

Στόχος της Εργασίας

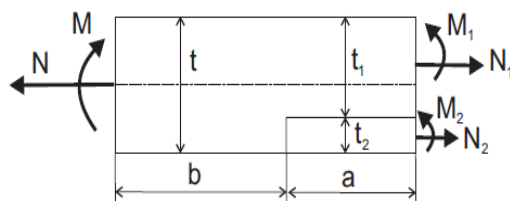
Στην παρούσα εργασία γίνεται μία βιβλιογραφική ανασκόπηση για τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση της διάδοσης μίας αποκόλλησης στρώσεων σε πολύστρωτες κατασκευές από σύνθετα υλικά. Οι τρεις κυριότερες μέθοδοι είναι η ανάλυση διάδοσης της αποκόλλησης των στρώσεων με την χρήση του Crack Tip Element, η ανάλυση εξάπλωσης διαστρωματικής αποκόλλησης με την τεχνική εικονικού κλεισίματος ρωγμής (Virtual Crack Closure Technique) και η ανάλυση ανάπτυξης της αποκόλλησης των στρώσεων με την βοήθεια συνεκτικών στοιχείων (cohesive elements). Τον τελευταίο καιρό γίνεται και μία προσπάθεια ανάπτυξης ενός μοντέλου κλειστών αναλυτικών εξισώσεων που αντικατοπτρίζουν τη μοντελοποίηση της συνεκτικής ζώνης ανάμεσα σε πολύστρωτες πλάκες για τα πειράματα Double Cantilever Beam (DCB), End-Notched Flexure (ENF).

Crack Tip Element (CTE)

Τα **crack tip elements (CTE)** προσφέρουν αναλυτικές κλειστές λύσεις για τον υπολογισμό του ρυθμού έκκλησης ενέργειας παραμόρφωσης **G** και του mode mix χρησιμοποιώντας την **θεωρία πλακών**, βασιζόμενη σε γειτονικές **δυνάμεις** και **ροπές**. Επίσης παρουσιάζεται το κριτήριο διάδοσης της αποκόλλησης FBK.

Ρυθμός Έκκλησης Ενέργειας

$$G = \frac{1}{2} (c_{11}N_c^2 + c_{22}M_c^2 + 2\sqrt{c_{11}c_{22}}N_cM_c \sin \Gamma)$$



Πηγή: *Technical Note 2: Best Practice*

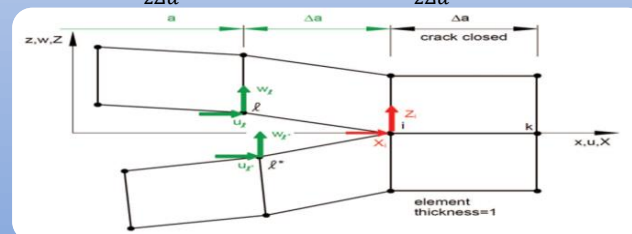
Analysis Methods -P.P. Camanho, A. Turon, C.S. Lopes, D. Trias (2010)

Virtual Crack Closure Technique (VCCT)

Η ανάλυση με την **τεχνική εικονικού κλεισίματος ρωγμής (VCCT)**, πραγματοποιείται με ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων για τον υπολογισμό του ρυθμού έκκλησης ενέργειας παραμόρφωσης **G**, προσομοιώνοντας την αποκόλληση ως **ασυνέχεια** του υλικού, χρησιμοποιώντας πεπερασμένα στοιχεία με ασύνδετους κόμβους ή με κόμβους όπου επιβάλλονται περιορισμοί αναμεσά τους. Επίσης παρουσιάζεται το κριτήριο διάδοσης της αποκόλλησης FBK.

Ρυθμός Έκκλησης Ενέργειας για 4-κόμβο 2D στοιχείο

$$G_I = \frac{1}{24\alpha} Z_i(w_l - w_l^*), G_{II} = \frac{1}{24\alpha} X_i(u_l - u_l^*)$$



Πηγή: *The Virtual Crack Closure Technique: History, Approach and Applications* -R.Krueger (2002)

Συνεκτικά στοιχεία (Cohesive elements)

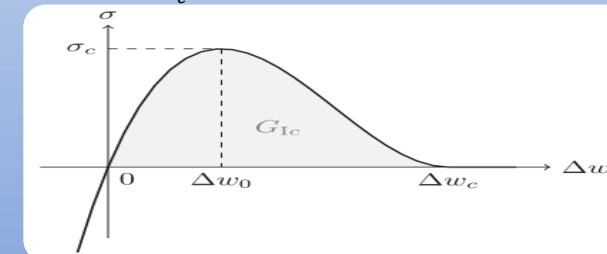
Με γνωστά τα μεγέθη, του μήκους της συνεκτικής ζώνης I_{cz} , τον αριθμό των στοιχείων **N** που θα μοντελοποιήσει αυτή την ζώνη, την διεπιφανειακή δυσκαμψία **K**, την γνώση της μορφής του **νόμου έλξης-διαχωρισμού** και τις **ιδιότητες του υλικού** μπορούμε να προσομοιώσουμε μία διαστρωματική αποκόλληση και την διάδοσή της σε ένα πακέτο πεπερασμένων με συνεκτικά πεπερασμένα στοιχεία (cohesive finite elements).

Μήκος Συνεκτικής Ζώνης

Δυσκαμψία Συνεκτικής Ζώνης

$$l_{cz} = ME \frac{G_c}{\sigma_c^2}$$

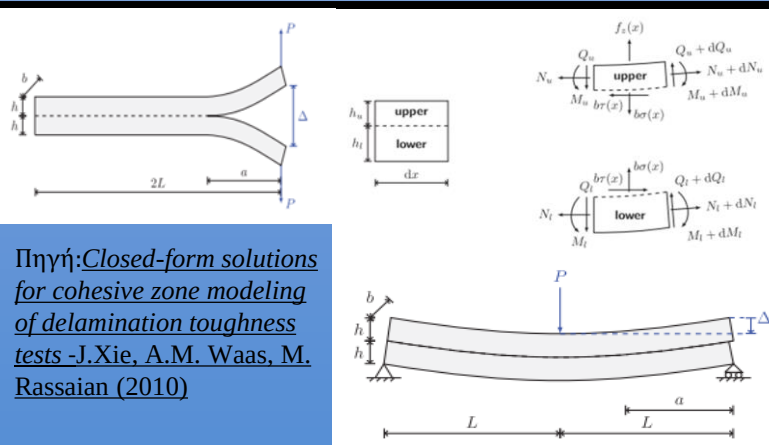
$$K = A \frac{E_3}{t}$$



Πηγή: *Closed-form solutions for cohesive zone modeling of delamination toughness tests* -J.Xie, A.M. Waas, M. Rassaian (2010)

Κλειστές-μορφές λύσεων για μοντελοποίηση της συνεκτικής ζώνης

Η μοντελοποίηση της συνεκτικής ζώνης γίνεται με την βοήθεια κλειστών αναλυτικών εξισώσεων, που υπακούουν στον τριγωνικό - διγραμμικό (bi-linear/triangular) νόμο έλξης-διαχωρισμού. Η τεχνική επίλυσης των πειραμάτων **DCB**, **ENF** με την χρήση αυτών των αναλυτικών εξισώσεων βασίζεται σε έναν αλγόριθμο, ο οποίος διαχωρίζεται σε **τρία κύρια τμήματα**, τα οποία είναι η αρχική κάμψη του δοκιμίου, η έναρξη της αποκόλλησης και η διάδοση της αποκόλλησης.



Πηγή: *Closed-form solutions for cohesive zone modeling of delamination toughness tests* -J.Xie, A.M. Waas, M. Rassaian (2010)

Συμπεράσματα

- Η μέθοδος μοντελοποίησης με τα **συνεκτικά πεπερασμένα στοιχεία** είναι η πιο ακριβής στα αποτελέσματα της αλλά είναι η πιο πολύπλοκη, είναι αργή και έχει μεγάλο υπολογιστικό κόστος
- Η **μοντελοποίηση της συνεκτικής ζώνης με αναλυτικές λύσεις** ελαχιστοποιεί το μεγάλο υπολογιστικό κόστος της χρήσης των συνεκτικών πεπερασμένων στοιχείων, είναι κατάλληλη για παραμετρικές μελέτες και προσφέρει κατανόηση του συνεκτικού νόμου.