



**ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΥΛΙΚΩΝ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΠΡΟΗΓΜΕΝΑ ΥΛΙΚΑ»**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Τσιβόλας Ελευθέριος

ΤΙΤΛΟΣ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

**ΜΕΛΕΤΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΣΥΝΘΕΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΔΙΑΣΤΑΥΡΟΥΜΕΝΩΝ
ΣΤΡΩΣΕΩΝ ΣΕ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ**

ΙΩΑΝΝΙΝΑ, ΕΤΟΣ 2018

Εσώφυλλο:

Η παρούσα Μεταπτυχιακή Διατριβή εκπονήθηκε στο πλαίσιο των σπουδών για την απόκτηση του Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης στην εξειδίκευση:

(Σύνθετα Υλικά)

που απονέμει το Τμήμα Μηχανικών Επιστήμης Υλικών του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων.

Εγκρίθηκε την 14/03/2018 από την εξεταστική επιτροπή:

ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ ΒΑΘΜΙΑ

- 1. Αλκιβιάδης Παϊπέτης**, Καθηγητής του ΤΜΕΥ του Παν/μίου Ιωαννίνων, **Επιβλέπων**
- 2. Λεωνίδας Γεργίδης**, Επίκουρος Καθηγητής του ΤΜΕΥ του Παν/μίου Ιωαννίνων
- 3. Ευάγγελος Χατζηγεωργίου**, Αναπληρωτής Καθηγητής του ΤΜΕΥ του Παν/μίου Ιωαννίνων

ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ

"Δηλώνω υπεύθυνα ότι η παρούσα διατριβή εκπονήθηκε κάτω από τους διεθνείς ηθικούς και ακαδημαϊκούς κανόνες δεοντολογίας και προστασίας της πνευματικής ιδιοκτησίας. Σύμφωνα με τους κανόνες αυτούς, δεν έχω προβεί σε ιδιοποίηση ξένου επιστημονικού έργου και έχω πλήρως αναφέρει τις πηγές που χρησιμοποίησα στην εργασία αυτή."

(Υπογραφή υποψηφίου)

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

- 1.1 Σύνθετα υλικά
- 1.2 Σύνθετα υλικά διασταυρούμενων στρώσεων
- 1.3 Μηχανισμοί αστοχίας

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΡΗΓΜΑΤΩΣΗ – (TRANSVERSE CRACKING)

- 2.1 Ανάπτυξη μαθηματικού μοντέλου με χρήση της θεωρίας shear-lag
- 2.2 Μηχανισμός ανάπτυξης ρωγμών
- 2.3 Κατανομή των τάσεων
- 2.4 Ανακεφαλαίωση του μοντέλου

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΣ SHEAR-LAG

- 3.1. Περιγραφή του μοντέλου
- 3.2 Κριτήριο ανάπτυξης εγκάρσιων ρωγμών
- 3.3 Μείωση της δυσκαμψίας κάθε στρώσης λόγω εμφάνισης εγκάρσιων ρωγμών
- 3.4 Συμπεράσματα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΕΙΡΑΜΑ ΘΡΑΥΣΗΣ ΜΙΑ ΙΝΑΣ (SINGLE FIBER FRAGMENTATION TEST)

4.1 Μέθοδοι ανάλυσης SFCE

4.1.1 Αριθμητική ανάλυση

4.2 Μοντελοποίηση της αστοχίας της ίνας και αποτελέσματα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΚΟΡΕΣΜΟΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΕΓΚΑΡΣΙΩΝ ΡΩΓΜΩΝ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ

5.1 Κορεσμός ανάπτυξης εγκάρσιων ρωγμών

5.2 Είδη προσεγγίσεων στη μοντελοποίηση

5.3 Επιλογή στοιχείων μοντελοποίησης

5.4 Πρόβλεψη αστοχίας

5.4.1 Εμφάνιση βλάβης σε σύνθετα υλικά ενισχυμένα με ίνες στο ABAQUS

5.4.2 Επέκταση της βλάβης (στάδιο , αμέσως μετά την εμφάνιση της βλάβης)

5.5 Στοιχεία μοντελοποίησης αστοχίας

5.5.1 cohesive στοιχεία και cohesive συμπεριφορά

5.5.2 Εμφάνιση και διάδοση ρωγμών με XFEM

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΚΑΙ ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

6.1 Αναλυτική παρουσίαση του μοντέλου

6.2 Επίλυση του μοντέλου

6.2.1 Εισαγωγή ρωγμών

6.2.2 Πρόβλεψη εμφάνισης εγκάρσιων ρωγμών έως τον κορεσμό

6.2.3 Προφίλ ορθών τάσεων

6.2.4 Πυκνότητα ρωγμών και τελική αντοχή του μοντέλου

6.2.5 Μέγεθος ILSS και επιρροή στη συνολική αντοχή και το μέγεθος της διεπιφανειακής αποκόλλησης

6.3 Ανακεφαλαίωση και συμπεράσματα

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

- Σχήμα 2.1 Σύνθετο υλικό με εφελκυστική αξονική καταπόνηση.
- Σχήμα 2.2 Τομή σύνθετου, ανακατανομή τάσεων μετά την εμφάνιση ρωγμής
- Σχήμα 2.3 Σύνθετο υλικό εγκάρσια ρηγματωμένο
- Σχήμα 2.4 Διαστρωματική διατμητική τάση μεταξύ δύο εγκάρσιων ρωγμών
- Σχήμα 2.5 Διαστρωματική πλευρική τάση μεταξύ δύο εγκάρσιων ρωγμών
- Σχήμα 2.6 Κανονικοποιημένη αξονική τάση μεταξύ δύο εγκάρσιων ρωγμών
- Σχήμα 2.7 Κατανομή αξονικών τάσεων στη στρώση των 90
- Σχήμα 3.1 Αναλυτική παρουσίαση του μοντέλου
- Σχήμα 3.2 Εφαρμοζόμενη συνισταμένη δύναμη κατά την εμφάνιση εγκάρσιων ρωγμών.
- Σχήμα 3.3 Μείωση παραμορφώσεων καθώς το πάχος του δοκιμίου αυξάνεται
- Σχήμα 3.4 Παραμορφώσεις συναρτήσεως του πάχους των στρώσεων των 90.
- Σχήμα 3.5 Παραμορφώσεις συναρτήσεως του πάχους των στρώσεων των 0
- Σχήμα 3.6 Μείωση δυσκαμψίας λόγω αύξησης πυκνότητας ρωγμών
- Σχήμα 4.1 Σχηματική περιγραφή του πειράματος SFCT
- Σχήμα 4.2 Γεωμετρία και συνοριακές συνθήκες μοντέλου
- Σχήμα 4.3 Διακριτοποίηση μήτρας και ίνας του μοντέλου
- Σχήμα 4.4 Ανάπτυξη τάσεων κατά μήκος της ίνας πριν τη θραύση όπως προβλέπει το μοντέλο shear lag.
- Σχήμα 4.5 Ανάπτυξη τάσεων κατά μήκος των δύο τμημάτων της ίνας μετά την πρώτη θραύση.
- Σχήμα 4.6 Ανάπτυξη τάσεων κατά μήκος των τμημάτων των ινών σε μετά από διαδοχικές θραύσεις.
- Σχήμα 4.7 Θραύση ινών και κατανομή των τάσεων.
- Σχήμα 5.1 Εικόνα από λογισμικό CAE. Τομή σύνθετου με στρώσεις σε διευθύνσεις 0/90/90/0
- Σχήμα 5.2 Εισαγωγή cohesive στοιχείων μεταξύ στρώσεων ίδιας διακριτοποίησης
- Σχήμα 5.3 Εισαγωγή cohesive στοιχείων πυκνότερης διακριτοποίησης
- Σχήμα 5.4 Φόρτιση μοντέλου

Σχήμα 5.5 Μοντελοποίηση διαστρωματικής αποκόλλησης σε δοκό από σύνθετο υλικό με χρήση cohesive στοιχείων.

Σχήμα 5.6 Μοντέλο σύνθετου υλικού πριν τη ρηγμάτωση

Σχήμα 5.7 Εμφάνιση και διάδοση της ρωγμής

Σχήμα 5.8 Περαιτέρω διάδοση της ρωγμής.

Σχήμα 6.1 Ιδιότητες υλικού μήτρας (αριστερά) ,ενίσχυσης (κέντρο) και στρώσης (δεξιά).

Σχήμα 6.2 Γεωμετρία και διαστάσεις του μοντέλου

Σχήμα 6.3 Συνοριακές συνθήκες του μοντέλου

Σχήμα 6.4 Διακριτοποίηση του μοντέλου

Σχήμα 6.5 Ίνες που περιβάλλονται από τη μήτρα

Σχήμα 6.6 Σχηματική περιγραφή των μηχανισμών αστοχίας

Σχήμα 6.7 Εισαγωγή ρωγμών ως επαφή με αντοχή ελαφρώς μικρότερα από την αντοχή της μήτρας

Σχήμα 6.8 Ρηγμάτωση και διαστρωματική αποκόλληση

Σχήμα 6.9 Ταυτόχρονη εμφάνιση και των τριών ρωγμών και διαστρωματική αποκόλληση

Σχήμα 6.10 Διάγραμμα ζώνης shear lag.

Σχήμα 6.11 Τάσεις στη διεπιφάνεια στις περιοχές κοντά στις ρωγμές

Σχήμα 6.12 Εισαγωγή πιθανών θέσεων εμφάνισης ρωγμών.

Σχήμα 6.13 Εκκίνηση φόρτισης πριν την εμφάνιση των πρώτων ρωγμών (HFTCRT).

Σχήμα 6.14 Εμφάνιση ρωγμών πριν την πλήρη ανάπτυξή τους (HFTCRT).

Σχήμα 6.15 Ανάπτυξη ρωγμών και εμφάνιση νέας ρωγμής (HFTCRT).

Σχήμα 6.16 Ανάπτυξη προηγούμενης ρωγμής (HFTCRT).

Σχήμα 6.17 Εμφάνιση τελευταίας ρωγμής (HFTCRT).

Σχήμα 6.18 Ανάπτυξη τελευταίας ρωγμής και κορεσμός (HFTCRT).

Σχήμα 6.19 Ρωγμές και αστοχία διεπιφάνειας (CQUADSCRT).

Σχήμα 6.20 Κατανομή αξονικών τάσεων στις στρώσεις μετά την εμφάνιση ρωγμών.

Σχήμα 6.21 Διάγραμμα αξονικών τάσεων στις στρώσεις μετά την εμφάνιση ρωγμών

Σχήμα 6.22 Αριθμός ρωγμών σε συνάρτηση με την παραμόρφωση.

Σχήμα 6.23 Διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων.

Σχήμα 6.24 Τιμή ILSS που επιτρέπει τη διεπιφανειακή αποκόλληση σε επιθυμητά επίπεδα

Σχήμα 6.25 Μεγάλη τιμή ILSS που δεν επιτρέπει τη διεπιφανειακή αποκόλληση σε επιθυμητά επίπεδα και προκαλεί πυκνότερη ρηγμάτωση.

Σχήμα 6.26 Κανονικοποιημένο μήκος συναρτήσει του ILSS

Σχήμα 6.27 Συνολική αντοχή συναρτήσει του ILSS

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα εργασία με τίτλο «Μελέτη αστοχίας σύνθετου υλικού διασταυρούμενων στρώσεων σε εφελκυσμό » εκπονήθηκε στα πλαίσια της ολοκλήρωσης των προϋποθέσεων, για τη λήψη του μεταπτυχιακού τίτλου του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών με τίτλο Προηγμένα υλικά του τμήματος Μηχανικών Επιστήμης Υλικών του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων.

Σε αυτό το σημείο , θα ήθελα εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Α. Παϊπέτη , για τη βοήθεια, την καθοδήγηση και τις πολύτιμες ιδέες του, που συνέβαλαν στην βελτίωση και ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας, καθώς και όλους τους καθηγητές που δίδαξαν στα πλαίσια του μεταπτυχιακού προγράμματος , συμβάλλοντας σημαντικά στην εξέλιξη μου ως μηχανικός.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, για την αμέριστη στήριξή τους καθ' όλη τη διάρκεια σπουδών.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη των μηχανισμών αστοχίας ενός σύνθετου υλικού διασταυρούμενων στρώσεων σε εφελκυσμό. Το γεγονός πως η αστοχία των σύνθετων υλικών είναι απρόβλεπτη σε σχέση με τα συμβατικά υλικά καθιστά τη μελέτη της ιδιαίτερα πολύπλοκη.

Στα πρώτα κεφάλαιο της εργασίας αναφέρονται οι θεωρίες και τα αναλυτικά μοντέλα (shear lag) που έπαιξαν σημαντικό ρόλο στην κατανόηση των μηχανισμών αστοχίας και στην αποτελεσματική μοντελοποίησή τους, καθώς εξηγούν αναλυτικά το μηχανισμό μεταφοράς τάσεων μεταξύ των στρώσεων, καθώς και την αστοχία τους. Παρουσιάζονται αποτελέσματα από το πείραμα θραύσης μιας ίνας σε εφελκυσμό, διότι οι μορφές αστοχίας που εμφανίζεται είναι ίδιες με το προς μελέτη αντικείμενο, με τη διαφορά ότι οι ίνες στο συγκεκριμένο πείραμα παρουσιάζουν κυλινδρική συμμετρία ενώ το συνολικό σύνθετο υλικό σε εφελκυσμό, επίπεδη συμμετρία.

Στη συνέχεια, γίνεται αναφορά στις παραμέτρους που επηρεάζουν σημαντικά τα αποτελέσματα μιας ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων, καθώς και την αιτιολόγηση για την επιλογή τους. Παρουσιάζεται αναλυτικά ο σχεδιασμός του μοντέλου και η επίλυση του ερμηνεύοντας τους μηχανισμούς αστοχίας που εμφανίστηκαν κατά την επίλυση του εικονικού πειράματος. Εισάγεται στοχαστικότητα για τη μοντελοποίηση της τυχαίας εμφάνισης ρωγμών στις στρώσεις των 90 μοιρών, και τον κορεσμό στην εμφάνιση τους.

Τέλος, γίνεται μια παραμετρική ανάλυση μεταξύ της διαστρωματικής αντοχής, του μήκους διαστρωματικής αποκόλλησης και τη συνολική αντοχή του υλικού, εξάγοντας σημαντικά συμπεράσματα και επαληθεύοντας τα πραγματικά πειραματικά αποτελέσματα. Όπως προέκυψε από τα αποτελέσματα της επίλυσης, η αντοχή της διεπιφάνειας παίζει σημαντικό ρόλο στην τελική αντοχή του υλικού καθώς επηρεάζει άμεσα την πυκνότητα ρηγμάτωσης, το μήκος της διαστρωματικής αποκόλλησης και κατ' επέκταση τον τρόπο ανακατανομής των τάσεων.

SUMMARY

The purpose of this paper is to study the failure mechanisms of a cross-ply composite material in tensile testing. The fact that the failure of composite materials is unpredictable compared to conventional materials makes its study particularly complex.

In the first chapters of the thesis, the theories and the analytical models (shear lag) are mentioned, which played an important role in understanding the mechanisms of failure and their efficient modeling as they explain in detail the mechanism of stress transfer between the layers as well as their failure. Results from the single fiber fragmentation test are presented and the failure mechanisms that appear, are identical to the object to be studied, except that the fibers in this experiment show a cylindrical symmetry while the total composite material in tension, planar symmetry.

Next, reference is made to the parameters that significantly affect the results of a finite element analysis, as well as the justification for their selection. It is presented analytically the model design and its solution, by interpreting the failure mechanisms that occurred during solving of the virtual experiment. Stochastic modelling is introduced for the accidental appearance of cracks in the 90 degree layers, and saturation.

Finally, a parametric study is presented between the interlaminar shear strength, the delamination length and the overall strength of the material, yielding important conclusions and verifying the actual experimental results. As it comes off from the results of the solution, the interfacial shear strength plays an important role in the ultimate strength of the material as it directly affects the crack density, the length of the laminar detachment and hence the redistribution of the stresses.

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

Οι συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις στον τομέα της μηχανικής και των κατασκευών, είχαν ως αποτέλεσμα την δημιουργία νέων υλικών με ένα ευρύ φάσμα ιδιοτήτων που δεν καλυπτόταν από τα συμβατικά υλικά , όπως για παράδειγμα τα μεταλλικά , κεραμικά και πολυμερή υλικά. Στη νέα κατηγορία των υλικών συγκαταλέγονται και τα σύνθετα υλικά. Οι ιδιότητες στις οποίες δόθηκε μεγάλη έμφαση είναι το χαμηλό βάρος σε συνδυασμό με την υψηλή αντοχή. Αυτό επιτεύχθηκε χάριν στην ανισοτροπία των υλικών αυτών , παρέχοντας τη δυνατότητα ενίσχυσης της κατασκευής μόνο στη διεύθυνση που ο μελετητής κρίνει απαραίτητη.

Σύνθετο υλικό ορίζεται ένα υλικό αποτελούμενο από δύο ή περισσότερα διαφορετικά υλικά ή φάσεις. Πιο ειδικά, ως σύνθετα αναγνωρίζονται εκείνα τα υλικά, τα οποία συντίθενται από επιμέρους υλικά με σημαντικά διαφορετικές μηχανικές και φυσικές ιδιότητες μεταξύ τους, ενώ και το ίδιο το σύνθετο υλικό έχει επίσης σημαντικά διαφορετικές ιδιότητες από εκείνες των συστατικών του. Για να καταταχθεί ένα υλικό στην κατηγορία των σύνθετων, πρέπει να προκύπτει ως συνδυασμός συστατικών μερών, στα οποία οι ιδιότητες του ενός από τα μέρη αυτά να είναι σημαντικά μεγαλύτερες από του άλλου.

Το ένα, από τα συστατικά μέρη, χαρακτηρίζεται ως συστατικό ενίσχυσης και προσδίδει στο σύνθετο βελτιωμένες μηχανικές, κυρίως, ιδιότητες. Το δεύτερο συστατικό καλείται μήτρα, είναι συνήθως χαμηλής πυκνότητας και η συμμετοχή του στο σύνθετο εξασφαλίζει τη μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση των ιδιοτήτων της ενίσχυσης. Οι ίνες στα υλικά αυτά είναι οργανικές ή ανόργανες, και έχουν σαν κύριο χαρακτηριστικό την υψηλή εφελκυστική αντοχή.

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται αντικατάσταση των συμβατικών υλικών από σύνθετα υλικά σε πολλές τεχνολογικές εφαρμογές. Αυτό οφείλεται στις βελτιωμένες, μηχανικές κυρίως ,ιδιότητες που έχουν έναντι των συμβατικών υλικών. Αυτές κυρίως είναι υψηλή αντοχή , χαμηλό βάρος, μεγάλη δυσκαμψία, αντοχή σε διάβρωση και σε ακραίες περιβαλλοντικές συνθήκες, αντίσταση σε φθορά, καλή θερμική αγωγιμότητα, χαμηλό κόστος συντήρησης κ.ά.

Ένα σύνθετο υλικό δε μπορεί να έχει όλες τις παραπάνω ιδιότητες καθώς αυτό εξαρτάται κυρίως από την εφαρμογή για την οποία προορίζεται . Επομένως, για ένα υλικό που θα χρησιμοποιηθεί ως δομικό μέλος σε μια κατασκευή μας ενδιαφέρει κυρίως η δυσκαμψία του, η αντοχή και το βάρος του. Επιπλέον, αν γνωρίζουμε εκ των προτέρων ότι τα φορτία που θα παραλαμβάνει είναι πάντοτε αξονικά -

εφελκυστικά υπάρχει η δυνατότητα ενίσχυσης μόνο στον προσανατολισμό της φόρτισης μειώνοντας σημαντικά το βάρος.

1.2 ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΔΙΑΣΤΑΥΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΤΡΩΣΕΩΝ

Όπως είναι γνωστό , τα σύνθετα υλικά δεν είναι ισότροπα , που σημαίνει πως η συμπεριφορά τους και οι ιδιότητες τους αλλάζουν ανάλογα με τη γεωμετρία του. Αυτό σημαίνει πως οι ελαστικές του σταθερές δεν είναι εύκολο να προσδιοριστούν καθώς το μέτρο ελαστικότητας είναι διαφορετικό για κάθε διαφορετικό προσανατολισμό της φόρτισης ως προς τη διεύθυνση της ενίσχυσης. Πολύ συχνά συναντούμε υλικά που είναι ενισχυμένα σε διάφορες γωνίες. Τα σύνθετα υλικά διασταυρούμενων στρώσεων είναι μια ειδική περίπτωση οι στρώσεις τους είναι προσανατολισμένες μόνο στις διευθύνσεις 0 και 90. Συχνά χρησιμοποιούνται σύνθετα υλικά αυτών των προδιαγραφών όταν είναι γνωστές εκ των προτέρων οι συνθήκες φόρτισης , ενισχύοντας μόνο αυτές τις δύο διευθύνσεις. Είναι επιθυμητό να υπάρχει συμμετρία ως προς τους δύο άξονες y και z αν θεωρήσουμε τον x κατά μήκος του άξονα του υλικού πράγμα που απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή στην αλληλουχία των στρώσεων . Αυτό συμβαίνει διότι σε περίπτωση μη συμμετρίας και αξονικών φορτίσεων μπορεί το υλικό να καταπονηθεί σε κάμψη παρ' όλο που δεν υπάρχει καμπτικό φορτίο.

Για περιπτώσεις αξονικού εφελκυσμού , όπως αυτός θα μελετηθεί και στη συνέχεια , παίζει σημαντικότατο ρόλο ο προσανατολισμός της ενίσχυσης. Έτσι , όσο μεγαλύτερη είναι η γωνία μεταξύ του άξονα της φόρτισης και της ενίσχυσης , τόσο γρηγορότερα και για μικρότερα φορτία εμφανίζονται οι αστοχίες στις στρώσεις αυτές.

Όσο μεγαλώνει η γωνία αυτή όμως, τόσο μειώνεται η πιθανότητα εμφάνισης δευτερευουσών μορφών αστοχίας στο σύνθετο , όπως είναι η διαστρωματική αποκόλληση. Στην περίπτωση λοιπόν αξονικού εφελκυστικού φορτίου σε σύνθετο υλικό διασταυρούμενων στρώσεων εμφανίζεται σε σύντομο χρονικό διάστημα ρηγμάτωση στη στρώση των 90 μοιρών ως προς τη φόρτιση. Αυτό συμβαίνει διότι το φορτίο παραλαμβάνεται όλο από τη μήτρα του σύνθετου και από τις ίνες που ανήκουν στις στρώσεις των 0 μοιρών. Η εμφάνιση της ρωγμής όμως δε σημαίνει και αστοχία του υλικού. Έτσι , το μοντέλο shear-lag προβλέπει τη μεταφορά των τάσεων από την περιοχή της ρωγμής σε ακέραια μέρη του υλικού ,και μέσω διάτμησης δημιουργούνται νέες ρωγμές. Αμέσως μετά την εμφάνιση ρωγμών , οι γειτονικές στη ρωγμή στρώσεις παραλαμβάνουν μεγαλύτερο φορτίο ώστε το σύνθετο να συνεχίσει να ισορροπεί.

1.3 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

Ο προσδιορισμός του μηχανισμού αστοχίας στα σύνθετα υλικά είναι σημαντικός διότι η βλάβη γίνεται ορατή στα τελευταία στάδια της δοκιμής. Οι μη καταστροφικές μέθοδοι έχουν βοηθήσει σε σημαντικό βαθμό να γίνει κατανοητός ο μηχανισμός αστοχίας και να αναπτυχθούν μαθηματικές θεωρίες που να περιγράφουν την υποβάθμιση των μηχανικών τους ιδιοτήτων.

Τα στάδια αστοχίας ενός σύνθετου υλικού ενισχυμένο στις διευθύνσεις 0 και 90 είναι συγκεκριμένα. Στο πρώτο στάδιο εμφανίζονται εγκάρσιες ρηγματώσεις στη στρώση των 90. Αυτές οι ρωγμές είναι σχεδόν ισαπέχουσες και η πυκνότητα των ρωγμών αυτών αυξάνεται έως ένα κατώφλι. Σε επόμενο στάδιο της φόρτισης η βλάβη εξελίσσεται και σχηματίζονται διαμήκειες ρωγμές στις στρώσεις των 0. Ακολουθούν μικροαποκολλήσεις μεταξύ των διαπιφανειών και τελικώς, με τη θραύση των ινών, το σύνθετο οδηγείται σε ολική αστοχία.

Είναι σημαντικό να τονιστεί πως καθώς αναπτύσσεται η βλάβη, τα χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες του σύνθετου υποβαθμίζονται. Συγκεκριμένα η υποβάθμιση της αντοχής λόγω ανάπτυξης ρωγμών είναι μια σημαντική ένδειξη βλάβης, ενώ από την πυκνότητα των ρωγμών μπορούμε να λάβουμε πληροφορίες σχετικά με την υπολειπόμενη διάρκεια ζωής του υλικού.

Ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό των σύνθετων υλικών είναι η διεπιφάνεια, μέσω της οποίας μεταφέρονται τάσεις από τη μήτρα προς την ενίσχυση. Είναι προφανές πως η τιμή της αντοχής της έχει μεγάλη σημασία διότι αν είναι σημαντικά μικρότερη από την αντοχή της ενίσχυσης, το υλικό δε μπορεί να εκμεταλλευτεί πλήρως τις ιδιότητες της ενίσχυσης. Το ίδιο ακριβώς συμβαίνει αν η αντοχή της διεπιφάνειας είναι μικρότερη από την αντοχή της στρώσης που υπό κατάλληλες συνθήκες, ρηγματώνεται πρώτη. Διάφορα μοντέλα και θεωρίες έχουν αναπτυχθεί για να μελετήσουν τη συμπεριφορά των σύνθετων υλικών, όπως για παράδειγμα το μοντέλο shear lag. Όταν η επιβαλλόμενη τάση ξεπεράσει την αντοχή της μήτρας αρχίζουν να δημιουργούνται ρωγμές, με αποτέλεσμα την ανακατανομή των τάσεων τοπικά στην περιοχή των ρωγμών. Αυτή η ανακατανομή μελετάται από το μοντέλο shear lag, το οποίο περιγράφει τη σχέση της αξονικής τάσης της ίνας με τη διατμητική τάση της διεπιφάνειας.

2. ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΡΗΓΜΑΤΩΣΗ

Η ρηγματώση της μήτρας (στη στρώση των 90) κάθετα στη διεύθυνση της φόρτισης είναι μία απ' τις πιο κοινές παρατηρήσεις στα σύνθετα υλικά. Η ανάπτυξη θεωριών και μοντέλων για σύνθετα πολύστρωτα υλικά τα οποία έχουν υποστεί εγκάρσια ρηγματώση της μήτρας λόγω μονοαξονικών φορτίσεων έχει προσελκύσει το ενδιαφέρον αρκετών ερευνητών. Η θραυστομηχανική στα σύνθετα υλικά μπορεί να περιλαμβάνει ρηγματώση μήτρας, ενδοστρωματικές και διαστρωματικές αποκολλήσεις, αστοχία διεπιφανειών και τελικά θραύση των ινών και ολική αστοχία του δοκιμίου. Η ανάπτυξη της φθοράς αποτελείται από τρία στάδια: την έναρξη των ρωγμών, την ανάπτυξη τους, και τον εντοπισμό, ο οποίος τελικά οδηγεί στην πλήρη θραύση.

Ο επικρατέστερος μηχανισμός όσον αφορά το πρώτο στάδιο εξέλιξης της φθοράς, όπως αυτά αναφέρθηκαν προηγουμένως, είναι ο σχηματισμός ενδοστρωματικών ρωγμών στη μήτρα, στις στρώσεις που η διεύθυνση των ινών είναι εκτός του άξονα φόρτισης. Η πυκνότητα των ρωγμών αυτών αυξάνεται με την ύπαρξη στατικού φορτίου, ή με τους κύκλους κόπωσης στους οποίους υποβάλλεται το υλικό, ως ένα κατώφλι, τη χαρακτηριστική κατάσταση βλάβης. Η έναρξη και εμφάνιση των ενδοστρωματικών ρωγμών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την αλληλουχία των στρώσεων, τον προσανατολισμό της ενίσχυσης αλλά και τις ιδιότητες του υλικού. Καθώς η βλάβη σε μία στρώση αυξάνεται, η δυσκαμψία της στρώσης μειώνεται σημαντικά, προσφέροντας λιγότερη δυσκαμψία στο σύνθετο υλικό έχοντας ως αποτέλεσμα την υποβάθμιση των ιδιοτήτων του.

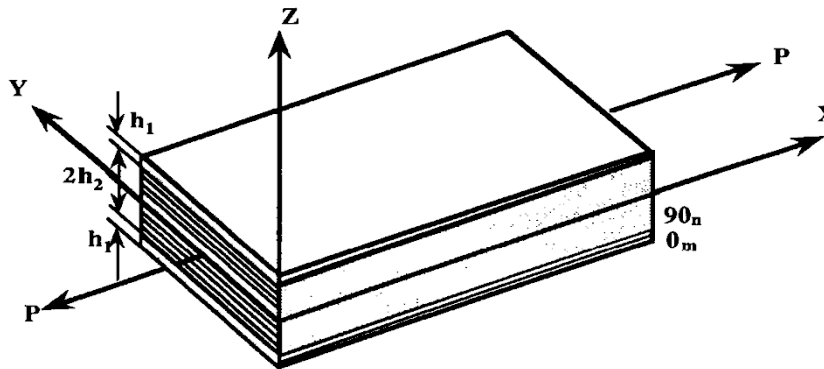
Κατά καιρούς έχει γίνει προσπάθεια ανάπτυξης διάφορων αναλυτικών διαδικασιών για πρόβλεψη της μείωσης της δυσκαμψίας συναρτήσει της κατάστασης βλάβης. Η μείωση της δυσκαμψίας σχετίζεται άμεσα με την πυκνότητα των ενδοστρωματικών ρωγμών αλλά και με τις περιοχές όπου έχουν εμφανιστεί αποκολλήσεις. Το μοντέλο shear lag έχει συμβάλει στην ανάλυση αυτών των διαδικασιών, με απλουστευμένες παραδοχές ότι οι ρωγμές κατά την εμφάνιση και ανάπτυξή τους παραμένουν σχετικά μακριά, ώστε να μπορεί να αγνοηθεί η μεταξύ τους αλληλεπίδραση, και ότι η διατμητική τάση που αναπτύσσεται μεταξύ των στρώσεων, περιορίζεται μέσα σε ένα λεπτό στρώμα απροσδιόριστου πάχους.

Πειράματα που διεξήχθησαν, έχουν δείξει πως οι τιμές για τη μείωση της δυσκαμψίας του θεωρητικού μοντέλου είναι πολύ κοντά στις πραγματικές, από τη μεριά της ασφάλειας, δείχνοντας δηλαδή, ελαφρώς μειωμένη δυσκαμψία σε σχέση με τις τιμές που προέκυψαν από τα πειράματα. Ωστόσο οι διαστρωματικές τάσεις, που παίζουν καθοριστικό ρόλο στην αστοχία των στρώσεων δε μπορούν να υπολογιστούν από αυτό το μοντέλο.

2.1 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΘΕΩΡΙΑΣ SHEAR-LAG

Αρκετές μελέτες έχουν γίνει για το συσχετισμό του μοντέλου shearlag με την σταδιακή ανάπτυξη των φθορών σε σύνθετα υλικά ενισχυμένα με στρώσεις 0/90. Η παράμετρος του μοντέλου αυτού εκφράζεται σαν συνάρτηση του συντελεστή διάτμησης της στρώσης και της γεωμετρίας του δοκιμίου. Με τη χρήση αυτών των μοντέλων έχουν αναπτυχθεί λύσεις κλειστής μορφής στις διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν τη διαδικασία ανάπτυξης εγκάρσιων ρωγμών, την πυκνότητα αυτών, την κατανομή των τάσεων στο σύνθετο υλικό, καθώς και τη μείωση της δυσκαμψίας των στρώσεων που έχουν υποστεί βλάβη δεδομένης της κατάστασης φόρτισης αλλά και των ιδιοτήτων της κάθε στρώσης από τις οποίες αποτελείται το σύνθετο. Η προσέγγιση που εφαρμόζεται για την ανάλυση της προοδευτικής ρηγμάτωσης των εγκάρσιων φύλλων, βασίζεται στην παραδοχή πως οι επόμενες ρωγμές θα αρχίσουν να εμφανίζονται, όταν το αξονικό φορτίο φτάσει την τιμή της αντοχής αυτών των στρώσεων.

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται ένα cross-ply σύνθετο υλικό (ενίσχυση στις διευθύνσεις 0/90) και εφαρμόζεται εφελκυστικό αξονικό φορτίο.

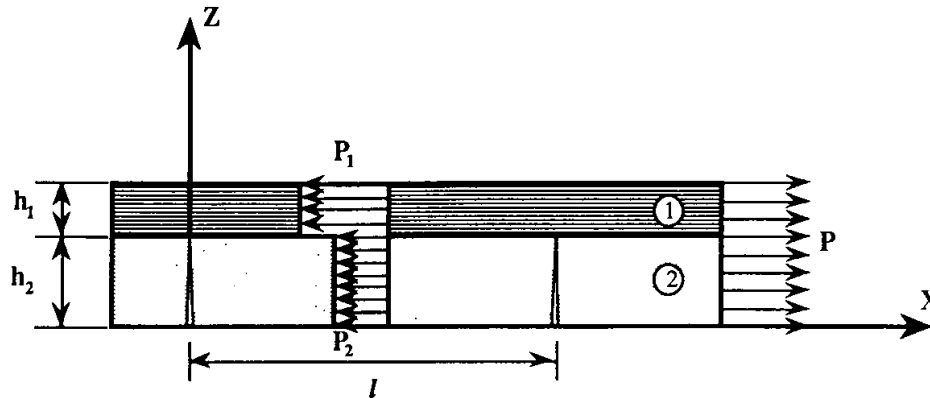


Σχήμα 2.1 Σύνθετο υλικό με εφελκυστική αξονική καταπόνηση.

Η πρώτη ρωγμή στα εγκάρσια φύλλα αρχίζει να εμφανίζεται όταν η αξονική τάση $\sigma_{\chi 2}$ σε αυτές τις στρώσεις, γίνει ίση με την εφελκυστική αντοχή F_{2T} του φύλλου αυτού, ή η αξονική παραμόρφωση $\varepsilon_{\chi 2}$, γίνει ίση με τη μέγιστη αξονική παραμόρφωση $\varepsilon_{\chi 2T}^u$, που μπορούν να υποστούν αυτές οι στρώσεις.

$$\sigma_{\chi 2} = F_{2T} \quad \text{ή} \quad \varepsilon_{\chi 2} = \varepsilon_{\chi 2T}^u \quad (2.1)$$

Μόλις εμφανιστεί η πρώτη ρωγμή πραγματοποιείται ανακατανομή των τάσεων στο εσωτερικό της στρώσης, όπως θα δούμε στη συνέχεια. Η γεωμετρία του δοκιμίου μετά τη ρωγμή φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί. Η στρώση 1 του σχήματος αντιστοιχεί σε ίνες παράλληλες με τον άξονα της φόρτισης (0°) ενώ στη στρώση 2, οι ίνες είναι διατεταγμένες κάθετα στη φόρτιση (90°).



Σχήμα 2.2 Τομή σύνθετου, ανακατανομή τάσεων μετά την εμφάνιση ρωγμής

Λόγω συμμετρίας ως προς το κατακόρυφο επίπεδο παράλληλο στη διεύθυνση της φόρτισης που διέρχεται από το μέσο του δοκιμίου μπορούμε να λάβουμε υπόψη το μισό μοντέλο. Από ισορροπία δυνάμεων προκύπτει:

$$P = P_1 + P_2 + (h_1 \sigma_{r1} + h_2 \sigma_{r2}) = P_1 + P_2 \quad (2.2)$$

Όπου P είναι το εξωτερικό αξονικό φορτίο που ασκείται στο σύνθετο, P_1 , P_2 είναι οι εσωτερικές δυνάμεις ανά μονάδα μήκους όπως αυτές ασκούνται στις στρώσεις ανάλογα με τον προσανατολισμό των ινών και το πάχος του κάθε στρώματος, σ_{r1} , σ_{r2} είναι οι υπολειπόμενες τάσεις σε κάθε στρώση και h_1, h_2 είναι το πάχος της κάθε στρώσης. Οι υπολειπόμενες τάσεις εξισορροπούνται μεταξύ τους.

Γίνεται η υπόθεση ότι

$$\frac{d(P_2 + h_2 \sigma_{r2})}{dx} = H(u_2 - u_1) \quad (2.3)$$

Όπου H είναι η παράμετρος shear lag η οποία είναι σταθερή, και u_1, u_2 είναι οι μέσες μετακινήσεις, εντός του πάχους των στρώσεων, κατά τη φορά του άξονα, των στρώσεων 1 και 2 αντίστοιχα.

$$\frac{d^2 P_2'}{dx^2} = H \left(\frac{du_2}{dx} - \frac{du_1}{dx} \right) \quad (2.4)$$

Όπου $P_2' = P_2 + h_2 \sigma_2$.

Από τη σχέση παραμορφώσεων – μετακινήσεων και τη γραμμική σχέση τάσεων-παραμορφώσεων, προκύπτει:

$$\frac{du_1}{dx} = \epsilon_{x1} = \frac{P_1}{h_1 E_1} \quad (2.5)$$

$$\frac{du_2}{dx} = \epsilon_{x2} = \frac{P_2}{h_2 E_2} \quad (2.6)$$

Όπου ϵ_{x1} και ϵ_{x2} είναι οι μέσες αξονικές παραμορφώσεις δια μέσου του πάχους των στρώσεων 1 και 2 αντίστοιχα, και E_1, E_2 είναι τα εγκάρσια και διαμήκη μέτρα ελαστικότητας του σύνθετου. Αντικαθιστώντας τις σχέσεις αυτές στην παραπάνω εξίσωση και κάνοντας χρήση την εξίσωση που προέκυψε από ισοροπία δυνάμεων προκύπτει:

$$\frac{d^2 P_2'}{dx^2} - \alpha^2 P_2' = -\beta \quad (2.7)$$

Όπου, $\alpha^2 = H$

$$\beta = H$$

$$E_0 = \text{Undamaged Laminate Stiffness} = E_1 \frac{h_1 + E_2 h_2}{h_1 + h_2} \quad (2.8)$$

Η γενική λύση της διαφορικής εξίσωσης είναι :

$$P_2' = \frac{\beta}{\alpha^2} + R \sinh(\alpha x) + S \cosh(\alpha x) \quad (2.9)$$

Όπου R και S σταθερές . Ο πρώτος όρος της γενικής λύσης αντιπροσωπεύει τη δύναμη που μοιράζεται από τις εγκάρσιες στρώσεις του σύνθετου, όπου δεν υπάρχουν ρωγμές , η άλλες μορφές βλάβης εξαιτίας της παρουσίας ρωγμών.

Οι συνοριακές συνθήκες για το σύνθετο υλικό που υπόκειται σε μονοαξονική φόρτιση είναι οι ακόλουθες:

$$P'_{x2}=0 \quad \text{για } x = 0 \text{ και } x = 1 \quad (2.10)$$

$$T_{xz2}=0 \quad \text{για } z = 0 \text{ και } z = h_1+h_2 \quad (2.11)$$

$$T_{xz1} = T_{xz2} \text{ για } z = h_2 \quad (2.12)$$

$$\sigma_{z1} = 0 \text{ για } z = h_1 + h_2 \quad (2.13)$$

$$\sigma_{z2} = \sigma_{z1} \text{ για } z = h_2 \quad (2.14)$$

$$u_1 = u_2 \text{ για } z = h_2 \quad (2.14)$$

Όπου τ_{xz1} και τ_{xz2} οι διατμητικές τάσεις , u_1 , u_2 οι αξονικές μετακινήσεις των στρώσεων 1 και 2 αντίστοιχα και l είναι το κενό μεταξύ δύο εγκάρσιων ρωγμών.

Κάνοντας χρήση τις συνοριακές συνθήκες η γενική λύση γίνεται:

$$\sigma_{xz2} = \left(\frac{E_2}{E_0} \sigma_\alpha + \sigma_{r2} \right) \left(1 - \frac{\cosh\left(\frac{\alpha l}{2} - \alpha x\right)}{\cosh\left(\frac{\alpha l}{2}\right)} \right) \quad (2.15)$$

Όπου σ_α η εφαρμοζόμενη τάση στο σύνθετο υλικό.

Για να υπολογιστεί η παράμετρος shear lag , H, γίνεται υπόθεση γραμμικής κατανομής τάσεων στη διεύθυνση z, και παραβολική μεταβολή της αξονικής μετατόπισης και στις 2 στρώσεις.

$$u_1 = C_1 z^2 + C_2 z + C_3 \quad (2.16)$$

$$u_2 = C_4 z^2 + C_5 z + C_6 \quad (2.17)$$

Όπου C_i άγνωστες συναρτήσεις της απόστασης x.

Η παράμετρος shear lag υπολογίζεται ως συνάρτηση του μέτρου διάτμησης και της γεωμετρίας του δοκιμίου .

$$H = \frac{3G_{12}G_{23}}{h_1G_{23}+h_2G_{12}} \quad (2.18)$$

Οι κατανομές των τάσεων (ορθές και διατμητικές) προκύπτουν από τους τύπους που ακολουθούν.

$$T_1 = -\alpha h_2 \left(\frac{E_2}{E_0} \sigma_\alpha + \sigma_{r2} \right) \frac{\sinh\left(\frac{\alpha l}{2} - \alpha x\right)}{\cosh\left(\frac{\alpha l}{2}\right)} \quad (2.19)$$

$$T_{xz1} = T_i \frac{h_1+h_2-z}{h_1} \quad \text{for } h_1 + h_2 \geq z \geq h_2 \quad (2.20)$$

$$T_{xz2} = T_i \frac{z}{h_2} \quad \text{for } h_2 \geq z \quad (2.21)$$

$$\sigma_{z1} = \frac{\alpha^2 E_2 h_2 (h_1+h_2-z)^2 \cosh\left(\frac{\alpha l}{2} - \alpha x\right)}{E_0 2 h_1 \cosh\left(\frac{\alpha l}{2}\right)} \sigma_\alpha \quad (2.22)$$

$$\sigma_{z2} = \frac{\alpha^2 E_2 h_2}{E_0} \left(\frac{h_1}{2} + \frac{h_2^2 - z^2}{2h_2} \right) \frac{\cosh\left(\frac{\alpha l}{2} - \alpha x\right)}{\cosh\left(\frac{\alpha l}{2}\right)} \sigma_\alpha \quad (2.23)$$

Επίσης οι κατανομές των αξονικών τάσεων στις στρώσεις 1 και 2 είναι:

$$\sigma_{x1} = \frac{E_1}{E_0} \left\{ 1 + \frac{E_2 h_2 \cosh\left(\frac{\alpha l}{2} - \alpha x\right)}{E_1 h_1 \cosh\left(\frac{\alpha l}{2}\right)} \right\} \sigma_\alpha + \left\{ 1 - \frac{\cosh\left(\frac{\alpha l}{2} - \alpha x\right)}{\cosh\left(\frac{\alpha l}{2}\right)} \right\} \sigma_{r1} \quad (2.24)$$

$$\sigma_{x2} = \left\{ 1 - \frac{\cosh\left(\frac{\alpha l}{2} - \alpha x\right)}{\cosh\left(\frac{\alpha l}{2}\right)} \right\} \left(\frac{E_2}{E_0} \sigma_\alpha + \sigma_{r2} \right) \quad (2.25)$$

Η πυκνότητα των εγκάρσιων ρωγμών λ , μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει της εφαρμοζόμενης τάσης ως εξής:

$$\lambda = \frac{\alpha}{2 \log(\eta - \sqrt{\eta^2 - 1})} \quad (2.26)$$

Όπου

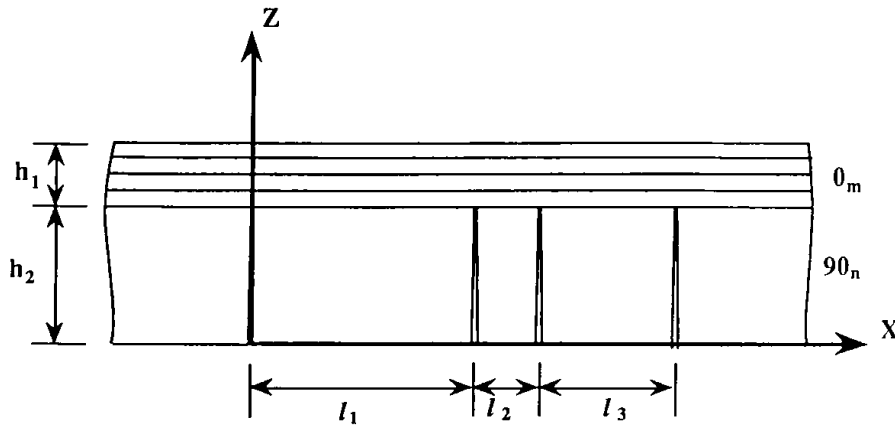
$$\eta = \left(1 - \frac{F_{2r}}{\frac{E_2}{E_0} \sigma_{\alpha} + \sigma_{r2}} \right)^{-1} \quad (2.27)$$

Η παραπάνω σχέση για τη μέση πυκνότητα εγκάρσιων ρωγμών προκύπτει ότι η μέση πυκνότητα είναι μια μονότονη συνάρτηση του εφαρμοζόμενου φορτίου.

2.2 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΡΩΓΜΩΝ

Θεωρούμε ένα στοιχείο με μία μέση πυκνότητα ρωγμών λ , χωρίς να είναι ομοιόμορφη απαραίτητα, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Λόγω του γεγονότος ότι οι αποστάσεις μεταξύ των ρωγμών μπορεί να είναι διαφορετικές, η μέγιστη αξονική τάση ανάμεσα σε δύο γειτονικές ρωγμές στη στρώση των 90, μπορεί να είναι διαφορετική για την ίδια εξωτερική φόρτιση. Όσο αυξάνεται η εφαρμοζόμενη τάση, εγκάρσιες ρωγμές αρχίζουν να εμφανίζονται στα σημεία που η μέγιστη αξονική τάση μεταξύ δύο ρωγμών φτάνει την τιμή της εγκάρσιας αντοχής σε εφελκυσμό, ή στα σημεία όπου οι αποστάσεις μεταξύ των ρωγμών είναι μέγιστες.

Στη συνέχεια, η αλλαγή της απόστασης μεταξύ των ρωγμών θα προκαλέσει ανακατανομή των τάσεων και στις δύο στρώσεις. Η κατανομή τάσεων, όμως μεταξύ δύο άλλων ρωγμών στη στρώση των 90 είτε θα αλλάξει ελάχιστα, είτε δε θα επηρεαστεί καθόλου. Αυξάνοντας ακόμη περισσότερο την εξωτερική φόρτιση, το ίδιο γεγονός θα παρατηρηθεί μεταξύ δύο άλλων ρωγμών κ.ο.κ. Ως εκ τούτου, η πυκνότητα των εγκάρσιων ρωγμών θα αυξάνεται σταδιακά, ενόσω αυξάνεται και η εξωτερική εφαρμοζόμενη φόρτιση, καθώς θα εμφανίζονται κάθε φορά νέα σημεία όπου η αξονική τάση μεταξύ ρωγμών θα φτάνει την τιμή της αξονικής αντοχής εφελκυσμού.



Σχήμα 2.3 Σύνθετο υλικό εγκάρσια ρηγματωμένο

Η τάση στη στρώση που απαιτείται για να εμφανιστούν ρωγμές με μέση πυκνότητα λ , μπορεί να εξαχθεί από την εξίσωση:

$$\sigma_{\alpha} = \frac{E_0}{E_2} \left(F_{2T} \frac{\cosh\left(\frac{a}{2\lambda}\right)}{\cosh\left(\frac{a}{2\lambda}\right) - 1} - \sigma_{r2} \right) \quad (2.28)$$

Η ποσότητα παριστάνει την υπολειμματική τάση στην κάθετη στρώση του σύνθετου που δεν έχει υποστεί βλάβη.

Η αναλογία της πυκνότητας εγκάρσιων ρωγμών σε συνάρτηση με την εφαρμοζόμενη τάση, μπορεί να εξαχθεί από τις παραπάνω εξισώσεις. Για το λόγο αυτό η πυκνότητα των ρωγμών εξαρτάται αποκλειστικά από την παρούσα ποσότητα ρωγμών και την κατάσταση που επικρατεί πάνω στο δοκίμιο.

Δεδομένης μιας αρχικής πυκνότητας εγκάρσιων ρηγματώσεων λ_{τ} , και μία σταθερή, μονοδιάστατη αξονική τάση σ_{τ} , η τιμή της τάσης σ_f που απαιτείται για να φτάσει το δοκίμιο σε μια τελική κατάσταση με πυκνότητα ρωγμών λ_f δίνεται από τον παρακάτω τύπο.

$$\sigma_f = \sigma_{\tau} + \int_{\lambda_{\tau}}^{\lambda_f} \frac{1}{g(\lambda)} d\lambda \quad (2.29)$$

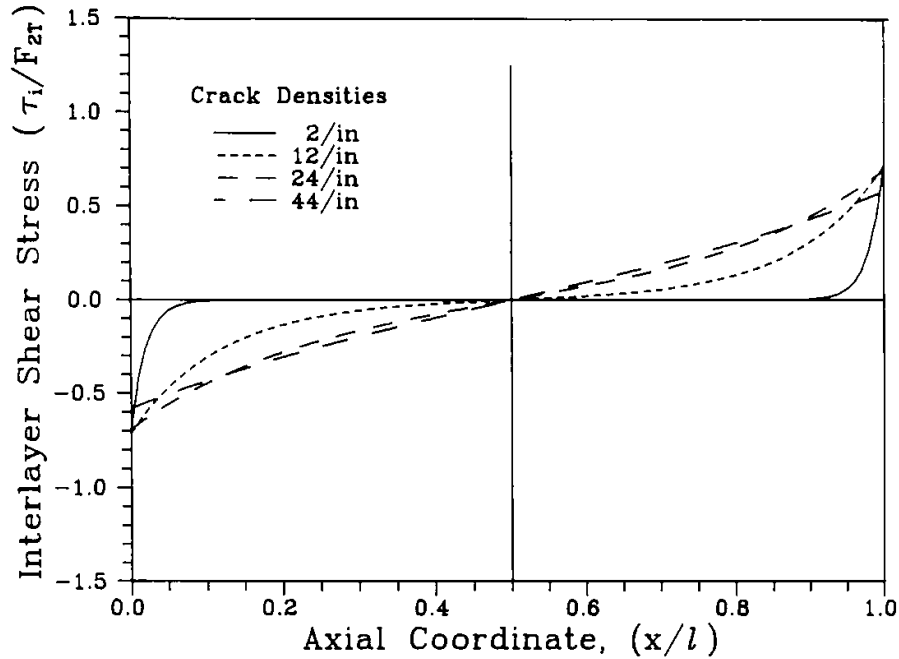
Υπό συνθήκες κυκλικής φόρτισης, το κριτήριο αστοχίας που αφορά την εγκάρσια στρώση λαμβάνεται από τις παραμέτρους της καμπύλης τάσης-αριθμού κύκλων φόρτισης για τη στρώση των 90, μπορεί δηλαδή, η πυκνότητα ρωγμών να εκφραστεί ως συνάρτηση της εφαρμοζόμενης κυκλικής φόρτισης και των αριθμό κύκλων φόρτισης αλλά και της παρούσας κατάστασης του δοκιμίου όσον

αφορά την πυκνότητα ρωγμών. Είναι εφικτό με αυτόν τον τρόπο να εξαχθεί ένα μοντέλο για την πρόβλεψη της εξέλιξης της βλάβης του δοκιμίου υπό συνθήκες κυκλικής φόρτισης .

2.3 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

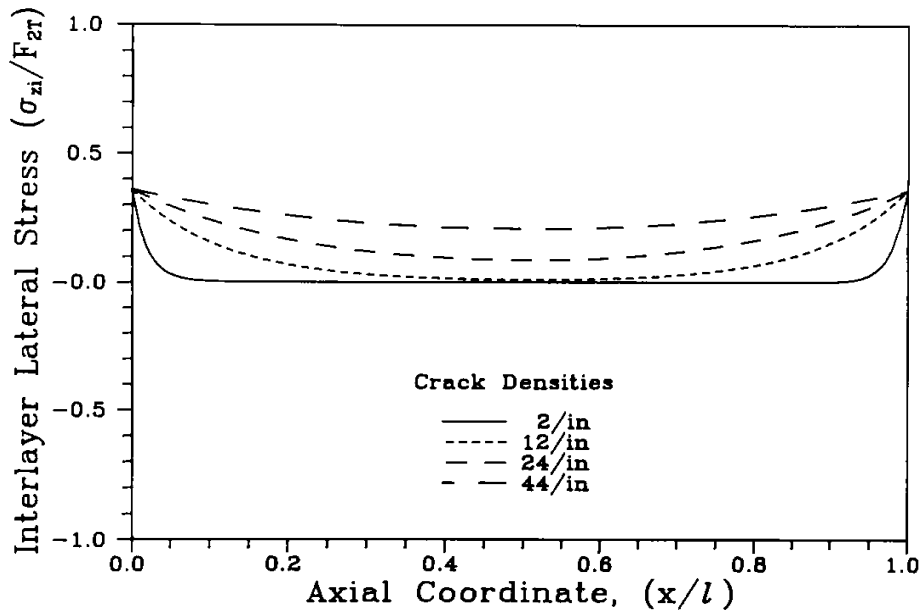
Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως , λαμβάνοντας υπόψιν στην ανάλυση τις μηχανικές τάσεις που εφαρμόζονται αλλά και τις υπολειπόμενες , μπορεί να εξαχθεί μία εικόνα σχετικά με την κατανομή των τάσεων μεταξύ δύο γειτονικών εγκάρσιων ρωγμών, και αυτό μπορεί να επιτευχθεί για διαφορετικές πυκνότητες ρωγμών. Προκύπτει πως η διατμητική τάση φτάνει τη μέγιστη τιμή της στη διεπιφάνεια μεταξύ των εγκάρσιων και διαμηκών στρωμάτων στην περιοχή κοντά στη ρωγμή. Η πλευρική τάση σ_z είναι μεγαλύτερη στον κεντρικό άξονα του δοκιμίου , παίζοντας σημαντικό ρόλο στη μηχανισμό που προκαλεί διαστρωματική αποκόλληση. Από την άλλη πλευρά , η αξονική τάση παραμένει σταθερή για όλο το πάχος του στρώματος. Σε περιοχές όπου η πυκνότητα των ρωγμών είναι μεγαλύτερη, η αξονική τάση που αναπτύσσεται εκεί, δε θα παίζει σημαντικό ρόλο για την εμφάνιση νέων ρωγμών. Στην παρούσα κατάσταση , σημαντικότερες για την πρόβλεψη της τοποθεσίας εμφάνιση νέων ρωγμών, είναι οι τάσεις που εμφανίζονται μακριά από τις ρωγμές που έχουν ήδη εμφανιστεί .

Στα παρακάτω γραφήματα φαίνεται η διαστρωματική διατμητική τάση τ_t , η πλευρική τάση σ_z , και οι αξονικές τάσεις στις παράλληλες και εγκάρσιες στρώσεις σ_{x1} , σ_{x2} για 4 διαφορετικές καταστάσεις πυκνοτήτων ρωγμών υπό την ίδια αξονική τάση , όπως καταγράφηκαν από τους J.W. Lee και I.M.Daniel. Η αξονική συντεταγμένη έχει κανονικοποιηθεί από την απόσταση από τη ρωγμή 1, και οι τάσεις , από την εγκάρσια ή παράλληλη αντοχή σε εφελκυσμό. Η διεπιφανειακή διατμητική τάση πρέπει να έχει μηδενική τιμή πάνω στις ρωγμές ($x/l = 0$ και $x = 1$). Το πρώτο από τα διαγράμματα όμως δείχνει πως ακριβώς πάνω στις ρωγμές η τάση είναι μέγιστη, μη συμφωνώντας με τη συνοριακή συνθήκη για μηδενικές τάσεις πάνω στην επιφάνεια των τάσεων .



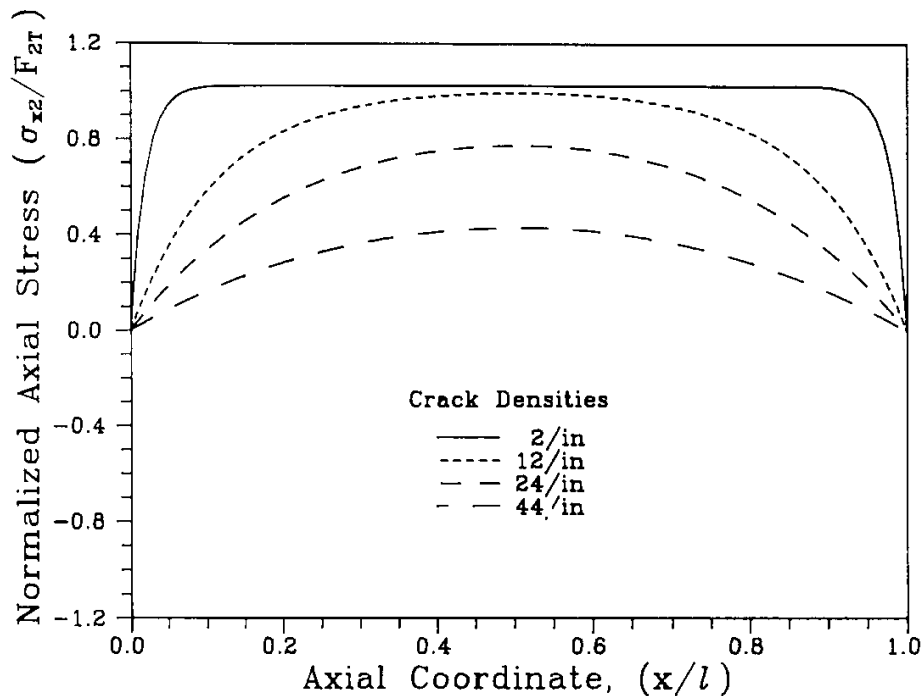
Σχήμα 2.4 Διαστρωματική διατμητική τάση μεταξύ δύο εγκάρσιων ρωγμών

Αυτό μπορεί να διορθωθεί εισάγοντας μια συνάρτηση βάρους, που δεν επηρεάζει καθόλου το σχήμα του προφίλ κατανομής των τάσεων και της συνολικής τάσης που μπορεί να αναπτυχθεί μεταξύ των δύο συγκεκριμένων ρωγμών. Λόγω της αντισυμμετρίας, στο μέσο της απόστασης μεταξύ των 2 ρωγμών η διατμητική τάση γίνεται μηδενική.



Σχήμα 2.5 Διαστρωματική πλευρική τάση μεταξύ δύο εγκάρσιων ρωγμών

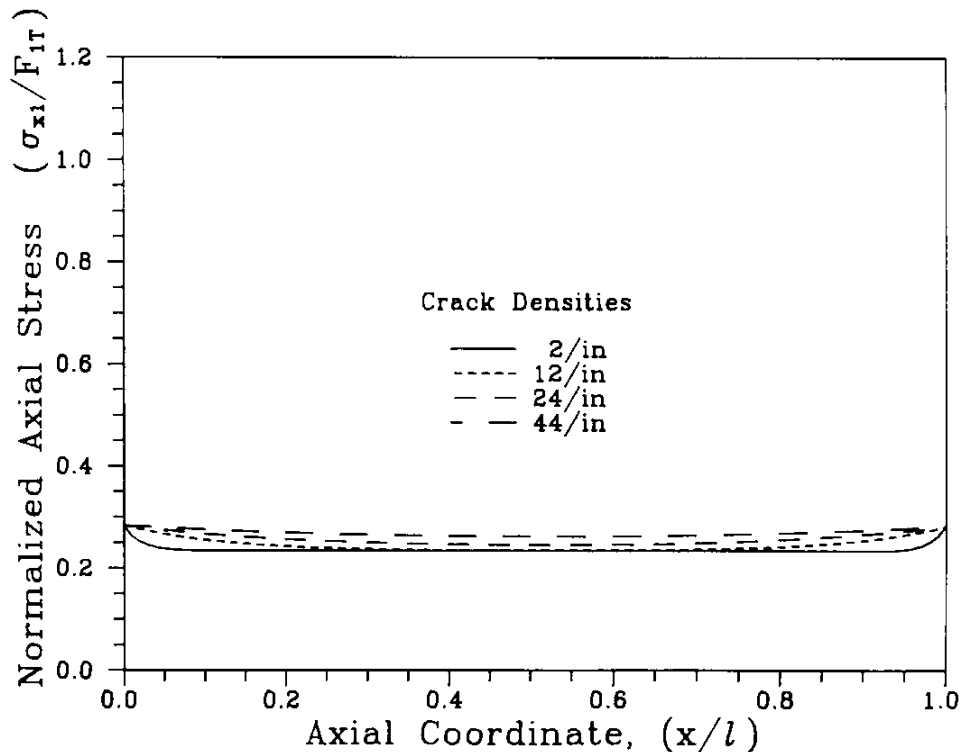
Η πλευρική καταπόνηση στη διεπιφάνεια δείχνει μέγιστη τιμή σε εφελκυσμό στα σημεία των ρωγμών , στη συνέχεια μειώνεται όσο πλησιάζουμε στο μέσο της απόστασής τους , αφού η απόλυτη τιμή της διατμητικής τάσης της διεπιφάνειας μειώνεται. Για μικρότερες πυκνότητες ρωγμών η κάθετη αξονική τάση στη στρώση των 90 είναι ίση , η ελάχιστα μικρότερη από την αντοχή εφελκυσμού F_{2T} . Αυτό σημαίνει πως είτε με μικρή αύξηση είτε χωρίς αύξηση της επιβαλλόμενης εξωτερικής φόρτισης , θα δημιουργούνται και άλλες ρωγμές , έως ότου η μέγιστη αξονική τάση στη στρώση των 90 , πάρει τιμή, μικρότερη από την αντοχή εφελκυσμού.



Σχήμα 2.6 Κανονικοποιημένη αξονική τάση μεταξύ δύο εγκάρσιων ρωγμών

Αντίθετα , για μεγάλες πυκνότητες ρωγμών , η μέγιστη αξονική τάση είναι πολύ χαμηλότερη , για την ίδια επιβαλλόμενη φόρτιση. Αυτό συμβαίνει διότι , το μήκος μεταξύ των ρωγμών δεν είναι αρκετό , ώστε να αναπτυχθούν αρκετά μεγάλες τάσεις στην ενίσχυση, σύμφωνα με το μοντέλο shear lag. Για το λόγο αυτό , για να εμφανιστούν περισσότερες ρωγμές , ή να αυξηθεί η μέγιστη αξονική τάση , πρέπει το εξωτερικό φορτίο να αυξηθεί και αυτό . Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η κατανομή των αξονικών τάσεων στη στρώση των 90. Όπως μπορούμε να διακρίνουμε, η τάση δε μεταβάλλεται ιδιαίτερα κατά μήκος της απόστασης μεταξύ των δύο ρωγμών. Αυτό συμβαίνει διότι η επιβαλλόμενη φόρτιση διατηρείται σταθερή , όπως επίσης και ο λόγος της δυσκαμψίας της διαμήκους στρώσης προς τη δυσκαμψία της στρώσης που έχει υποστεί βλάβη . Οι παράμετροι αυτοί δε μεταβάλλονται ιδιαίτερα

με τη μεταβολή της πυκνότητας των ρωγμών . Μία μικρή αύξηση της τάσης μπορούμε να πούμε ότι παρατηρείται στα σημεία των δύο ρωγμών.



Σχήμα 2.7 Κατανομή αξονικών τάσεων στη στρώση των 90

2.4 ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Η παραπάνω μαθηματική ανάλυση ενός σύνθετου υλικού ενισχυμένο στις διευθύνσεις 0/90 κάνει χρήση του μοντέλου shear lag και υποθέτει, για λόγους απλοποίησης, γραμμική κατανομή διατμητικών τάσεων σε κάθε στρώση του σύνθετου, διαμέσου του πάχους του. Έγινε υπολογισμός της κατανομής των τάσεων δεδομένης μιας συνθήκης φόρτισης και της κατάστασης βλάβης που προϋπήρχε στο σύνθετο υλικό. Η ανάλυση προβλέπει τον πολλαπλασιασμό των ρωγμών στη στρώση κάθετα στη διεύθυνση της φόρτισης καθώς το επιβαλλόμενο φορτίο αυξάνεται μέχρι την τελική αστοχία του υλικού. Επίσης μπορεί να δώσει μια εικόνα με σχετική ακρίβεια, όσον αφορά τη μείωση της δυσκαμψίας συναρτήσει του μεγέθους της βλάβης.

3. ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΣ SHEAR-LAG

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως , υπάρχουν διάφοροι μηχανισμοί αστοχίας που μπορεί να ακολουθήσει ένα σύνθετο υλικό . Αυτοί μπορεί να είναι εγκάρσια ρηγμάτωση της μήτρας στη στρώση των 90 μοιρών , διεπιφανειακή αποκόλληση μεταξύ των στρώσεων 0 και 90 , διαμήκης ρηγμάτωση της μήτρας που αναπτύσσεται παράλληλα στη διεύθυνση των ινών στη στρώση των 0 μοιρών και θραύση των ινών στις 0 μοίρες. Στα σύνθετα υλικά διασταυρούμενων στρώσεων όταν αυτά καταπονούνται εφελκυστικά οι ρωγμές ξεκινούν από τη μήτρα των στρώσεων στις 90 μοίρες και συνεχίζουν μέχρι τα ελεύθερα άκρα του δοκιμίου. Τα μαθηματικά μοντέλα που περιγράφουν αυτή τη διαδικασία ακολουθούν διαφορετικές αρχές , ανάλογα με τη φύση της φόρτισης, αν δηλαδή η φόρτιση είναι στατική (quasi-static) όπου διατηρείται η εσωτερική ισορροπία στο υλικό , είτε επικρατούν συνθήκες κόπωσης.

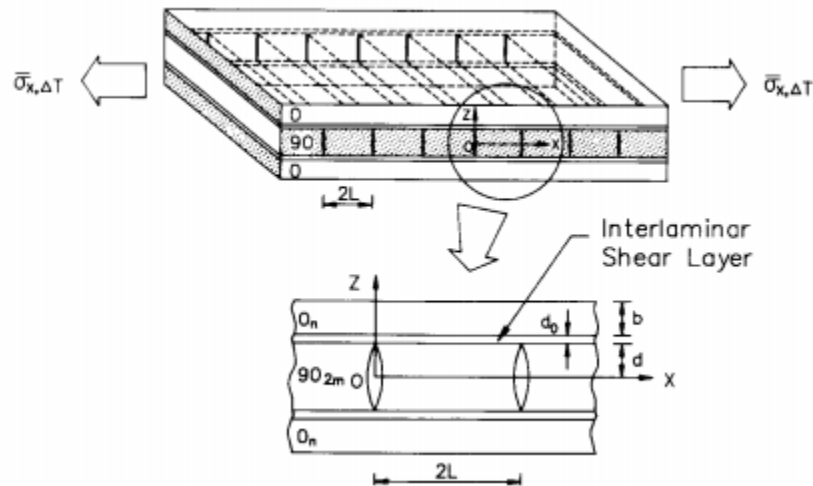
Οι ανάπτυξη των ρωγμών δεν μπορεί να προβλεφθεί από κριτήρια αστοχίας λαμβάνοντας υπόψιν μόνο τις τάσεις και τις παραμορφώσεις. Χρειάζονται επιπλέον ‘εργαλεία’ όπως είναι το μοντέλο shear lag και το κριτήριο ενέργειας του Griffith.

Καθώς αυξάνεται το επιβαλλόμενο φορτίο ,όπως είναι λογικό , οι ρωγμές πολλαπλασιάζονται , και αυτό έχει ως αποτέλεσμα σημαντική μείωση της δυσκαμψίας.

Η μέθοδος που θα περιγραφεί στο κεφάλαιο αυτό , προβλέπει αυτή τη μείωση της δυσκαμψίας χρησιμοποιώντας μια τροποποιημένη μέθοδο του μοντέλου shear lag. Το πεδίο των μετατοπίσεων που προκύπτει , ικανοποιεί τόσο τις συνοριακές συνθήκες όσο και τις εξισώσεις ισορροπίας στις στρώσεις και στις περιοχές των ρωγμών.

3.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Το μοντέλο που λαμβάνεται υπόψιν για την ανάλυση είναι ένα σύνθετο υλικό διασταυρούμενων στρώσεων το οποίο καταπονείται σε αξονικό εφελκυσμό και θερμική καταπόνηση. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται τόσο η γεωμετρία του μοντέλου όσο και οι συνοριακές συνθήκες του προβλήματος.



Σχήμα 3.1 Αναλυτική παρουσίαση του μοντέλου

Λόγω των αξονικών παραμορφώσεων κάνουν την εμφάνιση τους οι πρώτες εγκάρσιες ρωγμές στη μήτρα των στρώσεων των 90. Γίνεται παραδοχή ομοιόμορφης κατανομής των ρωγμών, στις περιοχές των οποίων γίνεται πρόβλεψη της κατανομής των τάσεων κάνοντας χρήση το παρόν μοντέλο. Επιπλέον, λαμβάνονται υπόψιν οι κοινές αλληλεπιδράσεις μεταξύ δύο γειτονικών ρωγμών, και ο πολλαπλασιασμός τους μπορεί να προσομοιωθεί, μειώνοντας το μήκος ($2L$) μεταξύ δύο ρωγμών. Οι εξισώσεις του πεδίου των μετατοπίσεων θεωρούνται οι εξής.

$$u_1 = e_0 x + U_1(x) \quad (3.1)$$

$$v_1 = -\frac{A_{12}}{A_{22}} e_0 y + V_1(x) \quad (3.2)$$

$$u_2 = e_0 x + U_2(x) \quad (3.3)$$

$$v_2 = -\frac{A_{12}}{A_{22}} e_0 y + V_2(x) \quad (3.4)$$

Οι μετατοπίσεις u , v θεωρούνται κατά μήκος των αξόνων x και y αντίστοιχα, ομοιόμορφες κατά μήκος του πάχους της κάθε στρώσης. Οι δείκτες 1 και 2 δηλώνουν τις 0 και τις 90 μοίρες αντίστοιχα. Η γραμμική παραμόρφωση e_0 προκύπτει από το αξονικό φορτίο σ_x .

Οι διαφορικές εξισώσεις που προκύπτουν από την ισορροπία των ρηγματωμένων στρώσεων, θεωρώντας απόσταση μεταξύ ρωγμών $2L$, είναι οι παρακάτω.

$$Q_{11} \frac{d^2 u_1}{dx^2} + \frac{G}{bd_0} (u_2 - u_1) = 0 \quad (3.5)$$

$$Q_{22} \frac{d^2 u_2}{dx^2} - \frac{G}{dd_0} (u_2 - u_1) = 0 \quad (3.6)$$

$$Q_{66} \frac{d^2 v_1}{dx^2} + \frac{G}{bd_0} (v_2 - v_1) = 0 \quad (3.7)$$

$$Q_{66} \frac{d^2 v_2}{dx^2} - \frac{G}{dd_0} (v_2 - v_1) = 0 \quad (3.8)$$

Όπου Q_{ij} και G δηλώνουν τις μειωμένες δυσκαμψίες και το συντελεστή διάτμησης της διεπιφάνειας μεταξύ των στρώσεων 0 και 90, αντίστοιχα.

Οι συνοριακές συνθήκες είναι:

$$\sigma_x^{(2)M} + \sigma_x^{(2)T} = 0, \quad b\sigma_x^{(1)M} = (b+d)\sigma_x, \quad V_1 = 0, \quad \frac{dV_2}{dx} = 0 \quad (3.9)$$

στα σημεία $\chi = 0$ και $\chi = 2L$. Οι συνοριακές συνθήκες όπως περιγράφονται από τις παραπάνω εξισώσεις ικανοποιούνται για κάθε πυκνότητα ρωγμών. (Τα γράμματα M και T αντιστοιχούν σε μηχανικές και θερμοκρασιακές τάσεις αντίστοιχα.)

Μετά τις συνοριακές συνθήκες, το πεδίο των μετατοπίσεων ορίζεται ως εξής:

$$u_1 = e_0 x - \frac{1}{\alpha} \frac{d\sigma_{x0}^{(2)}}{bQ_{11}} (-\beta_1 e^{\alpha x} + \beta_2 e^{-\alpha x}) \quad (3.10)$$

$$u_2 = e_0 x + \frac{1}{\alpha} \frac{\sigma_{x0}^{(2)}}{Q_{22}} (-\beta_1 e^{\alpha x} + \beta_2 e^{-\alpha x}) \quad (3.11)$$

$$v_1 v_2 = \frac{-A_{12}}{A_{22}} e_0 y \quad (3.12)$$

όπου

$$\begin{aligned} \alpha^2 &= \frac{G}{d_0} \left(\frac{1}{bQ_{11}} + \frac{1}{dQ_{22}} \right), \\ \beta_1 &= (1 - e^{-2\alpha L}) / (e^{2\alpha L} - e^{-2\alpha L}), \\ \beta_2 &= (e^{2\alpha L} - 1) / (e^{2\alpha L} - e^{-2\alpha L}), \\ \sigma_{x0}^{(2)} &= \sigma_x^{(2)M} + \sigma_x^{(2)T}, \end{aligned} \quad (3.13)$$

Από τις παραπάνω εξισώσεις αλλά και από την κλασσική θεωρία επίπεδων στρώσεων (βλ. παράρτημα) οι συνιστώσες των τάσεων μπορούν να γραφούν ως εξής:

$$\begin{aligned}\sigma_x^{(1)} &= \sigma_{x0}^{(1)} + \frac{d}{b} \sigma_{x0}^{(2)} (\beta_1 e^{ax} + \beta_2 e^{-ax}), \\ \sigma_x^{(2)} &= \sigma_{x0}^{(2)} \{1 - (\beta_1 e^{ax} + \beta_2 e^{-ax})\}, \\ \sigma_y^{(1)} &= \sigma_{y0}^{(1)} + \frac{dQ_{12}}{bQ_{11}} \sigma_{x0}^{(2)} (\beta_1 e^{ax} + \beta_2 e^{-ax}), \\ \sigma_y^{(2)} &= \sigma_{y0}^{(2)} + \frac{Q_{12}}{Q_{22}} \sigma_{x0}^{(2)} (\beta_1 e^{ax} + \beta_2 e^{-ax})\end{aligned}\quad (3.14)$$

Όπου $\sigma_{x0}^{(i)}$ και $\sigma_{y0}^{(i)}$ δηλώνουν το άθροισμα της υπολοιπούμενης θερμικής τάσης με της συνιστώσες της μηχανικής τάσης της στρώσης που δεν έχει υποστεί βλάβη στις διευθύνσεις x και y αντίστοιχα.

3.2 ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΕΓΚΑΡΣΙΩΝ ΡΩΓΜΩΝ

Με την επίλυση της τροποποιημένης μεθόδου shear lag, η επόμενη διαδικασία είναι η διατύπωση του κριτηρίου ανάπτυξης εγκάρσιων ρωγμών σε σύνθετα υλικά διασταυρούμενων στρώσεων. Κάνοντας χρήση των ενεργειακών μεθόδων ανάπτυξης ρωγμών υπό μηχανικές και θερμικές φορτίσεις, το κριτήριο μπορεί να περιγραφεί από τον παρακάτω τύπο:

$$\frac{d}{da} (W - U) \geq 2dG_{IC} \quad (3.15)$$

Όπου W είναι το έργο που παράγεται από τις εξωτερικές φορτίσεις, U η ελαστική ενέργεια παραμόρφωσης, G_{IC} κρίσιμος ρυθμός απελευθέρωσης ενέργειας παραμόρφωσης στη διεύθυνση των ινών και a είναι το μέγεθος της ρωγμής.

Το κριτήριο αυτό στηρίζεται στην υπόθεση ότι οι εγκάρσιες ρωγμές εκτείνονται σε όλο το πάχος των στρώσεων των 90° σε διεύθυνση κάθετη στο εφαρμοζόμενο φορτίο και παράλληλη στη διεύθυνση των στρώσεων. Για την ανάπτυξη μιας μεμονωμένης ρωγμής, το κριτήριο μπορεί να διατυπωθεί ως εξής:

$$(\Delta W - \Delta U) \geq 2dG_{IC} \quad (3.16)$$

όπου ΔW το έργο που παράγεται από την εξωτερική φόρτιση και ΔU είναι η μεταβολή της ελαστικής ενέργειας παραμόρφωσης κατά τη διάρκεια ανάπτυξης των εγκάρσιων ρηγματώσεων και ισούται με :

$$\Delta U = \Delta U_1 + \Delta U_2 + \Delta U_3,$$

με $\Delta U_1, \Delta U_2$ τη μεταβολή της ελαστικής ενέργειας παραμόρφωσης στις 0 και 90 αντίστοιχα και ΔU_3 τη μεταβολή της ενέργειας λόγω των διατμητικών τάσεων που εμφανίζονται στη διεπιφάνεια κατά την ανάπτυξη εγκάρσιων ρωγμών.

3.3 ΜΕΙΩΣΗ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ ΚΑΘΕ ΣΤΡΩΣΗΣ ΛΟΓΩ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ ΕΓΚΑΡΣΙΩΝ ΡΩΓΜΩΝ

Είναι γνωστό πως η πολλαπλή ανάπτυξη εγκάρσιων ρωγμών με επιπρόσθετο εφελκυστικό φορτίο σε σύνθετα υλικά , προκαλεί σταδιακή μείωση της δυσκαμψίας των στρώσεων . Η ανάπτυξη αυτή αποδίδεται σε μια ζώνη shear lag που εμφανίζεται γύρω από την περιοχή της ρωγμής.

Για σταθερή φόρτιση σ_x , η σχέση τάσεων παραμορφώσεων για τη στρώση που δεν έχει υποστεί βλάβη δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\sigma_x = e_0 E_{x0} \quad (3.17)$$

όπου E_{x0} είναι το μέτρο ελαστικότητας της στρώσης που δεν έχει υποστεί βλάβη . Η ίδια σχέση για τη στρώση που έχει υποστεί βλάβη με ρωγμές μήκους $2L$ είναι

$$\sigma_x = \acute{e}_x E_x \quad (3.18)$$

όπου \acute{e}_x η μέση παραμόρφωση στη ρηγματωμένη στρώση και E_x το ενεργό μέτρο ελαστικότητας της στρώσης αυτής.

Η κανονικοποιημένη μείωση της δυσκαμψίας, λαμβάνοντας υπόψιν τους παραπάνω τύπους, ορίζεται ως

$$E_x/E_{x0} = e_0 \acute{e}_x \quad (3.19)$$

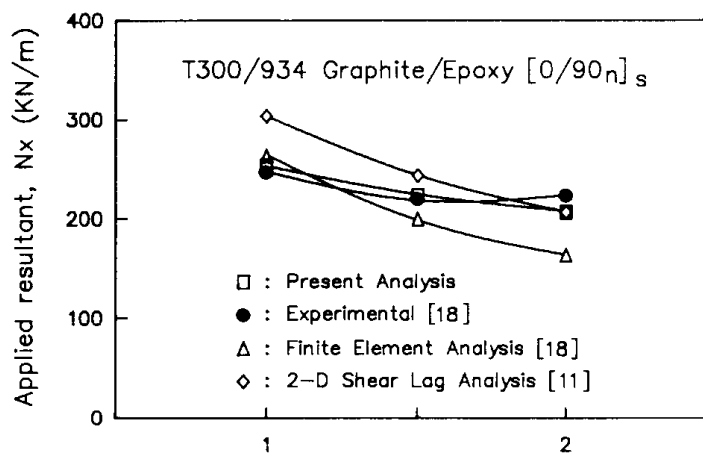
όπου e_0 η παραμόρφωση λόγω των εγκάρσιων ρωγμών στη στρώση που εμφανίζονται.

Αξίζει να σημειωθεί πως για λόγους απλότητας της ανάλυσης , γίνεται η παραδοχή πως η νέα ρωγή που εμφανίζεται κάθε φορά θεωρείται ότι γίνεται στο μέσο του διαστήματος μεταξύ δύο ήδη υπάρχουσών ρωγμών, δεδομένης της τιμής των παραμορφώσεων.

3.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

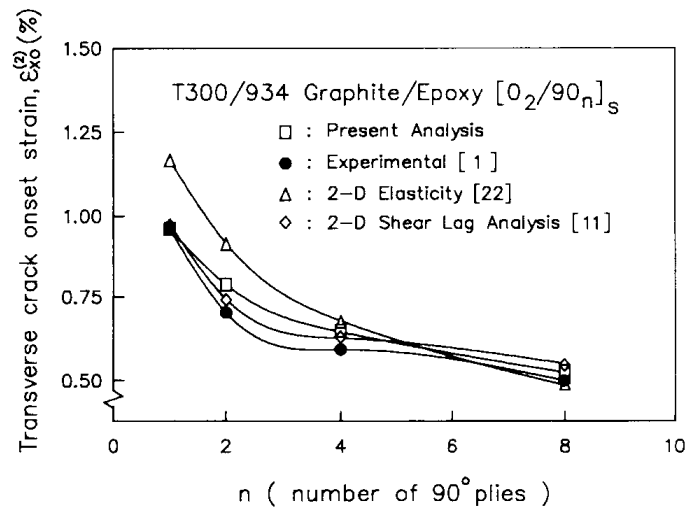
Για την επαλήθευση της τροποποιημένης μεθόδου shear lag εκπονήθηκαν πειράματα με χρήση υλικών γνωστών μηχανικών και θερμικών ιδιοτήτων από τη βιβλιογραφία. Τα αποτελέσματα της θεωρίας συγκρίνονται και με αποτελέσματα και με παλαιότερες αναλύσεις . Όταν εφελκούνται τα σύνθετα υλικά διασταυρούμενων στρώσεων , όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα , οι εγκάρσιες ρωγμές προκύπτουν στις στρώσεις των 90 μοιρών. Γενικά , οι ρωγμές αυτές είναι η πρώτη μορφή αστοχίας που κάνει την εμφάνισή της για παραμορφώσεις μικρότερες της παραμόρφωσης θραύσης του σύνθετου υλικού.

Στο γράφημα που ακολουθεί , συγκρίνονται τα αποτελέσματα για εφελκυστικό φορτίο κατά την αρχική εμφάνιση των ρωγμών σύμφωνα με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων , τα πειραματικά δεδομένα, τη μέθοδο shear lag και την παρούσα θεωρία(τροποποιημένη μέθοδος shear lag), και γίνεται εύκολα αντιληπτή η συμφωνία των αποτελεσμάτων κατά προσέγγιση με τις υπόλοιπες μεθόδους.



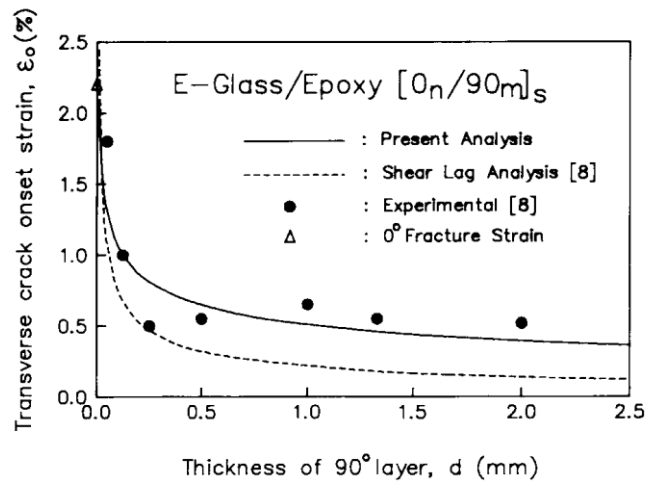
Σχήμα 3.2 Εφαρμοζόμενη συνισταμένη δύναμη κατά την εμφάνιση εγκάρσιων ρωγμών.

Το ίδιο μπορούμε να παρατηρήσουμε και για τις παραμορφώσεις οι οποίες μειώνονται με την αύξηση του πάχους του δοκιμίου .

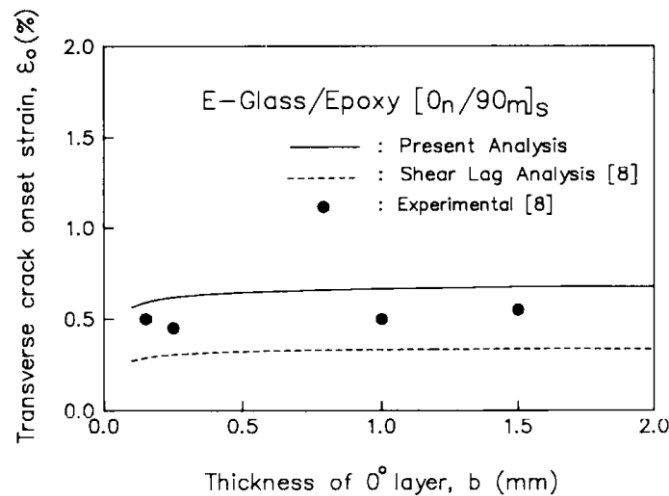


Σχήμα 3.3 Μείωση παραμορφώσεων καθώς το πάχος του δοκιμίου αυξάνεται

Στο επόμενο διάγραμμα των τάσεων κατά την εμφάνιση των ρωγμών με το πάχος της στρώσης των 90 αλλά και των 0 μοιρών, φαίνεται πως η τροποποιημένη μέθοδος shear lag της παρούσας ενότητας προσεγγίζει περισσότερο τα πειραματικά αποτελέσματα σε σχέση με την συμβατική μέθοδο shear lag.



Σχήμα 3.4 Παραμορφώσεις συναρτήσει του πάχους των στρώσεων των 90.



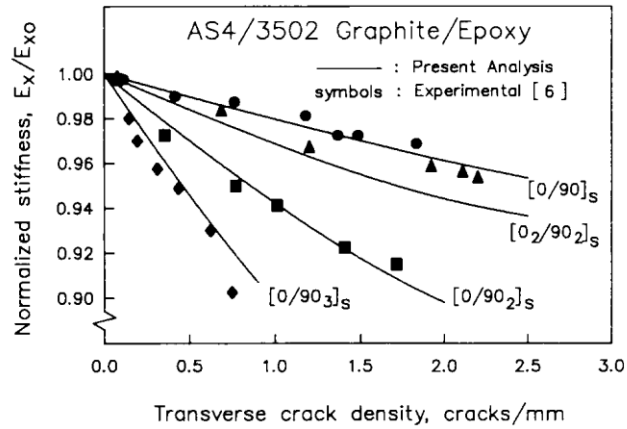
Σχήμα 3.5 Παραμορφώσεις συναρτήσει του πάχους των στρώσεων των 0° .

Για σύνθετα υλικά με λεπτά πάχη της στρώσης των 90° , η παρούσα ανάλυση προσομοιώνει καλά τον περιορισμό της στρώσης των 0° , κατά την εγκάρσια ρηγμάτωση.

Η περιοριστική επίδραση της στρώσης αυτής, περιγράφεται από το παραπάνω διάγραμμα. Σύμφωνα με τις πειραματικές μετρήσεις, υπάρχει μια μικρή αύξηση της παραμόρφωσης λόγω ρηγμάτωσης στις 90° , καθώς το πάχος των 0° , αυξάνεται, όπως είναι επόμενο λόγω του φαινομένου Poisson ανάλογα και με την τιμή του δείκτη. Παρά το γεγονός πως τα αποτελέσματα από την τροποποιημένη μέθοδο shear lag υπερεκτιμούν ελαφρώς την τιμή των παραμορφώσεων, βρίσκονται σε μεγαλύτερη συμφωνία σε σχέση με την απλή μέθοδο shear lag. Η παραμόρφωση κατά την εμφάνιση εγκάρσιων ρωγμών δεν επηρεάζεται σημαντικά από το πάχος της στρώσης των 0° , όσο από το πάχος των 90° .

Η θεώρηση ύπαρξης ενός ενδιάμεσου στρώματος διατμητικών τάσεων επηρεάζει σημαντικά την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Αυτό συμβαίνει διότι, σε περίπτωση αγνόησης αυτής της συνθήκης, όλη η στρώση που υφίσταται ρηγματώσεις εκλαμβάνεται ως ένα στρώμα διάτμησης.

Κατά την αύξηση του φορτίου, αυξάνεται και η πυκνότητα ρωγμών που επηρεάζει σημαντικά τις μηχανικές ιδιότητες του σύνθετου. Για την ακρίβεια μειώνεται η δυσκαμψία, όπως μπορεί κανείς να παρατηρήσει στο επόμενο γράφημα.



Σχήμα 3.6 Μείωση δυσκαμψίας λόγω αύξησης πυκνότητας ρωγμών

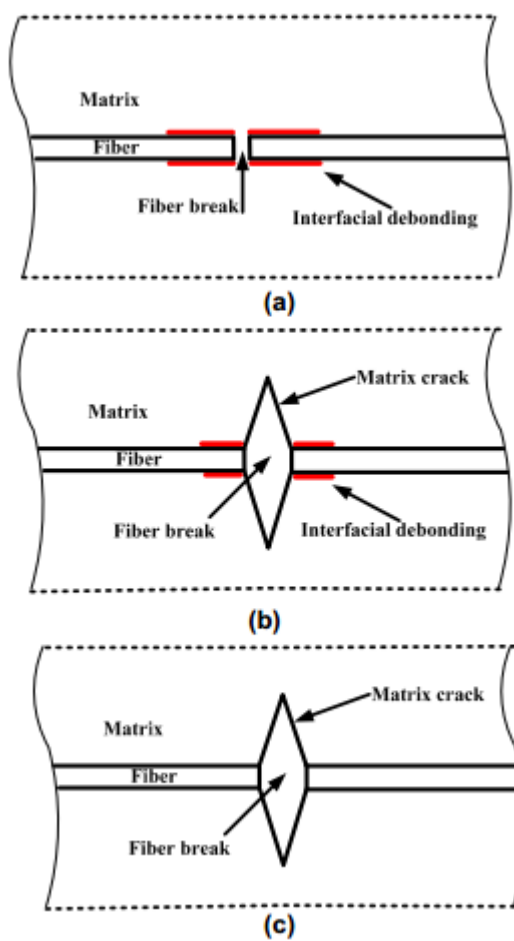
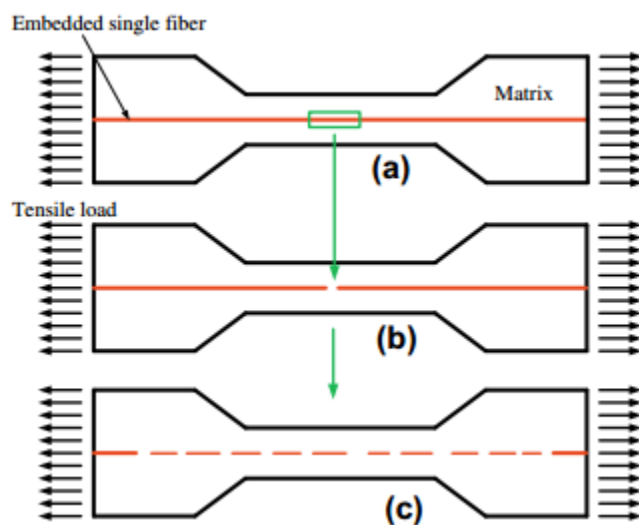
Η μείωση αυτή δεν επηρεάζεται μόνο από την πυκνότητα των εγκάρσιων ρωγμών αλλά και από το πάχος της στρώσης των 90. Όσο περισσότερες είναι οι στρώσεις των 90 τόσο μεγαλύτερη είναι υποβάθμιση της δυσκαμψίας του σύνθετου. Αυτό ερμηνεύεται από το γεγονός , πως για μεγαλύτερα πάχη των στρώσεων αυτών , όλο και περισσότερη τάση παραλαμβάνεται από τις συγκεκριμένες στρώσεις καθώς και υφίσταται μεγαλύτερες παραμορφώσεις λόγω των ρωγμών .

4. ΠΕΙΡΑΜΑ ΘΡΑΥΣΗΣ ΜΙΑΣ ΙΝΑΣ

Για να γίνουν πιο εύκολα κατανοητοί οι μηχανισμοί αστοχίας σε ένα σύνθετο υλικό, έχουν γίνει αρκετές προσπάθειες και προταθεί διάφορες μεθοδολογίες, ειδικά για την εξέταση της θραύσης μιας ίνας σε εφελκυσμό που προτάθηκε για πρώτη φορά από τους Kelly και Tyson (Single Fiber Composite Fragmentation Test, SFCT). Το συγκεκριμένο πείραμα έχει πολύ καλή αντιστοίχιση με πραγματικά σύνθετα υλικά όταν αυτά καταπονούνται σε μονοαξονικό εφελκυσμό στη διεύθυνση των ινών της ενίσχυσης. Αυτό συμβαίνει διότι οι θεμελιώδεις μηχανισμοί αστοχίας που εμφανίζονται σε ένα σύνθετο υλικό, υπάρχουν και στο SFCT, με τη διαφορά ότι στο SFCT η συμμετρία είναι κυλινδρική, ενώ σε ένα σύνθετο υλικό διασταυρούμενων στρώσεων είναι επίπεδη. Έτσι, χρησιμοποιείται ευρέως ως ένα πολύ ισχυρό εργαλείο για την εκπόνηση μικρομηχανικών μελετών της διεπιφάνειας μεταξύ των ινών και του περιβάλλοντος μητρικού υλικού, καθώς και των μηχανισμών αστοχίας.

Στο SFCT, το δοκίμιο που αποτελείται από μια ίνα που περιβάλλεται από πολυμερές υλικό καταπονείται εφελκυστικά όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Μόλις το δοκίμιο αρχίσει να φορτίζεται, εφελκυστικό φορτίο μεταφέρεται από την περιβάλλουσα μήτρα, στην ίνα μέσω διατμητικής τάσης, και αρχίζει σταδιακά να αυξάνεται. Όταν η τάση, ξεπεράσει την αντοχή την ίνας, η ίνα θα αστοχήσει. Καθώς η διαδικασία συνεχίζεται, η ίνα συνεχίζει να σπάει σε μικρότερα τμήματα. Όταν, τελικά, η εξωτερική φόρτιση δε μπορεί να αναπτύξει αρκετή τάση στην ίνα, ώστε αυτή να συνεχίζει να σπάει σε μικρότερα τμήματα, το πείραμα διακόπτεται καθώς φτάνει σε μια κατάσταση κορεσμού των ρωγμών, ίδια ακριβώς με την κατάσταση στα σύνθετα υλικά, όπως περιγράφεται σε επόμενη ενότητα.

Κατά τη διάρκεια του πειράματος, η τάση στην ίνα, τη μήτρα και τη διεπιφάνεια ανακατανέμεται συνεχώς. Οι μηχανισμοί αστοχίας που θα προκύψουν (αστοχία μήτρας, ινών ή διαστρωματική αποκόλληση) εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τις ιδιότητες της διεπιφάνειας. Για χαμηλή αντοχή της διεπιφάνειας, εμφανίζεται διαστρωματική αποκόλληση. Για μέση αντοχή της διεπιφάνειας, εμφανίζεται θραύση της μήτρας, ενώ για μεγάλη αντοχή της διεπιφάνειας, δεν εμφανίζονται αποκολλήσεις και ο μηχανισμός θραύσης είναι είτε αστοχία της μήτρας είτε της ενίσχυσης.



Σχήμα 4.1 Σχηματική περιγραφή του πειράματος SFCT.

4.1 ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ SFCT

Η ανάλυση του SFCT πειράματος μπορεί να χωριστεί σε δύο μεθόδους· την αναλυτική και την αριθμητική.

Στις αναλυτικές μεθόδους αναπτύσσονται θεωρητικά μοντέλα π.χ μοντέλα shear lag μιας διάστασης, αξονοσυμμετρικά μοντέλα δύο διαστάσεων κ.ά. Μέσω των μοντέλων αυτών αναπτύσσονται διάφορα κριτήρια και τύποι οι οποίοι μπορούν να καθορίσουν τις τάσεις που αναπτύσσονται στις ίνες, την ανακατανομή των τάσεων στη διεπιφάνεια και τη μήτρα, καθώς και το κρίσιμο μήκος απόστασης των ρωγμών, όταν το σύνθετο βρίσκεται σε κατάσταση κορεσμού των ρωγμών. Παρ' όλ' αυτά η αναλυτική μέθοδος είναι δύσκολη για τη μελέτη και ανάλυση των μηχανισμών θραύσης.

Αντίθετα, όλες οι μορφές αστοχίας αλλά και οι κατανομές των τάσεων που προκύπτουν μπορούν να περιγραφούν από αριθμητικές μεθόδους. Στις αριθμητικές μεθόδους, γίνεται χρήση λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων. Πολλές μελέτες επικεντρώνεται στην αριθμητική επίλυση της μεταφοράς των τάσεων από τη μήτρα στην ενίσχυση, όπως και στην προσομοίωση της θραύσης σε σύνθετα υλικά.

Η αντοχή των ινών ακολουθεί κατανομή Weibull έτσι ώστε η αθροιστική πιθανότητα αστοχίας μιας ίνας μήκους L να δίνεται από τον τύπο:

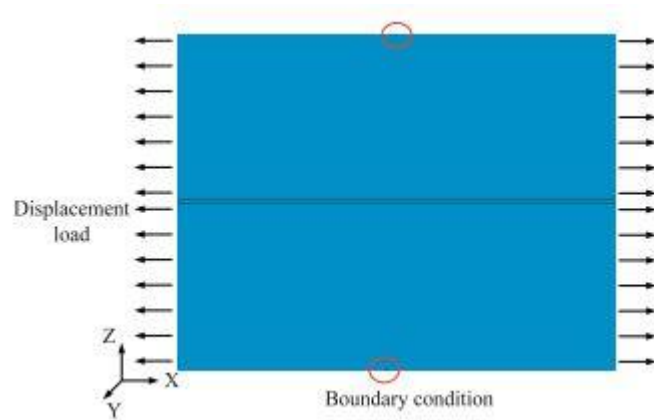
$$F(\sigma) = 1 - \exp[-L/(\sigma/\sigma_0)^m] \quad (4.1)$$

Όπου m , σ_0 είναι παράμετροι της κατανομής Weibull.

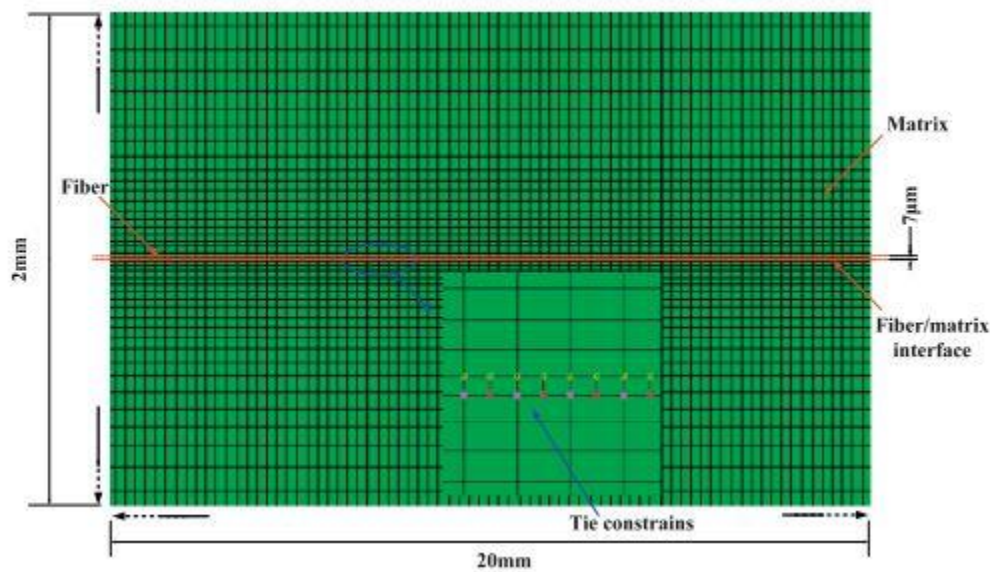
4.1.1 Αριθμητική ανάλυση και προσομοίωση του SFCT

Στη συνέχεια της εργασίας παρουσιάζεται ένα μοντέλο που προσομοιώνει τη συμπεριφορά μιας ίνας που περιβάλλεται από υλικό της μήτρας και ακολουθεί η επίλυσή του με πεπερασμένα στοιχεία. Το δοκίμιο προσομοιώνεται με μια πλάκα δύο διαστάσεων. Η διάμετρος της ίνας θεωρείται 7μm. Η εξωτερική ακτίνα της μήτρας είναι 1 mm έτσι ώστε το ελεύθερο άκρο να μην επηρεάζει τη διαδικασία θραύσης στην ενσωματωμένη ίνα.

Η γεωμετρία του δοκιμίου διακριτοποιήθηκε με τετράκομβα επίπεδα πεπερασμένα στοιχεία. Στη διεύθυνση της φόρτισης ο αριθμός των στοιχείων που μοντελοποιούν την ίνα είναι πολύ μεγαλύτερος από αυτόν της μήτρας. Έτσι η ιδιότητα της επαφής που ορίζεται, ακολουθεί μια συμπεριφορά αρκετά όμοια με αυτή της διεπιφάνειας ενός σύνθετου υλικού.



Σχήμα 4.2 .Γεωμετρία και συνοριακές συνθήκες μοντέλου



Σχήμα 4.3 Διακριτοποίηση μήτρας και ίνας του μοντέλου

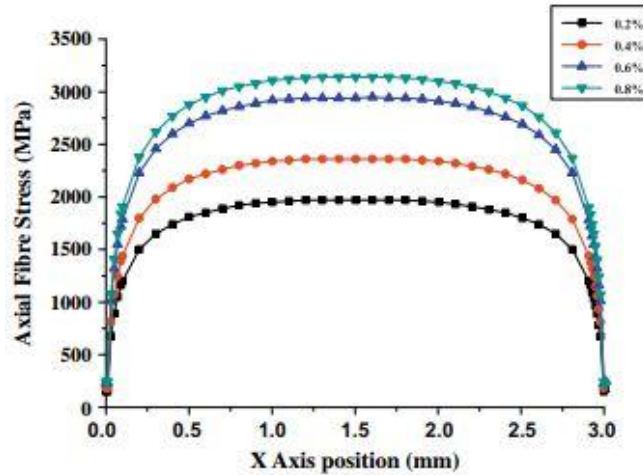
Όσον αφορά τα υλικά που μοντελοποιούν το δικίμιο, η ίνα και η μήτρα θεωρούνται ότι αποκρίνονται ως ένα ισότροπο ελαστικό υλικό. Η εξωτερική φόρτιση εκφράζεται ως εφελκυστική παραμόρφωση στον άξονα της ίνας και για να αποτραπεί η κίνηση στερεού σώματος, εμποδίζεται η μετακίνηση εκτός του επιπέδου της γεωμετρίας του μοντέλου.

Η μοναδική ίνα του δοκιμίου έχει σταθερή φέρουσα ικανότητα. Όταν η τάση που μεταφέρεται στην ίνα από τη μήτρα ξεπεράσει την αντοχή της ίνας, η ίνα θα αστοχήσει και θα χάσει ένα μέρος της φέρουσας ικανότητάς της λόγω του γεγονότος ότι το μήκος της πλέον θα είναι μικρότερο. Έτσι, όπως περιγράφεται στο μοντέλο shear lag στο κεφάλαιο 2, η τάση που θα αναπτυχθεί κατά μήκος της διεύθυνσης της ίνας δε θα φτάσει στα επίπεδα που είχε πριν αστοχήσει. Έτσι το κριτήριο της μέγιστης τάσης για την ίνα περιγράφει την κατάσταση αστοχίας. Με άλλα λόγια αν η

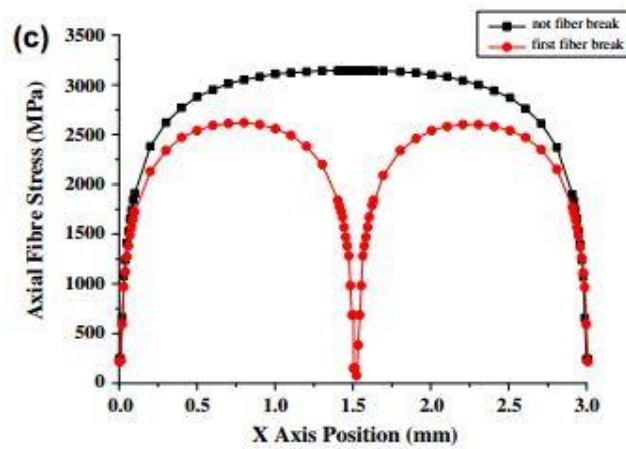
κυρία εφελκυστική τάση ξεπεράσει την αντοχή της ίνας , η ίνα θα αστοχήσει. Το μέτρο ελαστικότητας μειώνεται, αφού το κριτήριο αστοχίας ικανοποιηθεί , ως εξής :

$$E = d E_f \quad (4.2)$$

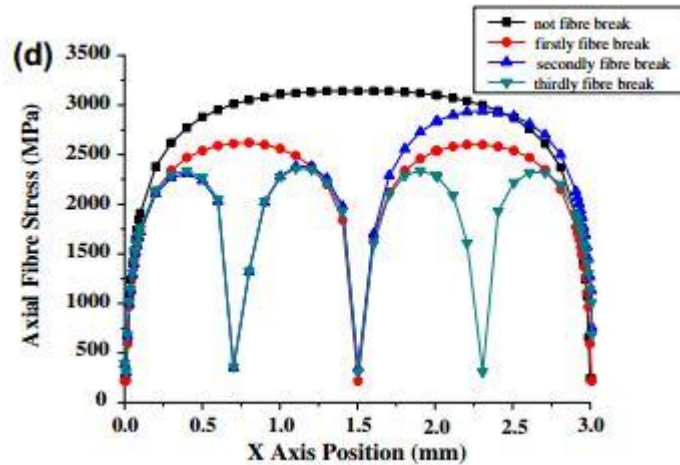
όπου E είναι το μέτρο ελαστικότητας πριν τη θραύση , d είναι ο συντελεστής υποβάθμισης και E_f το μέτρο ελαστικότητας μετά την αστοχία.



Σχήμα 4.4 Ανάπτυξη τάσεων κατά μήκος της ίνας πριν τη θραύση όπως προβλέπει το μοντέλο shear lag.



Σχήμα 4.5 Ανάπτυξη τάσεων κατά μήκος των δύο τμημάτων της ίνας μετά την πρώτη θραύση.



Σχήμα 4.6 Ανάπτυξη τάσεων κατά μήκος των τμημάτων των ινών σε μετά από διαδοχικές θραύσεις.

4.2 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΤΗΣ ΙΝΑΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.

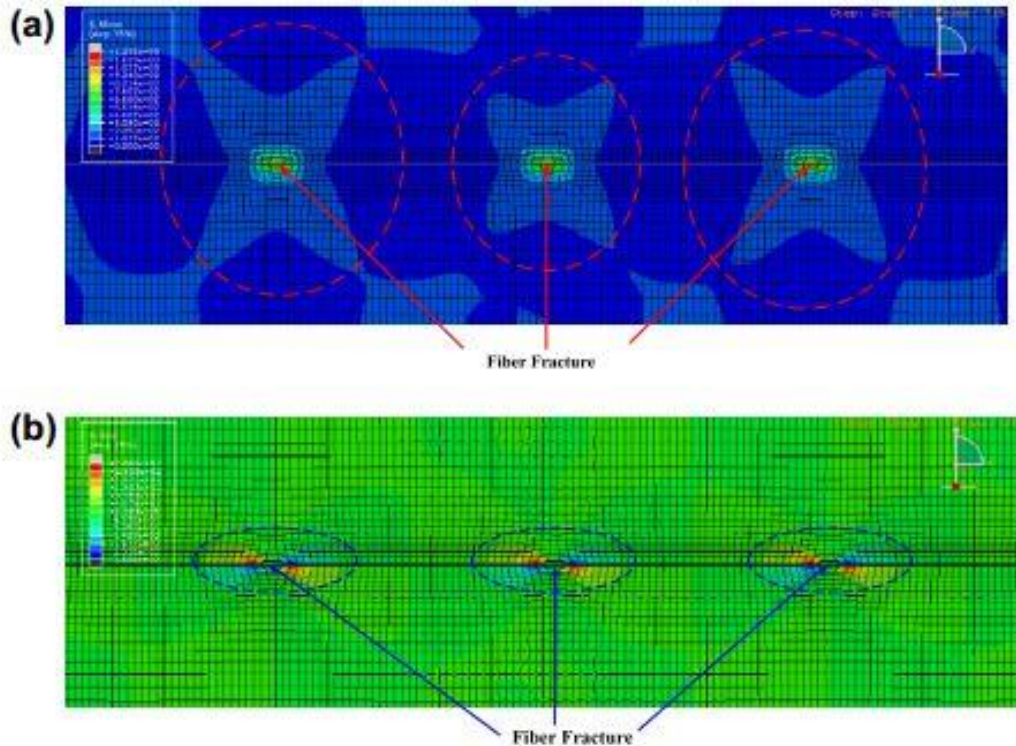
Στο ABAQUS υπάρχουν πολλές έτοιμες υπορουτίνες για αυτού του τύπου τις μελέτες . Προγραμματίζονται σε Fortran και εκτελούνται από το ίδιο το λογισμικό κατά τη διάρκεια της αριθμητικής επίλυσης του μοντέλου. Οι ρουτίνες αυτές καθορίζουν τη συμπεριφορά του υλικού, ώστε να παρέλθει αστοχία της ίνας κατά το SFDCF. Έτσι κάθε φορά που υπάρχει αστοχία στην ίνα , οι παράμετροι των κριτηρίων αστοχίας ρυθμίζονται κατάλληλα μέσα από την υπορουτίνα με αποτέλεσμα να υποβαθμίζεται η φέρουσα ικανότητα .

Πριν την πρώτη αστοχία της ίνας , η μεταφορά του φορτίου από τη μήτρα στην ίνα θεωρείται ελαστική . Η αξονική τάση στην ίνα αυξάνεται με την αύξηση του εξωτερικού φορτίου, μέσω της μεταφοράς της από τη διεπιφάνεια . Καθώς το φορτίο αυξάνεται , μόλις ξεπεραστεί η αντοχή της ίνας , αυτή θα αστοχήσει όπως φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί.

Η τάση στο στοιχείο που βρίσκεται στην περιοχή αστοχίας της ίνας θεωρείται ότι είναι σχεδόν μηδενική , πράγμα που σημαίνει ότι το στοιχείο αυτό έχει χάσει εντελώς τη φέρουσα ικανότητα του . Με τον τρόπο αυτό υφίσταται ανακατανομή της τάσης στη διεπιφάνεια και στο υλικό της μήτρας στις κοντινές περιοχές γύρω από τα σημεία θραύσης , κάτι που συμβαίνει κάθε φορά που θα επέρχεται αστοχία στην ίνα .

Λόγω του γεγονότος ότι μειώνεται το συνολικό μήκος της ίνας , κάθε αστοχία που θα ακολουθεί, θα πραγματοποιείται με μικρότερη συνολική τάση , όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως. Με τη συνεχή

αύξηση του φορτίου η ίνα θα σπάει σε όλο και μικρότερα τμήματα μέχρι να φθάσει στην κατάσταση κορεσμού.



Σχήμα 4.7 Θραύση ινών και κατανομή των τάσεων.

Η παραπάνω πειραματική διαδικασία έχει μεγάλη εφαρμογή στον προσδιορισμό των τάσεων της διεπιφάνειας που αναπτύσσονται σε ένα σύνθετο υλικό. Επειδή τα σημεία που θα παρέλθει η θραύση δε μπορούν να προβλεφθούν, συχνά χρησιμοποιείται η κατανομή Weibull έτσι ώστε τα μοντέλα να έχουν στοχαστικό χαρακτήρα. Το μοντέλο shear lag εκφράζει με ικανοποιητική ακρίβεια την ανάπτυξη της τάσης κατά μήκος της ίνας πριν αλλά και μετά τη θραύση της ίνας.

Όπως θα δούμε σε επόμενο κεφάλαιο που εξετάζεται ένα σύνθετο υλικό διασταυρούμενων στρώσεων σε εφελκυσμό, τα αποτελέσματα που προκύπτουν (κατανομή των τάσεων στη διεπιφάνεια και κατά μήκος της ενίσχυσης) ταυτίζονται σε μεγάλο βαθμό με τα αποτελέσματα του SFCC. Η κατανομή των τάσεων, δηλαδή, στις γειτονικές περιοχές των ρωγμών είναι όμοια και στις δύο περιπτώσεις, πράγμα που σημαίνει πως η παραπάνω πειραματική διαδικασία είναι αρκετά ακριβής για την εξαγωγή συμπερασμάτων, παρ' όλο που δεν εξετάζεται ένα πλήρες σύνθετο υλικό.

5. ΚΟΡΕΣΜΟΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΕΓΚΑΡΣΙΩΝ ΡΩΓΜΩΝ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ

5.1 ΚΟΡΕΣΜΟΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΕΓΚΑΡΣΙΩΝ ΡΩΓΜΩΝ

Το εφαρμοζόμενο φορτίο παίζει καθοριστικό ρόλο για το μηχανισμό αστοχίας που θα ακολουθήσει το σύνθετο. Καθώς αρχίζουν να αυξάνονται οι ρωγμές στη στρώση των 90, το φορτίο που παραλαμβάνει αυτή η στρώση σταδιακά μειώνεται. Το γεγονός αυτό, όπως είναι λογικό, μειώνει το ρυθμό αύξησης της πυκνότητας των ρωγμών, ώσπου τελικά φτάσει ως ένα σημείο κορεσμού. Από εκείνο το σημείο και έπειτα δεν εμφανίζονται νέες ρωγμές στο σύνθετο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της αντοχής του σύνθετου και μπορεί να οδηγήσει σε θραύση των ινών στη στρώση των 0.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από πειραματικές διαδικασίες, οι ρωγμές θα αρχίσουν να κάνουν την εμφάνισή τους σε σημεία των στρώσεων των 90 όπου υπάρχουν ατέλειες. Στη συνέχεια, θα αρχίσουν να αναπτύσσονται καθ' όλο το πάχος της στρώσης μέχρι τη διεπιφάνεια. Καθώς αυξάνεται το φορτίο, νέες ρωγμές κάνουν την εμφάνισή τους, παράλληλες με τις ήδη υπάρχουσες. Αυτό θα συνεχίσει να συμβαίνει έως ένα σημείο κορεσμού, όπου και θα σταματήσουν να εμφανίζονται νέες ρωγμές ανεξάρτητα από το εξωτερικό φορτίο που εφαρμόζεται.

Ο μηχανισμός αυτός ερευνήθηκε αρχικά από τους Altus και Ishai (1986), ενώ έγινε και η παρατήρηση ότι η εντός επιπέδου διαμήκεις τάσεις μειώνονται καθώς η πυκνότητα των ρωγμών αυξάνεται.

Περεταίρω ρηγματώσεις προκαλούν διαμήκεις θλιπτικές τάσεις στις στρώσεις των 90. Η σημαντική αύξηση των τάσεων στις αιχμές των ρωγμών είναι υπεύθυνες για την διαστρωματική ολίσθηση μεταξύ των στρώσεων 0 και 90 στις αιχμές των ρωγμών.

Άλλη μια σημαντική παρατήρηση είναι πως η πυκνότητα των εγκάρσιων ρωγμών είναι ένα σημαντικό κριτήριο που μπορεί να δώσει σημαντικές πληροφορίες για τη βλάβη που μπορεί να υποστεί ακόμη το σύνθετο, καθώς και να υποδείξει, πόσο πιθανή είναι η εμφάνιση διαφορετικών μηχανισμών αστοχίας. Η εμφάνιση αυτών όμως εξαρτάται και από το είδος της εξωτερικής φόρτισης, αν το δοκίμιο δηλαδή καταπονείται στατικά, σε κόπωση κτλ.

Τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν πως οι ρηγματώσεις κάνουν την εμφάνισή τους για σχετικά μικρές τιμές της εξωτερικής φόρτισης. Αντίθετα, οι διαστρωματικές αποκολλήσεις που πολύ συχνά ακολουθούν, απαιτούν αρκετά μεγαλύτερες φορτίσεις.

Το μοντέλο που θα αναλυθεί στη συνέχεια ερμηνεύει το μηχανισμό κορεσμού των εγκάρσιων ρωγμών καθώς και την εμφάνιση διαστρωματικής αποκόλλησης στις αιχμές των ρωγμών στη διεπιφάνεια μεταξύ των στρώσεων 0 και 90 μοιρών.

5.2 ΕΙΔΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΩΝ ΣΤΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ

Γενικά , υπάρχουν δύο προσεγγίσεις όσον αφορά τη μοντελοποίηση και προσομοίωση των υλικών. Η πρώτη προσέγγιση ,η οποία καλείται , μακρομηχανική, αναφέρεται σε πειραματικές παρατηρήσεις συγκεκριμένων δοκιμών , προσπαθώντας από τα πειράματα αυτά να εξαχθούν καταστατικές εξισώσεις που να ισχύουν για ένα ευρύτερο φάσμα υλικών. Η παραδοχή που γίνεται σε αυτού του τύπου τις προσεγγίσεις είναι πως θεωρείται το σύνθετο υλικό ως ένα ομογενές ορθότροπο μέσο και δεν λαμβάνει υπόψη τις εσωτερικές ιδιαιτερότητες της γεωμετρίας του σύνθετου. Για το λόγο αυτό , τέτοιου είδους μοντέλα με χονδροειδείς παραδοχές δε μπορούν να προβλέψουν τοπική βλάβη του υλικού . Για να εξεταστεί πειραματικά όμως ένα ευρύ φάσμα υλικών πρέπει να ληφθεί υπόψιν ο χρόνος και οι οικονομικοί πόροι που απαιτούνται .

Η δεύτερη προσέγγιση καλείται μικρομηχανική και βασίζεται στη διακριτοποίηση της γεωμετρίας του υλικού και με γνωστές τις ιδιότητες των ινών και της μήτρας μπορεί να προβλέψει τη συνολική συμπεριφορά του σύνθετου. Η υπόθεση που γίνεται είναι πως το σύνθετο υλικό κατέχει μια περιοδική δομή. Με βάση τα στοιχεία που αναφέρθηκαν πραγματοποιείται διακριτοποίηση είτε σε επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία , είτε σε στοιχεία όγκου , βασιζόμενη στη γεωμετρία του υλικού αλλά και τις συνοριακές συνθήκες κάθε προβλήματος φόρτισης που καλείται να αντιμετωπίσει.

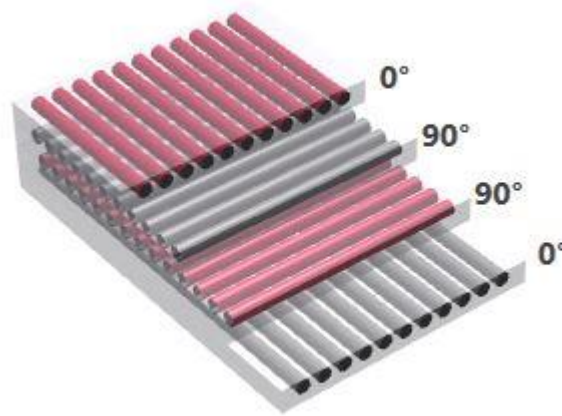
Η λύση της διαφορικής εξίσωσης του φυσικού προβλήματος που προκύπτει μπορεί να γίνει είτε με αναλυτικές είτε με μαθηματικές μεθόδους , και η ακρίβεια της εξαρτάται από διάφορους παράγοντες . Για μία λύση πολύ κοντά στην πραγματική , απαιτείται λεπτομερής σχεδιασμός του μοντέλου , σωστή διακριτοποίηση της γεωμετρίας του και ακριβής περιγραφή των ιδιοτήτων των συστατικών του σύνθετου .

Οι περισσότερες προσομοιώσεις σύνθετων υλικών, αντιμετωπίζουν τα σύνθετα, ως ένα πολυστρωματικό υλικό κατάλληλα διακριτοποιημένο. Με άλλα λόγια , ο διαχωρισμός της γεωμετρίας γίνεται σε επίπεδο στρώσεων αλλά όχι σε επίπεδο ινών . Παρ ‘όλ’ αυτά, η παραδοχή είναι πιο σύνθετη σε σχέση με τα μακρο-μηχανικά μοντέλα, καθώς λαμβάνονται υπόψη οι ιδιότητες τις κάθε στρώσης αλλά και των διεπιφανειών τους. Παραδείγματος χάριν , μια καλή προσέγγιση για το υλικό της εποξειδικής μήτρας είναι η αντιμετώπιση του ως ένα μη γραμμικό ιξωδοελαστικό στερεό.

Για να διερευνηθεί η ρηγματώση της μήτρας , είναι απαραίτητη η εισαγωγή ενός κριτηρίου αστοχίας στο μοντέλο που χρησιμοποιείται για την επίλυση.

Στη συνέχεια της παρούσας εργασίας θα πραγματοποιηθεί η επίλυση ενός σύνθετου υλικού με στρώσεις (0/90)s που εφελκύεται αξονικά ,με τη βοήθεια ενός προγράμματος CAE, όπου και θα γίνει εκτενέστερη αναφορά σχετικά με την προετοιμασία του μοντέλου , το σχεδιασμό του ,αλλά και με τις παραδοχές που γίνονται .

Στην εικόνα που ακολουθεί , φαίνεται η διάταξη των στρώσεων όπως ακριβώς εισήχθησαν στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων.



Σχήμα 5.1 Εικόνα από λογισμικό CAE. Τομή σύνθετου με στρώσεις σε διευθύνσεις 0/90/90/0

5.3 ΕΠΙΛΟΓΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ

Πολλοί ερευνητές έχουν δημιουργήσει μοντέλα σύνθετων υλικών και ο τρόπος με τον οποίο μπορούν να αναπτυχθούν ποικίλουν. Οι παραδοχές στις οποίες στηρίζεται ένα μοντέλο και η χρήση των κατάλληλων στοιχείων για την επίλυση του μοντέλου εξαρτώνται από το προς μελέτη αντικείμενο , από το πακέτο λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων και από το χρόνο επίλυσης που μπορεί να διατεθεί. Για παράδειγμα ένα σύνθετο υλικό μπορεί να μοντελοποιηθεί με πεπερασμένα στοιχεία είτε όγκου είτε επιφανειακά. Η χρήση στοιχείων όγκου στην προσομοίωση σύνθετων υλικών όμως έχει κάποιους περιορισμούς. Συνήθως , μια στρώση από στοιχεία όγκου αντιπροσωπεύει όλο το σύνθετο υλικό σε αντίθεση με τα επιφανειακά στοιχεία που κάθε στρώση τους αντιπροσωπεύει μια στρώση του σύνθετου υλικού και αποκρίνεται ως ένα ορθότροπο υλικό. Ακόμη , δεν μπορούν να υπολογίσουν με ακρίβεια τις εγκάρσιες τάσεις που αναπτύσσονται στις στρώσεις , οι οποίες είναι και ο κύριος λόγος εμφάνισης διαστρωματικής αποκόλλησης . Έτσι , ένας ερευνητής που θέλει να μελετήσει είτε αυτής της μορφής

αστοχία, είτε αστοχία σε λυγισμό, είναι πιο συνετό να χρησιμοποιήσει επιφανειακά στοιχεία. Αν όμως είναι υποχρεωτική η χρήση στοιχείων όγκου, τότε μια καλή προσέγγιση είναι η διακριτοποίηση του χώρου κατάλληλα, ώστε στη διεύθυνση του πάχους του σύνθετου να υπάρχουν αρκετές στρώσεις από τέτοια στοιχεία. Μια άλλη απόφαση που πρέπει να ληφθεί κατά την προετοιμασία του μοντέλου είναι το είδος των επιφανειακών στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν, όπως διακρίνονται σε αρκετά πακέτα πεπερασμένων στοιχείων. Ένα από αυτά είναι τα συμβατικά στοιχεία επιφάνειας, η χρήση των οποίων επιτρέπει της διακριτοποίηση μόνο μιας επιφάνειας. Η χρήση τους σε ένα μοντέλο σύνθετου υλικού δεν είναι η πλέον κατάλληλη, για το λόγο ότι αγνοούν την εγκάρσια ελαστικότητα και θεωρούν μικρές παραμορφώσεις. Αντίθετα, τα συνεχή επιφανειακά στοιχεία αντιπροσωπεύουν ένα επίπεδο στοιχείο λεπτού πάχους που έχει όμως όγκο, αλλά η κινηματική συμπεριφορά τους ακολουθεί την κλασική θεωρία πλακών.

Ένας άλλος τομέας της μοντελοποίησης των σύνθετων υλικών είναι η προσομοίωση της αστοχίας η οποία μπορεί να συμβεί με δύο τρόπους. Ο ένας τρόπος είναι η αστοχία μεμονωμένων στρώσεων του σύνθετου σε θλίψη, εφελκυσμό ή διάτμηση (μήτρα ή ενίσχυση). Η μορφή αστοχίας αυτή εξαρτάται κυρίως από τη διεύθυνση της φόρτισης και της ενίσχυσης. Ο δεύτερος τρόπος είναι με την παρουσία διαστρωματικής αποκόλλησης μεταξύ των στρώσεων, η οποία είναι πιο απρόβλεπτη από την προηγούμενη, σχετίζεται με την παρουσία εγκάρσιων τάσεων και μπορεί να μοντελοποιηθεί είτε με τη χρήση cohesive στοιχείων είτε με συγκεκριμένα εργαλεία που υποστηρίζει το ABAQUS, όπως είναι το VCCT (virtual crack closure technique) και το XFEM (extended finite element method). Τα συνηθέστερα κριτήρια αστοχίας που έχουν αναπτυχθεί είναι το κριτήριο μέγιστης τάσης, Tsai -Hill, Tsai -Wu και μέγιστης παραμόρφωσης. Όπως είναι φυσικό, με την ύπαρξη οποιασδήποτε μορφής αστοχίας οι δομικές ιδιότητες του υλικού υποβαθμίζονται. Για να συμβεί αυτό κατά τη μοντελοποίηση, και όχι απλά να βρεθούν τα στοιχεία που η τάση που έχει αναπτυχθεί ξεπερνάει την αντοχή τους, γίνονται χρήση νόμων της θραυστομηχανικής και τα στοιχεία που έχουν αστοχήσει δε συμβάλουν στη συνολική δυσκαμψία της κατασκευής. Για να πραγματοποιηθεί τέτοιου είδους ανάλυση είναι απαραίτητη η χρήση ενός ειδικού προγράμματος επίλυσης μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων (explicit solver) ώστε σε κάθε χρονικό βήμα της ανάλυσης να υπολογίζεται εξολοκλήρου το μητρώο δυσκαμψίας του μοντέλου, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η συμβολή των στοιχείων που έχουν αστοχήσει. Έτσι σε κάθε βήμα λαμβάνεται υπόψη η υποβάθμιση των δομικών ιδιοτήτων λόγω αστοχίας.

5.4 ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

Ένας από τους στόχους της μοντελοποίησης των σύνθετων υλικών είναι η σωστή πρόβλεψη της αστοχίας τους, γεγονός εξαιρετικά δύσκολο λόγω των πολλών διαφορετικών μηχανισμών αστοχίας (ρηγμάτωση μήτρας, θραύση ινών, εξόλκευση, διαστρωματική αποκόλληση, λυγισμός κ.ά.).

5.4.1 Εμφάνιση βλάβης σε σύνθετα υλικά ενισχυμένα με ίνες στο ABAQUS

Το ABAQUS Κάνει την παραδοχή ότι το τμήμα του υλικού που δεν έχει υποστεί βλάβη έχει γραμμική ελαστική συμπεριφορά και βασίζεται στη θεωρία Hashin η οποία λαμβάνει υπόψιν τέσσερις διαφορετικούς μηχανισμούς αστοχίας (Εφελκυσμό και θλίψη ινών, εφελκυσμό και θλίψη υλικού μήτρας). Η εμφάνιση της βλάβης αφορά την υποβάθμιση του υλικού σε ένα σημείο του δοκιμίου.

Τα κριτήρια έναρξης της βλάβης έχουν την εξής μορφή:

Εφελκυσμό ινών: $\sigma_{11} \geq 0$

$$F_f^t = \left(\frac{\hat{\sigma}_{11}}{X^T}\right)^2 + \alpha \left(\frac{\hat{\tau}_{12}}{S^L}\right)^2. \quad (5.1)$$

Θλίψη ινών: $\sigma_{11} < 0$

$$F_f^c = \left(\frac{\hat{\sigma}_{11}}{X^C}\right)^2. \quad (5.2)$$

Εφελκυσμό μήτρας: $\sigma_{22} \geq 0$

$$F_m^t = \left(\frac{\hat{\sigma}_{22}}{Y^T}\right)^2 + \left(\frac{\hat{\tau}_{12}}{S^L}\right)^2. \quad (5.3)$$

Θλίψη μήτρας: $\sigma_{22} < 0$

$$F_m^c = \left(\frac{\hat{\sigma}_{22}}{2S^T}\right)^2 + \left[\left(\frac{Y^C}{2S^T}\right)^2 - 1\right] \frac{\hat{\sigma}_{22}}{Y^C} + \left(\frac{\hat{\tau}_{12}}{S^L}\right)^2. \quad (5.4)$$

όπου

X^t είναι η διαμήκης εφελκυστική αντοχή, X^c είναι η διαμήκης θλιπτική αντοχή,

Y^t είναι η εγκάρσια εφελκυστική αντοχή, Y^c είναι η εγκάρσια θλιπτική αντοχή,

S^l είναι διαμήκης διατμητική αντοχή, S^t είναι η εγκάρσια διατμητική αντοχή,

α είναι ο συντελεστής που αποφασίζει τη συμβολή της διατμητικής τάσης στο κριτήριο

εφελκυστικής αστοχίας της ίνας, σ_{11} , σ_{22} , τ_{12} είναι τα στοιχεία του τανυστή των τάσεων που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο επαλήθευσης του κριτηρίου και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\hat{\sigma} = \mathbf{M}\sigma,$$

σ είναι η πραγματική τάση και \mathbf{M} είναι το μητρώο που ακολουθεί.

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \frac{1}{(1-d_f)} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{(1-d_m)} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{(1-d_s)} \end{bmatrix}. \quad (5.5)$$

d_f , d_m , d_s είναι μεταβλητές που χαρακτηρίζουν τη θραύση της ίνας, της μήτρας και τη διάτμηση που λαμβάνονται από τις μεταβλητές d_f^t , d_f^c , d_m^t , d_m^c που αντιστοιχούν στις 4 μορφές αστοχίας που προαναφέρθηκαν.

$$d_f = \begin{cases} d_f^t & \text{if } \hat{\sigma}_{11} \geq 0, \\ d_f^c & \text{if } \hat{\sigma}_{11} < 0, \end{cases}$$

$$d_m = \begin{cases} d_m^t & \text{if } \hat{\sigma}_{22} \geq 0, \\ d_m^c & \text{if } \hat{\sigma}_{22} < 0, \end{cases}$$

$$d_s = 1 - (1 - d_f^t)(1 - d_f^c)(1 - d_m^t)(1 - d_m^c). \quad (5.6)$$

Πριν την εμφάνιση οποιασδήποτε μορφής αστοχίας το μητρώο \mathbf{M} είναι ο μοναδιαίος πίνακας.

Όταν η βλάβη κάνει την εμφάνισή της σε τουλάχιστον έναν τύπο θραύσης, το μητρώο \mathbf{M} αποκτά σημαντικό αριθμητικό μέγεθος στο κριτήριο αστοχίας των υπόλοιπων τύπων.

Στο μοντέλο που σχεδιάστηκε για τις ανάγκες της εργασίας το $\alpha = 1$.

5.4.2 Επέκταση της βλάβης (στάδιο , αμέσως μετά την εμφάνιση της βλάβης)

Το λογισμικό κατά την επίλυση υποθέτει ότι η αστοχία χαρακτηρίζεται από σταδιακή υποβάθμιση της αντοχής του υλικού που τελικά οδηγεί στην πλήρη αστοχία έχοντας γραμμικά ελαστική συμπεριφορά όταν δεν υπάρχει φθορά. Λαμβάνει υπόψιν τέσσερις τύπους αστοχίας ενώ συνδυάζεται με το κριτήριο Hashin για εμφάνιση αστοχίας. Τέλος, βασίζεται σε απώλεια ενέργειας κατά την διαδικασία επέκτασης της θραύσης.

Πριν την εμφάνιση της βλάβης, η συμπεριφορά του υλικού θεωρείται γραμμική, με μητρώο δυσκαμψίας που αντιστοιχεί σε ορθότροπο (ή εγκάρσιως ισότροπο) επίπεδης τάσης (2 διαστάσεις).

Έτσι, η απόκριση του υλικού υπολογίζεται από τη σχέση $\sigma = C_d \varepsilon$,

όπου ε είναι η παραμόρφωση και C_d είναι το μητρώο ελαστικότητας λαμβάνοντας υπόψιν την υφιστάμενη βλάβη, και έχει τη μορφή που ακολουθεί:

$$C_d = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} (1-d_f)E_1 & (1-d_f)(1-d_m)\nu_{21}E_1 & 0 \\ (1-d_f)(1-d_m)\nu_{12}E_2 & (1-d_m)E_2 & 0 \\ 0 & 0 & (1-d_s)GD \end{bmatrix}, \quad (5.7)$$

όπου $D = 1 - (1-d_f)(1-d_m)\nu_{12}\nu_{21}$, D_f αντιπροσωπεύει την τρέχουσα κατάσταση της βλάβης στις ίνες, D_m την τρέχουσα κατάσταση της βλάβης στο υλικό της μήτρας και d_s την τρέχουσα κατάσταση της αστοχίας σε διάτμηση. E_1 είναι το μέτρο ελαστικότητας στη διεύθυνση των ινών και E_2 το μέτρο ελαστικότητας στην εγκάρσια διεύθυνση.

Οι μεταβλητές d_f , d_m , d_s , προκύπτουν από τις μεταβλητές βλάβης για τις 4 μορφές αστοχίας όπως αυτές περιγράφηκαν προηγουμένως, από τις εξής σχέσεις:

$$d_f = \begin{cases} d_f^t & \text{if } \hat{\sigma}_{11} \geq 0, \\ d_f^c & \text{if } \hat{\sigma}_{11} < 0, \end{cases}$$

$$d_m = \begin{cases} d_m^t & \text{if } \hat{\sigma}_{22} \geq 0, \\ d_m^c & \text{if } \hat{\sigma}_{22} < 0, \end{cases}$$

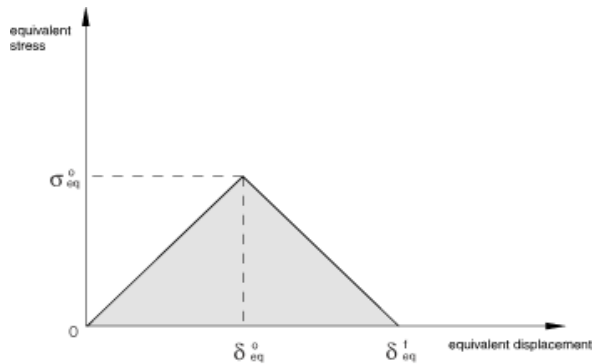
$$d_s = 1 - (1-d_f^t)(1-d_f^c)(1-d_m^t)(1-d_m^c), \quad (5.8)$$

σ_{11} και σ_{22} είναι οι συνιστώσες του ενεργού τανυστή τάσεων.

Μεταβλητές βλάβης σε κάθε τύπο θραύσης

Για να μειωθεί η εξάρτηση της πυκνότητας της διακριτοποίησης κατά τη διαδικασία υποβάθμισης του υλικού, η έννοια του χαρακτηριστικού μήκους εισάγεται στους υπολογισμούς έτσι ώστε ο καταστατικός νόμος του υλικού να εκφράζεται ως μια σχέση τάσης-παραμόρφωσης.

Η μεταβλητή βλάβης θα παίρνει τέτοιες τιμές έτσι ώστε η καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης να έχει τη μορφή του διαγράμματος που ακολουθεί, για κάθε έναν από τους 4 τύπους θραύσης.



Εφελκυσμό ιών: $\sigma_{11} \geq 0$

$$\delta_{eq}^{ft} = L^c \sqrt{\langle \varepsilon_{11} \rangle^2 + \alpha \varepsilon_{12}^2}, \quad (5.9)$$

$$\sigma_{eq}^{ft} = \frac{\langle \sigma_{11} \rangle \langle \varepsilon_{11} \rangle + \alpha \tau_{12} \varepsilon_{12}}{\delta_{eq}^{ft} / L^c}, \quad (5.10)$$

Θλίψη ιών: $\sigma_{11} < 0$

$$\delta_{eq}^{fc} = L^c \langle -\varepsilon_{11} \rangle, \quad (5.11)$$

$$\sigma_{eq}^{fc} = \frac{\langle -\sigma_{11} \rangle \langle -\varepsilon_{11} \rangle}{\delta_{eq}^{fc} / L^c}. \quad (5.12)$$

Εφελκυσμό μήτρας: $\sigma_{22} \geq 0$

$$\delta_{eq}^{mt} = L^c \sqrt{\langle \varepsilon_{22} \rangle^2 + \varepsilon_{12}^2}, \quad (5.13)$$

$$\sigma_{eq}^{mt} = \frac{\langle \sigma_{22} \rangle \langle \varepsilon_{22} \rangle + \tau_{12} \varepsilon_{12}}{\delta_{eq}^{mt} / L^c}. \quad (5.14)$$

Θλίψη μήτρας : $\sigma_{22} < 0$

$$\delta_{eq}^{mc} = L^c \sqrt{\langle -\varepsilon_{22} \rangle^2 + \varepsilon_{12}^2}, \quad (5.15)$$

$$\sigma_{eq}^{mc} = \frac{\langle -\sigma_{22} \rangle \langle -\varepsilon_{22} \rangle + \tau_{12} \varepsilon_{12}}{\delta_{eq}^{mc} / L^c}. \quad (5.15)$$

Το χαρακτηριστικό μήκος εξαρτάται από τη γεωμετρία του στοιχείου. Για πεπερασμένα στοιχεία πρώτου βαθμού είναι το μήκος της γραμμής που διασχίζει του στοιχείο, ενώ για στοιχεία δεύτερου βαθμού είναι το μισό από αυτό το μήκος.

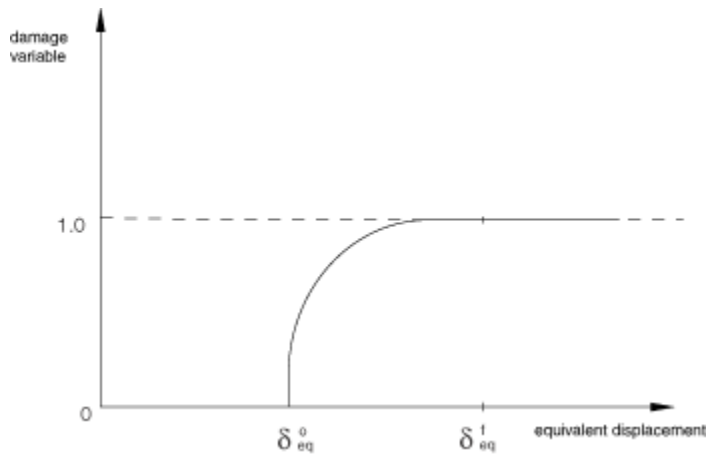
Η βλάβη θα κάνει την εμφάνισή της όταν $\delta_{eq} \geq \delta_{eq}^0$. Μετά από αυτό το σημείο η κάθε μεταβλητή βλάβης θα δίνεται από τη σχέση :

$$d = \frac{\delta_{eq}^f (\delta_{eq} - \delta_{eq}^0)}{\delta_{eq} (\delta_{eq}^f - \delta_{eq}^0)}, \quad (5.16)$$

όπου δ_{eq}^0 είναι η αρχική ισοδύναμη μετακίνηση, για την οποία το κριτήριο κάποιας μορφής θραύσης επαληθεύεται. Η τιμή αυτή για κάθε τύπο αστοχίας, εξαρτάται από το μητρώο ελαστικότητας και την αντοχή του υλικού, όπως αυτή ορίστηκε κατά το σχεδιασμό.

δ_{eq}^f είναι η μετακίνηση για την οποία το δοκίμιο έχει εντελώς αστοχήσει.

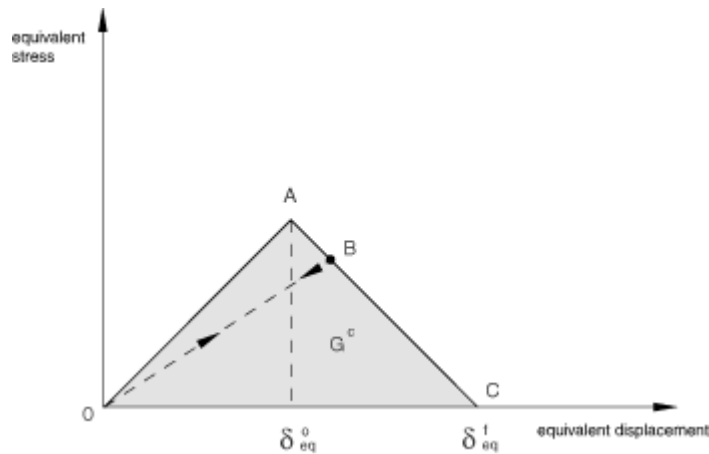
Η γραφική απεικόνιση της παραπάνω σχέσης φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Τέλος, για κάθε τύπο θραύσης πρέπει να οριστεί και μια ενέργεια απελευθέρωσης λόγω θραύσης G^c , η οποία αντιστοιχεί στο εμβαδό της καμπύλης τάσης παραμόρφωσης.

Αποφορτίζοντας από μια κατάσταση μερικής θραύσης, η διαδρομή που θα ακολουθηθεί είναι ουσιαστικά η γραμμή που ενώνει το σημείο αυτό με την αρχή των αξόνων.

Επαναφορτίζοντας , θα ακολουθηθεί η ίδια διαδρομή κατά την αντίθετη φορά , όπως φαίνεται στο διάγραμμα που ακολουθεί.



5.5 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

5.5.1 Cohesive στοιχεία και cohesive συμπεριφορά.

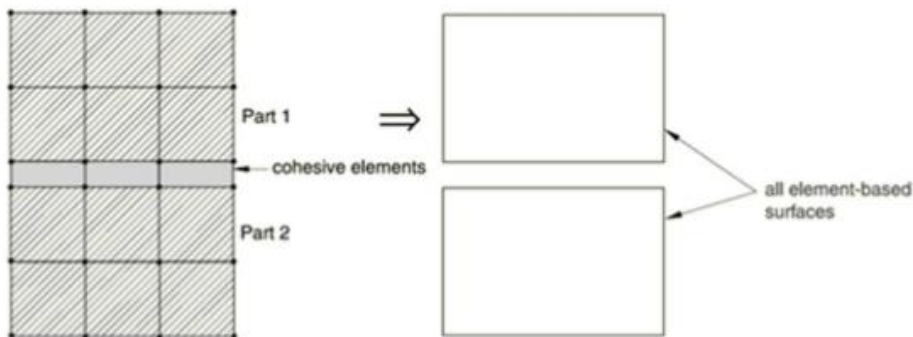
Το ABAQUS έχει ενσωματωμένο ένα μοντέλο για την εμφάνιση και ανάπτυξη της βλάβης. Η εμφάνιση της βλάβης ελέγχεται ουσιαστικά από το κριτήριο αστοχίας Hashin που έχει την ικανότητα να προβλέψει την αστοχία των ινών και της μήτρας σε εφελκυσμό και θλίψη .Μόλις γίνει η εμφάνιση της βλάβης, ένα μοντέλο ανάπτυξης προβλέπει πως αυτή εξαπλώνεται στο υπόλοιπο μοντέλο . Η εξάπλωση αυτή βασίζεται στις ιδιότητες της μήτρας και των ινών για απορρόφηση ενέργειας.

Η διαστρωματική αποκόλληση είναι μια από τις πιο κοινές μορφές αστοχίας στα σύνθετα υλικά , λόγω των κατώτερων δομικών ιδιοτήτων σε σχέση με αυτές της ενίσχυσης. Η προσομοίωση της μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε με cohesive στοιχεία είτε με cohesive συμπεριφορά χωρίς τη χρήση επιπλέον στοιχείων.

Η χρήση των cohesive στοιχείων που ορίζονται μεταξύ των στρώσεων των ινών και δίνουν κάποιες συγκολλητικές ιδιότητες στο σύνθετο, χαρακτηρίζονται από δυσκαμψία , αντοχή και ιδιότητες εξάπλωσης της βλάβης. Οι ιδιότητες αυτές ορίζουν , το σημείο και τη χρονική στιγμή στην οποία πρόκειται να συμβούν διαστρωματικές αποκολλήσεις. Η χρήση των στοιχείων αυτών , αυξάνει σημαντικά το χρόνο επίλυσης του

μοντέλου λόγω του αυξημένου αριθμού πεπερασμένων στοιχείων καθώς και των επιπλέον παραμέτρων που εισάγονται στους υπολογισμούς. Επιπλέον, τα στοιχεία αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν με διάφορους τρόπους ανάλογα με τα αποτελέσματα που επιθυμούμε να λάβουμε. Κύριος λόγος χρήσης τους είναι όταν η διαστρωματική αποκόλληση είναι ο κυριότερος μηχανισμός αστοχίας σε ένα εικονικό πείραμα, δηλώνοντας μια μορφή συγκόλλησης μεταξύ δύο μερών, σαν ένα είδος κόλλας. Το πάχος της στρώσης συνήθως είναι πάρα πολύ μικρό και σε κάποιες περιπτώσεις ακόμα και μηδενικό. Χρειάζεται προσοχή όμως όταν θεωρείται μηδενικό πάχος διότι η διαδικασία επίλυσης είναι πιθανό να μη συγκλίνει.

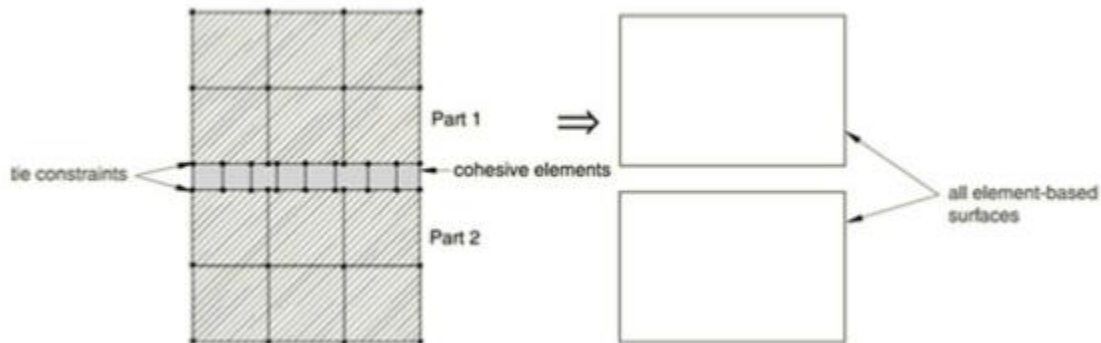
Στη βιβλιογραφία αλλά και στο εγχειρίδιο του λογισμικού, γίνεται αντιληπτό πως η χρήση τους μπορεί να γίνει με δύο τρόπους κατά τη μοντελοποίηση ενός σύνθετου υλικού. Ο πρώτος είναι η ενσωμάτωση τους σε ένα ήδη υπάρχον διακριτοποιημένο μοντέλο. Τα cohesive στοιχεία θα μοιράζονται τους κόμβους με τα ήδη υπάρχοντα στοιχεία, και θα έχουν το ίδιο μέγεθος διακριτοποίησης με τα γειτονικά στοιχεία.



Σχήμα 5.2 Εισαγωγή cohesive στοιχείων μεταξύ στρώσεων ίδιας διακριτοποίησης

Ο δεύτερος τρόπος εισαγωγής τους σε ένα διακριτοποιημένο μοντέλο είναι να δημιουργηθεί η γεωμετρία όλου του τμήματος σαν ένα ξεχωριστό μέρος και μετά να προσκολληθεί στα επιθυμητά σημεία του μοντέλου. Αυτή η μέθοδος επιτρέπει μια πιο πυκνή διακριτοποίηση στα cohesive στοιχεία ώστε να αυξηθεί η ακρίβεια των αποτελεσμάτων και να μειώσει την πιθανότητα η λύση να μη συγκλίνει. Ένα μοντέλο

διάδοσης της βλάβης (traction-separation law) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να δείξει την αποκόλληση, με την επιλογή να αφαιρούνται τα στοιχεία αυτά από το μοντέλο όταν ξεπερνιέται η αντοχή τους όπως θα δούμε στη συνέχεια στο μοντέλο που δημιουργήθηκε για την εξέταση των αποτελεσμάτων με cohesive στοιχεία. Το μοντέλο αυτό θεωρεί ότι το πάχος της διεπιφάνειας έχει τόσο μικρό πάχος που μπορεί να αγνοηθεί.



Σχήμα 5.3 Εισαγωγή cohesive στοιχείων πυκνότερης διακριτοποίησης

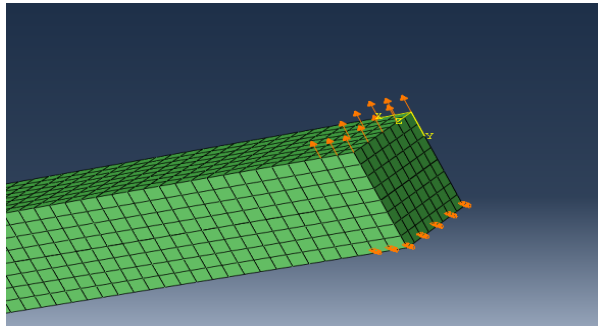
Το ABAQUS έχει διάφορα μοντέλα που ακολουθούν το νόμο διαχωρισμού/έλξης μετά την θραύση, αλλά όλα τα μοντέλα αυτά ακολουθούν γραμμικά ελαστικό μοντέλο πριν τη θραύση. Η ελαστική συμπεριφορά μπορεί να υπολογιστεί από ταυιστές που συνδέουν τις τάσεις και τις παραμορφώσεις κατά μήκος της στρώσης των cohesive στοιχείων. Η σχέση φαίνεται στον παρακάτω τύπο:

$$\begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{nn} & K_{ns} & K_{nt} \\ K_{ns} & K_{ss} & K_{st} \\ K_{nt} & K_{st} & K_{tt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_n \\ \epsilon_s \\ \epsilon_t \end{Bmatrix} \quad (5.17)$$

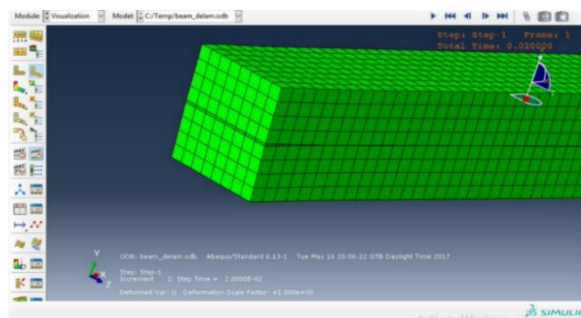
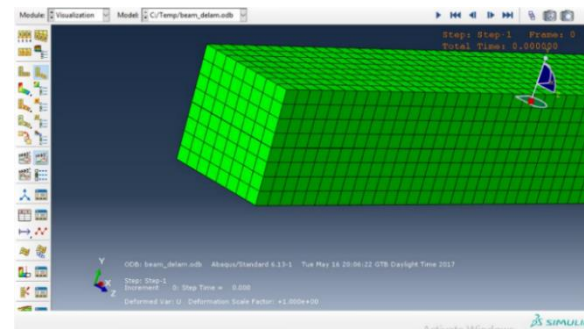
Όπου t_n είναι οι ορθές τάσεις και t_s , t_t είναι οι διατμητικές συνιστώσες της τάσης. Το λογισμικό που χρησιμοποιείται για την επίλυση μπορεί να γεμίσει το μητρώο δυσκαμψίας σύμφωνα με τις ιδιότητες και τα πάχη των στοιχείων. Πριν τον υπολογισμό των τάσεων, υπολογίζεται το διάνυσμα των παραμορφώσεων από τις παρακάτω σχέσεις:

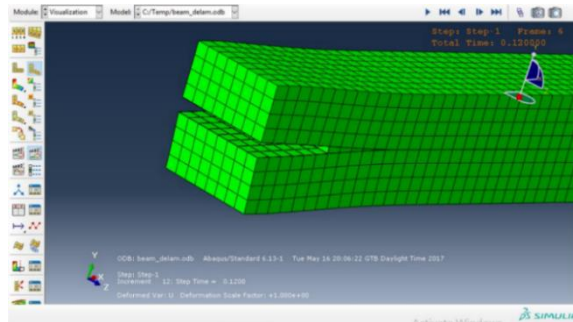
$$\epsilon_n = \frac{\delta_n}{T_o}, \epsilon_s = \frac{\delta_s}{T_o}, \epsilon_t = \frac{\delta_t}{T_o} \quad (5.18)$$

Όπου δ είναι ο διαχωρισμός και T_0 το αρχικό πάχος των στοιχείων. Ο ερευνητής θα επιλέξει τον κατάλληλο μηχανισμό απόκρισης μετά τη θραύση. Στη συνέχεια παρουσιάζεται ένα μοντέλο ενός σύνθετου υλικού με δυνάμεις κάθετες στην επιφάνεια των στρώσεων ώστε να προκύψουν διαστρωματικές αποκολλήσεις όπως φαίνεται στις παρακάτω εικόνες.



Σχήμα 5.4 Φόρτιση μοντέλου





Σχήμα 5.5 Μοντελοποίηση διαστρωματικής αποκόλλησης σε δοκό από σύνθετο υλικό με χρήση cohesive στοιχείων.

Στην τελευταία εικόνα , παρατηρούμε την αφαίρεση των στοιχείων στη διεπιφάνεια που έχουν αστοχήσει.

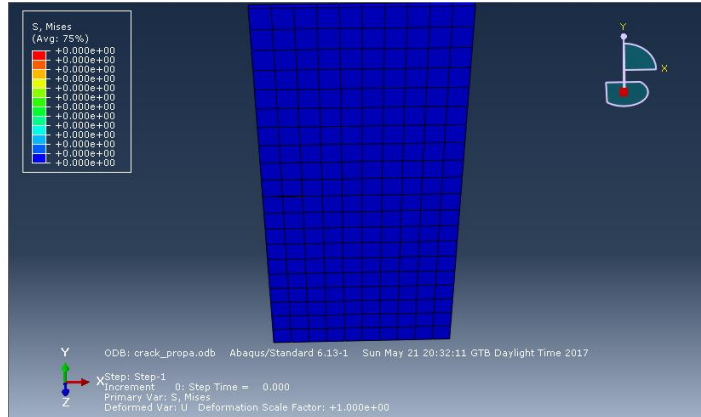
Η άλλη μέθοδος μοντελοποίησης της διεπιφάνειας, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως , είναι με τον ορισμό επαφής των διεπιφανειών μεταξύ των στρώσεων που έχει παρόμοιες συγκολλητικές ιδιότητες με τα cohesive στοιχεία , με αρκετά όμως πλεονεκτήματα. Ο ορισμός επαφής μεταξύ των στρώσεων με απόκριση αντίστοιχη της διεπιφάνειας ενός σύνθετου υλικού , δεν εισάγει στο μοντέλο επιπλέον στοιχεία , γεγονός που μειώνει σημαντικά το χρόνο επίλυσης του μοντέλου. Ακόμη, η εφαρμογή της μεθόδου αυτής , λαμβάνει υπόψιν τη γεωμετρία και τις επιφάνειες και όχι τη διακριτοποίηση του μοντέλου και οι ιδιότητες της επαφής είναι παρόμοιες με τις ιδιότητες των cohesive στοιχείων. Επομένως μπορεί να εφαρμοστεί μεταξύ στρώσεων με τελείως διαφορετική διακριτοποίηση.

5.5.2 Εμφάνιση και διάδοση ρωγμών με XFEM

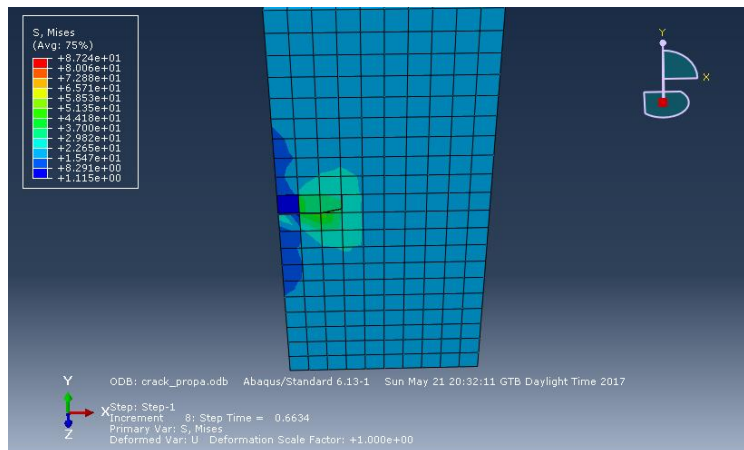
Η τεχνική XFEM (extended finite element method) είναι μια τεχνική που χρησιμοποιείται συχνά από τους ερευνητές , για την προσομοίωση της διάδοσης των ρωγμών σε γραμμικά αλλά και μη γραμμικά μοντέλα. Η τεχνική αυτή έχει εφαρμογή και σε σύνθετα υλικά , που μπορεί να περιγράψει με επιτυχία τυχούσες διαστρωματικές αποκολλήσεις σε συνδυασμό με τη χρήση cohesive στοιχείων ή επαφών σε συγκεκριμένα σημεία ώστε να περιορίζει τη διάδοση της ρωγμής σε συγκεκριμένη περιοχή. Νόμοι και τύποι από τη μηχανική θραύσης εφαρμόζονται ώστε τα αποτελέσματα που θα προκύψουν

από τη μοντελοποίηση να είναι αρκετά συναφή με πειραματικά αλλά και θεωρητικά μοντέλα.

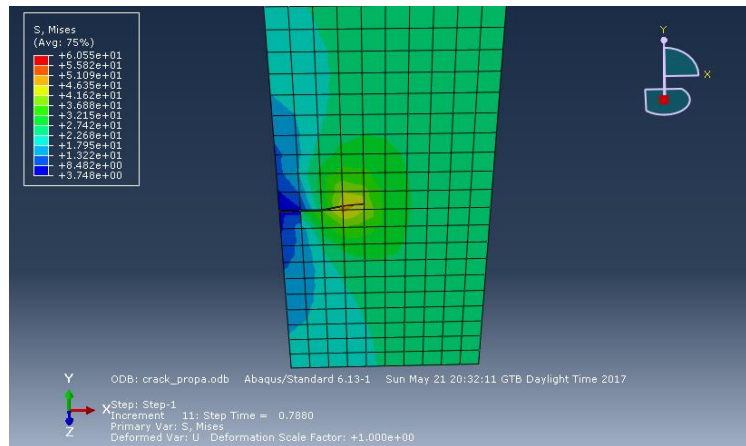
Στις παρακάτω εικόνες μπορούμε να διακρίνουμε την εμφάνιση και διάδοση της ρωγμής σε ένα σύνθετο υλικό, καθώς η εξωτερική φόρτιση συνεχίζει να εφαρμόζεται.



Σχήμα 5.6 Μοντέλο σύνθετου υλικού πριν τη ρηγματώση



Σχήμα 5.7 Εμφάνιση και διάδοση της ρωγμής



Σχήμα 5.8 Περαιτέρω διάδοση της ρωγμής.

Για τις ανάγκες τις παρούσας εργασίας και για την προσομοίωση των διάφορων μηχανισμών αστοχίας, έπειτα από σύγκριση των πιθανών εργαλείων που παρέχει το συγκεκριμένο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων, επιλέχθηκε η μέθοδος με την εφαρμογή cohesive συμπεριφοράς. Η μέθοδος XFEM παρουσιάζει σημαντικά μειονεκτήματα ως προς τη χρήση της για το σκοπό της μελέτης αυτής, με σημαντικότερο το γεγονός πως δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί από το ABAQUS explicit που σημαίνει πως η υποβάθμιση της φέρουσας ικανότητας δε θα λαμβάνονταν υποψιν σε κάθε βήμα της διαδικασίας επίλυσης. Επίσης η χρήση cohesive στοιχείων αυξάνει σημαντικά το χρόνο επίλυσης του μοντέλου και παρουσιάζει σημαντικά προβλήματα απόκλισης της λύσης, σε σχέση με τη μέθοδο που τελικώς υιοθετήθηκε.

6. ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΚΑΙ ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Υπάρχουν διάφορα πακέτα μοντελοποίησης για επίλυση με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων. Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, για την προετοιμασία και επεξεργασία του μοντέλου, που αφορά τη γεωμετρία, τις ιδιότητες των υλικών και τις αρχικές και συνοριακές συνθήκες, έγινε χρήση του λογισμικού ANSA (BETA CAE SA). Για την επίλυση, έγινε χρήση το ABAQUS (SIMULIA) ενώ για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων (μετακινήσεις, τάσεις, παραμορφώσεις, κριτήρια αστοχίας) το λογισμικό META και ABAQUS post processor.

Για την προετοιμασία του μοντέλου, τα παραπάνω λογισμικά διαθέτουν ορισμούς ορθότροπων και ανισότροπων υλικών, ανάλογα με το είδος των στοιχείων που θα γίνουν χρήση. Το μοντέλο μπορεί να σχεδιαστεί είτε με επίπεδα πεπερασμένα στοιχεία, είτε με στοιχεία όγκου. Κάθε είδος στοιχείου έχει διαφορετική εφαρμογή ανάλογα με τη φύση του προβλήματος, και από την επιλογή τους θα εξαρτηθεί σε μεγάλο βαθμό το υπολογιστικό κόστος κατά την επίλυση. Στην παρούσα εργασία, έγιναν χρήση συνεχή, επίπεδα πεπερασμένα στοιχεία, για να υπάρχει η δυνατότητα προσομοίωσης των διάφορων μηχανισμών αστοχίας. Το σύνθετο υλικό διασταυρούμενων στρώσεων με αλληλουχία προσανατολισμού των ινών 0/90/90/0 περιγράφεται με 4 στρώσεις πεπερασμένων στοιχείων με προσανατολισμούς υλικών στις 0 και τις 90 μοίρες.

6.1 ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε είναι εγκάρσιως ισότροπο υλικό ίδιο για όλες τις στρώσεις, με διαφορετικό προσανατολισμό. Οι ιδιότητες προέκυψαν από μικρομηχανική ανάλυση με χρήση της μεθόδου των Mori – Tanaka, που βασίζεται στη θεωρία ελλειψοειδούς ενίσχυσης του Eshelby. Οι παράμετροι για την ανάλυση αυτή είναι η γεωμετρία και ο προσανατολισμός της ίνας (θεωρήθηκε κυλινδρική ίνα, με μήκος ίσο με το μήκος του αντιπροσωπευτικού όγκου στη διεύθυνση της φόρτισης), οι ελαστικές ιδιότητες των υλικών μήτρας και ενίσχυσης, καθώς και η κατ' όγκο περιεκτικότητα της ενίσχυσης. Περισσότερη αναφορά σχετικά με την μικρομηχανική ανάλυση ξεφεύγει από το σκοπό της παρούσας εργασίας.

Στους πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζονται αναλυτικά οι παράμετροι των υλικών και τα αποτελέσματα της στρώσης όπως αυτές προέκυψαν από την ανάλυση για κατ' όγκο περιεκτικότητα ίση με 0,5.

MATRIX PROPERTY	VALUE	UNITS	FIBER PROPERTY	VALUE	UNITS				
Young modulus	4000	MPa	Axial Young modulus	2.31E+05	MPa	E1	117520	Matrix cracking	60
Poisson's ratio	0.35	-	In-plane Young modulus	15000	MPa	E2	7545.8	ILSS	60
Tensile strength	46.747	MPa	Transverse shear modulus	24000	MPa	N12	0.4353	G1(j/m ²)m	500
Compressive strength	144.23	MPa	In-plane Poisson's ratio	0.28	-	N23	0.4247	G2(j/m ²)m	1540
			Transverse Poisson's ratio	0.49	-	G12	2628.6	G1(j/m ²)d	500
			Tensile strength	3500.8	MPa	G23	3827.2	G2(j/m ²)d	800
			Compressive strength	2323.4	MPa			Xt	1400
								Yt	50
								S	75

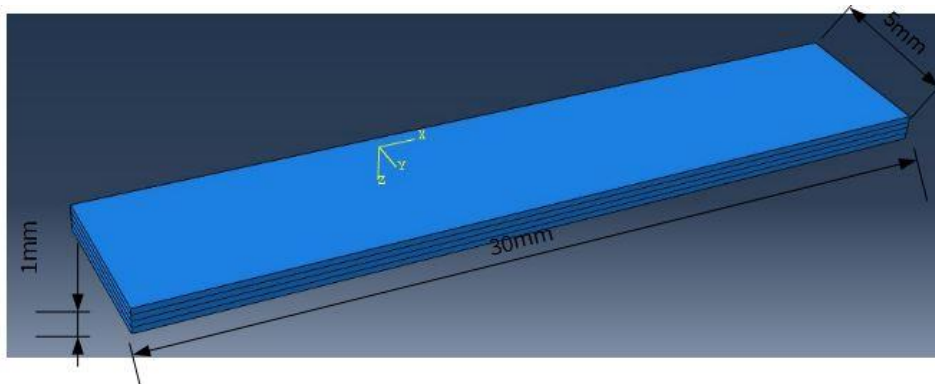
Σχήμα 6.1 Ιδιότητες υλικού μήτρας (αριστερά), ενίσχυσης (κέντρο) και στρώσης (δεξιά).

Οι ελαστικές ιδιότητες προέκυψαν από μικρομηχανική ανάλυση, και οι παράμετροι που αφορούν τη θραύση από τη βιβλιογραφία.

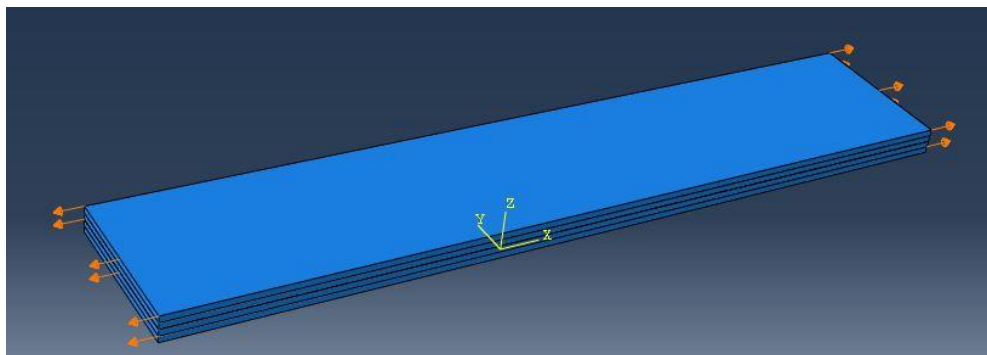
Η διεπιφάνεια μεταξύ των στρώσεων αφού εξετάστηκαν όλες οι εναλλακτικές επιλογές με διάφορες δοκιμές, μοντελοποιήθηκε με cohesive contact, όπως θα δούμε αναλυτικότερα στη συνέχεια, που υποστηρίζει το ABAQUS, με αποκρίσεις ανάλογες με αυτές της διεπιφάνειας ενός σύνθετου υλικού.

Κατά τη διακριτοποίηση της γεωμετρίας δεν αντιμετωπίσαμε δυσκολίες καθώς η γεωμετρία του δοκιμίου είναι σχετικά απλή. Τοποθετήθηκαν δύο σειρές από πεπερασμένα στοιχεία σε κάθε στρώση για περισσότερα σημεία ολοκλήρωσης στη διεύθυνση του πάχους και καλύτερη εποπτεία του προφίλ τάσεων στα αποτελέσματα. (45144 continuum shell elements SC8R*).

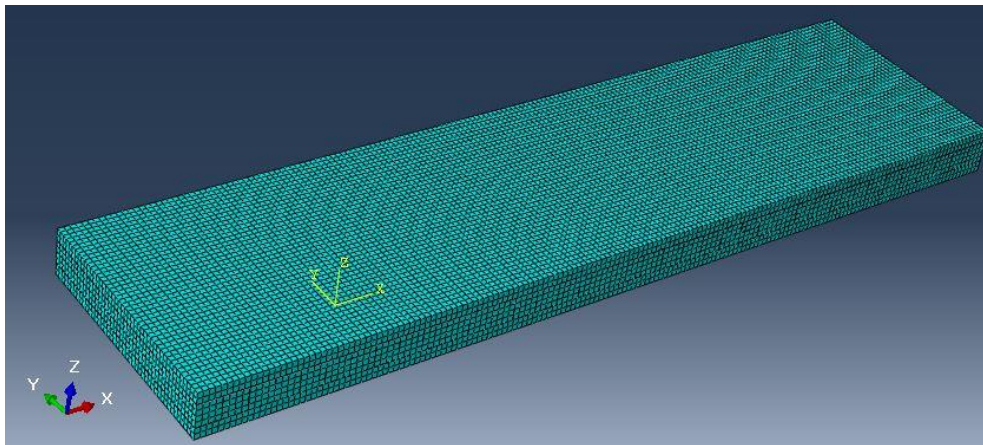
Η γεωμετρία, οι συνοριακές συνθήκες καθώς και η διακριτοποίηση του μοντέλου φαίνονται στις εικόνες που ακολουθούν.



Σχήμα 6.2 Γεωμετρία και διαστάσεις του μοντέλου



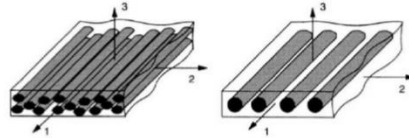
Σχήμα 6.3 Συνοριακές συνθήκες του μοντέλου



Σχήμα 6.4 Διακριτοποίηση του μοντέλου

Πριν προχωρήσουμε στην λεπτομερή επίλυση του μοντέλου , αξίζει να αναφερθούν κάποιες παραδοχές που γίνονται για να απλοποιηθεί η διαδικασία επίλυσης. Για να προβλεφθούν οι ελαστικές αποκρίσεις του σύνθετου υλικού , θεωρούμε ότι η κάθε

στρώση αποτελείται από μια σειρά ινών , και το υλικό που περιγράφει τη στρώση αυτή έχει μια ορθότροπη συμπεριφορά.



Σχήμα 6.5 Ίνες που περιβάλλονται από τη μήτρα

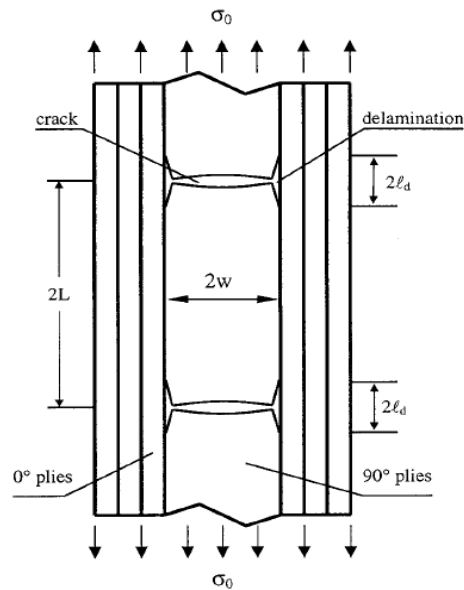
Όταν οι στρώσεις ενωθούν ώστε να συνθέσουν το σύνθετο υλικό, κάθε στρώση μπορεί να έχει το δικό της προσανατολισμό ινών , πάχος και υλικό αλλά θεωρείται ότι η παραμόρφωση σε όλες τις στρώσεις είναι ίδια , και ίση με τη συνολική παραμόρφωση όλου του σύνθετου υλικού. Επίσης θεωρούνται συνθήκες επίπεδης τάσης . Έτσι , παρ' όλο που το υλικό είναι ορθότροπο οι παράμετροι που είναι απαραίτητοι είναι οι E_1 , E_2 , G_{12} και ν_{12} . Οι αρχικοί υπολογισμοί των τάσεων απαιτούν και τη σταθερά Poisson και στην άλλη διεύθυνση , η οποία μπορεί να προσδιοριστεί εύκολα από τη σχέση :

$$\nu_{21} = \nu_{12} E_2 / E_1. \quad (6.1)$$

6.2 ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

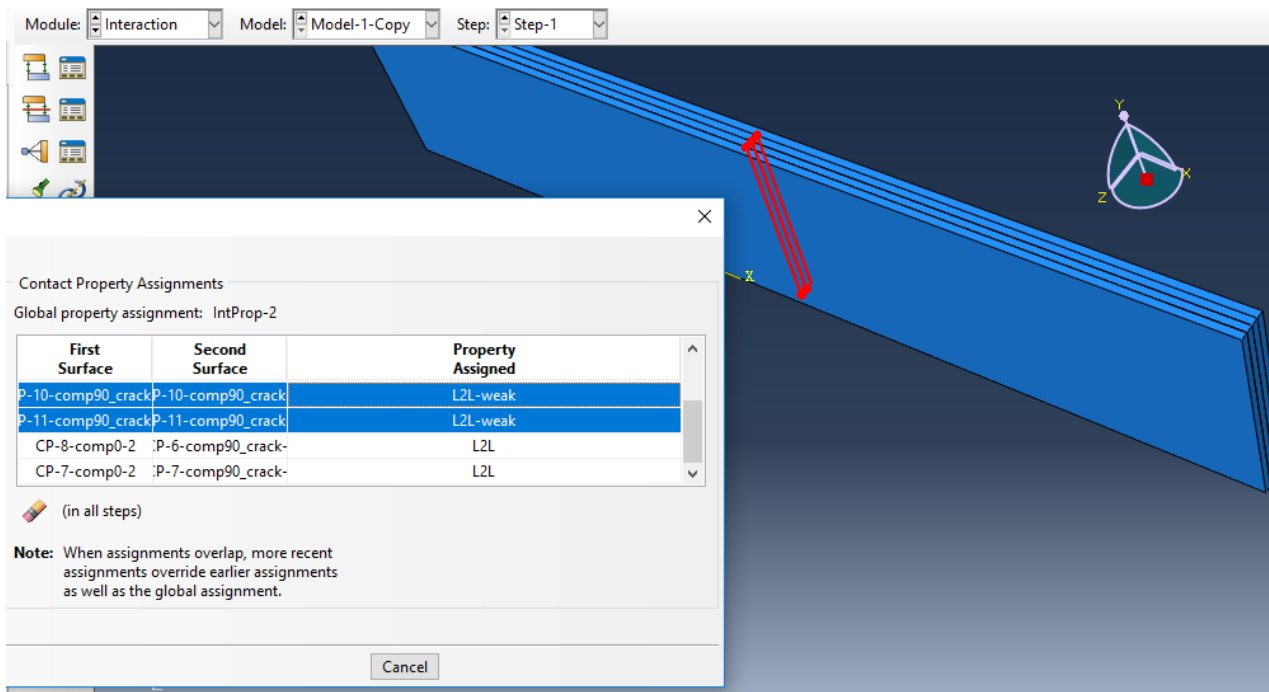
6.2.1 Εισαγωγή ρωγμών

Στη συνέχεια εισάγονται πιθανές θέσεις ρωγμών στο μοντέλο για την μελέτη των τάσεων που αναπτύσσονται μετά τη ρηγμάτωση. Γίνεται η παραδοχή πως οι ρωγμές που έχουν αναπτυχθεί είναι πανομοιότυπες μεταξύ τους, το διάστημα μεταξύ δύο διαδοχικών ρωγμών είναι πάντα σταθερό, και οι ρωγμές εξαπλώνονται καθ' όλο το πάχος των στρώσεων των 90 μοιρών μέχρι τη διεπιφάνεια. Οι τυχούσες διαστρωματικές αποκολλήσεις που πιθανόν εμφανιστούν , είναι συμμετρικές στις αιχμές της κάθε ρωγμής, όπως μπορούμε να διακρίνουμε και στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 6.6 Σχηματική περιγραφή των μηχανισμών αστοχίας

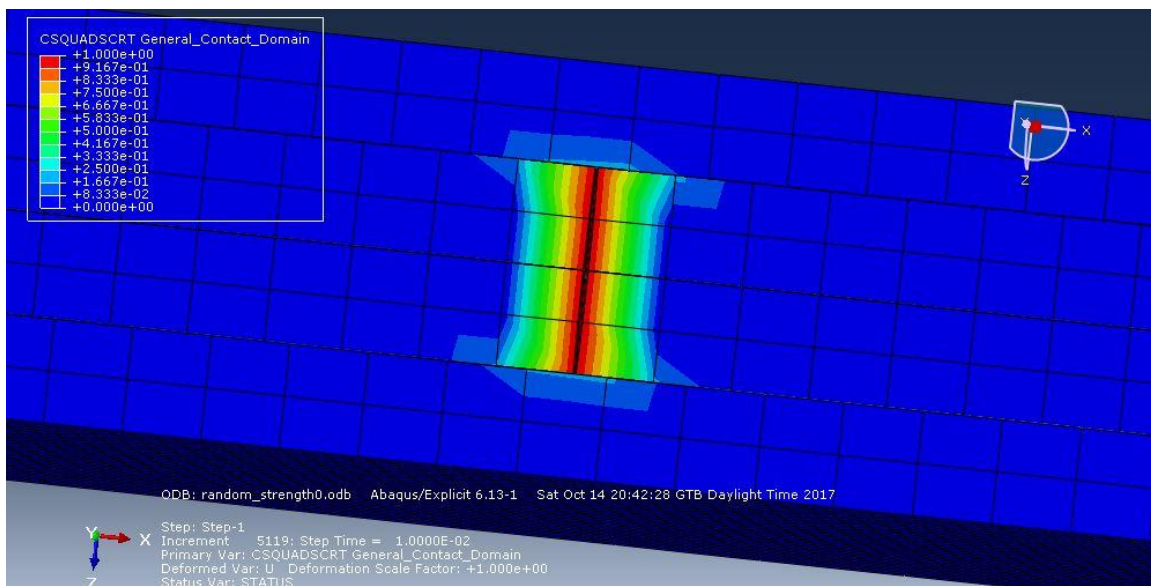
Η εισαγωγή ρωγμών στο μοντέλο έγινε ορίζοντας μια επαφή με μικρή αντοχή (σχεδόν όση είναι και η αντοχή της μήτρας) μεταξύ των στρώσεων των 90 όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα για μία ρωγμή αρχικά.



Σχήμα 6.7 Εισαγωγή ρωγμών ως επαφή με αντοχή ελαφρώς μικρότερα από την αντοχή της μήτρας

Έτσι, φορτίζοντας το μοντέλο σταδιακά, οι ορθές τάσεις που θα αναπτυχθούν σε αρχικό χρονικά στάδιο είναι αρκετές για να ρηγματωθεί το μοντέλο και να είναι δυνατή η μελέτη απόκρισης του μοντέλου γύρω από τη ρωγμή στη συνέχεια.

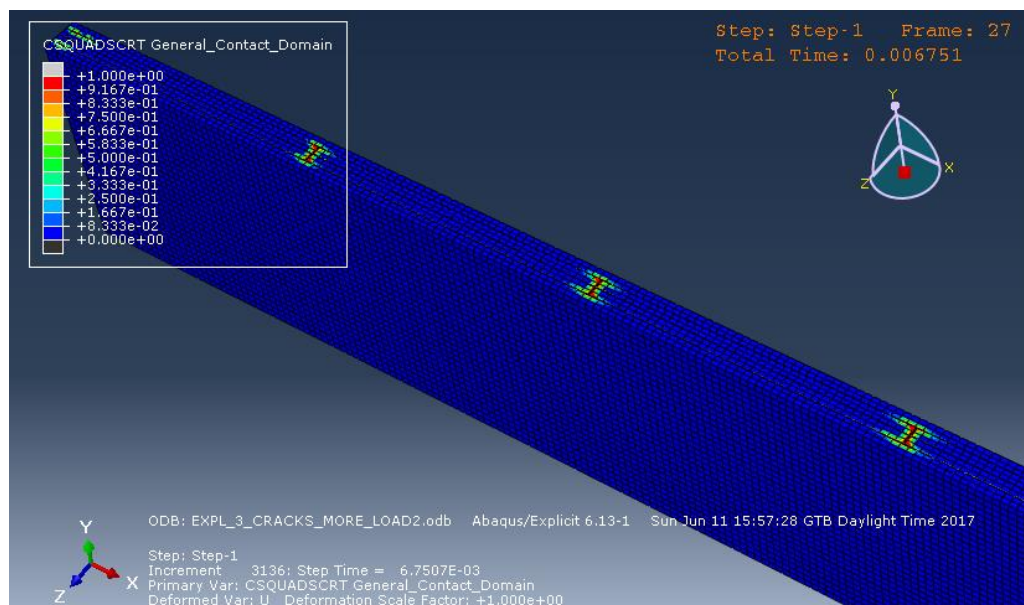
Όπως θα δούμε στη συνέχεια οι μηχανισμοί αστοχίας που θα εμφανιστούν, θα ακολουθήσουν τη γνωστή πλέον σειρά, δηλαδή εμφάνιση ρωγμής στη μήτρα των στρώσεων των 90 λόγω των τάσεων που αναπτύσσονται και τη χαμηλή δυσκαμψία των στρώσεων αυτών σε αυτή τη διεύθυνση φόρτισης. Στη συνέχεια θα παρατηρήσουμε διαστρωματικές αποκολλήσεις μεταξύ των 0 και 90 στρώσεων στην περιοχή της ρωγμής, και τελικά αστοχία των ινών στη στρώση των 0 μοιρών. Όλα αυτά που αναφέρθηκαν γίνονται εύκολα αντιληπτά στις παρακάτω εικόνες.



Σχήμα 6.8 Ρηγμάτωση και διαστρωματική αποκόλληση

Στις περιοχές με κόκκινο χρώμα, όπως μπορούμε να διακρίνουμε από την εξηγηματικό πλαίσιο με τα χρώματα, ο λόγος των τάσεων προς την αντοχή τους είναι 1, επομένως επέρχεται αστοχία.

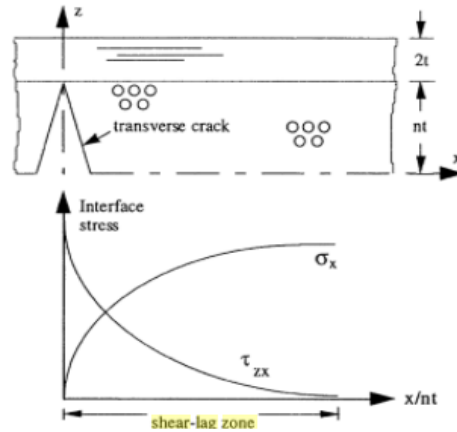
Στη συνέχεια , εισάγουμε άλλες 2 ρωγμές στο μοντέλο, με σταθερή απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών ρωγμών. Οι συνθήκες φόρτισης και στήριξης είναι ακριβώς ίδιες. Ο ρυθμός αύξησης της φόρτισης είναι λίγο πιο αργός αυτή τη φορά λόγω του γεγονότος ότι η συνολική δυσκαμψία του μοντέλου είναι μικρότερη , για να αποφύγουμε θέματα μη σύγκλισης της λύσης. Παρατηρούμε πως οι ρωγμές κάνουν την εμφάνισή τους λίγο πιο νωρίς χρονικά , λόγω της περαιτέρω μείωσης της δυσκαμψίας.



Σχήμα 6.9 Ταυτόχρονη εμφάνιση και των τριών ρωγμών και διαστρωματική αποκόλληση

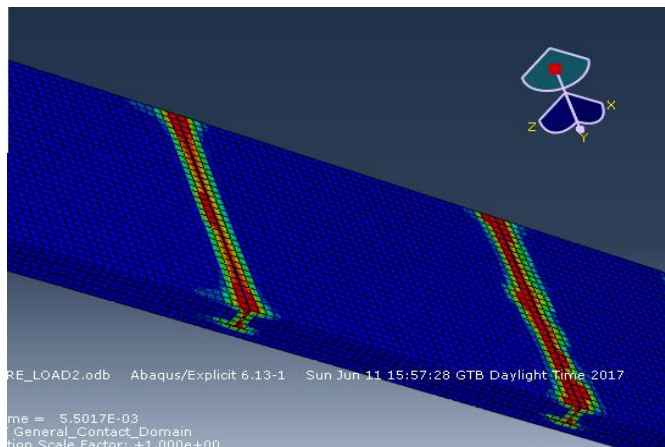
Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 3 , στην περιοχή των εγκάρσιων ρωγμών στις στρώσεις των 90, υπάρχει μια περιοχή που επηρεάζει την κατανομή των τάσεων, και όσο απομακρυνόμαστε από τη ζώνη αυτή τόσο μειώνονται και οι τάσεις. Στη βιβλιογραφία η περιοχή αυτή αναφέρεται ως ζώνη shear lag. Η ζώνη αυτή έχει την ιδιότητα πως οι κύριες εφελκυστικές τάσεις του μοντέλου εντός της ζώνης shear lag είναι κοντά στο μηδέν, ενώ οι διατμητικές τάσεις στη διεπιφάνεια είναι αυξημένες, και για το λόγο αυτό εμφανίζονται διαστρωματικές αποκολλήσεις στις αιχμές των ρωγμών. Όσο απομακρυνόμαστε από τη

ζώνη αυτή , συμβαίνει ακριβώς το αντίθετο. Αυξάνονται δηλαδή οι εφελκυστικές τάσεις και μειώνονται οι εγκάρσιες διατμητικές στη διεπιφάνεια.



Σχήμα 6.10 Διάγραμμα ζώνης shear lag.

Η εικόνα που ακολουθεί επιβεβαιώνει τη θεωρία αυτή , καθώς φαίνονται με χρώματα οι διατμητικές διεπιφανειακές τάσεις στις αιχμές των ρωγμών. Για καλύτερη εποπτεία των αποτελεσμάτων δεν εμφανίζεται η πρώτη στρώση των 0, ώστε να διακρίνονται εύκολα οι τάσεις στη διεπιφάνεια.



Σχήμα 6.11 Τάσεις στη διεπιφάνεια στις περιοχές κοντά στις ρωγμές.

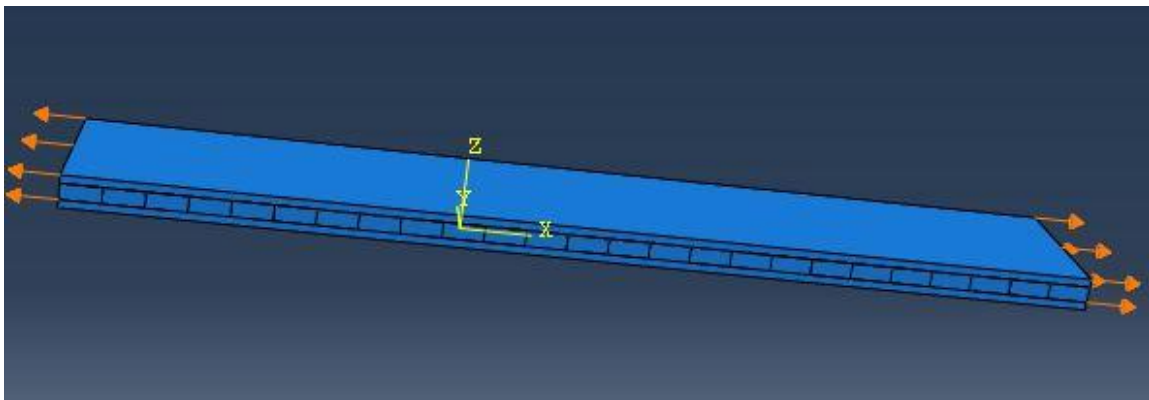
Εντός της ζώνης αυτής , στη στρώση των 90, οι ορθές εφελκυστικές τάσεις είναι μικρότερες από αυτές που αναπτύσσονται μακριά από τις ρωγμές γεγονός που κάνει

δύσκολη την περαιτέρω διάδοση της συγκεκριμένης βλάβης, καθώς είναι πιθανότερη η εμφάνιση σε άλλο σημείο μακριά από τη ζώνη shear lag. Το μέγεθος της ζώνης είναι ανάλογο του πάχους της στρώσης των 90, αλλά δεν είναι και ο μοναδικός παράγοντας που την επηρεάζει. Άλλοι παράγοντες είναι η δυσκαμψία των εξωτερικών στρώσεων στη διεύθυνση της φόρτισης καθώς και η ποιότητα της διεπιφάνειας που εμφανίζεται μεταξύ των στρώσεων. Στη συνέχεια θα παρουσιαστεί αναλυτικότερα το προφίλ αξονικών τάσεων στην περιοχή των ρωγμών.

6.2.2 Πρόβλεψη εμφάνισης εγκάρσιων ρωγμών ως τον κορεσμό

Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει η μοντελοποίηση του σύνθετου υλικού με στοχαστικότητα ώστε να εμφανίζονται τυχαία οι ρωγμές μέχρι να φτάσουν μια συγκεκριμένη πυκνότητα ρηγματώσης (κορεσμός). Αυτό επιτεύχθηκε με την εξής διαδικασία:

Οι δύο ελεύθερες επιφάνειες στις στρώσεις των 90 μοιρών αντιπροσωπεύουν εγκάρσιες ρωγμές που εμφανίστηκαν κατά τη φόρτιση του μοντέλου και η μελέτη γίνεται ώστε να παρατηρήσουμε πως αποκρίνεται το δοκίμιο μεταξύ των δύο αυτών ρωγμών. Έτσι, το μοντέλο που εξετάζουμε μπορεί να θεωρηθεί ως ένας αντιπροσωπευτικός όγκος του υλικού μεταξύ των δύο αρχικών ρωγμών. Οι ελεύθερες επιφάνειες των στρώσεων των 0 μοιρών εφελκύνονται με ρυθμό παραμόρφωσης ίσο και αντίθετο όπως φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί.



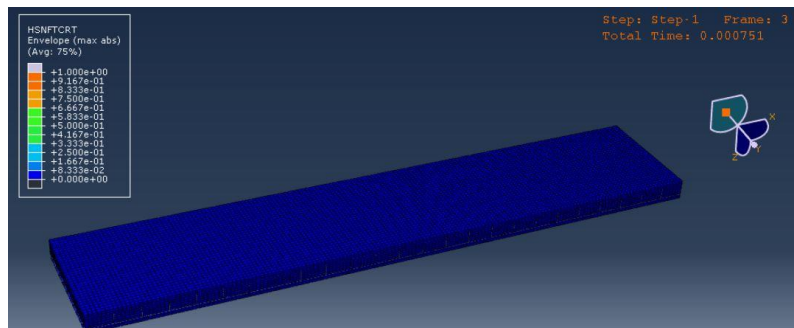
Σχήμα 6.12 Εισαγωγή πιθανών θέσεων εμφάνισης ρωγμών.

Η στοχαστικότητα του μοντέλου οφείλεται στον ορισμό ενός μεγάλου πιθανού αριθμού ρωγμών που μπορεί να εμφανιστούν με διαφορετική αντοχή η κάθε μια. Η εισαγωγή αυτών των πιθανών ρωγμών γίνεται για να αποφευχθεί η ομοιόμορφη εντατική κατάσταση σε όλο το μήκος της κάθε στρώσης, και η διαφορετική αντοχή ώστε να μην ανοίξουν ταυτόχρονα όλες οι ρωγμές. Η αντοχή σε κάθε επαφή (που μπορεί να εξελιχθεί σε ρωγμή) ακολουθεί κανονική κατανομή με μέση τιμή την αντοχή του υλικού της μήτρας και τυπική απόκλιση 15%. Οι τιμές που προέκυψαν από την κατανομή, εκχωρήθηκαν σε ρωγμές με τη βοήθεια μιας συνάρτησης παραγωγής τυχαίων αριθμών.

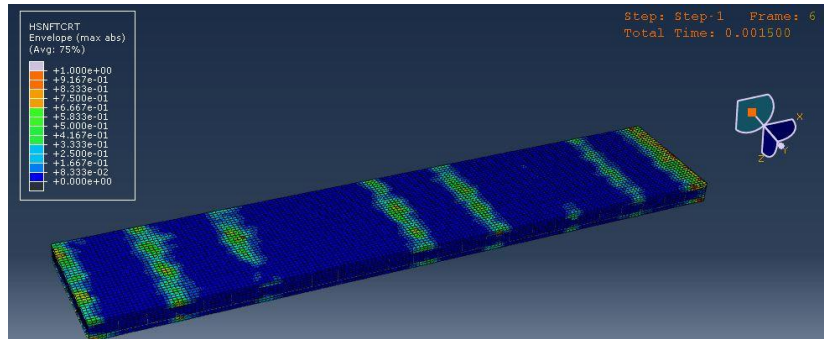
Στα σημεία που οι εγκάρσιες ρωγμές κάνουν την εμφάνισή τους παρατηρείται συγκέντρωση τάσεων. Σε ένα από αυτά τα σημεία θα προκύψει τελικά αστοχία των στρώσεων των 0 μοιρών ακριβώς πάνω και κάτω από τη ρωγμή.

Όπως παρατηρούμε από τις εικόνες που ακολουθούν κάποιες ρωγμές έχουν εμφανιστεί πολύ κοντά μεταξύ τους και έχουν επικαλυπτόμενα πεδία τάσεων. Οι περιοχές δηλαδή που υπάρχει συγκέντρωση τάσεων ενώνονται, και το μοντέλο αποκρίνεται σαν να υπάρχει ρωγμή στο διάστημα μεταξύ των δύο εγκάρσιων ρωγμών.

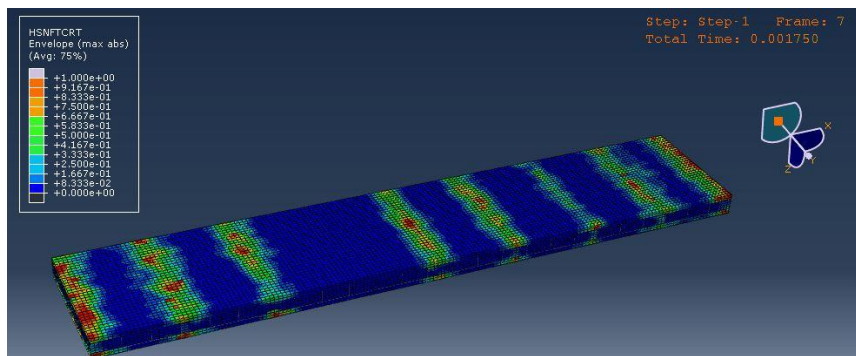
Στις εικόνες που ακολουθούν βλέπουμε την εμφάνιση των ρωγμών με την αύξηση του φορτίου, και τις συγκεντρώσεις τάσεων, σύμφωνα με το κριτήριο Hashin για εφελκυσμό ινών (HFTCTR).



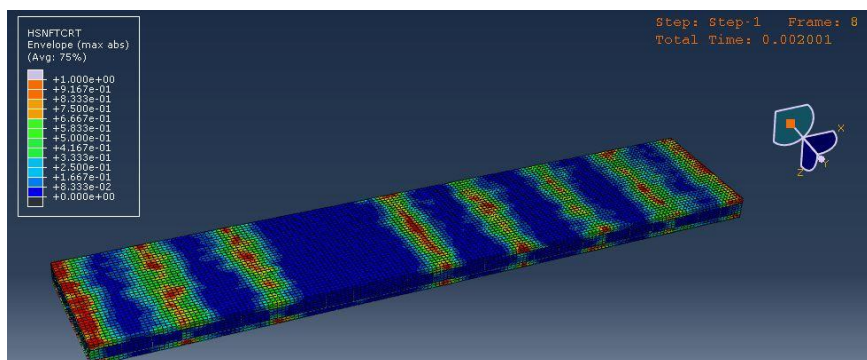
Σχήμα 6.13 Εκκίνηση φόρτισης πριν την εμφάνιση των πρώτων ρωγμών (HFTCTR).



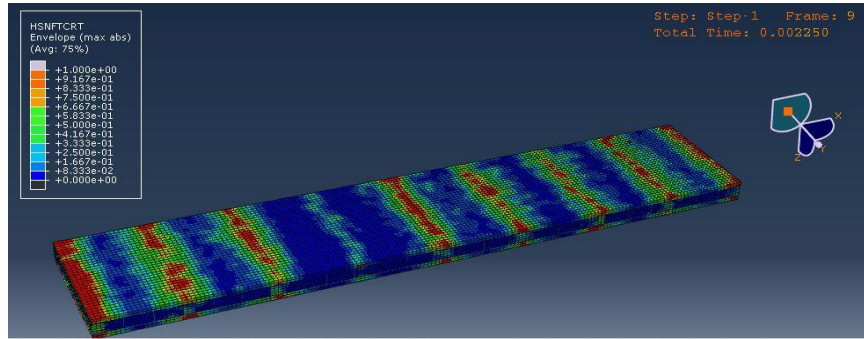
Σχήμα 6.14 Εμφάνιση ρωγμών πριν την πλήρη ανάπτυξή τους (HFTCRT).



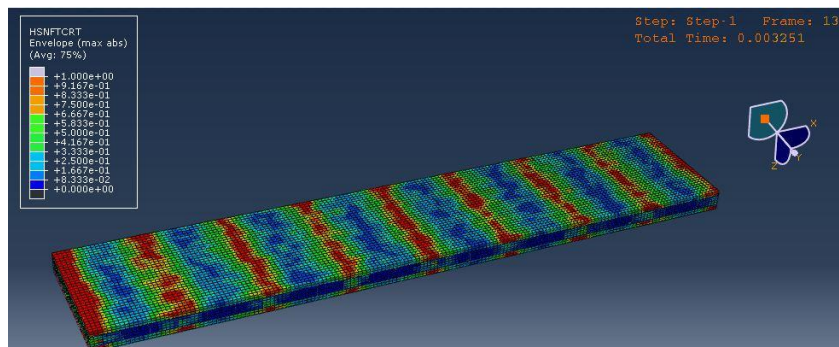
Σχήμα 6.15 Ανάπτυξη ρωγμών και εμφάνιση νέας ρωγμής (HFTCRT).



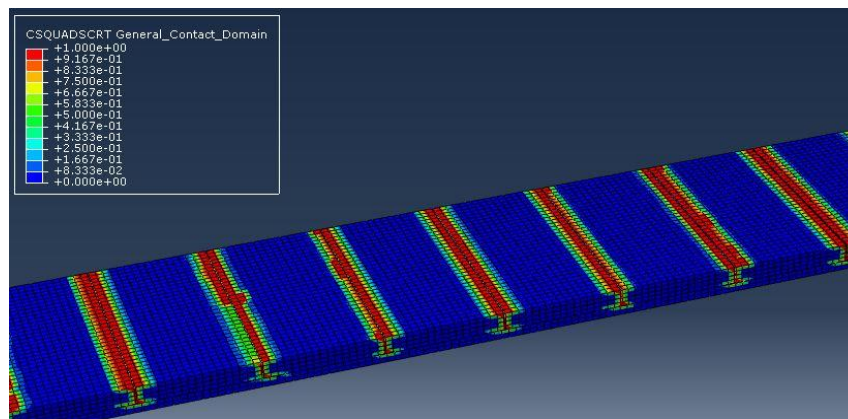
Σχήμα 6.16 Ανάπτυξη προηγούμενης ρωγμής (HFTCRT).



Σχήμα 6.17 Εμφάνιση τελευταίας ρωγμής (HFTCRT).



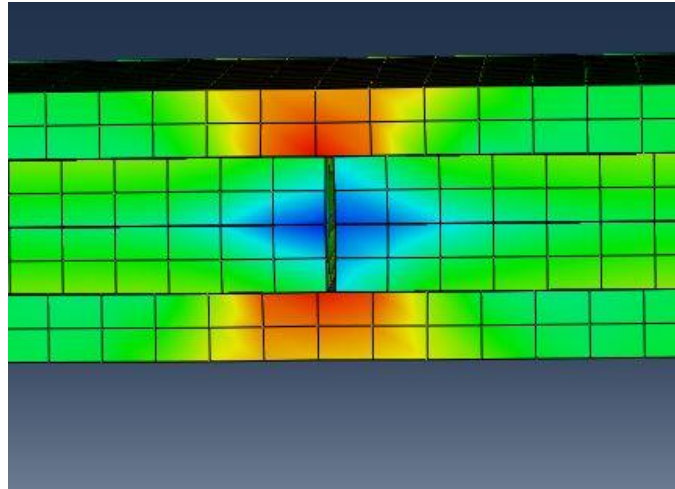
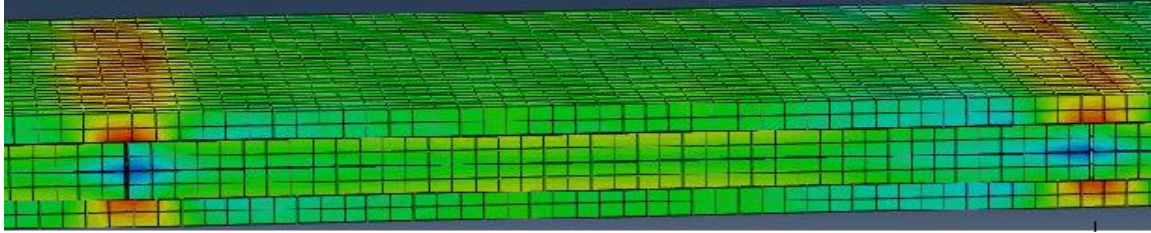
Σχήμα 6.18 Ανάπτυξη τελευταίας ρωγμής και κορεσμός (HFTCRT).



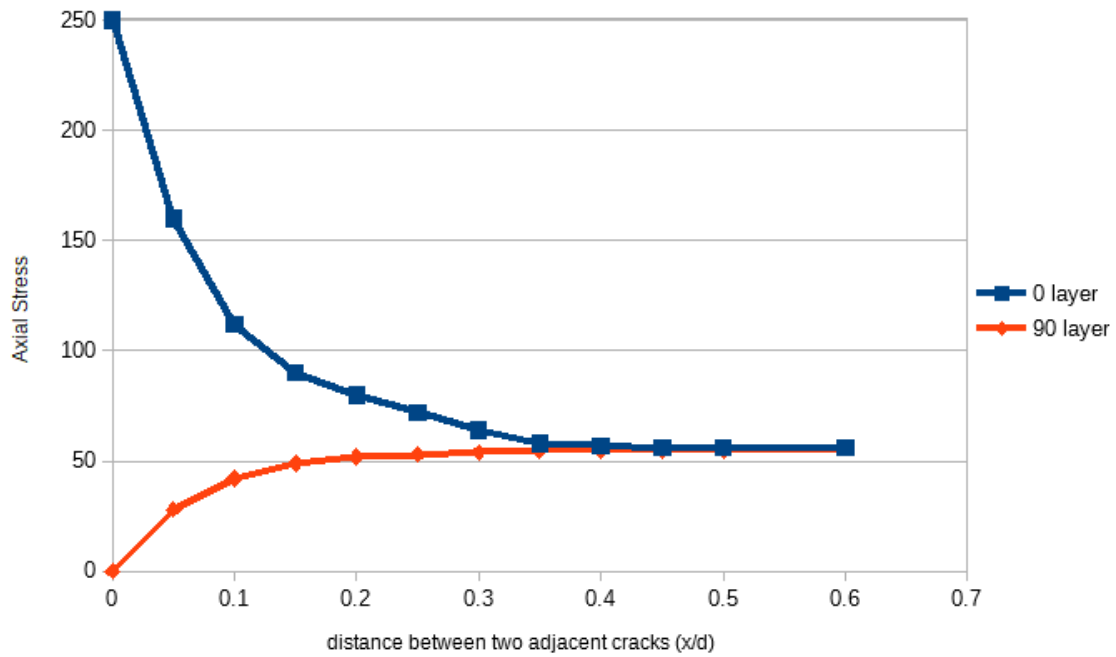
Σχήμα 6.19 Ρωγμές και αστοχία διεπιφάνειας (CQUADSCRT).

6.2.3 Προφίλ ορθών τάσεων

Σε προηγούμενη ενότητα αναφέρθηκε η ζώνη shear lag , και πώς ανακατανέμονται οι τάσεις στις περιοχές των ρωγμών. Η κατανομή των τάσεων , όπως προέκυψε από την επίλυση του μοντέλου παρουσιάζεται στις εικόνες που ακολουθούν.



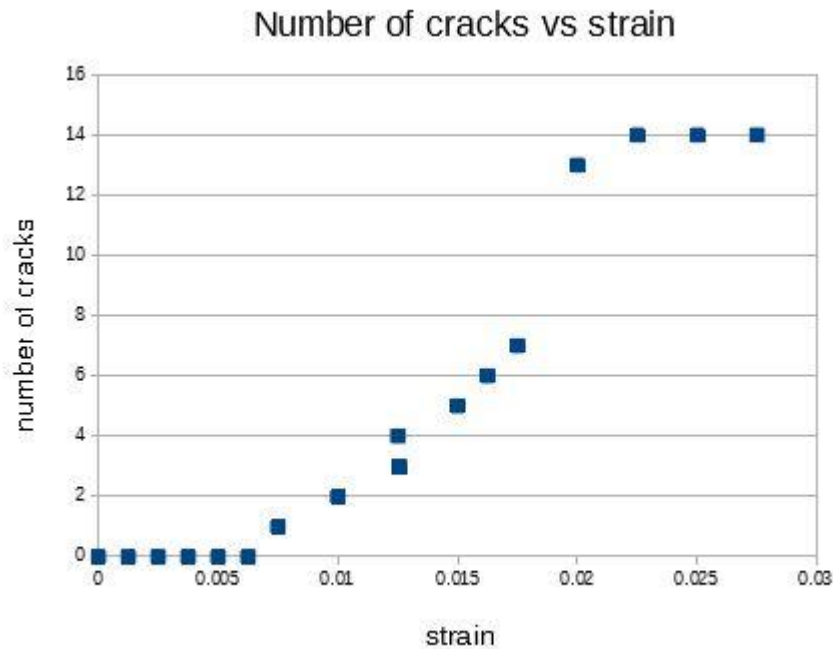
Σχήμα 6.20 Κατανομή αξονικών τάσεων στις στρώσεις μετά την εμφάνιση ρωγμών.



Σχήμα 6.21 Διάγραμμα αξονικών τάσεων στις στρώσεις μετά την εμφάνιση ρωγμών.

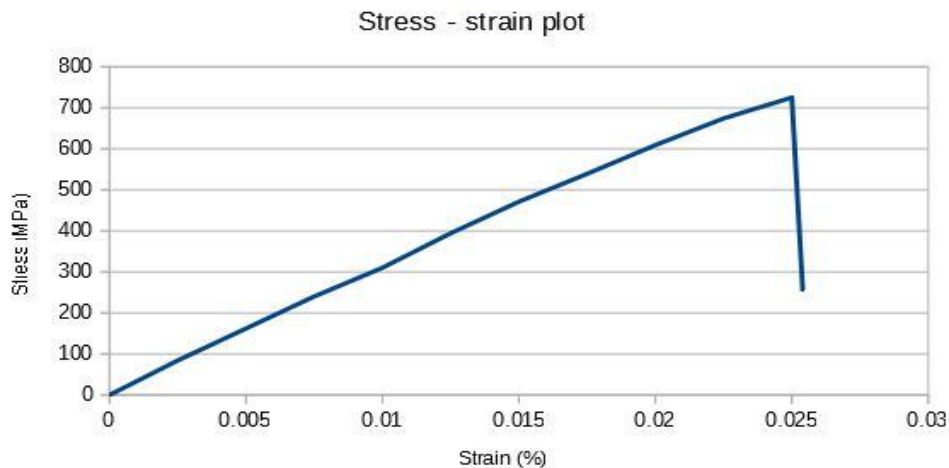
6.2.4 Πυκνότητα ρωγμών και τελική αντοχή του μοντέλου

Στο μοντέλο τοποθετήθηκε ένας μεγάλος αριθμός πιθανών ρωγμών, περισσότερες δηλαδή από όσες μπορούν σύμφωνα με τα μεγέθη των τάσεων, να εμφανιστούν. Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται αναλυτικά ο αριθμός των ρωγμών και οι τάσεις στις οποίες αναπτύχθηκαν.



Σχήμα 6.22 Αριθμός ρωγμών σε συνάρτηση με την παραμόρφωση.

Μετά την εμφάνιση της πρώτης ρωγμής που πραγματοποιείται με παραμόρφωση 0.68 %, ο αριθμός των ρωγμών αυξάνεται συνεχώς, μέχρι η παραμόρφωση να ξεπεράσει το 2% όταν και επέρχεται ο κορεσμός.



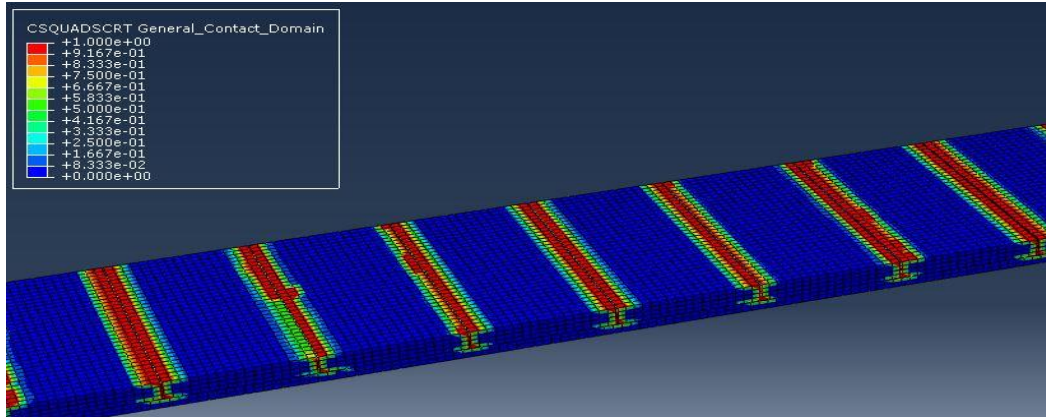
Σχήμα 6.23 Διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων.

Από το διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων προκύπτει πως η τελική αστοχία του σύνθετου υλικού προκύπτει για παραμόρφωση λίγο μεγαλύτερη από 2.5%, δηλαδή αμέσως μετά τον κορεσμό των ρωγμών και την αστοχία των ινών στις στρώσεις των 0 μοιρών.

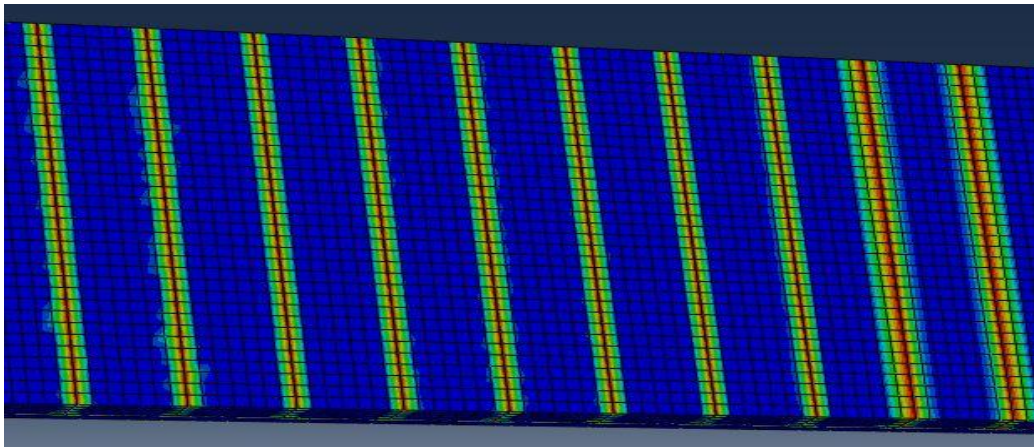
6.2.5 Μέγεθος ILSS και επιρροή στη συνολική αντοχή και το μέγεθος της διεπιφανειακής αποκόλλησης

Η διατμητική διαστρωματική αντοχή σε ένα σύνθετο υλικό παίζει καθοριστικό ρόλο στις δομικές ιδιότητες του υλικού, καθώς από αυτήν εξαρτάται το μέγεθος της φόρτισης που θα μεταφερθεί διατμητικά μεταξύ των στρώσεων. Έτσι, μια σχετικά μικρή αντοχή της διεπιφάνειας περιορίζει τις δομικές ιδιότητες του σύνθετου υλικού, καθώς υπάρχει περίπτωση να μην εκμεταλλεύονται πλήρως οι ιδιότητες μιας στρώσης, π.χ. αστοχώντας η διεπιφάνεια πριν αστοχήσει μια στρώση που φορτίζεται έμμεσα. Κατά κύριο λόγο, αυξάνοντας την αντοχή της διεπιφάνειας αυξάνεται και η συνολική αντοχή του υλικού όπως θα δούμε στη συνέχεια. Όπως είναι λογικό όμως, για πολύ μεγάλες τιμές της διεπιφανειακής αντοχής, οι διατμητικές τάσεις που αναπτύσσονται στη διεπιφάνεια δεν είναι ικανές να προκαλέσουν διαστρωματική αποκόλληση και η ανακατανομή των τάσεων είναι διαφορετική. Ακόμη, το μέγεθος των ορθών τάσεων που μεταφέρονται στη στρώση των 90, μέσω διάτμησης είναι αρκετές ώστε να προκαλέσουν επιπλέον ρηγμάτωση και οι συγκεντρώσεις τάσεων να προκαλούν συνολική αστοχία για μικρότερη φόρτιση.

Στις παρακάτω εικόνες γίνεται αντιληπτό πως το μέγεθος της διαστρωματικής αντοχής επηρεάζει σημαντικά το μέγεθος της διαστρωματικής αποκόλλησης και κατ' επέκταση τη συνολική αντοχή του δοκιμίου.

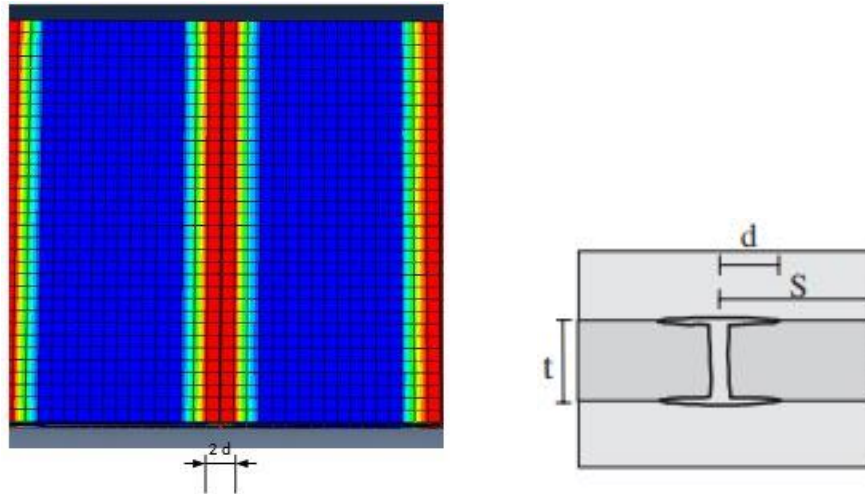


Σχήμα 6.24 Τιμή ILSS που επιτρέπει τη διεπιφανειακή αποκόλληση σε επιθυμητά επίπεδα



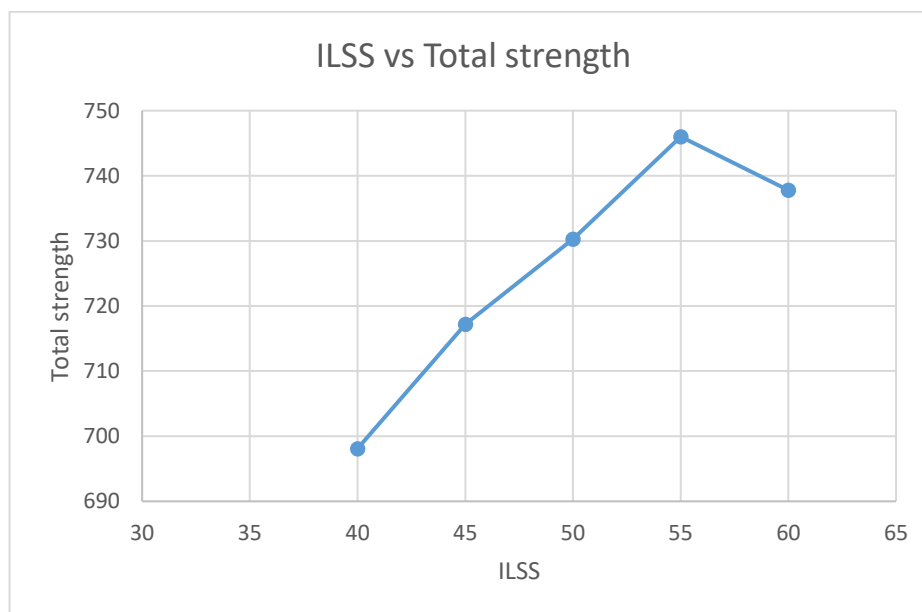
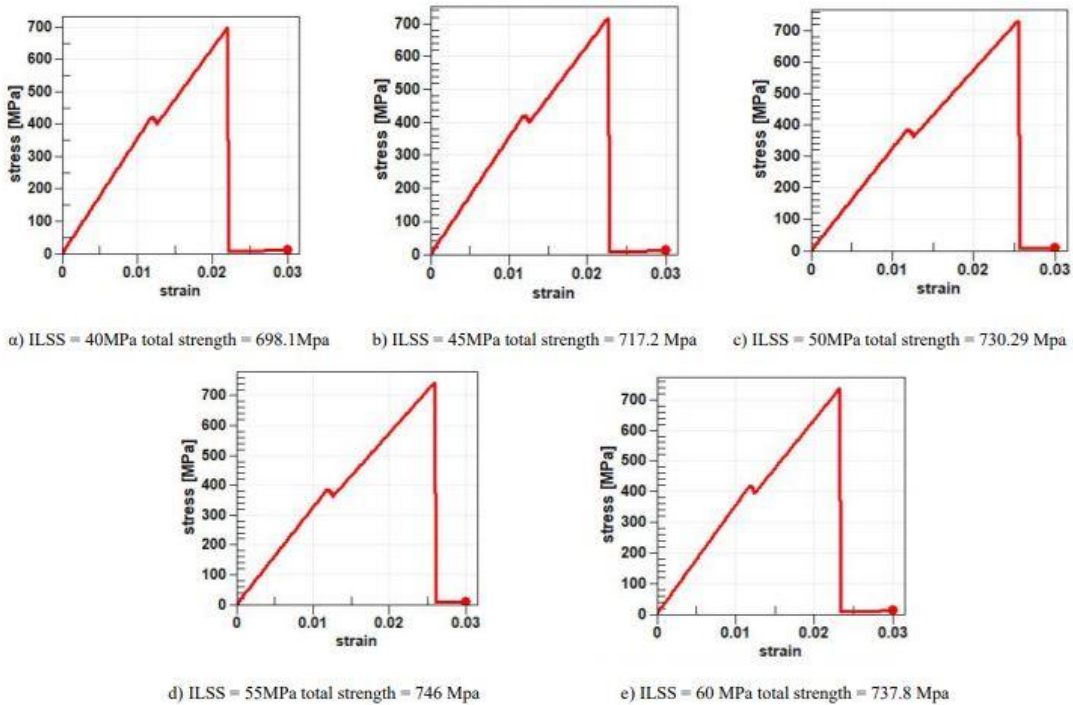
Σχήμα 6.25 Μεγάλη τιμή ILSS που δεν επιτρέπει τη διεπιφανειακή αποκόλληση σε επιθυμητά επίπεδα και προκαλεί πυκνότερη ρηγμάτωση.

Για την παρουσίαση της μεταβολής του μήκους της διεπιφανειακής αποκόλλησης συναρτήσει της διεπιφανειακής αντοχής, ορίζεται ως κανονικοποιημένο μήκος ο λόγος του μισού μήκους αποκόλλησης προς τη μισή απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών ρωγμών d / S .



Σχήμα 6.26 Κανονικοποιημένο μήκος συναρτήσει του ILSS

Όσον αφορά τη συνολική αντοχή, επιλύθηκαν 5 μοντέλα με ίδιες ακριβώς παραμέτρους, εκτός από τη διεπιφανειακή αντοχή, η οποία πήρε τιμές 40, 45, 50, 55, 60 Μπα. Παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα της συνολικής αντοχής συναρτήσει του ILSS.



Σχήμα 6.27 Συνολική αντοχή συναρτήσει του ILSS

Είναι εμφανές πως αυξάνοντας τη διεπιφανειακή αντοχή αυξάνεται και η συνολική αντοχή του δοκιμίου. Αυτό συμβαίνει διότι μεταφέρεται η τάση στη μεσαία στρώση η οποία αστοχεί δημιουργώντας εγκάρσιες ρωγμές και διαστρωματική αποκόλληση στην περιοχή των ρωγμών. Με τον τρόπο αυτό υπάρχει απελευθέρωση ενέργειας, και ομοιόμορφη ανακατανομή των τάσεων στο υπόλοιπο υλικό, έχοντας ως αποτέλεσμα τη μεγιστοποίηση της συνολικής αντοχής. Έτσι, όσες περισσότερες είναι οι εγκάρσιες ρωγμές που θα εμφανιστούν (μαζί με αποκόλληση) τόσο μεγαλύτερη θα είναι η συνολική αντοχή του σύνθετου υλικού. Αυτό συμβαίνει μέχρι μια βέλτιστη τιμή. Από αυτή την τιμή και μετά, δε θα εμφανίζεται διεπιφανειακή αποκόλληση, οι περιοχές με μεγάλη συγκέντρωση τάσεων δε θα 'ανακουφίζονται', μειώνοντας τη συνολική αντοχή του υλικού. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η βέλτιστη τιμή είναι μεταξύ 55 και 60 Μpa.

6.3 ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας δημιουργήθηκαν μοντέλα σύνθετων υλικών διασταυρούμενων στρώσεων και μελετήθηκαν οι μηχανισμοί αστοχίας που προκύπτουν από την καταπόνηση του δοκιμίου σε εφελκυσμό. Αρχικά, το μοντέλο υλοποιήθηκε χωρίς ατέλειες και εξετάστηκε η αστοχία της μήτρας και των ινών.

Στη συνέχεια εισήχθησαν ατέλειες με τη μορφή επαφών, όπου η αντοχή σε κάθε επαφή ακολουθεί κανονική κατανομή με τυπική απόκλιση 15%. Καθώς το εφελκυστικό φορτίο αυξανόταν, οι πρώτες ρωγμές άρχισαν να κάνουν την εμφάνισή τους. Την ίδια στιγμή διαστρωματικές αποκολλήσεις στις περιοχές των ρωγμών λάμβαναν χώρα.

Όταν η παραμόρφωση ξεπέρασε το 2%, οι τελευταίες ρωγμές αναπτύχθηκαν φτάνοντας σε μία κατάσταση κορεσμού. Στη συνέχεια λόγω συγκέντρωσης τάσεων στις ρωγμές, τερματίζεται η ανάλυση λόγω της συνολικής αστοχίας, ενώ οι διαστρωματικές αποκολλήσεις συνέχισαν να λαμβάνουν χώρα μέχρι και το τέλος της ανάλυσης.

Τέλος, υλοποιείται μια παραμετρική ανάλυση μεταξύ της διεπιφανειακής αντοχής, του μήκους διαστρωματικής αποκόλλησης και της συνολικής αντοχής του μοντέλου. Προέκυψε πως η αύξηση της διαπιφανειακής αντοχής λειτουργεί ευεργετικά ως προς τις

συνολικές δομικές ιδιότητες της αντοχής μέχρι μια βέλτιστη τιμή, πέραν της οποίας η συνολική αντοχή μειώνεται.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική βιβλιογραφία:

Κατερέλος Δ. (2004) Μηχανική συμπεριφορά σε στατική και δυναμική καταπόνηση σύνθετων υλικών με παρουσία συγκέντρωσης τάσης, Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών.

Ξένη Βιβλιογραφία:

D. T. G. Katerelos¹, A. Paipetis^{*2}, T. Loutas³, G. Sotiriadis³, V. Kostopoulos³ and S. L. Ogin⁴, In situ damage monitoring of cross-ply laminates using acoustic emission

S.G. Lim and C.S. Hong (1989) Prediction of Transverse Cracking and Stiffness Reduction in Cross-Ply Laminated Composites

John A. Nairn and Shoufeng HU (1992) The formation and Effect of Outer-Ply Microcracks in Cross-Ply Laminates: A variational Approach.

John A. Nairn (1996) On the use of shear-lag methods for analysis of stress transfer in unidirectional composites

Zihui Xia, Yu Chen, Fernand Ellyin (2000) A meso/micro- mechanical model for damage progression in glass-fiber/epoxy cross-ply laminates by finite-element analysis.

J.-W. Lee and I.M. Daniel (1990) Progressive transverse cracking of cross-ply laminates

Masaaki Nishikawa ^a, Tomonaga Okabe ^{b,*}, Nobuo Takeda ^c (2006) Numerical simulation of interlaminar damage propagation in CFRP cross-ply laminates under transverse loading

Christopher Baker ^a, Gregory N. Morscher ^{a,†}, Vijay V. Pujar ^b, Joseph R. Lemanski (2014) Transverse cracking in carbon fiber reinforced polymer composites : Modal acoustic emission and peak frequency analysis

Jianqiao Ye^{1*}, Dennis Lam¹ and Daxu Zhang² (2010) Initiation and Propagation of Transverse Cracking in Composite Laminates

George J. Dvorak (1987) Progressive Transverse Cracking in Composite Laminates

John A. Nairn , D.A. Mendels (2001) On use of planar shear lag methods for stress transfer analysis of multilayered composites

MR Jolly*, A. Prabhakar, B. Sturzu, K. Hollstein, R.Singh, S. Thomas, P. Foote & A. Shaw Review of Non-Destructive Testing (NDT) Techniques and their applicability to thick walled composites

Michael R. Wisnom a,*, Fu-Kuo Chang b (2000) Modelling of splitting and delamination in nithced cross -ply laminates

Amir Refahi Oskouei a,†, Hossein Heidary b, Mehdi Ahmadi b, Mehdi Farajpur (2012) Unsupervised acoustic emission data clustering for the analysis of damage mechanisms in glass polyester composites

S.Gholizadeh (2016) A review of non-destructive testing methods of composite materials

YongPeng a, Wei-LongZheng a, Bao-LiangLu (2014) An unsupervised discriminative extreme learning machine and its applications to unsupervised data clustering.

A. Mareca, J.-H. Thomasa,b, R. El Guerjouma (2007) Damage characterization of polymer based composite materials: Multivariable analysis and wavelet transform for clustering acoustic emission data.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Κλασική θεωρία πλακών:

Η κλασική θεωρία πλακών είναι άμεση προέκταση της κλασικής θεωρίας επίπεδων στρώσεων για ισότροπο και ομοιογενές υλικό, όπως προτείνεται από Kirchhoff -Love. Ωστόσο, η επέκταση αυτής της θεωρίας στα ελάσματα απαιτεί ορισμένες τροποποιήσεις προκειμένου να ληφθεί υπόψη η ανομοιογένεια στο πάχος της κατεύθυνσης. Στη συνέχεια, οι παραδοχές που έγιναν σε αυτή τη θεωρία, μαζί με τις παραδοχές που γίνονται για την κλασική θεωρία των επίπεδων στρώσεων είναι δεδομένες.

Παραδοχές της κλασικής θεωρίας των στρώσεων:

1. Το σύνθετο αποτελείται από άριστα συνδεδεμένα στρώματα. Δεν υπάρχει καμία ολίσθηση μεταξύ των γειτονικών στρωμάτων. Με άλλα λόγια, είναι ισοδύναμο να πούμε ότι τα συστατικά μετατόπισης είναι συνεχή διαμέσου του πάχους.
2. Κάθε στρώση θεωρείται ότι είναι ένα ομοιογενές στρώμα έτσι ώστε οι τελικές του ιδιότητες να είναι γνωστές.
3. Κάθε στρώση είναι σε κατάσταση επίπεδης τάσης.
4. Η κάθε ατομική στρώση μπορεί να είναι ισότροπη, ορθότροπη ή εγκάρσια ισότροπη.
5. Η κάθε στρώση παραμορφώνεται σύμφωνα με τις υποθέσεις του Kirchhoff για την κάμψη και τον εφελκυσμό των λεπτών επίπεδων πλακών (όπως υποτίθεται στην κλασική θεωρία επίπεδων πλακών). Οι υποθέσεις είναι:
 - Οι κάθετοι προς το μεσαίο επίπεδο παραμένουν ευθεία και κάθετα προς το μέσο επίπεδο, ακόμη και μετά την παραμόρφωση.
 - Οι κάθετοι προς το μεσαίο επίπεδο δεν αλλάζουν το μήκος τους.

Η κλασική θεωρία πλακών είναι συντομογραφία όπως το (CLT = Classical laminated theory). Αυτή η θεωρία είναι γνωστή ως η κλασική θεωρία επίπεδων στρώσεων και με τη συντομογραφία (CLPT = Classical laminated plate theory).