utilizzata è la Loctite Hysol® 3422 A&B (Henkel-Germania). Il modulo di Young ed il coefficiente di Poisson dei substrati in alluminio, forniti dal produttore, sono rispettivamente $E_s=70\text{GPa}$ e $\nu_s=0.33$ mentre quelli dell'adesivo, rilevati sui cataloghi Henkel, sono $E_a=1.3\text{GPa}$ e $\nu_a=0.35$. Considerato che la resistenza all'adesione è sensibile alle condizioni superficiali del materiale da incollare, il substrato è stato trattato con tela abrasiva di allumina e sgrassato con acetone. In tal modo si previene la formazione di ossidi superficiali e si migliora il contatto molecolare tra adesivo e substrato durante l'incollaggio. Al fine di evitare la contaminazione delle superfici trattate da parte degli agenti atmosferici, i substrati sono stati incollati immediatamente dopo i trattamenti superficiali. Un pre-crack iniziale ($a_0=25\text{ mm}$) è stato introdotto inserendo un sottile nastro in Teflon® all'interfaccia tra adesivo e substrato (Fig. 1); ciò permette di riprodurre in modo accettabile i difetti che generalmente si verificano in condizioni di esercizio. Infine, inserendo degli spessori nelle estremità del provino è stata ottenuta una linea di giunzione di spessore 0.2 mm. Tutti i provini sono stati testati dopo una stagionatura di 24 h in aria a temperatura ambiente (25°C).

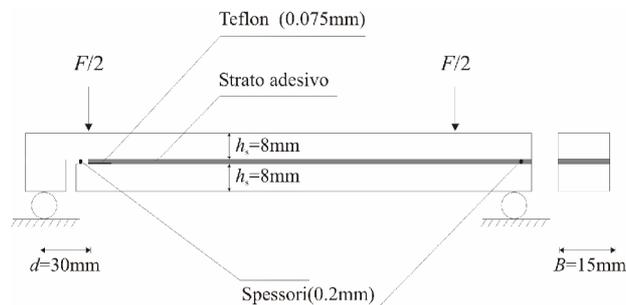


Fig. 1: Geometria e dimensioni del provino cracked lap shear (accuratezza di $\pm 0.02\text{ mm}$)

2. VALUTAZIONE DEI PARAMETRI DI FRATTURA

2.1 Determinazione analitica dell'energia di rilascio

I provini realizzati sono stati sollecitati a flessione su quattro punti (Fig. 1). Analogamente a quanto riportato in [9], esiste, per questo tipo di procedura di prova, un valore stazionario dell'energia di rilascio, G_{ss} , che risulta indipendente dalla lunghezza del difetto. In particolare, il legamento, per un difetto all'interfaccia posizionato tra le due linee di carico interne, è soggetto ad un momento per unità di lunghezza costante e pari a $M=Fd/2B$, dove con F è stato indicato il carico applicato, con d il braccio del momento e con B lo spessore del provino. L'energia di rilascio G_{ss} può dunque essere ottenuta come differenza tra l'energia di deformazione valutata nella sezione priva di difetto ed in quella in cui sia presente il difetto. Dalla teoria delle travi di Eulero-Bernoulli, l'energia di deformazione per unità di area, U , può essere espressa come $M^2/2EI$, pertanto G_{ss} assume la seguente forma

$$G_{ss} = \frac{M^2}{2E_s} \left(\frac{1}{I_c} - \frac{1}{I} \right) \quad (1)$$

dove I_c è il momento d'inerzia per unità di lunghezza della sezione in cui è presente il crack, I è il momento d'inerzia per unità di lunghezza dell'intero provino mentre \bar{E}_s è pari a E_s in condizione di stato piano di tensione e a $E_s/(1-\nu_s^2)$ in stato piano di deformazione.

Il campo di tensione in prossimità dell'apice del difetto all'interfaccia è caratterizzato dalla presenza di una singolarità oscillatoria del tipo $r^{-1/2+i\varepsilon}$ [8]; dove r rappresenta la distanza dall'apice del difetto, ε l'indice di oscillazione definito come $\varepsilon = 1/(2\pi) \ln[(\kappa_1/\mu_1 + 1/\mu_2)/(\kappa_2/\mu_2 + 1/\mu_1)]$, $\kappa_i = 3 - 4\nu_i$ in stato piano di tensione e $\kappa_i = (3 - \nu_i)/(1 + \nu_i)$ in stato piano di deformazione, mentre μ_i è il modulo di elasticità tangenziale. Assumendo che prevalgano le condizioni di deformazione piana all'apice, per il sistema bimateriale considerato ε è pari a 0.072. Inoltre, a causa della differenza tra le proprietà elastiche dei materiali che formano l'interfaccia, si ha un problema in condizioni di modo misto di apertura, qualunque sia il tipo di carico applicato. Pertanto, per esprimere la resistenza all'adesione del giunto devono essere determinati il modulo del valore critico del fattore di intensificazione delle tensioni complesso, K , e la sua fase ψ' . In particolare, il modulo di K è correlato all'energia di rilascio dalla seguente relazione

$$G_{ss} = \frac{\bar{E}_s + \bar{E}_a}{2 \cosh^2(\pi\varepsilon) \bar{E}_s \bar{E}_a} K^2 \quad (2)$$

mentre ψ' può essere determinato mediante un'analisi agli elementi finiti, come descritto nella sezione successiva. Per evitare che l'angolo di fase ψ' dipenda dalla distanza dall'apice del difetto è stata effettuata la correzione suggerita da Rice [8], che scala il fattore di intensificazione delle tensioni complesso di una lunghezza fissa caratteristica l ; in pratica si moltiplica \tilde{K} per il fattore $l^{i\varepsilon}$ ($\tilde{K}l^{i\varepsilon} = Ke^{i\psi}$). Si sottolinea, infine, che la singolarità oscillatoria porta alla conclusione fisicamente inaccettabile che le facce del difetto si compenetrino in prossimità dell'apice. Tuttavia, essendo stato dimostrato [8] che la dimensione della zona di compenetrazione è molto piccola, la soluzione è in grado di descrivere adeguatamente il campo di tensione.

2.1 Simulazioni agli elementi finiti

L'energia di rilascio e l'angolo di fase del SIF complesso sono stati determinati utilizzando un modello piano agli elementi finiti del provino. Il modello FE è stato ottenuto utilizzando il codice commerciale ABAQUS®. Sono stati utilizzati, per l'intero dominio, elementi ad otto nodi considerando un comportamento lineare elastico per il materiale. Le analisi sono state condotte assumendo condizioni di stato piano di deformazione all'apice del difetto, per via del ridotto spessore dello strato di adesivo rispetto allo spessore del provino. Inoltre, la notevole differenza tra i moduli elastici dei due materiali, che formano l'interfaccia, di fatto impedisce lo sviluppo della deformazione trasversale. Il software agli elementi finiti utilizzato in questo lavoro è dotato di routine che forniscono il valore del J -integral e le componenti del SIF complesso [10]. I valori dell'energia di rilascio sono stati confrontati con quelli ottenuti analiticamente dall'Eq. 1. In particolare, l'energia di rilascio ottenuta dal modello FEM, G_{FEM} , normalizzata rispetto a G_{ss} , è riportata in Fig. 2 al variare della lunghezza del difetto adimensionalizzata, a/d .

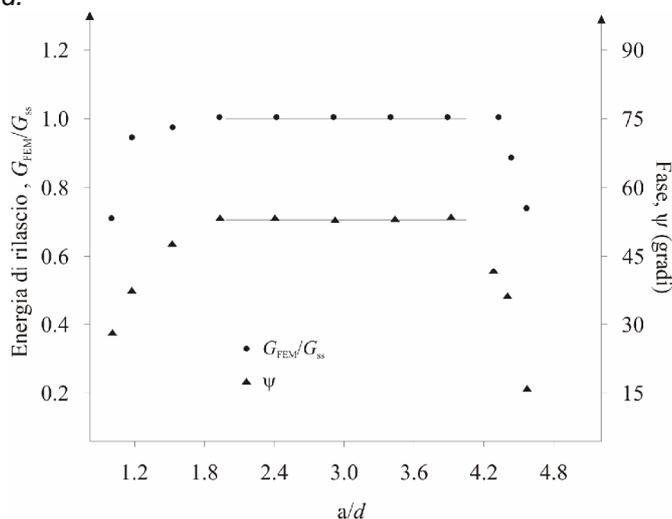


Fig. 2: Energia di rilascio e angolo di fase del SIF complesso ottenuto dal modello FE del provino ($l=h_a$).

Nella stessa figura è anche riportata la fase del SIF complesso, dove è stata scelta come lunghezza caratteristica lo spessore dello strato adesivo, $l=h_a$; ciò ha permesso di ottenere una rappresentazione non ambigua dell'angolo di fase. I risultati numerici e analitici risultano in ottimo accordo tra di loro. Inoltre, sia G che ψ assumono un valore pressoché stazionario per lo stesso intervallo di valori della lunghezza del difetto, ovvero per $a=2\div4 d$. Il valore stazionario dell'angolo di fase per il CLS è pari a circa 53° . Tuttavia, differenti valori dell'angolo di fase possono essere ottenuti modificando lo spessore relativo dei substrati.

3. RISULTATI

Le prove sono state condotte a temperature ambiente con una macchina universale di prova materiali elettro-idraulica Instron 8500. Le prove sono state eseguite in controllo di spostamento con la velocità di avanzamento del pistone di 0.06 mm/min; inoltre le superfici dei perni di carico sono state lubrificate per ridurre l'attrito. Le prove hanno mostrato una frattura di tipo stick-slip caratterizzata da propagazione rapida ed instabile e dal successivo arresto; il difetto iniziale propaga in modo chiaro lungo l'interfaccia. Le fluttuazioni periodiche del carico fanno sì che la risultante curva carico-spostamento del pistone presenti un tipico andamento a dente di sega (Fig. 3). Inoltre, la curva $F-\delta$ non si discosta dall'andamento lineare prima della frattura, a parte il tratto iniziale in cui vengono recuperati i giochi del dispositivo di prova. Questo indica che i fenomeni non-lineari avvengono su una scala più piccola rispetto alle dimensioni del provino. I valori di $(F_i)_{\max}$ e $(F_i)_{\min}$ mostrati in Fig. 3 rappresentano rispettivamente i valori del carico necessari alla propagazione e all'arresto del difetto. I valori medi di questi ultimi sono stati assunti come carichi critici per il calcolo della resistenza a frattura del giunto, ed hanno permesso il calcolo del modulo della tenacità a frattura del giunto bi-materiale: $K_{Ic}=0.267 \pm 3\% \text{ MPa m}^{1/2}$ ($\psi=53^\circ$).

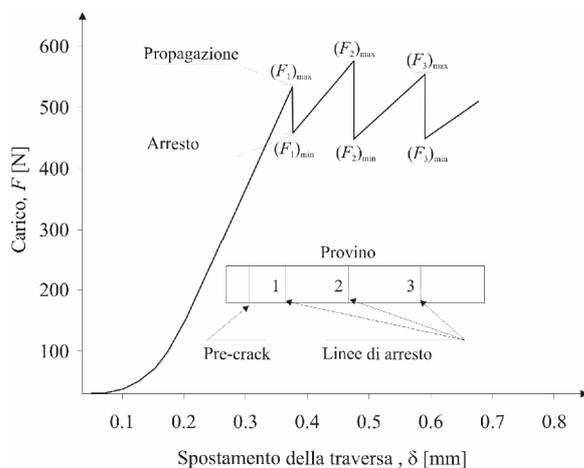


Fig. 3: Tipica curva carico-spostamento con andamento a 'dente di sega' registrata durante gli esperimenti

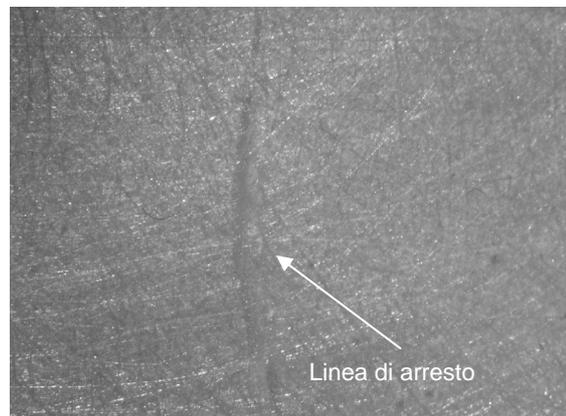


Fig. 4: Superfici di frattura: ingrandimento in prossimità della linea di arresto (micrografia ottica a 50 X)

Le superfici di frattura sono state analizzate al microscopio ottico per valutarne la modalità di rottura (Fig. 4). Le linee di arresto del difetto sono chiaramente visibili. E' interessante notare che, a parte le caratteristiche sopra menzionate, le superfici di frattura non presentano alcun segno caratteristico, in particolare la loro morfologia lascia pensare all'assenza di meccanismi di tenacizzazione. Dal momento che il principale contributo alla resistenza a frattura è dovuto all'energia dissipata plasticamente all'apice del difetto, si può concludere che la frattura è avvenuta sostanzialmente in modo fragile. Questo è quello che si verifica generalmente per le resine epossidiche testate a temperature ambiente [7].

4. CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

Nel presente lavoro è stata valutata la tenacità a frattura interfacciale di un sistema Alluminio-Resina epossidica con un difetto giacente all'interfaccia mediante l'utilizzo di un provino cracked lap shear caricato in flessione su quattro punti. E' stato dimostrato che per questo tipo di procedura di prova esiste una soluzione analitica per l'energia di rilascio indipendente dalla lunghezza del difetto. I risultati ottenuti hanno mostrato una dispersione bassa, cosicché è possibile affermare che le

procedure sperimentali proposte (la preparazione dei provini e l'esecuzione delle prove) risultano affidabili. Le attività future saranno volte all'analisi della resistenza all'adesione per differenti valori del modo misto e sulla selezione dei pre-trattamenti superficiali che favoriscono la frattura coesiva e quindi un tipo di cedimento che coinvolge una maggiore dissipazione energetica.

RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia il Dr. P. Mauri di Loctite H.L.A., Brugherio (MI), per la preziosa collaborazione.

BIBLIOGRAFIA

- [1] A.J. Kinloch, Adhesion and Adhesives, Science and Technology, Chapman & Hall, London 1986 (book)
- [2] A.R. Akisanya, N.A. Fleck, Int J Fracture, Vol. 58, p. 93, 1992 (journal)
- [3] B. Chen, D.D. Dillard, Int J Adhesion and Adhesives, Vol. 21, p. 357, 2001 (journal)
- [4] B. Chen, D.D. Dillard, J.G. Dillard, R.L. Clark: Int J Fracture, Vol. 114, p. 167, 2002 (journal)
- [5] J.W. Hutchinson, Z.G. Suo in Advances in Applied Mechanics, edited by J.W. Hutchinson and T. Y. Wu, Vol. 29, pp. 63-191, Academic Press, San Diego, 1992 (book)
- [6] H. Pavartareddy, D.A. Dillard, Int J Fracture, Vol. 96, p.215, 1999 (journal)
- [7] X.Q. Shi, X.R. Zhang, J.H.L. Pang, Int J Adhesion and Adhesive, Vol. 26, p.250, 2006 (journal)
- [8] J.R.Rice, ASME J App Mech, Vol. 55, p. 98, 1998 (journal)
- [9] Charalambides et al, ASME J App Mech, Vol. 56, p. 77, 1989 (journal)
- [10] ABAQUS user's manual, v6.3. Pawtucket, USA: Hibbit, HKS Inc; 2002

