

## Caratterizzazione di giunzioni metallo-ceramiche mediante risoluzione di problemi inversi in cascata

Roberto Fedele<sup>1</sup>, Valentina Casalegno<sup>2</sup>, Monica Ferraris<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale (DICA), Politecnico di Milano, Milano. E-mail: [roberto.fedele@polimi.it](mailto:roberto.fedele@polimi.it)*

<sup>2</sup> *Dipartimento di Scienza Applicata e Tecnologia (DISAT), Politecnico di Torino. E-mail: [valentina.casalegno@polito.it](mailto:valentina.casalegno@polito.it) , [monica.ferraris@polito.it](mailto:monica.ferraris@polito.it)*

*Keywords:* giunzioni, materiali ceramici, misure di campo.

**SOMMARIO.** In questa comunicazione si fa riferimento a una procedura di giunzione tra leghe di rame (Cu) e compositi a matrice di carbonio rinforzati con fibre di carbonio (CFC), utilizzata per confezionare componenti industriali. Il ricorso a tale modalità di giunzione, che prevede l'impiego di una lega brasante dopo modifica del sostrato di CFC, si rende necessario in quanto il metallo fuso sulla superficie del materiale ceramico presenta una scarsa bagnabilità, ossia ha una ridotta capacità di fluire e spandersi durante il processo di brasatura. Per caratterizzare la risposta a taglio di tali giunzioni CFC/Cu è stata sviluppata una metodologia numerico-sperimentale, che include due problemi inversi in cascata, formulati in maniera consistente: (i) il problema inverso "ottico", affrontato mediante una procedura a correlazione digitale d'immagine, che permette di ricostruire campi di spostamento piani a partire da una sequenza di immagini digitali bidimensionali; (ii) il problema inverso "meccanico", che utilizza le misure di campo sopra indicate e un modello a elementi finiti per stimare i parametri meccanici della giunzione.

### 1 INTRODUZIONE

Tra vari materiali compositi di interesse ingegneristico, quelli a matrice ceramica risultano adatti in misura particolare a quelle applicazioni che richiedono tolleranza al danneggiamento e stabilità alle alte o altissime temperature. Per applicazioni aerospaziali e nel campo dell'energia, i materiali con il maggiore potenziale sono indubbiamente i compositi a matrice ceramica rinforzati con fibre (Ceramic Matrix Composites, CMC), capaci di sopravvivere in condizioni estreme, ove non solo l'alta temperatura ma anche l'usura, la corrosione e l'applicazione di carichi variabili e ripetuti rappresentano le condizioni di servizio, si veda in proposito.

In particolare, i CMC sono stati sviluppati per applicazioni energetiche avanzate e nel settore nucleare (in centrali a fissione e fusione) a motivo della loro tolleranza alle radiazioni, della bassa suscettibilità all'attivazione neutronica e del basso calore di decadimento, accompagnati da una bassa permeabilità ai sottoprodotti di fusione (come il Trizio). Tra i CMC, i compositi a matrice di carbonio rinforzati con fibre in carbonio (Carbon Fibre reinforced, carbon matrix Composites, CFC) sono capaci di dissipare grandi flussi di calore svolgendo al contempo importanti funzioni strutturali.

Per rispondere a tutte queste esigenze, è ovviamente necessario realizzare componenti di forma complessa, non sempre ottenibili mediante sinterizzazione diretta, o solidarizzare materiali con caratteristiche molto diverse. È pertanto imprescindibile per un vasto utilizzo di tali materiali

disporre di procedure di giunzione efficaci, atte a solidarizzare parti ceramiche fra loro o con altre parti metalliche. In lavori recenti [1-2], alcuni autori al Politecnico di Torino hanno dimostrato la possibilità di giuntare simultaneamente CFC a Cu (o alle sue leghe) utilizzando una lega brasante e un unico trattamento termico. Il metodo proposto è semplice ed economico e per ora permette la realizzazione di prototipi giuntati in geometrie “a piastrelle piane” o “a monoblocco”. Questa tecnica non richiede pressioni elevate e le temperature di lavorazione risultano più basse rispetto a procedure alternative che richiedono la fusione del rame [3]. Una bagnabilità eccellente della lega brasante sul CFC è stata ottenuta dopo avere modificato il sostrato composito mediante reazione allo stato solido con il cromo ad alta temperatura.

Una vasta campagna sperimentale è stata svolta su piccoli prototipi giuntati, sottoposti a diverse prove meccaniche a temperature ambiente, quali torsione, taglio, la prova ASTM B898, si veda anche [4]. Nei dati sperimentali così ottenuti è stata riscontrata una dispersione di ampiezza inattesa, e pertanto si sono ritenuti necessari approfondimenti ulteriori.

Durante gli ultimi dieci anni, tecniche di Correlazione di immagini digitali, atte a fornire senza contatto misure di campo molto accurate, sono state impiegate per monitorare esperimenti meccanici su una varietà di provini eterogenei a diverse scale di osservazione, sia in laboratorio che *in situ*, si veda ad es. [5]. Misure di campo cinematiche possono notevolmente arricchire le prove meccaniche solitamente equipaggiate con sensori puntuali come strain gages e LVDT, fornendo informazioni ad es. sulle “reali” condizioni al contorno imposte al provino durante la prova, che possono discostarsi da quelle nominali o ideali. In particolare, l’approccio DIC, basato su una discretizzazione alla Galerkin-elementi finiti del campo di spostamento incognito, fornisce l’informazione sperimentale in un formato coerente con quello delle analisi meccaniche della maggior parte dei codici commerciali a elementi finiti, si veda a riguardo [5-6].

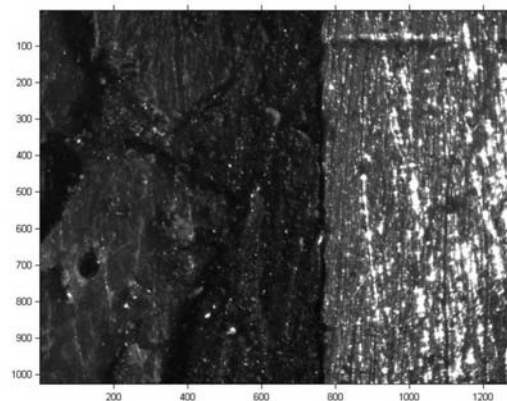


Figura 1. Superficie libera del prototipo giuntato, monitorata mediante DIC, alla fine della prova di taglio. La giunzione al centro risulta ormai rotta. La parte del provino a sinistra della giunzione è occupata dal CFC, quella a destra dal rame. Un pixel dell’immagine digitale equivale a circa 3  $\mu\text{m}$  sull’oggetto.

## 2 MODELLAZIONE MATEMATICA

Per descrivere la risposta multiassiale dell'aderente metallico (rame o sue leghe) nell'ipotesi di piccoli spostamenti e deformazioni (si veda anche [7]), si è utilizzato il modello di Ramberg-Osgood. La fase ceramica rinforzata con fibre di carbonio (CFC) mostra una marcata anisotropia, tanto nel regime elastico che in quello plastico. Una estensione anisotropa del modello Ramberg-Osgood è stata proposta di recente e può venire espressa come segue:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}_{el} + \boldsymbol{\varepsilon}_{pl} = \mathbf{C} : \boldsymbol{\sigma} + \frac{\alpha}{E_R} \begin{bmatrix} \sigma_{eq}^{n-1} \\ \sigma_0^{n-1} \end{bmatrix} \mathcal{M} : \mathbf{s} \quad (1)$$

I simboli  $\boldsymbol{\sigma}$ ,  $\mathbf{s} \equiv \boldsymbol{\sigma} - (\text{tr } \boldsymbol{\sigma}/3) \mathbf{1}$ ,  $\boldsymbol{\varepsilon}$  denotano nell'ordine il tensore di sforzo di Cauchy, la sua parte deviatorica, il tensore delle piccole deformazioni (decomposto in maniera additiva in una parte elastica e in una plastica, ovvero  $\boldsymbol{\varepsilon}_{el}$  e  $\boldsymbol{\varepsilon}_{pl}$ ), essendo  $\mathbf{1}$  il tensore identità del secondo ordine,  $\boldsymbol{\beta} : \boldsymbol{\gamma} \equiv \beta_{ij} \gamma_{ji}$  e  $\text{tr } \boldsymbol{\beta} \equiv \beta_{ii} = \boldsymbol{\beta} : \mathbf{1}$ ; con il simbolo  $\mathbf{C}$  si indica il tensore di cedevolezza elastica del quarto ordine. Lo sforzo equivalente secondo Mises viene qui definito come  $\sigma_{eq} \equiv (\mathbf{s} : \mathcal{M} : \mathbf{s})^{1/2}$ , ove  $\mathcal{M}$  è un tensore del quarto ordine che governa l'anisotropia della superficie di snervamento e la direzione del flusso plastico, in modo analogo a quanto avviene nel criterio di Hill. Nell'Equazione (1), oltre alle matrici che definiscono l'anisotropia elastica e plastica, quattro parametri,  $\sigma_0$  [MPa],  $E_R$  [MPa],  $\alpha, n$ , governano la transizione graduale dal regime elastico a quello plastico.

In notazione ingegneristica alla Voigt, la cedevolezza elastica  $\mathbf{C}$  e la matrice di anisotropia plastica  $\mathcal{M}$  (da utilizzarsi in condizioni di sforzo piano) vengono espresse come segue:

$$\mathbf{C} \equiv \begin{pmatrix} 1/E_x & -\nu_{yx}/E_y & -\nu_{zx}/E_z & 0 \\ -\nu_{xy}/E_x & 1/E_y & -\nu_{zy}/E_z & 0 \\ -\nu_{xz}/E_x & -\nu_{yz}/E_y & 1/E_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{xy} \end{pmatrix} \quad \mathcal{M} \equiv \begin{pmatrix} G+H & -H & -G & 0 \\ -H & H+F & -F & 0 \\ -G & -F & F+G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2N \end{pmatrix} \quad (2)$$

Le coordinate  $x$  and  $y$  definiscono la superficie libera del provino, sottoposta a monitoraggio ottico durante la prova, e corrispondono assieme all'asse fuori piano  $z$  alle direzioni di anisotropia del materiale ceramico. Per il CFC i parametri meccanici sono stati ricavati dalla documentazione specifica disponibile per il progetto ITER e adattati alla presente formulazione, quando necessario con integrazioni tratte dalla letteratura recente.

La risposta del giunto in condizioni di modo misto viene qui descritta mediante una relazione in termini finiti tra le componenti normali e tangenziali di tensione all'interfaccia,  $\{p_n, p_t\}^T$ , e le quantità cinematiche duali nel senso del lavoro  $\{\Delta_n, \Delta_t\}^T$  (per dettagli si consulti [8])

$$\begin{cases} p_n = \frac{\phi_n}{\delta_n} \left( \frac{\Delta_n}{\delta_n} \right) \cdot \exp \left( -\frac{\Delta_n}{\delta_n} \right) \cdot \exp \left( -\frac{\Delta_n^2}{\delta_n^2} \right) \\ p_t = \frac{2\phi_t}{\delta_t} \left( \frac{\Delta_t}{\delta_t} \right) \cdot \left( 1 + \frac{\Delta_n}{\delta_n} \right) \cdot \exp \left( -\frac{\Delta_n}{\delta_n} \right) \cdot \exp \left( -\frac{\Delta_t^2}{\delta_t^2} \right) \end{cases} \quad (3)$$

I simboli  $\phi_n$  e  $\phi_t = r \cdot \phi_n$  denotano nell'ordine il lavoro di separazione in puro modo I e quello in puro modo II;  $\delta_n$  e  $\delta_t$  indicano le aperture critiche in direzione rispettivamente normale e tangenziale, in corrispondenza delle quali le tensioni normale e tangenziale raggiungono i relativi valori di picco (solo in condizioni disaccoppiate). Tale relazione coesiva è nonlineare sin dall'origine, presenta un ramo discendente post-picco ("softening") ed è governata da soli tre parametri, ovvero il lavoro di separazione in direzione normale  $\phi_n$ , l'apertura critica in direzione normale e tangenziale,  $\delta_n$  e  $\delta_t$ , mentre il coefficiente adimensionale  $r$  viene assunto noto a priori (qui si utilizza il valore  $r=5$ ). I parametri incogniti che governano il comportamento meccanico della giunzione sono stati poi raccolti in un unico vettore  $\mathbf{X} = \{\phi_n, \delta_n, \delta_t\}^T$  prima di effettuare la procedura di identificazione, basata sulla minimizzazione di una funzione di divario.

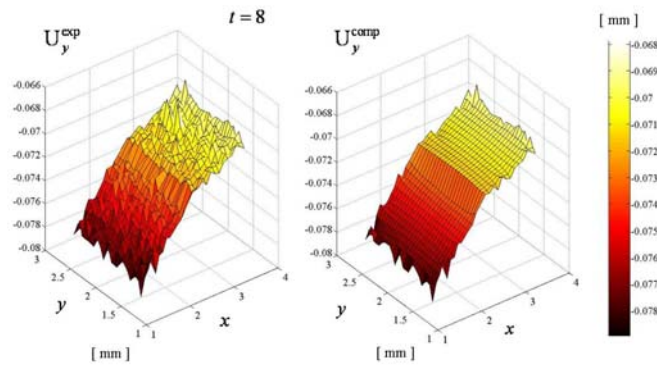


Figura 2. Campo di spostamento verticale, parallelo alla giunzione, misurato sperimentalmente mediante DIC (nel riquadro a sinistra), a confronto con quello ricostruito dal modello ad elementi finiti con i medesimi spostamenti sperimentali prescritti in modo deterministico lungo il contorno (nel riquadro a destra). Si notino a sinistra le increspature del campo di spostamenti che ammontano a 1-2  $\mu\text{m}$  e corrispondono al "rumore" sperimentale.

Il modello eterogeneo del prototipo giuntato descritto sopra è stato implementato in linguaggio Fortran 90, interfacciato con programmi in ambiente Matlab<sup>®</sup> per la procedura di identificazione, si veda in proposito [9]. Grazie a un approccio squisitamente locale, è stato possibile discretizzare esclusivamente un piccolo sottodominio rettangolare della superficie esposta del provino, di dimensioni all'incirca 2.4×1.4 [mm], che include una piccola parte della giunzione e dei due aderenti. Tale strategia ha comportato una drastica riduzione dell'onere computazionale e del

grado di complessità del modello matematico. Nelle simulazioni ad elementi finiti sono state considerate condizioni di sforzo piano. Per entrambi gli aderenti sono stati utilizzati elementi finiti isoparametrici a quattro nodi con funzioni di forma bilineari, mentre per la giunzione alla microscala si è fatto ricorso a elementi di interfaccia a spessore finito, dotati della legge coesiva in modo misto specificata nell'Equazione (3).

### 3 CONSIDERAZIONI FINALI

In questa comunicazione è stata presentata una strategia di caratterizzazione a taglio di provini giuntati CFC\Cu per applicazioni industriali, che utilizza in modo sinergico un algoritmo a correlazione per immagini digitali bidimensionali (2D DIC), un modello meccanico a elementi finiti e tecniche di identificazione dei parametri. Le giunzioni innovative sono state realizzate secondo un protocollo di recente concezione, e permettono di solidarizzare elementi in composito a matrice di carbonio rinforzato con fibre di carbonio, e altri in lega di rame.

Le difficoltà incontrate nella manipolazione e caratterizzazione di tali prototipi giuntati (all'incirca cubici, con lato di pochi centimetri), che risultano estremamente sensibili alla presenza di spigoli o di intagli, da una parte, e forniscono dati molto dispersi nelle diverse prove meccaniche (taglio, torsione, flessione a tre o quattro punti) dall'altra, hanno indirizzato le ricerche verso una metodologia numerico-sperimentale atta a stimare con accuratezza la resistenza effettiva della giunzione. Anche la presenza di condizioni al contorno incerte (con vincoli cedevoli, per lo strato di colla e la deformazione degli afferraggi in alluminio) ha motivato il ricorso a un approccio locale, centrato su un piccolo sottodominio sulla superficie del provino che viene monitorato nel corso dell'esperimento e dove i fenomeni in studio risultano predominanti. Le simulazioni a elementi finiti sono state condotte prescrivendo sul contorno esterno del sottodominio gli spostamenti (rumorosi) forniti dalla procedura DIC, mentre gli spostamenti misurati nella parte interna (in particolare nelle vicinanze della giunzione) sono stati utilizzati come quantità misurabili nella procedura di identificazione. Infine, uno studio perturbativo ha permesso di valutare in modo approssimato ma efficace la stabilità delle stime nei riguardi dell'incertezza delle proprietà degli aderenti, che nella procedura proposta sono assunte noti a priori ma che è altamente probabile risultino alterate dal processo di giunzione.

Fino ad oggi, nell'ingegneria meccanica la tensione tangenziale media è stata solitamente considerata il parametro più rappresentativo della resistenza meccanica di giunzioni innovative. La strategia qui proposta permette di ricostruire i reali profili di tensione lungo la giunzione durante la prova, rilevando anche sollecitazioni di modo misto inattese, generate ad es. dai vincoli cedevoli, pervenendo a una stima più accurata della resistenza meccanica di tali giunzioni e dell'energia che possono dissipare fino a rottura.

### 4 RINGRAZIAMENTI

Gli autori ringraziano: (i) la Fondazione CARIPLO, che attraverso il Bando "Ricerca scientifica e Tecnologica sui materiali avanzati" ha finanziato il Progetto n. 2010-0432 dal titolo: "Innovative metal-ceramic joints for high and ultra-high temperature applications (UHT)"; (ii) il Politecnico di Milano, che nel 2010 ha supportato attraverso il Bando interno per giovani ricercatori "5 per mille" il progetto "CINEMAT".

### *Bibliografia*

- [1] Salvo, M., Casalegno, V., Rizzo, S., Smeacetto, F., Ferraris, M., Merola, M., "One-step brazing process to join CFC composites to copper and copper alloy", *J Nucl. Mater.*, Vol. 374 (1-2), 69-74 (2008)
- [2] Casalegno, V., Salvo, M., Murdaca, M., Ferraris, M., "One-step brazing process for CFC mono-block joints and mechanical testing", *J Nucl Mater*, Vol. 393, 300–305 (2009).
- [3] Appendino, P., Ferraris, M., Casalegno, V., Salvo, M., Merola, M., Proposal for a new technique to join CFC composites to copper, *J Nucl. Mat.*, 348, 102-107 (2006).
- [4] ASTM D1002-05. "Apparent shear strength of single-lap-joint adhesively bonded metal specimens by tension loading [metal-to-metal]", ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2005.
- [5] Fedele, R., Galantucci, L., and Ciani, A., "Global 2D Digital Image Correlation for motion estimation in a finite element framework: a variational formulation and a regularized, pyramidal, multi-grid implementation", *Int. J. Num Meth Engn*, 96(12), 739–762 (2013).
- [6] Fedele, R., Ciani, A., Galantucci, L., Bettuzzi, M., and Andena, L., "A regularized, pyramidal multi-grid approach to global 3D-Volume Digital Image Correlation based on X-ray microtomography". *Fund Inform*, 125 (3-4), 361–376 (2013).
- [7] Belytschko, T., Liu, W. K. Moran, B. Elkhodary, K. *Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures*, Chichester, West Sussex, United Kingdom, John Wiley & Sons Inc Print on; 1 ed., 2000.
- [8] Fedele, R., Galantucci, L., Ciani, A., Casalegno, V., Ventrella, A., Ferraris, M., "Characterization of innovative CFC/Cu joints by full-field measurements and finite elements", *Mat. Science & Engn. A*, Vol. 595-C, 306-317 (2014).
- [9] Fedele, R., "Simultaneous Assessment of mechanical properties and boundary conditions based on Digital Image Correlation", *Exp. Mech.*, 55(1), 139-153, (2015).