

Effetto di z-pin sulla resistenza statica di giunzioni composite

Thursday 3 September 2026 16:15 (15 minutes)

Nelle applicazioni che coinvolgono giunzioni di elementi compositi a spessore sottile, il processo di co-curing è ampiamente preferito rispetto alle tecniche di giunzione tradizionali, in quanto migliora la capacità portante del giunto e induce una distribuzione degli sforzi più uniforme nella regione incollata. Tuttavia, la ridotta resistenza trasversale dei materiali fibro-rinforzati e le elevate tensioni di peeling e taglio che si sviluppano ai bordi dell'interfaccia incollata rendono le giunzioni composite ottenute con processi di co-curing particolarmente suscettibili allo sviluppo di delaminazioni sull'interfaccia di giunzione e, quindi al debonding. Per questo sono state proposte numerose tecniche per migliorarne la tenacità a frattura. Tra queste, lo z-pinning —che consiste nell'inserimento di sottili elementi cilindri fibrosi o metallici attraverso lo spessore del materiale non ancora indurito —si è dimostrato efficace nel migliorare le prestazioni strutturali di diverse configurazioni di giunto. La presenza dei pin contrasta la propagazione della delaminazione mediante la formazione di una zona di bridging in prossimità del fronte di avanzamento della cricca. Ciò nonostante, la maggior parte degli studi sullo z-pinning ha preso in esame schemi di rinforzo che prevedono l'inserimento di pin sull'intera regione di sovrapposizione, con conseguenti elevate densità di pin che possono compromettere le proprietà di rigidità e resistenza del materiale composito.

Per questo motivo, il presente studio esamina le prestazioni quasi-statiche e la progressione del danno in giunzioni composite del tipo step-lap (giunzioni a scalino) selettivamente rinforzate con pin z metallici. I giunti, realizzati con una sequenza di laminazione cross-ply e con una lunghezza di sovrapposizione di 40 mm, sono stati rinforzati mediante pin in acciaio inossidabile. I pin sono stati inseriti manualmente in fori realizzati con un ago di 0.5 mm di diametro

e disposti su quattro file parallele alla linea di giunzione. Giunzioni rinforzate e non-rinforzate sono state messe in sacco a vuoto e consolidate in autoclave. I pannelli ottenuti sono stati successivamente tagliati per ricavare provini rettangolari di larghezza pari a 20 mm da sottoporre a prove di trazione quasi-statica.

I risultati sperimentali indicano che la presenza dei rinforzi non modifica i meccanismi di danneggiamento che governano la rottura delle giunzioni testate. Infatti, il processo di danneggiamento delle giunzioni inizia con la formazione di delaminazioni ai bordi della linea di giunzione. Successivamente, le delaminazioni propagano attraverso la regione giuntata fino al completo debonding degli aderenti. Al fine di acquisire una comprensione più approfondita dei meccanismi di danneggiamento e di tenacizzazione indotti dai pin, è stato sviluppato un modello agli elementi finiti dei giunti per ognuna delle configurazioni di rinforzo considerate. Il comportamento della giunzione e l'interazione tra i pin e gli aderenti compositi sono stati modellati impiegando una legge di danneggiamento coesivo. Le previsioni numeriche mostrano un soddisfacente accordo con le osservazioni sperimentali in termini di resistenza ultima, curve forza-deformazione e spostamento, ed evoluzione della cricca di debonding. Il modello proposto riproduce correttamente l'effetto benefico dei pin sulla resistenza statica dei giunti e sulla loro tolleranza al danno, dimostrando che la presenza dei pin non ritarda l'innesco della delaminazione, bensì ne contrasta la propagazione riducendo il tasso di rilascio di energia —e dunque l'energia disponibile per la propagazione—al fronte della cricca.

Primary author: LOI, Gabriela (Università degli Studi di Cagliari)

Co-authors: LOI, Daniele (Università degli Studi di Cagliari); MARONGIU, Gianluce (Università degli Studi di Cagliari); AYMERICH, Francesco (Università di Cagliari - Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Chimica e dei Materiali)

Presenter: LOI, Gabriela (Università degli Studi di Cagliari)

Session Classification: Compositi

Track Classification: Materiali Compositi