

A S-N-based Cohesive Element for Delamination Propagation in Composite Materials

Anatoli A. Mitrou

Fracture in composites is composed of complex micromechanical networks of cracks. These damage mechanisms, which include fiber bridging, transverse matrix cracking, splitting, and migration, can provide a degree of resistance by redistributing the loads away from the stress concentrations and blunting the crack tips. The resulting increase in the critical energy release rate with crack extension is referred-to as a resistance curve or R-curve. The role of R-curve effects on the rate of crack propagation in fatigue is the subject of current research. An experimental study was conducted by Yao [1] to quantify the significance of fiber bridging in the delamination growth in multidirectional composite laminates by comparing quasi-static and fatigue R-curves. He observed that fatigue R-curves are less pronounced than quasi-static R-curves. Analysis methods capable of capturing R-curves are not yet mature, especially in fatigue. Yao's results were used in an effort to evaluate a recently proposed [2] cohesive zone model (CZM) for both quasi-static and fatigue. The quasi-static R-curve behavior is modeled using a cohesive layer superposition approach [3]. The model utilizes the CZM developed by Turon et al. [4] and assumes that the quasi-static cohesive law is also the envelope of the fatigue damage. The fatigue model also relies on intrinsic relationships between an S-N curve and its corresponding Paris law. Damage is assumed to accumulate at a rate dependent on the displacement jump and described by a damage accumulation function. The parameters of the model are obtained by fitting the integrated form of the damage accumulation function to an idealized S-N curve. The assessment of the numerical procedure is done by evaluating the method's ability to capture Yao's rates of crack propagation for unidirectional (UD) laminates. The analysis results indicate that the numerical model can predict slope and the offsets in the Paris law observed in the experiments for short cracks. However, as cracks lengths grow past 35 mm propagation rates are overestimated. Additional work is underway to understand this discrepancy.

Keywords

Fatigue, Fracture, Cohesive Zone Model, R-Curve, Composites

ABSTRACT (IN GREEK)

Ανάπτυξη Συνεκτικών Στοιχείων (Cohesive Elements) Βασισμένων σε Αποτελέσματα Καμπυλών Κόπωσης S-N για την Μοντελοποίηση Διαστρωματικής Αποκόλλησης σε Σύνθετα Υλικά

Ανατολή Α. Μήτρου

Η θραύση στα σύνθετα υλικά χαρακτηρίζεται από σύνθετα μικρομηχανικά δίκτυα ρωγμών. Αυτοί οι μηχανισμοί θραύσης, στους οποίους ανήκει και η γεφύρωση ινών (fiber bridging), μπορούν να προσδώσουν μια μορφή αντίστασης λόγω της ανακατανομής των φορτίων μακριά από τα σημεία συγκέντρωσης τάσεων και το άκρο της ρωγμής. Η παρατηρούμενη αύξηση στον ρυθμό απελευθέρωσης ελαστικής ενέργειας (ERR) με την αύξηση του μήκους διάδοσης της ρωγμής αναφέρεται ως καμπύλη αντίστασης ή R-curve. Η επιρροή των R-curve φαινομένων στον ρυθμό διάδοσης ρωγμών υπο κόπωση αποτελεί αντικείμενο σύγχρονης έρευνας. Ο Yao [1] εκτέλεσε πειραματική έρευνα για να ποσοτικοποιήσει το μέγεθος της επιρροής της γεφυρώσεως ινών στην ανάπτυξη διαστρωματικών αποκολλήσεων σε πολυδιευθυντικά σύνθετα και να συγκρίνει την επίδραση των R-curve φαινομένων σε ημι-στατική θραύση και θραύση υπο κόπωση. Παρατήρησε ότι η καμπύλη αντίστασης για την κόπωση ήταν λιγότερο έντονη απ' ό,τι για την ημι-στατική θραύση. Υπολογιστικές μέθοδοι ικανές να μοντελοποιήσουν καμπύλες αντίστασης (R-curves) βρίσκονται ακόμα σε πρώιμο στάδιο, ιδίως σε ό,τι αφορά στην κόπωση. Έτσι, τα αποτελέσματα του Yao χρησιμοποιήθηκαν στην προσπάθεια να αξιολογηθεί ένα πρόσφατα δημοσιευμένο μοντέλο συνεκτικών στοιχείων (Cohesive Zone Model-CZM) [2] για ημι-στατική θραύση και θραύση υπο κόπωση. Η συμπεριφορά χαρακτηριζόμενη από την R-curve μοντελοποιήθηκε χρησιμοποιώντας μια μέθοδο επαλληλίας στρώσεων συνεκτικών στοιχείων [3]. Το μοντέλο εκμεταλλεύεται το CZM που αναπτύχθηκε από τον Turon et al. [4] και υποθέτει ότι ο QS νόμος των συνεκτικών στοιχείων είναι ο φάκελος της βλάβης και για την κόπωση. Το μοντέλο για την κόπωση επίσης βασίζεται σε εγγενείς σχέσεις μεταξύ της καμπύλης S-N και τον αντίστοιχο νόμο Paris. Η βλάβη θεωρείται ότι συσσωρεύεται με ρυθμό εξαρτώμενο από την μετατόπιση και περιγράφεται με μια συνάρτηση συσσώρευσης βλάβης. Οι παράμετροι του μοντέλου υπολογίζονται από την προσέγγιση μιας κανονικοποιημένης S-N καμπύλης από την ολοκληρωτική μορφή της συνάρτησης συσσώρευσης βλάβης. Η αξιολόγηση της υπολογιστικής μεθόδου εκτελείται αξιολογώντας την ικανότητα της μεθόδου να αναπαράξει τους ρυθμούς διάδοσης ρωγμής που παρουσίασε ο Yao για UD σύνθετα. Τα

αποτελέσματα δείχνουν ότι η ανάλυση είναι ικανή να προβλέψει την κλίση και μετακίνηση των γραμμών του νόμου Paris που παρατηρείται στα πειραματικά αποτελέσματα για μικρές σε μήκος ρωγμές. Ωστόσο όταν το μήκος της διάδοσης της ρωγμής ξεπεράσει τα 35 mm οι ρυθμοί διάδοσης εκτιμώνται λανθασμένα. Επιπρόσθετη δουλειά πρέπει να γίνει ώστε να υπάρξει κατανόηση της διάκρισης αυτής.

Λέξεις κλειδιά

Κόπωση, Θραύση, Cohesive Zone Model, R-Curve, Σύνθετα

REFERENCES

1. Yao, L., Alderliesten, R., Zhao, M., and Benedictus, R., "Bridging Effect on Mode I Fatigue Delamination Behavior in Composite Laminates," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 63, 2014, pp. 103-109.
2. Dávila, C. G., Rose, C. A., Murri, G. B., Jackson, W. C., and Johnston, W. M., "Evaluation of Fatigue Damage Accumulation Functions for Delamination Initiation and Propagation," Technical Publication NASA/TP-2020-220584, Hampton, VA, April 2020.
3. Dávila, C. G., Rose, C. A., and Camanho, P. P., "A Procedure for Superposing Linear Cohesive Laws to Represent Multiple Damage Mechanisms in the Fracture of Composites," *International Journal of Fracture*, Vol. 158, No. 2, 2009, pp. 211-223.
4. Turon, A., González, E. V., Sarrado, C., Guillaumet, G., and Maimí, P., "Accurate Simulation of Delamination under Mixed-Mode Loading Using a Cohesive Model with a Mode-Dependent Penalty Stiffness," *Composite Structures*, Vol. 184, 2018, pp. 506-511.