



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

**Επίδραση του τρόπου ύφανσης στις
μηχανικές ιδιότητες σύνθετων υλικών
αποτελούμενων από
ανθρακοϋφασμα και εποξειδική
ρητίνη**

Το μέτρο ελαστικότητας και η αντοχή σε
μονοαξονικές διατάξεις και σε υφάσματα
απλής πλέξης

Ιωάννης Αλεξίου

Επιβλέπων: Αλέξανδρος Δ. Γκότσης



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΛΙΚΩΝ

**ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΤΡΟΠΟΥ ΥΦΑΝΣΗΣ ΣΤΙΣ
ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ
ΥΛΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΟΥΜΕΝΩΝ ΑΠΟ
ΑΝΘΡΑΚΟΪΦΑΣΜΑ ΚΑΙ ΕΠΟΞΕΙΔΙΚΗ
ΡΗΤΙΝΗ**

*Το μέτρο ελαστικότητας και η αντοχή σε
μονοαξονικές διατάξεις και σε υφάσματα απλής
πλέξης*

Ιωάννης Αλεξίου

Διπλωματική εργασία υποβληθήσα στα πλαίσια των απαιτήσεων για
την απόκτηση του Διπλώματος
της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης

10 Ιουνίου, 2016

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ιωάννης Αλεξίου,
αρ. φ. μητρώου: 2008020003
e-mail: alexiouj89@gmail.com

Η εργασία εγκρίθηκε από την ακόλουθη τριμελή εξεταστική επιτροπή:

1. Αλέξανδρος Δ. Γκότσης, καθηγητής Πολυτεχνείου Κρήτης, Επιβλέπων
 2. Κωνσταντίνος Κομνίτσας, καθηγητής Πολυτεχνείου Κρήτης
 3. Κωνσταντίνος Προβιδάκης, καθηγητής Πολυτεχνείου Κρήτης
- στις 15 Ιουνίου 2016

Εικόνα εξωφύλλου:

Σύνθετο υλικό από ανθρακοϋφασμα και εποξειδική ρητίνη, παρασκευασμένο με την μέθοδο έγχυσης ρητίνης υπό κενό

ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ:

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ, ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΛΙΚΩΝ

Κτήριο Επιστημών, Πανεπιστημιούπολη, Κουνουπιδιανά, 73100 Χανιά
τηλ. 2821037259

e-mail: gotsis@isc.tuc.gr

ΔΗΛΩΣΗ

Δηλώνω υπεύθυνα ότι η παρούσα διπλωματική εργασία είναι προϊόν ανεξάρτητης εργασίας μου που διεξήχθη κατά τις σπουδές μου στη σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης, στα Χανιά,

Για ό,τι δεδομένα ή πληροφορίες χρησιμοποίησα που προέρχονται από εξωτερικές πηγές έχουν δοθεί οι αρμόζουσες αναγνωρίσεις και αναφορές.

Ιωάννης Αλεξίου

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Τα σύνθετα υλικά παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τα συμβατικά υλικά (π.χ. μέταλλα, κεραμικά, πολυμερή), όπως χαμηλή πυκνότητα, εξαιρετική αντοχή και ακαμψία, δυνατότητα παραγωγής προϊόντων σε σχεδόν απεριόριστο μήκος, ευκολότερη μορφοποίηση και εγκατάσταση και ανθεκτικότητα σε διάβρωση. Γι' αυτό, τα υλικά αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πολλές εφαρμογές, όπου η αποκλειστική χρήση συμβατικών υλικών δεν δίνει μία ικανοποιητική λύση.

Η παρούσα εργασία μελετά πολύστρωτα σύνθετα υλικά (laminates) αποτελούμενα από ανθρακοϋφασμα και εποξειδική ρητίνη. Χρησιμοποιήθηκαν υφάσματα απλής πλέξης και φύλλα από μονοαξονικά προσανατολισμένα νήματα. Ιδιαίτερος σκοπός της εργασίας αυτής είναι να μελετηθεί η επίδραση του τρόπου ύφανσης και στοίβαξης των φύλλων στις μηχανικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	iii
Ευχαριστίες	ix
Σύνοψη	xi
Abstract	1
1 Εισαγωγή	3
1.1 Σύνθετα Υλικά	4
1.2 Υλικά Ινών	6
1.3 Υλικά Μήτρας	9
2 Τρόποι Διάταξης της Ενίσχυσης	13
2.1 Κατ' όγκον και κατά βάρος περιεκτικότητα	19
3 Μηχανικές Ιδιότητες των Σύνθετων Υλικών	21
3.1 Εισαγωγή	21
3.2 Ελαστικές Ιδιότητες μιας Στρώσης	24
3.3 Αντοχή σε εφελκυσμό	24
3.4 Αναλυτικά μοντέλα για υφασμένες ίνες	26
3.4.1 Γεωμετρική Περιγραφή	27
3.5 Απλούστερη προσέγγιση	32
3.5.1 Παράλληλη στοίβαξη των υφασμάτων	32
3.5.2 Στοίβαξη των υφασμάτων σε γωνία 45°	32
3.6 Μοντέλα για την αντοχή	33
4 Πειραματική Διαδικασία	35
4.1 Εισαγωγή	35
4.2 Περιγραφή εξοπλισμού	35
4.3 Υλικά και διαδικασία παρασκευής δοκιμών	38

5	Αποτελέσματα	41
5.1	Ανθρακόνημα	41
5.2	Μονό υφασμένο φύλλο	41
5.2.1	Εφελκυσμός στην κατεύθυνση του στημονιού	41
5.2.2	Εφελκυσμός σε 45°	44
5.3	Δύο υφασμένα φύλλα στοιβαγμένα σε γωνία 0°	45
5.3.1	Εφελκυσμός στην κατεύθυνση του στημονιού	45
5.3.2	Εφελκυσμός σε 45°	45
5.4	Δύο υφασμένα φύλλα στοιβαγμένα σε γωνία 45°, εφελκυσμός στην κατεύθυνση του στημονιού	47
5.5	Τέσσερα υφάσματα, στοιβαγμένα σε γωνία 0°, εφελκυσμός στην κατεύθυνση του στημονιού	47
5.6	Μονοαξονικά φύλλα	48
5.6.1	Δύο μονοαξονικά φύλλα στοιβαγμένα σε γωνία 90°, εφελκυσμός στην κατεύθυνση του άξονα του 1ου φύλλου	48
5.6.2	Τέσσερα μονοαξονικά φύλλα στοιβαγμένα σε γωνίες 90°, εφελκυσμός στην κατεύθυνση του άξονα του 1ου φύλλου	48
5.6.3	Τέσσερα μονοαξονικά φύλλα στοιβαγμένα σε γωνία 45°, εφελκυσμός στην κατεύθυνση του άξονα του 1ου φύλλου	48
6	Ανάλυση και συζήτηση των αποτελεσμάτων	51
6.1	Πυκνότητα στοίβαξης	51
6.2	Εφελκυσμός στην κατεύθυνση του στημονιού	51
6.2.1	Ανθρακόνημα	51
6.2.2	Υφασμένα φύλλα	52
6.2.3	Μονοαξονικά φύλλα	53
6.2.4	Σύγκριση των υφασμάτων και των στοιβάξεών τους	54
6.3	Εφελκυσμός σε 45° από την κατεύθυνση των ινών	55
6.4	Αντοχή	55
6.4.1	Φόρτιση κατά μήκος των κυρίων αξόνων του συνθέτου	55
6.4.2	Φόρτιση σε 45° ως προς τον κύριο άξονα των συνθέτων	56
7	Εφαρμογή	59
8	Συμπεράσματα και προτάσεις	61
8.1	Συμπεράσματα	61
8.2	Προτάσεις για περαιτέρω μελέτη	62
9	Βιβλιογραφία	63
A	Διαγράμματα $\sigma - \varepsilon$ όλων των δοκιμών	65
A.1	Υφασμένα φύλλα	66
A.1.1	f1- Μονό υφασμένο φύλλο, εφελκυσμός στην κατεύθυνση του στημονιού	66
A.1.2	f1-45: Μονό υφασμένο φύλλο, εφελκυσμός σε 45°	67

A.1.3	f2 Διπλό υφασμένο φύλλο, εφελκυσμός στην κατεύθυνση του στημονιού	68
A.1.4	f2- Διπλό υφασμένο φύλλο, εφελκυσμός σε 45°	69
A.1.5	f2-45-0: Δύο υφασμένα φύλλα στοιβαγμένα σε γωνία 45°, εφελκυσμός στην κατεύθυνση του στημονιού	70
A.1.6	f4 Τετραπλό υφασμένο φύλλο, εφελκυσμός στην κατεύθυνση του στημονιού	71
A.2	Μονοαξονικά φύλλα	72
A.2.1	2f-90-II : 2 μονοαξονικά φύλλα στοιβαγμένα σε γωνία 90°, εφελκυσμός στην κατεύθυνση του άξονα του 1ου φύλλου	72
A.2.2	2f-90-II : 2 μονοαξονικά φύλλα στοιβαγμένα σε γωνία 90°, εφελκυσμός σε γωνία 45° ως προς τον άξονα του 1ου φύλλου	73
A.2.3	4f-90-II : 4 μονοαξονικά φύλλα στοιβαγμένα σε γωνίες 90°, εφελκυσμός στην κατεύθυνση του άξονα του 1ου φύλλου	74
A.2.4	4f-45-II : 4 μονοαξονικά φύλλα στοιβαγμένα σε γωνία 45°, εφελκυσμός στην κατεύθυνση του άξονα του 1ου φύλλου	75
	Ευρετήριο	81
	Vitae	81

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω το διδακτικό προσωπικό της σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων για την παροχή όχι μόνο γνώσεων, αλλά ενός ολοκληρωμένου τρόπου σκέψης και επίλυσης προβλημάτων, τόσο εκπαιδευτικού, όσο και πρακτικού χαρακτήρα.

Ευχαριστώ τον Καθηγητή Αλέξανδρο Γκότση, επιβλέποντα της παρούσης εργασίας, για την εμπιστοσύνη, την υποστήριξη, την καθοδήγηση και το κλίμα συνεργασίας καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Ευχαριστώ επίσης και τα μέλη της επιτροπής, Καθηγητή Κ. Προβιδάκη (Αρχιτεκτονική) και Κ. Κομνίτσα (ΜΗΧΟΠ) για τη συμπαράστασή τους και την υπομονή τους.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους οικείους μου για την ηθική και οικονομική τους υποστήριξη σε όλα τα χρόνια των σπουδών μου.

Σύνοψη

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι να μελετηθεί η επίδραση του τρόπου ύφανσης στις μηχανικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών. Τα σύνθετα υλικά στην παρούσα εργασία αποτελούνται από ανθρακοϋφασμα και εποξειδική ρητίνη. Χρησιμοποιήθηκαν υφάσματα απλής πλέξης και φύλλα από μονοαξονικά προσανατολισμένα νήματα.

Το κάθε δοκίμιο υπεβλήθη σε εφελκυσμό μέχρι θραύσης, με ταυτόχρονη μέτρηση της τάσης και της παραμόρφωσης. Μελετήθηκε πως επιδρά η ύφανση, ο τρόπος στοίβαξης των φύλλων/υφασμάτων και η γωνία φόρτισης των δοκιμίων στο μέτρο ελαστικότητας και στην αντοχή του συνθέτου.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η χρήση απλά υφασμένων ανθρακονημάτων είναι εξ' ίσου αποτελεσματική με τη στοίβαξη μονοαξονικών φύλλων στοιβαγμένα με $\pm 90^\circ$ για την παραγωγή συνθέτων υλικών. Όσον αφορά την ακαμψία (μέτρο ελαστικότητας) και την αντοχή του υλικού η αποδοτικότητα των υφασμάτων βρέθηκε να μειώνεται ελαφρά με την αύξηση του αριθμού τους στο συστρωμάτωμα. Η αποδοτικότητα της στοίβαξης σε 45° είναι ίδια με αυτή σε 0° , με επιπλέον όφελος την μεγαλύτερη ισοτροπικότητα του τελικού υλικού.

Όταν η φόρτιση γίνεται σε γωνία 45° από τους άξονες των ινών, η αποδοτικότητα των υφασμάτων είναι πολύ χαμηλότερη από ό,τι προβλέπει η θεωρία. Για μεγαλύτερη απόδοση στην περίπτωση αυτή τα υφάσματα πρέπει να στοιβάζονται σε γωνία 45° μεταξύ τους.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν ήταν ενθαρρυντικά για την αξιοπιστία της μεθόδου, δηλαδή για την εξαγωγή αξιόπιστων συμπερασμάτων σχετικά με την ελαστικότητα και την αντοχή ενός υλικού χρησιμοποιώντας διαφορετικό αριθμό φύλλων καθώς και προσανατολισμού τους.

Abstract

The aim of this work is the study of the influence of the type of weave at the reinforcing medium on the mechanical properties of composites. The present composites consist of woven carbon fibre fabrics and epoxy resin. Plain woven fabrics were used, as well as uniaxially oriented carbon threads arranged in laminae.

The samples were measured in tensile mode until break, while the evolving stress and the deformation were measured. The effect of the weave type, the stacking of the fabrics and the loading angle on the elasticity modulus and the strength of the composite were studied.

The results indicate that using simply woven carbon fabrics is equally effective as the stacking at $\pm 90^\circ$ of uniaxially oriented carbon threads for the production of composites. The effectiveness of the fabrics on both the modulus of elasticity and the strength of the composite seems to reduce slightly when stacking more fabrics in the composite. Stacking at 45° and loading at the same angle gives equivalent results as the traditional stacking at $\pm 90^\circ$ and loading along one of the major axes of the laminate. This stacking, therefore is preferable, as it provides better isotropicity of the laminate.

When the loading is done at 45° relative to the axes of the fibres, then the effectiveness of the fabrics is much lower from what the theory predicts. It seems that the mode of deformation and failure is not so simple in this case and dominated by the shear deformation of the matrix. For best efficiency in these cases it is advised to stack the fabrics at $\pm 45^\circ$.

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Η ραγδαία πρόοδος που έχει σημειωθεί στον τομέα της τεχνολογίας των δομικών υλικών τα τελευταία χρόνια, είχε ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη πληθώρας νέων προϊόντων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πολλές εφαρμογές, όπου η αποκλειστική χρήση συμβατικών υλικών αποτυγχάνει να παρέχει μία ικανοποιητική λύση. Μεταξύ των προϊόντων αυτών σημαντική θέση κατέχουν τα σύνθετα υλικά από ινοπλισμένα πολυμερή, τα οποία αποτελούνται από 'υφάσματα' από ινώδη υλικά (γυαλί, άνθρακα κ.λπ.) εμποτισμένα με ειδικές εποξειδικές ρητίνες [3].

Η εφαρμογή ινοπλισμένων πολυμερών παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως οι εξαιρετικές ιδιότητες βάρους προς αντοχή, η διαθεσιμότητα του υλικού σε σχετικά απεριόριστο μήκος, η συγκριτικά ευκολότερη εγκατάσταση και η ανθεκτικότητα σε διάβρωση. Τα πλεονεκτήματα αυτά καθιστούν τα σύνθετα υλικά μία πολύ ελκυστική εναλλακτική πρόταση.

Με την ευρύτερη χρήση του όρου, συνδυασμός δύο ή περισσότερων στοιχείων συνιστά ένα σύνθετο υλικό. Η ενίσχυση κατασκευών με σύνθετα υλικά αποτελεί μια νέα τεχνική, η οποία διαδίδεται αλματωδώς και βρίσκει όλο και μεγαλύτερη εφαρμογή. Τα σύνθετα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι ινοπλισμένα πολυμερή (Fiber Reinforced Polymer Composites) και αποτελούνται από συνεχείς ίνες κυρίως γυαλιού ή άνθρακα και σπανιότερα αραμιδίου, που σε συνδυασμό με την εποξειδική ρητίνη, σχηματίζουν ένα σύνθετο υλικό υψηλής αντοχής.

Στην αγορά κυκλοφορούν σε μορφή δύσκαμπτων λωρίδων (με πάχος της τάξης του 1 mm) ή εύκαμπτων υφασμάτων (με πάχος της τάξης των 0.1-0.4 mm), από γυαλί, άνθρακα ή αραμίδιο, με τις ίνες κατανομημένες σε μία ή περισσότερες διευθύνσεις. Τα υλικά αυτά τοποθετούνται με προσανατολισμό, έτσι ώστε οι ίνες να παραλαμβάνουν σημαντικές εφελκυστικές δυνάμεις. Επίσης, τα σύνθετα υλικά εφαρμόζονται στις επιφάνειες σαν ελάσματα, φύλλα ή πλέγματα. Τα υφάσματα μπορεί να είναι μίας ή δύο διευθύνσεων, και ολόσωμα ή σε στρώσεις.

Τα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται ευρύτατα από τον άνθρωπο από τα πρώτα χρόνια της ανάπτυξής του. Υλικά που εύκολα βρίσκουμε στη φύση (ξύλο, πέτρα, πηλός, κόκαλα) χρησιμοποιήθηκαν πρώτα, και ο άνθρωπος σύντομα έμαθε να βελτιώνει τις ιδιότητες τους ενισχύοντας τα υλικά αυτά με πρόσθετα συστατικά [7].

Για παράδειγμα, οι Αιγύπτιοι (5000 π.Χ.) χρησιμοποιούσαν την τεχνική της ενί-

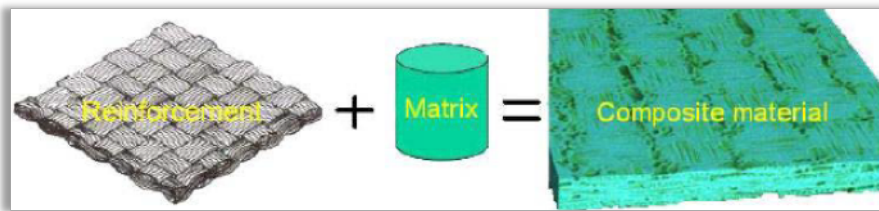
σχυσης τούβλων πηλού με πλέγμα άχυρων, με αποτέλεσμα τη μείωση των τάσεων συστολής που αναπτύσσονταν κατά την ξήρανση του πηλού. Επίσης, παρατήρησαν ότι οι πλάκες από πολύστρωτες βέργες ξύλου, παρουσίαζαν πολύ μεγαλύτερη αντοχή από το φυσικό ξύλο έναντι στρέβλωσης που οφειλόταν στην απορρόφηση υγρασίας. Στη Μεσοποταμία (1000 π.Χ.) εφαρμόστηκε η τεχνική του βερνικώματος των τούβλων και των πλακιδίων με σκοπό τον περιορισμό της επιφανειακής φθοράς, ενώ, κατά τους Ρωμαϊκούς χρόνους, η οδοποιία στηρίχθηκε στην ενίσχυση του οδοστρώματος με τρίμματα κεραμιδιών. Η χρήση της σιδηρόβεργας για προεντεταμένο σκυρόδεμα, που χρησιμοποιείται στις οικοδομές της σύγχρονης εποχής, δεν είναι παρά η μετεξέλιξη της τεχνικής της ανάμιξης γύψου με ζωικό τρίχωμα, η οποία ήταν μια πρακτική μέθοδος ενίσχυσης εύθραυστων υλικών κατασκευής στους αναπτυσσόμενους πολιτισμούς [7].

Το πρώτο σύνθετο υλικό βασισμένο σε μήτρα πλαστικού εμφανίστηκε τη δεκαετία του 1920 και επρόκειτο για μίγμα ινιδίων ξύλου με φαινολική φορμαλδεΰδη, γνωστό αργότερα ως βακελίτης από τον Leo Baekeland που το ανακάλυψε. Η ανάπτυξη των σύνθετων υλικών με ενίσχυση ινών κατά την διάρκεια των τελευταίων 30 ετών υπήρξε ραγδαία και συνδυάστηκε με την ανάπτυξη ινών γυαλιού υψηλής αντοχής, των υψηλής δυσκαμψίας ινών βορίου (1960) και την ανάγκη της αεροδιαστημικής βιομηχανίας για μεγαλύτερη απόδοση με παράλληλη μείωση βάρους αεροσκαφών και διαστημοπλοίων. Το 1964 διατέθηκαν στην αγορά, αρχικά σε μικρές ποσότητες, οι ίνες άνθρακα (carbon fibers), οι οποίες τώρα αποτελούν τις ευρύτερα χρησιμοποιούμενες ενισχύσεις στις αεροδιαστημικές κατασκευαστικές εφαρμογές. Το 1971 διατέθηκαν στο εμπόριο οι ίνες πολυαραμιδίου (Kevlar, Twaron), οι οποίες τώρα χρησιμοποιούνται ευρύτατα στα ελαστικά αυτοκινήτων, καθώς και σε αρκετές αεροδιαστημικές και ναυπηγικές κατασκευές. Στα τέλη της δεκαετίας 1990 πραγματοποιήθηκαν στην Ελλάδα οι πρώτες εφαρμογές της τεχνολογίας των συνθέτων υλικών [7].

Η ειδική αντοχή (λόγος αντοχής προς πυκνότητα) και η ειδική δυσκαμψία (λόγος δυσκαμψίας προς πυκνότητα) των ενισχυτικών ινών βελτιώνονται συνεχώς τα τελευταία 30 χρόνια, π.χ. η ειδική αντοχή και η ειδική δυσκαμψία των ινών γυαλιού, άνθρακα, αραμιδίου και βορίου έχουν φθάσει στο 10-14πλάσιο των αντίστοιχων τιμών του αλουμινίου (ελαφρό μέταλλο). Σκοπός της χρήσης των σύνθετων υλικών είναι η βελτίωση της μηχανικής συμπεριφοράς των υλικών, δηλαδή η βελτίωση της αντοχής της παραμόρφωσης αστοχίας (συνεπώς και της πλαστικότητας) και της ικανότητας απορρόφησης ενέργειας. Το μικρό βάρος, η υψηλή αντοχή, η εξαιρετική αντοχή σε διάβρωση, η πολύ καλή συμπεριφορά σε κόπωση, σε κρούση και στη διάδοση ρωγμών, οι σχετικά εύκολες διαδικασίες παραγωγής και το μικρό κόστος συντήρησης είναι μερικοί από τους παράγοντες εκείνους που έχουν οδηγήσει τα σύνθετα υλικά στην πρώτη θέση μεταξύ των κατασκευαστικών υλικών για μεγάλο πλήθος εφαρμογών [7].

1.1 Σύνθετα Υλικά

Τα ομοιογενή υλικά, με βάση την χημική τους σύσταση, συνήθως διακρίνονται σε μεταλλικά, κεραμικά και οργανικά. Υπάρχουν όμως και μη ομοιογενή υλικά, αποτελούμενα από δύο ή περισσότερα είδη υλικών, που δεν μπορούν να συμπεριληφθούν



Σχήμα 1.1: Σχηματική αναπαράσταση δημιουργίας σύνθετου υλικού [7].

σε μία από αυτές τις κατηγορίες. Τα σύνθετα αυτά υλικά, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, είναι γνωστά από την αρχαιότητα, αλλά τα τελευταία 40 χρόνια έχει γίνει μια επανάσταση στο χώρο των κατασκευών από την όλο και εκτενέστερη χρήση τους.

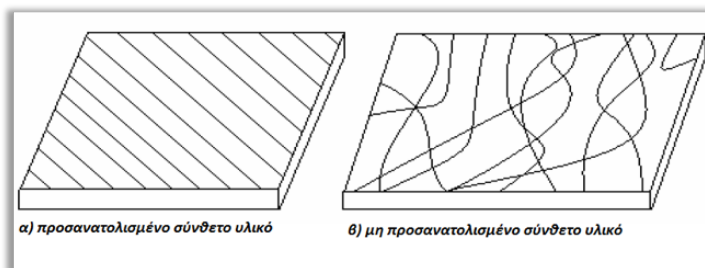
Τα σύνθετα υλικά από ινοπλισμένα πολυμερή έχουν ως συστατικά τους στοιχεία ίνες υψηλής αντοχής και υψηλού μέτρου ελαστικότητας σε παχύρρευστη σκληρυμένη μήτρα. Σε αυτή τη μορφή, τόσο οι ίνες όσο και η μήτρα διατηρούν τις φυσικές και χημικές τους ιδιότητες ενώ ταυτόχρονα παράγουν ένα συνδυασμό ιδιοτήτων που δεν είναι δυνατόν να επιτευχθεί με κανένα από τα συστατικά στοιχεία όταν δρα μόνο του. Η συγκόλληση των προσανατολισμένων ινών πάνω στο μαλακότερο υλικό της μήτρας έχει ως αποτέλεσμα ένα σύνθετο υλικό ινοπλισμένου πολυμερούς με σαφώς καλύτερες ιδιότητες στη διεύθυνση των ινών. Ανάλογα με το συνδυασμό των υλικών, τα σύνθετα υλικά διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες [3]:

- Σύνθετα υλικά ινών (fibrous composites) αποτελούμενα από ίνες εμποτισμένες σε ρητίνη ή μη.
- Σύνθετα υλικά στρωμάτων (laminated composites) αποτελούμενα από επίπεδα διαφόρων υλικών.
- Σύνθετα υλικά σωματιδίων (particulate composites) αποτελούμενα από σωματίδια διαφόρων υλικών σε ένα σώμα.

Τα σύνθετα υλικά ινών αποτελούνται από ίνες εμποτισμένες με ρητίνη ή μη. Ανάλογα με τον προσανατολισμό των ινών, διακρίνονται σε: προσανατολισμένα (directional), με ίνες συνεχείς και ίδιας διεύθυνσης, και σε μη προσανατολισμένα (random), με ίνες τυχαία τοποθετημένες στο συνδετικό υλικό (Σχήμα 2-2) [3].

Οι ίνες των σύνθετων υλικών τοποθετούνται με διάφορους τρόπους ανάλογα με τις ανάγκες της κάθε εφαρμογής. Βάσει του τρόπου τοποθέτησης και του συνδυασμού των ινών στο συνδετικό υλικό, τα σύνθετα υλικά ινών διακρίνονται σε:

- Πλεκτών ινών (woven fiber), που αποτελούν συνεχές σώμα χωρίς επιμέρους στρώματα, οπότε δεν παρουσιάζουν πιθανότητες αποκόλλησης. Έχουν όμως μικρή αντοχή λόγω της μεγάλης συγκέντρωσης τάσεων και του μεγάλου ποσοστού ρητίνης (Σχήμα 1.3(α)).
- Ασυνεχών ινών (chopped fiber), τα οποία έχουν κοντές ίνες διάσπαρτες μέσα



Σχήμα 1.2: Γενικοί τύποι σύνθετων υλικών ινών [3].

στο συνδετικό υλικό, και μηχανική αντοχή κατώτερη απ' αυτήν των συνεχών ινών (Σχήμα 1.3(β)).

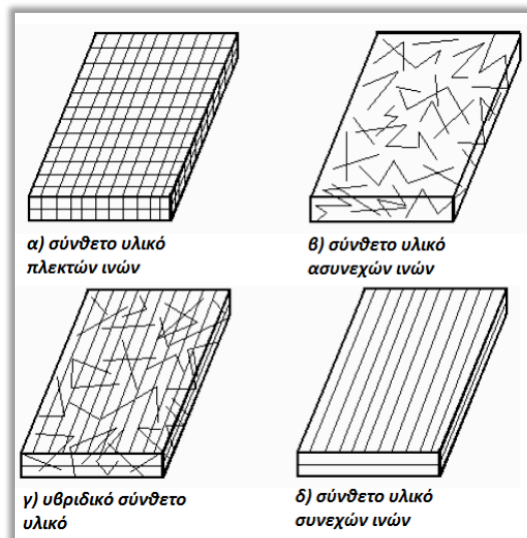
- Υβριδικά (hybrid), τα οποία αποτελούνται είτε από συνεχείς, ή από συνεχείς ίνες, ή από περισσότερους του ενός τύπους ινών. Χρησιμοποιούνται για να πετύχουν επιθυμητές ιδιότητες που το σύνθετο υλικό δεν διαθέτει (Σχήμα 1.3(γ)).
- Συνεχών ινών (continuous fiber), που στρώματα συνεχών ινών – ρητίνης τοποθετούνται στην κατάλληλη διεύθυνση και συνδέονται αποτελώντας ένα σώμα, παρουσιάζοντας έτσι, μεγάλη αντοχή, Η αποκόλληση μεταξύ των στρωμάτων συνεχών ινών- ρητίνης είναι πιθανή (Σχήμα 1.3(δ)) [1].

1.2 Υλικά Ινών

Τα ινώδη σύνθετα υλικά (fiber-reinforced composites), όπως προαναφέραμε, αποτελούνται από έγκλεισμα υπό μορφή ινών μέσα σε μια συνεχή μήτρα. Η μήτρα μπορεί να είναι ένα οποιοδήποτε υλικό από μια μεγάλη ποικιλία φυσικών ή τεχνητών υλικών [6].

Μια ίνα χαρακτηρίζεται από ένα πολύ μεγάλο λόγο μήκος/διάμετρο (aspect ratio). Έχει παρατηρηθεί ότι οι ίνες των διαφόρων υλικών είναι πολύ πιο άκαμπτες και ανθεκτικές από τα αντίστοιχα υλικά που όμως βρίσκονται σε συνήθη μορφή. Για την επίσκευή και ενίσχυση κατασκευών χρησιμοποιούνται κυρίως προσανατολισμένα σύνθετα υλικά συνεχών ινών τα οποία παρουσιάζουν μεγάλη αντοχή [6]. Ο προσανατολισμός των ινών όμως, δίνει στο σύνθετο υλικό ανισότροπη συμπεριφορά, δίνοντας τη δυνατότητα στους μελετητές να διευθετήσουν κατά τέτοιο τρόπο τις στρώσεις του υλικού ώστε να ενισχυθεί το μέλος στη διεύθυνση που αναπτύσσονται οι υψηλότερες τάσεις. Οι τρεις κύριες κατηγορίες των υλικών ινών είναι:

Ίνες υάλου (υαλονήματα): Τα υαλονήματα εμφανίστηκαν για πρώτη φορά στο εμπόριο το 1939. Παράγονται με μηχανικό τρόπο από ύαλο που τήκεται. Το κύριο χαρακτηριστικό του υάλου είναι ότι δεν παρουσιάζει ούτε πλήρως κρυσταλλική δομή αλλά ούτε και ιδιότητες ρευστού. Ανάλογα με το είδος της εφαρμογής για



Σχήμα 1.3: Τύποι σύνθετων υλικών ινών

το οποίο αναπτύχθηκαν, υπάρχουν έξι διαφορετικοί τύποι υαλονημάτων. Από αυτούς, οι δύο τύποι που χρησιμοποιούνται για την επισκευή και ενίσχυση κατασκευών είναι ο ύαλος-E και ο ύαλος-S. Ο ύαλος-S έχει μεγαλύτερη εφελκυστική αντοχή και μέτρο ελαστικότητας από τον ύαλο-E, λόγω του υψηλού του κόστους έχει περιορισμένη εφαρμογή σε σχέση με το δεύτερο. Οι ίνες υάλου, αν και είναι ανθεκτικές στους περισσότερους διαλύτες, αντιδρούν με ορισμένες αλκαλικές ενώσεις και ισχυρά οξέα. Ο ύαλος παρέχει εξαιρετική θερμική και ηλεκτρική μόνωση. Τα φύλλα υάλου έχουν μικρότερη αντοχή σε κόπωση από τα φύλλα άνθρακα ή πολυαραμιδίου, αλλά μεγαλύτερη από τα περισσότερα μέταλλα. Όπως και ο άνθρακας, ο ύαλος δεν παρουσιάζει ερπυστικές παραμορφώσεις, είναι όμως ευπαθής σε διάβρωση. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι παραπάνω ιδιότητες επηρεάζονται σημαντικά από τις περιβαλλοντικές συνθήκες καθώς και τη μήτρα που επιλέγεται για την παραγωγή του σύνθετου υλικού. παράγονται με μηχανικό τρόπο από ύαλο που τήκεται[1]. Για παράδειγμα τα συνηθισμένα φύλλα γυαλιού έχουν τάση θραύσεων μόνο μερικών MPa, ενώ οι ίνες γυαλιού του εμπορίου μπορούν να έχουν αντοχή θραύσεων της τάξεως των 2,8 - 4,8 GPa και όταν αυτές παρασκευάζονται σε εργαστήρια η τάση θραύσεως μπορεί να φτάσει τα 7,0 GPa. Αυτό προφανώς δείχνει ότι η γεωμετρία μιας ίνας είναι αποφασιστικής σημασίας για τον υπολογισμό της αντοχής της ίνας και θα πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη στις σχετικές εφαρμογές [6].

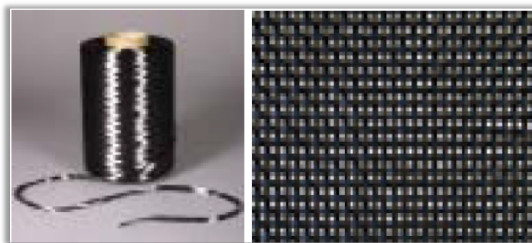
Ίνες άνθρακα (ανθρακονήματα): Οι ίνες άνθρακα διατίθενται στο εμπόριο από τα τέλη της δεκαετίας του 1950. Ο άνθρακας παράγεται από πολυακρυλονιτρίλιο, πίσσα (υποπροϊόν της διύλισης του πετρελαίου) ή ρεγινόν με πυρόλυση σε πολύ



Σχήμα 1.4: Ίνες υάλου [7].

υψηλή θερμοκρασία (συχνά έως 3000 °C). Μέσω της πυρόλυσης απομακρύνονται από το πολυμερές του άνθρακα διάφορες ενώσεις κυανίου και άτομα υδρογόνου. Τα κρυσταλλικά φύλλα άνθρακα που σχηματίζονται εντείνονται έτσι ώστε να προσανατολιστούν παράλληλα προς τον άξονα της ίνας. Με τον τρόπο αυτό οι κρύσταλλοι στερεοποιούνται σε μία βέλτιστη διάταξη. Θεωρητικά, οι ίνες άνθρακα είναι δυνατό να αποκτήσουν μηχανικές ιδιότητες που προσεγγίζουν τα 100 GPa εφελκυστικής αντοχής και 1000 GPa μέτρου ελαστικότητας. Πάντως, οι τιμές αυτές κατά κανόνα δεν αναπτύσσονται πλήρως λόγω ατελειών που παρουσιάζονται στην κρυσταλλική δομή. Οι ίνες άνθρακα που διατίθενται στο εμπόριο έχουν εφελκυστική αντοχή που κυμαίνεται από 2100 MPa έως 6800 MPa με συνήθη για τις εφαρμογές τιμή της τάξης των 3500 MPa και μέτρο ελαστικότητας από 215 GPa έως 700 GPa. Η επιμήκυνση θραύσης κυμαίνεται από 0.2 έως 2.5%, ανάλογα με το είδος του νήματος και τη μέθοδο κατασκευής [3]. Οι ίνες άνθρακα είναι χημικά αδρανείς στους περισσότερους διαλύτες, είτε αυτή είναι οξείνη είτε βασική, και επιπλέον έχουν μεγάλη αντοχή στις υψηλές θερμοκρασίες. Τα φύλλα από ανθρακονήματα και εποξειδική ρητίνη είναι ανθεκτικά σε κόπωση, ερπυσμό και διάβρωση. Λόγω της δράσης του ως ευγενές μέταλλο, ο άνθρακας έχει υψηλή αγωγιμότητα και μπορεί να προκαλέσει γαλβανική διάβρωση των μετάλλων που έρχονται σε επαφή μαζί του. Για το λόγο αυτό πρέπει να αποφεύγεται η απευθείας επαφή του χάλυβα ή του αλουμινίου με τις ίνες άνθρακα. Αξίζει να σημειωθεί ότι το κόστος των ανθρακονημάτων, παρότι παραμένει αρκετά υψηλό σε σχέση με τα άλλα είδη ινών, ωστόσο έχει μειωθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια[2].

Ίνες πολυαραμιδίου : Η εμπορική ονομασία των πρώτων ινών πολυαραμιδίου που κυκλοφόρησαν στην αγορά στις αρχές της δεκαετίας του 1970 είναι Kevlar. Η χρήση των σύνθετων υλικών από ίνες πολυαραμιδίου σε δομικά έργα είναι περιορισμένη σε σχέση με τα υαλονήματα και τα ανθρακονήματα. Κύρια εφαρμογή τους αποτελεί η θωράκιση κατασκευών από κρουστικά φορτία. Λόγω της χημικής δομής του πολυμερούς από το οποίο παράγονται, οι ίνες πολυαραμιδίου έχουν μεγάλο μέτρο ελαστικότητας και υψηλή πυκνότητα [3]. Παρόλο που ορισμένες από τις ίνες της κατηγορίας αυτής παρουσιάζουν εφελκυστική αντοχή από 3500 έως 4100 MPa και μέτρο ελαστικότητας της τάξης των 175 GPa,



Σχήμα 1.5: Ίνες άνθρακα [7].

που σε εξαιρετικές περιπτώσεις μπορεί να φτάσει έως τα 210 GPa, η συνήθης τιμή της εφελκυστικής αντοχής είναι 3800 MPa, ενώ το μέτρο ελαστικότητας κυμαίνεται από 70 έως 130 GPa. Η επιμήκυνση θραύσης είναι μεταξύ 2.5 και 5.0%. Επιπλέον έχουν μεγάλη αντοχή σε κόπωση και τριβή και είναι ανθεκτικές στους διαλύτες, με εξαίρεση τα ισχυρά οξέα και τις βάσεις. Επειδή είναι υδρόφιλες, παρουσιάζουν μερική απώλεια αντοχής σε θερμό περιβάλλον με υψηλό ποσοστό υγρασίας. Η θλιπτική τους αντοχή είναι σημαντικά μικρότερη από την αντίστοιχη εφελκυστική (περίπου το 20%), ενώ ακόμα, υπό δεδομένη τάση, παρουσιάζουν ερπυστικές παραμορφώσεις. Τέλος, η χρήση τους είναι περιορισμένη σε σχέση με τα υαλονήματα και τα ανθρακονήματα, ενώ τα σύνθετα υλικά από ίνες πολυαραμιδίου βρίσκουν κυρίως εφαρμογή στη θωράκιση κατασκευών από κρουστικά φορτία [1].

1.3 Υλικά Μήτρας

Η μήτρα αποτελεί τη συνδετική ύλη μεταξύ των ινών. Παρέχει το μέσο δια του οποίου κατανέμεται το φορτίο στις ίνες χωρίς αυτές να αυτοθραύονται και ταυτόχρονα συνεισφέρει στην ανθεκτικότητα και στην ηλεκτρική μόνωση του σύνθετου υλικού. Προκειμένου να αναπτυχθεί ισχυρή μηχανική και χημική σύνδεση μεταξύ ινών και μήτρας, είναι απαραίτητη η ύπαρξη συνάφειας μεταξύ τους. Επιπλέον πρέπει να υπάρχει χημική συμβατότητα έτσι ώστε να μην λάβουν χώρα ανεπιθύμητες αντιδράσεις κατά τη σύνδεση τους. Όταν μια ίνα σπάσει, το φορτίο από τη πλευρά της σπασμένης ίνας μεταβιβάζεται στην αμέσως επόμενη από αυτή παραπλήσια ίνα. Ο μηχανισμός μετάδοσης του φορτίου είναι η διατμητική τάση εντός της μήτρας. Η μήτρα έχει χαμηλότερη πυκνότητα, ακαμψία και στερεότητα από ένα υλικό ενισχυόμενο με ίνες, αλλά ο συνδυασμός ινών και μήτρας παράγει ένα υλικό με μεγάλη στερεότητα και ακαμψία ενώ συγχρόνως το όλο σύνολο έχει μικρότερη πυκνότητα.

Ρητίνες χρησιμοποιούνται συνήθως ως μήτρες για την παραγωγή σύνθετων υλικών ινών. Οι ρητίνες από τη φύση τους είναι τουλάχιστον μία τάξη μεγέθους ασθενέστερες από τις ίνες στις οποίες εμποτίζονται. Είναι περισσότερο ευπαθείς στη θερμότητα και στη πυρκαγιά και γενικά εμφανίζουν μεγαλύτερη ευαισθησία στους χημικούς διαλύτες, τα οξέα, τις βάσεις και το νερό σε σχέση με τις ίνες. Όλα τα είδη των ρητινών



Σχήμα 1.6: Ίνες πολυαραμιδίου (Kevlar) [7]

παρουσιάζουν επίσης σημαντικές ερπυστικές παραμορφώσεις, σε σχέση με τα παραδοσιακά δομικά υλικά. Παρόλα αυτά, τα σύνθετα υλικά ινοπλισμένων πολυμερών δεν θα μπορούσαν να υπάρξουν χωρίς τις ρητίνες, καθώς αυτές είναι που μεταφέρουν τα φορτία και κατανέμουν τις τάσεις στις ίνες κάθε στρώσης του πολυμερούς. Με τον τρόπο αυτό επιτρέπουν στο ινοπλισμένο πολυμερές να συμπεριφέρεται σαν ομογενές υλικό. Η μεγάλη διάρκεια ζωής που χαρακτηρίζει τις μήτρες πολυμερών σχετίζεται με τη προοδευτική αλλαγή των φυσικών τους ιδιοτήτων, η οποία λαμβάνει χώρα με τη πάροδο του χρόνου και τη φόρτιση [3].

Η προένταση των σύνθετων υλικών μπορεί να έχει εξαιρετικά σημαντική επίδραση στη διάρκεια ζωής της μήτρας πολυμερούς. Η αστοχία λόγω ερπυσμού, που αποτελεί τυπική μορφή αστοχίας των ινοπλισμένων πολυμερών, οφείλεται στην ιξωδοπλαστική συμπεριφορά της μήτρας από πολυμερές και όχι στις ίνες. Οι ρητίνες που χρησιμοποιούνται συνήθως για τη παραγωγή σύνθετων υλικών για την επισκευή και ενίσχυση κατασκευών είναι οι εποξειδικές, οι πολυεστερικές και οι βινυλεστερικές [1]. Οι σημαντικότερες μηχανικές ιδιότητες των τριών αυτών κατηγοριών ρητινών παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.1:

Τρεις βασικές έννοιες, που διέπουν την χρήση ρητινών, είναι :

- Ο χρόνος διεργασιμότητας (pot life), είναι αυτός που έχει κάποιος στη διάθεσή του για να χρησιμοποιήσει την κόλλα, πριν αρχίσει να μειώνεται το ιξώδες της και να σκληρύνεται. Εξαρτάται από τον τύπο της κόλλας, την θερμοκρασία του περιβάλλοντος, την ποσότητα κόλλας και μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος. Ενδεικτικοί χρόνοι για ποσότητα τυπικής κόλλας (εποξειδικής ρητίνης) 5 Kg είναι 90 min σε 15 °C και 30 min σε 35 °C.

Πίνακας 1.1: Μηχανικές ιδιότητες-σύγκριση ρητινών [3].

Είδος ρητίνης	Εφελκυστική αντοχή	Μέτρο ελαστικότητας	Επιμήκυνση θραύσης	Πυκνότητα
	(MPa)	(GPa)	(%)	(gr/cm ³)
Εποξική	55-130	2.0 - 4.5	4.0 – 14.0	1.20 – 1.30
Πολυεστερική	35-104	2.1 – 4.1	< 5.0	1.10 – 1.46
Βινυλεστερική	73-81	3.0 – 3.6	3.5 – 5.5	1.12 – 1.32

- Ο χρόνος εφαρμογής (open time), είναι το χρονικό διάστημα που η κόλλα είναι ενεργή, δηλαδή έχει ικανοποιητικές συγκολλητικές ιδιότητες. Μέσα σε αυτό το χρονικό διάστημα πρέπει να ολοκληρώνεται η επικόλληση του οπλισμού στην επιφάνεια του υποστρώματος.
- Η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης (glass transition temperature), ονομάζεται η διαδικασία μετάβασης ενός άμορφου στερεού, όπως το γυαλί και κάποια άμορφα πολυμερή από συμπεριφορά ρευστού σε συμπεριφορά στερεού. Επειδή όμως αυτά δεν έχουν καθορισμένο σημείο πήξης, αναφερόμαστε σε ένα εύρος θερμοκρασιών.

Οι 3 κατηγορίες ρητινών που χρησιμοποιούνται συνήθως για την κατασκευή σύνθετων υλικών, αναλύονται παρακάτω:

1. Εποξειδικές Ρητίνες. Οι εποξειδικές ρητίνες θεωρούνται γενικά οι καλύτερες μήτρες για χρήση σε ινοπλισμένα πολυμερή λόγω της μεγάλης αντοχής, συγκολλητικής ικανότητας, ανθεκτικότητας σε κόπωση και χημική διάβρωση, καθώς και της χαμηλής συστολής ξηράνσεως που παρουσιάζουν. Όπως συμβαίνει και με τα άλλα είδη ρητινών, οι εποξειδικές ιδιότητες ποικίλουν σημαντικά ανάλογα με τη ρητίνη βάσης και τις χημικές ενώσεις που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή τους. Ο συντελεστής ιξώδους των εποξειδικών ρητινών είναι γενικά μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο συντελεστή τόσο των πολυεστερικών όσο και των βινυλεστερικών ρητινών. Χρειάζονται επίσης περισσότερο χρόνο για να αναπτύξουν πλήρως τις μηχανικές τους ιδιότητες και έχουν υψηλότερο κόστος σε σχέση με τις δύο άλλες κατηγορίες ρητινών [3].
2. Πολυεστερικές Ρητίνες. Οι ρητίνες αυτές αποτελούν τον κύριο όγκο των πολυμερών που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία παραγωγής σύνθετων υλικών. Πρόκειται για ακόρεστους πολυεστέρες που παράγονται από την αντίδραση γλυκόλης, είτε με διβασικά οξέα είτε με ανυδρίτες. Λόγω της μεγάλης ποικιλίας των συστατικών τους στοιχείων, οι ιδιότητες των πολυεστερικών ρητινών μπορούν να διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους. Η χημική αντίδραση με την οποία παράγονται οι πολυεστέρες είναι σημαντικά εξώθερμη. Για το λόγο αυτό απαιτείται μεγάλη προσοχή στη χρήση της ποσότητας της μάζας των αντιδρώντων. Εάν η μάζα είναι μεγάλη το φύλλο πολυεστέρα μπορεί να αναφλεγεί ή να

ρηγματωθεί. Αντίθετα εάν η μάζα είναι μικρή η θερμότητα που εκλύεται δεν επαρκεί για την ολοκλήρωση της αντίδρασης. Οι πολυεστέρες παρουσιάζουν μέτρια ανθεκτικότητα στους διαλύτες και τα οξέα, ενώ είναι ευπαθείς στις βάσεις και στο νερό υψηλής θερμοκρασίας. Είναι γενικά λιγότερο ανθεκτικοί σε κόπωση συγκριτικά με τις εποξικές και τις βινυλεστερικές ρητίνες. Η παραμόρφωση θραύσης είναι κατά κανόνα της τάξης του 1%. Ωστόσο, το κυριότερο μειονέκτημα των πολυεστερικών ρητινών για χρήση τους σε κατασκευές που κατοικούνται είναι η δυσάρεστη οσμή λόγω της χημικής τους σύστασης [3].

3. Βινυλεστερικές Ρητίνες. Πρόκειται για υβριδικές ρητίνες που παράγονται με αλυσιδωτές αντιδράσεις ενός εποξικού πολυμερούς με ακρυλικές ή μεθακρυλικές ενώσεις. Λόγω της παρουσίας του εποξικού πολυμερούς, οι βινυλεστερικές ρητίνες είναι περισσότερο εύκαμπτες, σκληρότερες, πιο ανθεκτικές σε κόπωση και λιγότερο χημικά ενεργές σε σχέση με τις πολυεστερικές. Οι υδροξυλικές ενώσεις που περιέχονται στο εποξειδικό πολυμερές σχηματίζουν δεσμούς υδρογόνου με αντίστοιχες ενώσεις στην επιφάνεια των ινών υάλου. Με τον τρόπο αυτό βελτιώνεται σημαντικά η σύνδεση της ρητίνης με τις ίνες, αν και δεν φτάνει στο επίπεδο της συγκολλησιμότητας των εποξικών ρητινών. Αυτό οφείλεται κυρίως στη μεγάλη απώλεια όγκου των βινυλεστερικών ρητινών λόγω συστολής ξηράνσεως [3].

Κεφάλαιο 2

Τρόποι Διάταξης της Ενίσχυσης

Όπως αναφέρθηκε και στο πρώτο κεφάλαιο, υπάρχουν διάφορες κατηγορίες σύνθετων υλικών, τόσο με διαφορετικά υλικά ινών, όσο και υλικών μήτρας. Κάθε μία από τις κατηγορίες διάκρισης των σύνθετων υλικών όμως επιμερίζεται και σε άλλες υποκατηγορίες βάσει της ενίσχυσής του. Το διάγραμμα 2.1 παρουσιάζει την κατηγοριοποίηση αυτή και είναι ενδεικτικό.

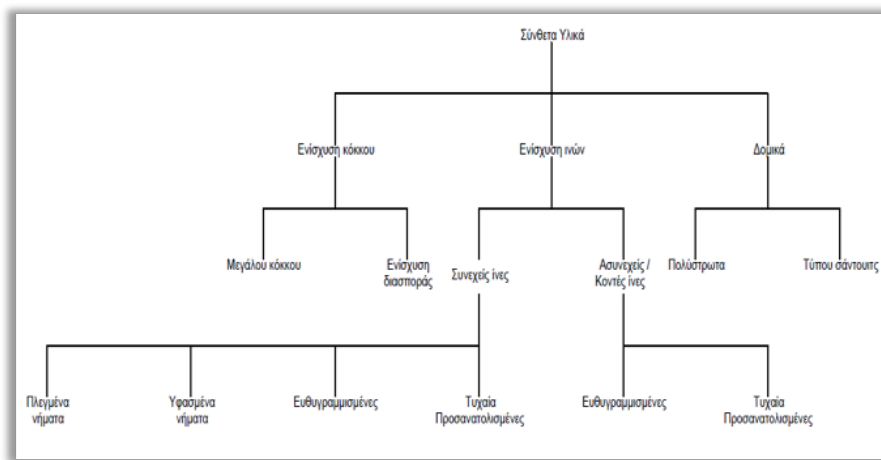
Αυτή η εκτενέστερη διάκριση γίνεται διότι ο κάθε συνδυασμός υλικών ενίσχυσης – μήτρας μπορεί να γίνει με διαφορετική διάταξη. Πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η ύαλος και ο άνθρακας, τα οποία μπορούν να συμμετέχουν σε πολυμερική μήτρα σαν σωματίδια, κοντές ίνες, ή συνεχείς ίνες, με διαφορετικά αποτελέσματα κάθε φορά.

Κατά την ενίσχυση κόκκου ή με τεμαχίδια, βασική επίδραση στη μήτρα είναι η αύξηση του μέτρου ελαστικότητας κατά 2 έως 3 φορές. Σε αντίθεση με το μέτρο ελαστικότητας, η αντοχή του σύνθετου υλικού κατά κανόνα δεν επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό. Αντιθέτως, μπορεί να παρουσιάσει ελαφρά μείωση. Αυτό συμβαίνει διότι η διεπιφάνεια ενίσχυσης – μήτρας λειτουργεί σαν σημείο συγκέντρωσης τάσεων και έναρξης ρωγμών. Ως εκ τούτου, σημαντικές παράμετροι είναι το μέγεθος των τεμαχιδίων και η συμβατότητά τους με τη μήτρα. Το βασικό πλεονέκτημα όμως με την ενίσχυση κόκκου είναι ότι το υλικό διατηρεί την ισοτροπικότητά του στο χώρο [2].

Διακρίνεται σε ενίσχυση μεγάλου κόκκου ή διασποράς ανάλογα με το μέγεθος της ενίσχυσης, αν και το μεταξύ τους όριο είναι ασαφές.

Τα σύνθετα υλικά με ενίσχυση κοντών ινών έχουν μεγαλύτερη ικανότητα παραλαβής φορτίου από τα αντίστοιχα με ενίσχυση τεμαχιδίων, ενώ ο τρόπος παραγωγής τους είναι παρόμοιος. Μια ίνα θεωρείται «κοντή» όταν ο λόγος L/D είναι τάξης μεγέθους 102. Ενίσχυση τέτοιας μορφής δίνει στην μήτρα πολύ υψηλότερο μέτρο ελαστικότητας αλλά συμβάλλει αποδοτικά στην ακαμψία του συστήματος μόνο όταν το φορτίο υποβάλλεται κατά μήκος του άξονά της. Αυτό δίνει στο σύστημα δύο δυναμικές:

- Οι ίνες να είναι προσανατολισμένες κατά την διεύθυνση του φορτίου. Ο προσανατολισμός των ινών είναι (στατιστικά) εφικτός κατά την ανάμιξή τους με τη μήτρα. Τότε, το σύνθετο υλικό είναι ανισότροπο ως προς τις διευθύνσεις κά-



Σχήμα 2.1: Διάκριση των συνθέτων υλικών ως προς τον τρόπο ενίσχυσής τους

θετα και παράλληλα στον άξονα των ινών, αλλά έχει αυξημένη αντοχή ως προς την παράλληλη διεύθυνση στον άξονα των ινών.

- Οι ίνες να έχουν τυχαία κατανομή προσανατολισμού μέσα στη μήτρα. Το υλικό τότε είναι ισότροπο, αλλά χαμηλότερων μηχανικών ιδιοτήτων.

Η παραπάνω διάκριση γίνεται ακόμη εντονότερη όταν η ίδια η ίνα είναι ανισότροπη, όπως οι ίνες άνθρακα. Ακόμη, ο λόγος L/D επηρεάζει πολύ έντονα τη συνολική μεταβολή των μηχανικών ιδιοτήτων. Μεγιστοποιώντας και τους τρεις παραπάνω παράγοντες, δηλαδή τον προσανατολισμό, τις ιδιότητες της ενίσχυσης και το λόγο L/D , μπορεί να επιτευχθεί αύξηση του μέτρου ελαστικότητας της μήτρας έως και 400%. Επίσης, αφού παραλαμβάνουν το μεγαλύτερο μέρος του φορτίου, και θεωρώντας ότι η διεπιφάνεια μήτρας – ενίσχυσης είναι αρκετά ισχυρή ώστε να το μεταφέρει χωρίς ολίσθηση, αυξάνεται αντίστοιχα και το όριο θραύσης. Παρόλα αυτά, η ενίσχυση με κοντές ίνες μετριάζει την επιμήκυνση θραύσης και την δυσθραυστότητα του υλικού.

Πέραν της αναβάθμισης των μηχανικών ιδιοτήτων της μήτρας, οι κοντές ίνες μπορεί να συμμετέχουν στο υλικό για να του δώσουν ειδικά χαρακτηριστικά, όπως ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα. Για παράδειγμα, στα σύνθετα υλικά που χρησιμοποιούνται στην Αεροναυπηγική, οι μήτρες ενισχύονται με νήματα μετάλλων, ώστε το αεροσκάφος να απορροφήσει την ηλεκτρική εκκένωση από κεραυνό σε περίπτωση καταιγίδας, χωρίς να καταστραφεί κάποιο κομμάτι της κατασκευής, του ηλεκτρονικού του εξοπλισμού ή/και του ωφέλιμου φορτίου του.

Όταν η ενίσχυση γίνεται με συνεχείς ίνες, οι μηχανικές ιδιότητες του σύνθετου υλικού πλησιάζουν πολύ περισσότερο αυτές των ινών, παρά της μήτρας. Έτσι, γίνεται πλήρης εκμετάλλευση των χαρακτηριστικών τους, ενώ η μήτρα αναλαμβάνει να κρατήσει τις ίνες παραταγμένες, και να μεταφέρει το φορτίο. Σε πολλές περιπτώσεις οι ίνες πλέκονται πριν τοποθετηθούν μέσα στην μήτρα. Στην περίπτωση πλεγμένων

ινών, ο χαρακτηρισμός του συνθέτου εξαρτάται και από:

- Τον τρόπο πλέξης (weavespacing)
- Τον αριθμό των ινών σε κάθε πλέξη
- Τη γωνία που σχηματίζουν οι ίνες κατά την πλέξη (weaveandweftdirection)

Η πλέξη δημιουργεί θύλακες ρητίνης στα σημεία συνάντησης των δεσμίδων των ινών και το V_{rmax} στην περίπτωση των πλεκτών ινών είναι μικρότερο από το αντίστοιχο V_{rmax} των προσανατολισμένων ινών [6].

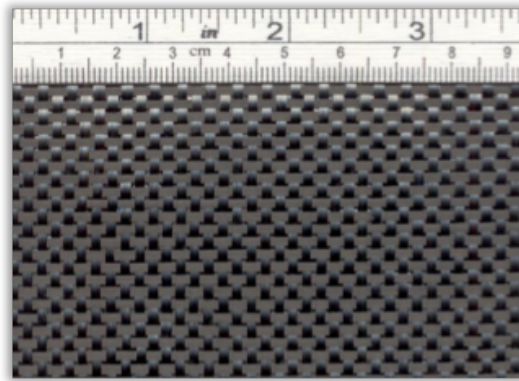
Η απλούστερη περίπτωση είναι όταν οι ίνες είναι ευθυγραμμισμένες και παράλληλες μεταξύ τους. Σε αυτήν την περίπτωση, τα υλικά έχουν την μέγιστη δυνατή αντοχή τους κατά την διεύθυνση των ινών, αλλά εμφανίζουν εξαιρετικά μεγάλη ανισοτροπία. Τα υλικά αυτά όταν είναι διατεταγμένα μόνο σε ένα στρώμα είναι πολύ δύσκολο να χρησιμοποιηθούν στην πράξη λόγω της ανισοτροπίας τους.

Για την άρση αυτής της ανισοτροπίας, οι ίνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε τυχαίο προσανατολισμό. Όμως, τα παραγόμενα υλικά, αν και ισότροπα, έχουν χαμηλότερες μηχανικές ιδιότητες λόγω των σχετικά χαμηλών τιμών της μέγιστης περιεκτικότητας σε ενίσχυση [2].

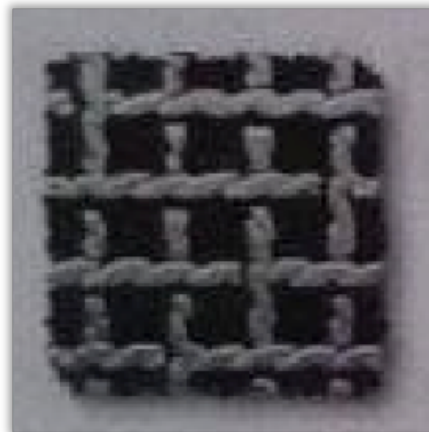
Ίσως ο πιο εύκολος και ευρέως διαδεδομένος τρόπος για την (σχεδόν) ιστροπική συμπεριφορά των σύνθετων υλικών στο επίπεδο φόρτισης είναι η χρήση υφασμένων και πλεγμένων νημάτων. Οι διάφορες τεχνοτροπίες ύφανσης και πλέξης είναι εξαιρετικά δημοφιλείς λόγω της ευκολίας κατασκευής και χρήσης τόσο στην καθημερινή, όσο και στην βιομηχανική κατασκευαστική πρακτική. Άλλωστε, τόσο η δημιουργία, όσο και η διαχείριση υφασμάτων είναι ένα κληροδότημα που εξελίσσεται από της αρχές της ανθρώπινης Ιστορίας. Ακόμη, η ευελιξία που προσφέρουν γενικά τα υφάσματα τους επιτρέπουν να μορφοποιούνται και σε πέραν των επιπέδων κατασκευών. Σε αυτές τις διατάξεις, οι μακριές, συνεχείς ίνες δεν είναι παραταγμένες με κάποια κανονικότητα στο υλικό, αλλά είναι συγκροτημένες σε νήματα, τα οποία δύναται να είναι υφασμένα σε 2 ή 3 διαστάσεις. Έχουν αναπτυχθεί πολλά είδη ενισχυτικών υφασμάτων από ίνες, αλλά μόνο πέντε βασικοί τύποι με χαρακτηριστικές πλέξεις χρησιμοποιούνται. Αυτές είναι:

Απλή πλέξη (Plain Weave): σε αυτόν τον τύπο πλέξης, που είναι και ο πιο συνήθης, η διαμήκης και οι εγκάρσιοι θύσανοι ινών διασταυρώνονται κάθετα μεταξύ τους και βρίσκονται εναλλάξ η μία ομάδα πάνω από την άλλη. Η πλέξη αυτή χαρακτηρίζεται ως η πλέον σταθερή (Σχήμα 2.2). Στην απλή πλέξη κάθε «στημόνι» και «υφάδι» περνάει πάνω από ένα «τέλος» ή «κορυφή» και κάτω από το επόμενο. Το «τέλος» είναι το «στημόνι» και η «κορυφή» το «υφάδι» [6].

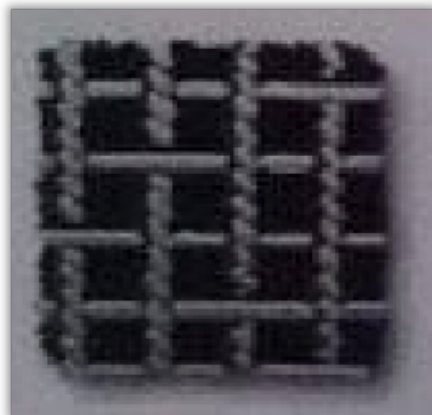
Διαγώνια πλέξη (Twill): Αυτός ο τύπος πλέξης χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερη πυκνότητα ινών ανά μονάδα επιφάνειας από ότι η απλή πλέξη, ενώ έχει διαφορετική μορφή αν κοιτάξουμε το ύφασμα από τις δύο όψεις του. Χαρακτηρίζεται από μία διαγώνια γραμμή από την οποία φέρει και την ονομασία της (twill) (Σχήμα 2.3). Στη συγκεκριμένη πλέξη κάθε «τέλος» και «κορυφή» περνάει πάνω από δύο και καμιά φορά τέσσερις διασταυρούμενες «κλωστές». Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται ένα σχέδιο από διαγώνιες γραμμές στην επιφάνεια του «πλεκτού» [6].



Σχήμα 2.2: Απλή πλέξη (plain weave)[8]



Σχήμα 2.3: Διαγώνια πλέξη (twill) [6]



Σχήμα 2.4: Πλέξη Satin [6]

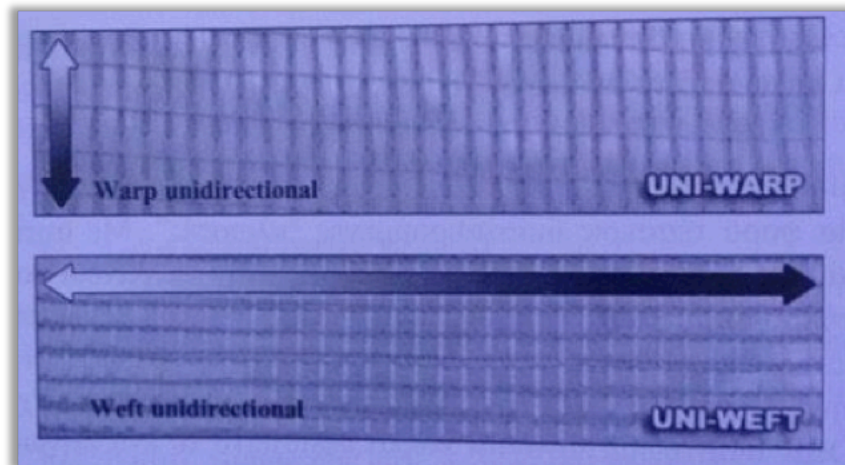
Πλέξη Satin: Σε αυτόν τον τύπο πλέξης η μπροστινή επιφάνεια κυριαρχείται από τις διαμήκεις θυσάνους ινών (warp) ενώ έχει διαφορετική μορφή αν κοιτάξουμε το ύφασμα από τις δύο όψεις του. Χρησιμοποιείται ευρύτατα στην βιομηχανία παραγωγής συνθέτων υλικών (Σχήμα 2-10). Στην πλέξη αυτή κάθε «στημόνι» και «υφάδι» περνάει πάνω από σχήμα «N» και κάτω από διασταυρούμενο νήμα. Η πλέξη περιγράφεται ως «N+1» και έχει δύο όψεις, την “warp face” και την “weft face” (Σχήμα 2.4), οι οποίες είναι σχετικά απαλές επιφάνειες [6].

Καλαθωτή πλέξη (basket weave): Αυτός ο τύπος πλέξης είναι μία παραλλαγή της απλής πλέξης στον οποίο δύο ή περισσότερες διαμήκεις θύσανοι διασταυρώνονται με δύο ή περισσότερους εγκάρσιους θυσάνους ινών. Η πλέξη αυτή είναι ισχυρότερη από την απλή αλλά λιγότερο σταθερή γιατί παρουσιάζει μια σχετική χαλαρότητα (Σχήμα 2.5) [6].

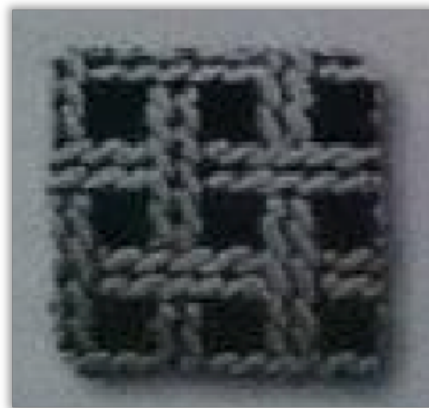
Σε όλες τις παραπάνω πλέξεις το κοινό σημείο είναι ότι οι διασταυρώσεις γίνονται στις 90°. Είναι όμως πιθανόν να κατασκευάσουμε «διαγώνια πλεκτά» με κλίση 45° ή 60°. Αν το «πλεκτό» δημιουργείται από πλέξιμο είναι δυνατόν να παραχθεί ένα «ύφασμα», στο οποίο τα «στημόνια» και «υφάδια» είναι ίσια ή παράλληλα, χωρίς στρέβλωση, όπως προέρχεται από την ύφανση. Τα νήματα κρατούνται στη θέση τους με πολύ λεπτά “garns” από ίνες γυαλιού ή πολυεστερικές ίνες. Αυτού του είδους τα «πλεκτά», τα “non-crimp” (μη κατσαρά), δημιουργούν ισχυρότερα και πιο δύσκαμπτα σύνθετα υλικά, διότι οι ίνες είναι ευθύγραμμες [6].

Στην παρούσα εργασία, όπου χρησιμοποιήθηκαν ίνες άνθρακα, η πλέξη τους φαίνεται στο Σχήμα 2.7 (το άσπρο χρώμα είναι μόνο ενδεικτικό· οι ίνες άνθρακα είναι μαύρες).

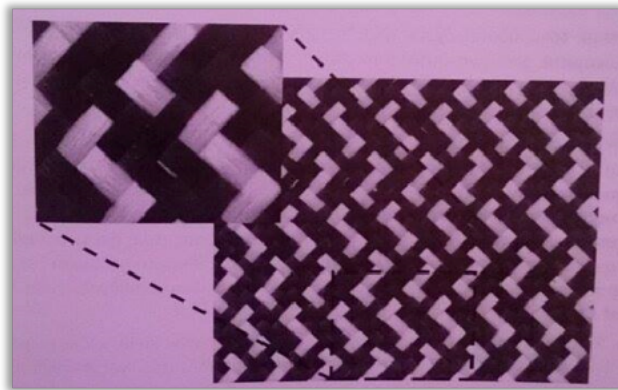
Ένας άλλος τρόπος άρσης αυτής της ανισοτροπίας είναι να χρησιμοποιηθούν πολυστρωματικά υλικά (laminæ), δηλαδή επάλληλα στρώματα από μονοαξονικές ίνες σε διάφορες κατευθύνσεις. Η λύση αυτή, αν και λύνει μερικώς το πρόβλημα, αφε-



Σχήμα 2.5: Υφάσματα ινών όπου φαίνεται ότι τα νήματα κρατούνται στη θέση τους με πολύ λεπτά “yarns” από ίνες γυαλιού ή πολυεστερικές ίνες[6]



Σχήμα 2.6: Καλαθωτή πλέξη (basketweave) [6].



Σχήμα 2.7: Ύφασμα από ίνες άνθρακα [6].

νός αναγκαστικά βάζει περισσότερες στρώσεις υλικού στο σύστημα, αυξάνοντας το βάρος, και αφετέρου δημιουργεί δευτερογενείς τάσεις κατά την φόρτιση λόγω της συστολής Poisson μεταξύ των στρωμάτων. Έτσι, το σύστημα οδηγείται στην καλύτερη περίπτωση σε παραμόρφωση του υλικού, ενώ στην χειρότερη σε αστοχία λόγω διαστρωματικής διάτμησης [5].

Η βέλτιστη λύση βρίσκεται συνδυάζοντας λιγότερες στρώσεις από υφάσματα ινών αντί για μονοαξονικές ίνες. Έτσι, το υλικό αποκτά ιστροπικότητα (όταν αυτή είναι επιθυμητή), διατηρώντας χαμηλό το βάρος (λόγω των λιγότερων στρώσεων) και τις διαστρωματικές τάσεις (λόγω της μικρότερης ανισοτροπίας των στρωμάτων). Στην παρακάτω εικόνα (Σχήμα 2-14) διακρίνονται συγκεντρωτικά οι διάφοροι τύποι ινωδών ενισχύσεων συνθέτων υλικών [6]:

2.1 Κατ' όγκον και κατά βάρος περιεκτικότητα

Αν και συνήθως βρίσκουμε την κατά βάρος περιεκτικότητα των ινών (με ζύγισμα, σε περιπτώσεις που υπολογίζουμε την πυκνότητα των συνθέτων υλικών χρησιμοποιούμε την κατ' όγκον περιεκτικότητα για τον υπολογισμό των μηχανικών ιδιοτήτων τους. Η σχέσεις που δίνουν τους δύο τύπους περιεκτικότητας είναι:

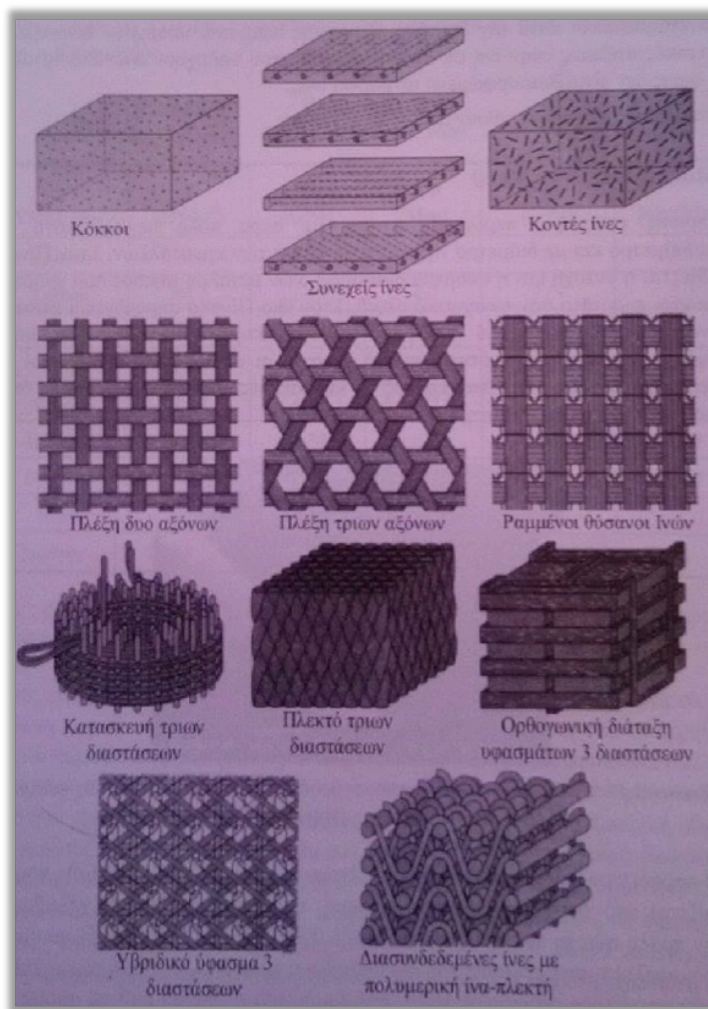
$$V_1 = \frac{W_1/\rho_1}{W_1/\rho_1 + W_2/\rho_2 + W_3/\rho_3 + \dots} \quad (2.1)$$

και

$$W_1 = \frac{\rho_1 V_1}{\rho_1 V_1 + \rho_2 V_2 + \rho_3 V_3 + \dots} \quad (2.2)$$

Όπου:

V_1, V_2, \dots είναι τα ποσοστά όγκου των συνιστωσών,
 W_1, W_2, \dots είναι τα ποσοστά βάρους των συνιστωσών και
 ρ_1, ρ_2, \dots είναι οι πυκνότητες των συνιστωσών



Σχήμα 2.8: Τύποι ινωδών ενισχύσεων συνθέτων υλικών [6]

Κεφάλαιο 3

Μηχανικές Ιδιότητες των Σύνθετων Υλικών

3.1 Εισαγωγή

Τα σύνθετα υλικά με υφασμένες ίνες για ενίσχυση κέρδισαν πολύ γρήγορα την πρωτεύουσα θέση στην κατασκευαστική πρακτική όχι μόνο λόγω της ευκολίας κατασκευής και διαχείρισης τους, αλλά και επειδή συνδυάζουν αντοχή με ελαστικότητα, ελεγχόμενη ανισοτροπία και μεγάλη περιεκτικότητα σε ενίσχυση. Η ιδιάζουσα γεωμετρία των υφασμάτων όμως, καθώς και όλες οι παράμετροι που εισάγει η ύφανση κατά την σχεδίαση, έγιναν αμέσως αντικείμενο μελέτης και έρευνας, ώστε να προσδιοριστούν με ακρίβεια και να εξελιχθούν οι θερμομηχανικές τους ιδιότητες.

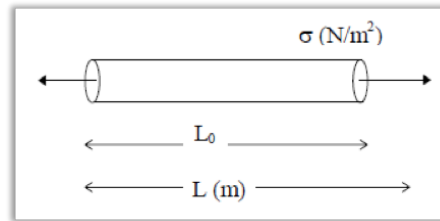
Η πιο γνωστή τεχνική για τη μέτρηση των μηχανικών ιδιοτήτων των σύνθετων υλικών είναι η δοκιμή του εφελκυσμού (tensile stress). Όταν εφαρμόζουμε μία εφελκυστική τάση παράλληλα προς τις ίνες σε μία στρώση με παράλληλες ίνες, τότε εάν ο δεσμός μεταξύ ίνας και μήτρας είναι τέλειος, η παραμόρφωση ε_1 που αναπτύσσεται στη μήτρα θα είναι η ίδια με την παραμόρφωση που αναπτύσσεται στην ίνα. Αν υποθέσουμε ότι ίνες και μήτρα συμπεριφέρονται και οι δύο γραμμικά ελαστικά, τότε οι αντίστοιχες τάσεις θα δίνονται προσεγγιστικά από τις σχέσεις:

$$\sigma_f = E_f \varepsilon_l \quad \text{και} \quad \sigma_m = E_m \varepsilon_l \quad (3.1)$$

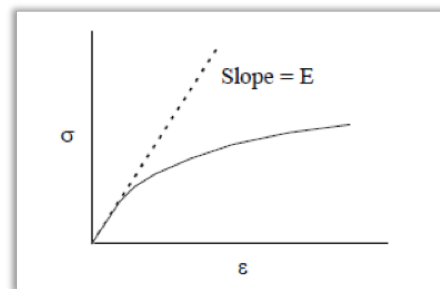
Όπου: σ = τάση, E = μέτρο ελαστικότητας του Young, και ε = παραμόρφωση που ορίζεται ως: $\varepsilon = (L - L_0)/L_0$.

Όπως βλέπουμε (Σχήμα 3.1), οι μονάδες για το E είναι $\text{N/m}^2 = \text{Pa}$, ενώ η κλίση σε διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης (Σχήμα 3-2) αντιπροσωπεύει το μέτρο ελαστικότητας η μέτρο εφελκυσμού (tensile modulus, E) σε μικρές παραμορφώσεις, όπου η συμπεριφορά είναι γραμμική και ο νόμος του Hooke ισχύει.

Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει, ότι αν $\sigma_f > \sigma_m$, τότε η τάση που αναπτύσσεται στις ίνες θα είναι μεγαλύτερη από εκείνη που αναπτύσσεται στη μήτρα. Αυτό βεβαίως αποτελεί και το βασικό λόγο κατασκευής των ινωδών συνθέτων υλικών διότι σε αυτά οι ίνες φέρουν και το μεγαλύτερο φορτίο, P .



Σχήμα 3.1: Δείγμα σε εφελκυσμό



Σχήμα 3.2: Τυπικό διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης

Σε ένα σύνθετο υλικό με συνολική διατομή A η μέση τάση δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma_l = \frac{P}{A} \quad (3.2)$$

Επειδή όμως:

$$P = P_f + P_m \quad (3.3)$$

με

$$P_f = \sigma_f A_f \quad (3.4)$$

και

$$P_m = \sigma_m A_m \quad (3.5)$$

Με αντικατάσταση των δύο παραπάνω εξισώσεων βρίσκουμε ότι:

$$P = \sigma_f A_f + \sigma_m A_m \quad (3.6)$$

Όπου A_f , A_m είναι οι διατομές ίνας και μήτρας αντίστοιχα και P_f , P_m είναι τα αντίστοιχα φορτία. Εξάλλου έχουμε ότι:

$$\sigma_l = E_l \varepsilon_l \quad (3.7)$$

Όπου E_l είναι το μέτρο ελαστικότητας του συνθέτου υλικού κατά τη διεύθυνση l . Αντικαθιστώντας, έχουμε:

$$E_l = E_f \frac{A_f}{A} + E_m \frac{A_m}{A} \quad (3.8)$$

Καθώς:

$$\phi = \frac{A_f}{A} \quad \text{και} \quad V_m = \frac{A_m}{A} \quad (3.9)$$

$$\Rightarrow E_l = E_f \phi + E_m V_m = E_f \phi + E_m (1 - \phi) \quad (3.10)$$

Η τελευταία σχέση συνήθως αναφέρεται ως “νόμος των μιγμάτων”.

Το εγκάρσιο μέτρο ελαστικότητας, E_t , μπορεί να υπολογισθεί με τον ίδιο τρόπο ότι:

$$E_t = \left(\phi E_f^{-1} + (1 - \phi) E_m^{-1} \right)^{-1} \quad (3.11)$$

Στην περίπτωση ιών άνθρακα σε εποξειδική ρητίνη, τα μέτρα ελαστικότητας των ιών και της μήτρας είναι $E_f = 235$ GPa και $E_m = 2.6$ GPa, αντίστοιχα.

Η παραπάνω ανάλυση βασίζεται στην υπόθεση ότι ισχύουν οι εξισώσεις 3.1, όμως αυτό δεν είναι απόλυτα σωστό, διότι η μήτρα και η ίνα έχουν διαφορετικούς λόγους Poisson ($\nu_f \neq \nu_m$), με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται επιπρόσθετες τάσεις, που εδώ δεν έχουν ληφθεί υπ’ όψιν. Όμως, παρόλα αυτά, το σφάλμα που γίνεται στον υπολογισμό του E_l με βάση το νόμο των μιγμάτων είναι μικρότερο του 1 ή 2% και αυτό έχει αποδειχθεί πειραματικά για πολλά συστήματα πολυμερικών ινωδών συνθέτων υλικών [6].

3.2 Ελαστικές Ιδιότητες μιας Στρώσης με Ίνες Μεγάλου Μήκους και Τυχαίου Προσανατολισμού

Μία στρώση με μακρές ίνες τυχαίου προσανατολισμού είναι μακροσκοπικά ισότροπη στο επίπεδό της, δηλαδή υπάρχει μια ομοιόμορφη πιθανότητα κατανομής από $-\pi/2$ έως $+\pi/2$. Για την πρόβλεψη του μέτρου ελαστικότητας, τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στα άκρα των ινών αγνοούνται. Οι περισσότερες θεωρίες πρόβλεψης βασίζονται στην προσέγγιση που εισήγαγαν οι Nielsen και Chen (1968) η οποία υποθέτει ότι το μέσο μέτρο ελαστικότητας \bar{E} μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση [6]:

$$\bar{E} = 2\pi \int_0^{\pi/2} E(\theta) d\theta \quad (3.12)$$

Όπου $E(\theta)$ είναι το μέτρο ελαστικότητας μίας στρώσης με παράλληλες ίνες το οποίο εξαρτάται από τη γωνία προσανατολισμού θ για σταθερό ϕ [6].

Σε πρακτικές εφαρμογές χρησιμοποιούνται οι παρακάτω ημι-εμπειρικές σχέσεις για τυχαία κατανομή προσανατολισμών στο επίπεδο (1,2):

$$\bar{E} = \frac{3}{8}E_1 + \frac{5}{8}E_2 \quad \bar{G} = \frac{1}{2}E_1 + \frac{1}{4}E_2 \quad (3.13)$$

Η επίδραση της περιεκτικότητας των ινών, ϕ , στις εξισώσεις αυτές υπεισέρχεται μέσω της εξάρτησης των E_1 και E_2 από το ϕ [6].

3.3 Αντοχή σε εφελκυσμό συνθέτων υλικών με παράλληλες ίνες μεγάλου μήκους

Δεν υπάρχουν πολλές πειραματικές εφαρμογές οι οποίες να βασίζονται σε προσανατολισμένα πολύστρωτα σύνθετα με ίνες παράλληλες μεταξύ τους. Αυτό συμβαίνει κυρίως επειδή η εγκάρσια εφελκυστική και διατμητική δυσκαμψία και, ειδικά, οι αντοχές είναι πολύ μικρότερες από τις αντίστοιχες δυσκαμψίες και αντοχές παράλληλα προς τις ίνες. Οι δυσκαμψίες εξαρτώνται κυρίως από τις ιδιότητες των ινών. Είναι γνωστό ότι για να επιτύχουμε υψηλές τιμές δυσκαμψίας σε περισσότερες από μία διευθύνσεις, κατασκευάζουμε πολύστρωτες πλάκες όπου η κάθε στρώση έχει ίνες παράλληλες μεταξύ τους αλλά με διαφορετικό προσανατολισμό από εκείνο των γειτονικών στρώσεων. Οι πολύστρωτες πλάκες πρέπει να σχεδιάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να ανθίστανται στη θραύση [6].

Μία στρώση με παράλληλες ίνες μπορεί να αστοχίσει με πολλούς τρόπους ανάλογα με το επιβαλλόμενο εξωτερικό φορτίο. Για τις ανάγκες του σχεδιασμού είναι πιθανό να είναι αρκετή η γνώση των αντοχών σε θραύση που αντιστοιχούν σε διαφορετικούς τύπους θραύσης, διαφορετικών συνθέτων υλικών και για ένα μεγάλο φάσμα τιμών περιεκτικότητας σε ίνες, όπως φαίνεται στον παραπάνω πίνακα [6].

Στον ίδιο πίνακα, με σ^* συμβολίζεται η αντοχή (τάση θραύσης) σε εφελκυσμό (T) και σε θλίψη (C) παράλληλα προς τις ίνες ή κάθετα προς αυτές. Επίσης με το σύμβολο $\tau_{\#}^*$ εκφράζουμε την αντοχή σε διάτμηση παράλληλα προς τις ίνες.

Πίνακας 3.1: Τυπικές τιμές αντοχής (MPa) μονοαξονικών στρώσεων ινωδών συνθέτων υλικών ($\phi \approx 0, 50$)

Υλικό	$\sigma_{1,}^*$	$\sigma_{1,C}^*$	$\sigma_{2,}^*$	$\sigma_{2,C}^*$	$\tau_{\#}^*$
Glass-Polyester	650-750	600-900	20-25	90-120	45-60
Type I carbon epoxy	850-1100	700-900	35-40	130-190	60-75
Kevlar 49-epoxy	1100-1250	240-290	20-30	110-140	40-60

Για την πρόβλεψη της αντοχής της στρώσης συναρτήσει των αντοχών της μήτρας και των ινών είναι βασικό να γνωρίζουμε τους μηχανισμούς θραύσης. Καταρχήν θα ασχοληθούμε με την περίπτωση του μονοαξονικού εφελκυσμού. Αρχικά, υποθέτουμε ότι όλες οι ίνες έχουν την ίδια αντοχή τόσο μεταξύ τους όσο και ότι κατά μήκος της κάθε ίνας η αντοχή παραμένει σταθερή.

Στη συνέχεια σε μία πιο ρεαλιστική προσέγγιση, θεωρούμε ότι οι ίνες παρουσιάζουν διαφορετικές αντοχές μεταξύ τους αλλά και ότι κατά μήκος της κάθε ίνας υπάρχει μία κατανομή επιφανειακών ατελειών που οδηγούν σε μία αντίστοιχη κατανομή αντοχής κατά μήκος της κάθε ίνας. Η τελευταία υπόθεση οδηγεί στην ανάγκη να λάβουμε υπ' όψιν το μηχανισμό ανάπτυξης και διάδοσης των ρωγμών καθώς και την ανάγκη να υπολογίσουμε την ενέργεια που απαιτείται για τη διάδοση των ρωγμών σε συνάρτηση με την αντοχή της διεπιφάνειας ίνας-μήτρας.

Στην περίπτωση εφελκυσμού κατά τη διεύθυνση των ινών μονοαξονικού του συνθέτου υλικού και υποθέτοντας τέλεια πρόσφυση μεταξύ ίνας και μήτρας και ελαστική συμπεριφορά ινών και μήτρας τότε ισχύει: $\varepsilon_1 = \varepsilon_m = \varepsilon_f$. Ο νόμος των μιγμάτων προέκυψε με βάση την παραπάνω υπόθεση και μπορεί να γραφεί στη μορφή:

$$\sigma_1 = E_f \varepsilon_1 \phi + E_m \varepsilon_1 E(1 - \phi) \quad (3.14)$$

Σε πρώτη προσέγγιση, οι ίνες από γυαλί, άνθρακα και Kevlar συμπεριφέρονται ελαστικά μέχρι την τάση θραύσης τους σ_f^* . Οι πολυεστέρες και τα εποξειδικά δεν παρουσιάζουν γραμμική καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων και είναι δυνατόν να παρουσιάσουν έντονα ιξωδοελαστική συμπεριφορά μέχρι τη θραύση τους. Κάτω από αυτές τις συνθήκες, η τάση που αναπτύσσεται παράλληλα προς τις ίνες σε ένα μονοαξονικό ινώδες σύνθετο υλικό θα δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma_1 = \sigma_f \phi + \sigma_m E(1 - \phi) \quad (3.15)$$

όπου σ_f και σ_m είναι οι τάσεις που αναπτύσσονται στην ίνα και στη μήτρα αντίστοιχα.

Για μεγάλες τιμές του ϕ , η μήτρα παραλαμβάνει μόνο ένα μικρό κλάσμα του φορτίου διότι $f > E_m$, έτσι ώστε όταν η μήτρα αστοχεί το φορτίο που μεταφέρεται στις ίνες να μην είναι αρκετό για τη θραύση των ινών. Καθώς όμως συνεχίζεται η μεταφορά του φορτίου στις ίνες, το φορτίο που αναπτύσσεται στο σύνθετο αυξάνει μέχρι την τιμή της τάσης θραύσης των ινών, οπότε μπορούμε να διατυπώσουμε τη σχέση:

$$\sigma_1^* = \sigma_f^* \phi \quad (3.16)$$

Οι εγκάρσια προσανατολισμένες ίνες δεν συνεισφέρουν καθόλου στην αντοχή του συνθέτου. Μια προσεγγιστική εκτίμηση της αντοχής σ_2^* μπορεί να γίνει θεωρώντας

τις ίνες στο σύνθετο ως κυλινδρικές οπές. Για μια απλή τετραγωνική διάταξη των οπών αυτών στη μήτρα οδηγεί σε μείωση της επιφάνειας της διατομής και στην ακόλουθη σχέση για την εγκάρσια αντοχή του σύνθετου υλικού με μονοαξονικά προσανατολισμένες ίνες:

$$\sigma_2^* = \sigma_m^* \left(1 - 2\sqrt{\frac{\phi}{\pi}} \right) \quad (3.17)$$

Η αντοχή σ_2^* , δηλαδή, είναι μικρότερη από την αντοχή της μήτρας!

Για φορτίσεις εκτός της κατεύθυνσης του στημονιού χρησιμοποιείται το κριτήριο της μέγιστης τάσης (maximum stress criterion). Για εφελκυστικό φορτίο σ_θ σε κατεύθυνση θ από τον άξονα των ινών (1), υλικό θα αστοχήσει και η σ_θ θα ισούται με την αντοχή του σ' αυτή την κατεύθυνση, αν:

$$\begin{aligned} \sigma_\theta^* &\geq \frac{\sigma_1^*}{\cos^2 \theta} \\ \sigma_\theta^* &\geq \frac{\sigma_2^*}{\sin^2 \theta} \\ \sigma_\theta^* &\geq \frac{\tau_{12}^*}{\cos \theta \sin \theta} \end{aligned} \quad (3.18)$$

τ_{12}^* είναι η αντοχή του συνθέτου σε διάτμηση και σ_1^* και σ_2^* οι αντοχές του στην κατεύθυνση 1 και 2 αντίστοιχα. Η τιμή της τ_{12}^* είναι δύσκολο να υπολογισθεί. Για μερικά υλικά $\tau_{12}^* \sim \tau_m^*$.

Οι εξισώσεις 3.18 εννοούν ότι η αντοχή του υλικού θα είναι η μικρότερη τιμή από τις τρεις αυτές περιπτώσεις.

Ένα άλλο κριτήριο αστοχίας για την εκτίμηση της αντοχής είναι το κριτήριο των Tsai - Hill:

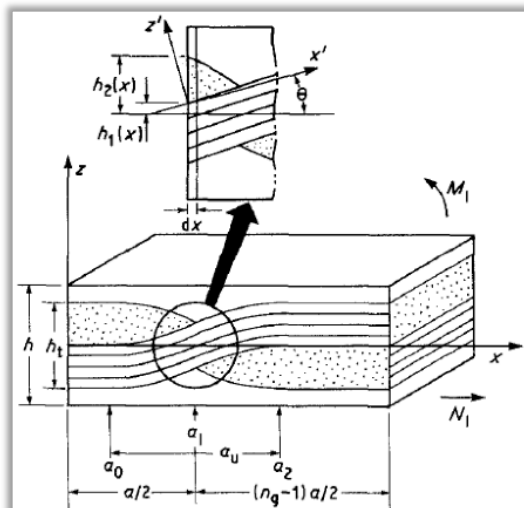
$$\sigma_\theta^* = \left[\frac{\cos^2 \theta (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta)}{\sigma_1^{*2}} + \frac{\sin^4 \theta}{\sigma_2^{*2}} + \frac{\cos^2 \theta \sin^2 \theta}{\tau_m^{*2}} \right]^{-0.5} \quad (3.19)$$

όπου οι όροι είναι ίδιοι με αυτούς στην εξίσωση 3.18

3.4 Αναλυτικά μοντέλα για υφασμένες ίνες

Η αρχή της μοντελοποίησης των υφασμάτων υπό τάση ξεκίνησε από τις εργασίες των Chou & Ishikawa [9], οι οποίοι ανέπτυξαν τρία μοντέλα για τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων τους, στις αρχές της δεκαετίας του '80. Τα τρία αυτά μοντέλα ήταν το μοντέλο «μωσαϊκού» (mosaic model), το μοντέλο «κυμάτωσης της ίνας» (fibre undulation model), και το μοντέλο «γεφύρωσης» (bridging model), το οποίο όμως έχει εφαρμογή μόνο στις σατέν υφάνσεις.

Οι αδυναμίες αυτού του μοντέλου είναι ότι δεν θεωρεί το νήμα συνεχές, και επίσης παραβλέπει την συνέχεια των οριακών συνθηκών των τάσεων και των παραμορφώσεων στα όρια των υποσυστημάτων κατά την σύνθεση του μοναδιαίου κελιού. Τις αδυναμίες αυτές προσπάθησαν να επιλύσουν με το μοντέλο «κυμάτωσης της ίνας».



Σχήμα 3.3: Το μοντέλο «κυμάτωση της ίνας» [9]

Το μοντέλο αυτό είναι μονοδιάστατο και λαμβάνει υπόψη την συνέχεια και την κυμάτωση της ίνας, χωρίζεται δε σε 3 περιοχές, την περιοχή «κυμάτωσης», την «ευθεία» περιοχή και την περιοχή «αμιγούς μήτρας», όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3.

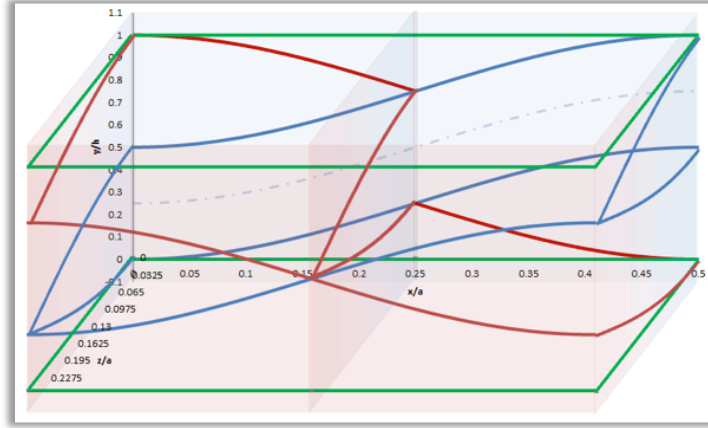
Ενώ στην ευθεία περιοχή μπορεί να χρησιμοποιηθεί το μοντέλο μωσαϊκού, στην περιοχή κυμάτωσης, σε κάθε απειροστή φέτα του νήματος εφαρμόζεται η Κλασική Θεωρία των Στρωμάτων (Laminate Theory) κατά την διεύθυνση φόρτισης. Έτσι, ολοκληρώνοντας αυτά τα διαφορικά, και συνδυάζοντας σε σειρά τις δύο περιοχές, παράγονται οι ελαστικές σταθερές.

Στη συνέχεια, ο Kabelka [10] εξέλιξε το μοντέλο κυμάτωσης λαμβάνοντας υπόψη την κυμάτωση και των δύο νημάτων, αν και δεν περιέλαβε την διατομή των νημάτων. Οι τιμές των ελαστικών σταθερών των νημάτων προσδιορίστηκαν σε ισοστασικό πεδίο και στην συνέχεια, μέσω της Classic Laminate Theory, προσδιορίστηκαν οι συνολικές τιμές. Παρόμοια εργασία έκαναν και οι Naik & Shembekar [11], ο οποίοι έλαβαν υπόψη τους την διατομή των νημάτων, και εισήγαγαν πιθανό κενό μεταξύ τους. Συνδυάζοντας δε τις περιοχές του μοντέλου πρώτα σειριακά και μετά παράλληλα ή πρώτα παράλληλα και μετά σειριακά, εξήγαγαν τα άνω και κάτω όρια των ελαστικών σταθερών αντίστοιχα, οι οποίες συμφωνούσαν αρκετά με τα πειραματικά δεδομένα.

3.4.1 Γεωμετρική Περιγραφή

Ο Αντωνογιαννάκης [11] ανέπτυξε ένα αναλυτικό μοντέλο που υπολογίζει το μέτρο ελαστικότητας για σύνθετα υλικά με στρώσεις υφασμάτων απλής πλέξης. Παραθέτουμε εδώ την βασική ιδέα του μοντέλου.

Το Σχήμα 3.4 απεικονίζει την δομή ενός μοναδιαίου ημι-κελίου σε σύνθετο υλικό μίας στρώσης υφάσματος απλής πλέξης του μοντέλου αυτού. Το σχήμα περιγράφει



Σχήμα 3.4: Η δομή του μοναδιαίου ημι-κελίου

την διάταξη των νημάτων στο ύφασμα, με h το ύψος του, a_{warp} την περίοδο της κυμάτωσης του νήματος στον άξονα x (στημόνι - warp), και a_{weft} την περίοδο της κυμάτωσης του νήματος στον άξονα z (υφάδι - weft). Για λόγους απλότητας, και καθώς η συμμετρία του κελιού το επιτρέπει, το ημι-κελί απεικονίζεται στον άξονα x από 0 έως $a_{warp}/2$, στον άξονα y από 0 έως h , και στον άξονα z από 0 έως και $a_{weft}/4$.

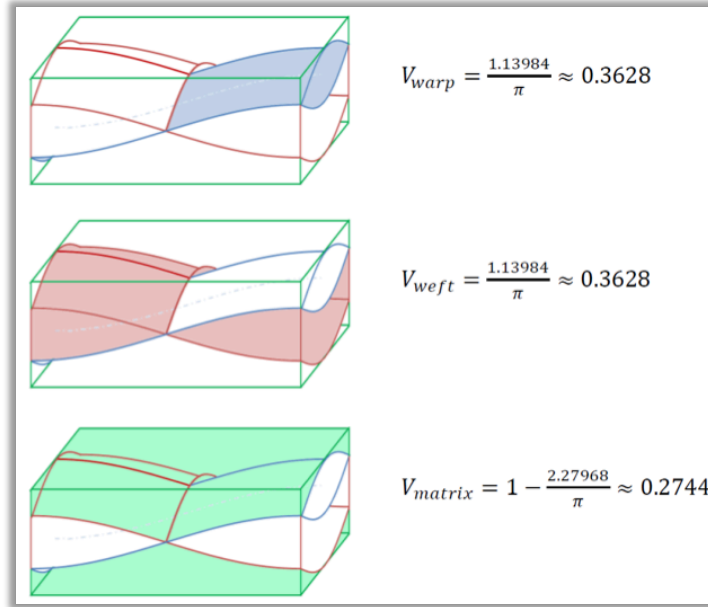
Στο υφάδι, η διατομή του παραμένει σταθερή κάθετα στον τοπικό άξονα του νήματος, διότι η διατομή στρέφει ακολουθώντας την καμπύλη του νήματος. Αν L είναι το συνολικό μήκος του κάθε νήματος στο μοναδιαίο κελί ($-a_{weft}/4 \leq z \leq a_{weft}/4$), τότε ο μερικός όγκος του υφαιδιού και του στημονιού ισούται με $1.14/\pi$ (Σχ. 3.5). Ο μερικός όγκος της μήτρας ισούται με το υπόλοιπο του μοναδιαίου κελιού αν αφαιρέσουμε τα νήματα, δηλαδή $1 - 2.28/\pi$.

Στα κενά που δημιουργούνται μεταξύ των ορίων των νημάτων και των επιπέδων $y = 0$ και $y = h$ δημιουργούνται οι χαρακτηριστικοί θύλακες μήτρας ("matrix pockets"). Λόγω της διάταξης των νημάτων είναι πάντα μη-μηδενικά, και θέτουν άνω όριο μικρότερο της μονάδας στην περιεκτικότητα του σύνθετου υλικού σε ενίσχυση ινών.

Υπολογισμός Μέτρων Ελαστικότητας

Θεωρούμε ότι το κάθε νήμα είναι από μόνο του ένα σύνθετο υλικό με κατ' όγκο περιεκτικότητα σε ίνες ϕ_s^f . Τα σύνθετα υλικά αυτά φορτίζονται εγκάρσια και παράλληλα. Η κλασική θεωρία συστρωματωμάτων δίνει την τελική τιμή του μέτρου ελαστικότητας κατά την διεύθυνση φόρτισης (x) για το μοναδιαίο κελί. Άρα, το πρόβλημα του υπολογισμού αναλύεται σε τρία σκέλη:

1. Τον υπολογισμό των ελαστικών σταθερών κάθε σώματος στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων $1 - 2$ ή $L - T$



Σχήμα 3.5: Μερικοί όγκοι νημάτων και μήτρας

2. Τον μετασχηματισμό των ελαστικών σταθερών κάθε σώματος στο γενικό σύστημα συντεταγμένων $x - y$
3. Τη σύνθεση των επιμέρους μέτρων ελαστικότητας

Υπολογισμός ελαστικών σταθερών νήματος στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων

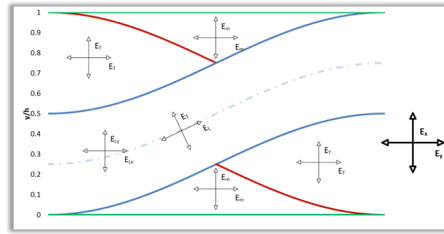
Έστω μία τομή κατά το επίπεδο $x - y$ (Σχήμα 3.6). Το μέτρο ελαστικότητας διαμήκους νήματος (στημόνι) στον άξονα x υπολογίζεται ως εξής:

$$\bar{E}_x^L = \frac{1}{\bar{S}_{11}} = \left(\frac{2S_{11}}{a_{wp}} \int_0^{a_{wp}/2} c^4 dx + \frac{2S_{22}}{a_{wp}} \int_0^{a_{wp}/2} s^4 dx + \frac{4S_{12} + 2S_{66}}{a_{wp}} \int_0^{a_{wp}/2} c^2 s^2 dx \right)^{-1} \quad (3.20)$$

όπου τα S_{ij} είναι οι όροι του τανυστή συμμόρφωσης του στρώματος, $c = \cos \theta$ και $s = \sin \theta$.

Το εγκάρσιο μέτρο ελαστικότητας και διάτμησης του νήματος στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων υπολογίζονται από το μοντέλο Halpin - Tsai, για ϕ_s^f και $\xi = 1$:

$$E_T = \frac{E_m(1 + \xi n \phi_s^f)}{1 - n \phi_s^f}, \quad \text{με} \quad n = \frac{E_{2f} - E_m}{E_{2f} + \xi E_m} \quad (3.21)$$



Σχήμα 3.6: Τα τοπικά και το ολικό σύστημα συντεταγμένων.

Σύνθεση επιμέρους στοιχείων του κελιού και συντελεστές c , b και n_0

Κάθε σώμα που υπάρχει στο μοναδιαίο κελί μπορεί να συνδεθεί με τα υπόλοιπα είτε σειριακά, είτε παράλληλα σε ένα διάγραμμα block χρησιμοποιώντας τα μοντέλα των Reuss και Voigt αντίστοιχα για την παραγωγή των συνολικών ελαστικών σταθερών. Εντούτοις, η κάθε μια από τις δύο επιλογές πρέπει να είναι σύμφωνη με το παραμορφωσιακό και τασικό πεδίο που αναπτύσσεται σε κάθε σώμα.

Οι θύλακες της μήτρας επί της ουσίας παραμορφώνονται όσο τους επιτρέπει το παραμορφωσιακό πεδίο στα νήματα, καθώς έχουν πολύ μικρό μέτρο ελαστικότητας σε σχέση με τα νήματα. Γι' αυτό, δεν μπορούν να συμμετέχουν σειριακά σε ένα μοντέλο. Άρα, μπαίνουν πάντα παράλληλα προς το σύμπλεγμα των νημάτων (iso-strain condition), διατηρώντας το ειδικό βάρος τους $(1-2.28/\pi)$ επί του μοναδιαίου κελιού, και το μέτρο ελαστικότητας E_m .

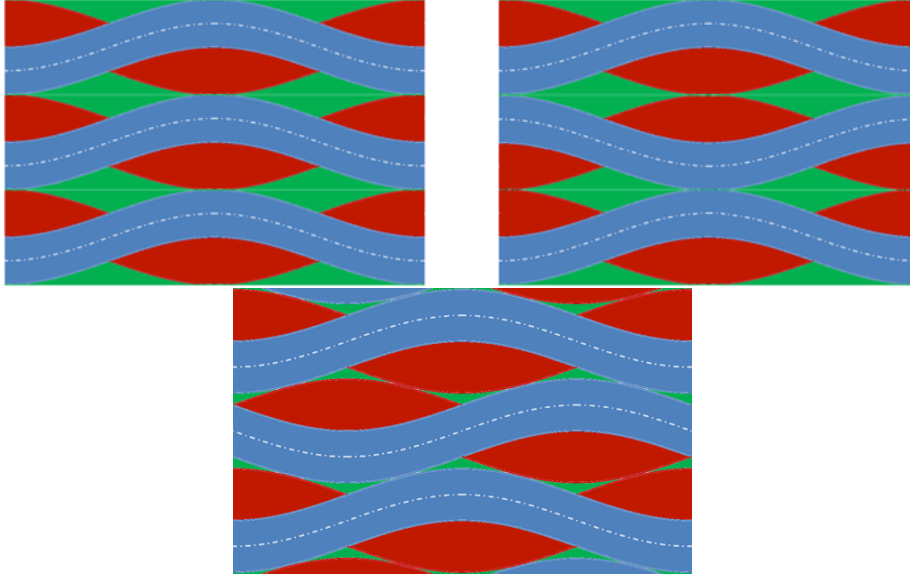
Για τα νήματα, το στημόνι συμμετέχει για το μέτρο ελαστικότητας E_x με E_{Lx} (μέτρο ελαστικότητας διαμήκους νήματος (στημόνι) στον άξονα x), και για το μέτρο ελαστικότητας E_y με E_{Ly} (μέτρο ελαστικότητας διαμήκους νήματος (στημόνι) στον άξονα y), όταν η φόρτιση είναι κατά τον άξονα x , ενώ το υφάδι με E_T , ανεξαρτήτως διεύθυνσης στο επίπεδο $x - y$, καθώς η διατομή του είναι εγκάρσια ορθοτροπική.

Η σύνδεση των συνεισφορών των μερών του μοναδιαίου κελιού γίνεται με τη βοήθεια τριών συντελεστών: c , b και n_0 .

Ο συντελεστής b είναι ίσος με το λόγο του μερικού όγκου του νήματος κατά το οποίο γίνεται η φόρτιση προς το συνολικό όγκο του υφάσματος (π.χ. για ύφασμα 60% στημόνι – 40% υφάδι, και φόρτιση κατά το στημόνι, τότε $b = 0.6$), ο οποίος εφαρμόζεται στους μερικούς όγκους του στημονιού και του υφιδιού ως b και $1 - b$ αντίστοιχα.

Το σύμπλεγμα των νημάτων (δηλαδή το ύφασμα), με ειδικό βάρος $2.28/\pi$ ως προς το μοναδιαίο κελί, δεν συντίθενται ούτε εντελώς σειριακά, ούτε εντελώς παράλληλα. Ο συντελεστής ποσόστωσης, c , εφαρμόζεται στο ειδικό βάρος του κάθετου προς την φόρτιση νήματος, παίρνει τιμές από 0 έως 1, και, ανάλογα με την τιμή του, το μοντέλο γίνεται σειριακό, παράλληλο, ή οποιαδήποτε γραμμική αναλογία μεταξύ τους.

Όταν το $2h/a$ τείνει στο άπειρο (πρακτικά πάνω από 2), η σύνθεση των νημάτων είναι σειριακή, άρα το c πρέπει να παίρνει την τιμή 1. Όταν το $2h/a$ (η εφαιπόμενη της μέσης γωνίας που σχηματίζει το νήμα καθώς κυματώνεται στο μοναδιαίο κελί.) τείνει στο 0, η σύνθεση των νημάτων είναι παράλληλη, άρα το c πρέπει να παίρνει



Σχήμα 3.7: Διατάξεις ελάχιστης και μέγιστης πυκνότητας μοναδιαίων κελιών

την τιμή 0 Το Σχ. 3.7 δείχνει μερικούς τρόπους στοίβαξης των υφασμάτων. Οι μερικοί όγκοι τείνουν από $2.28/\pi$ για τα νήματα, και $(1 - 2.28/\pi)$ για τα matrix rockets, μέχρι 1 και 0 αντίστοιχα.

Ο συντελεστής αλληλοεπικάλυψης μοναδιαίων κελιών, n_0 , εφαρμόζεται στον μερικό όγκο του matrix rocket, και λαμβάνει τιμές από 0 (για μηδενική αλληλοεπικάλυψη των μοναδιαίων κελιών), έως 1 (πλήρης απουσία matrix rockets). Η ακριβής τιμή του συντελεστή προσδιορίζεται πειραματικά.

Το μέτρο ελαστικότητας του συνολικού μοντέλου

Το μέτρο ελαστικότητας E_x :

$$E_x = \frac{\left(\frac{1 - c + cb}{E_{Lx}b + E_T(1 - b)(1 - c)} + \frac{(1 - b)c}{E_T} \right)^{-1} \frac{2.28}{\pi} + E_m \left(1 - \frac{2.28}{\pi} \right) (1 - n_0)}{1 - n_0 \left(1 - \frac{2.28}{\pi} \right)} \quad (3.22)$$

Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία για το E_y :

$$E_y = \frac{\left(\frac{1 - c + cb}{E_{Ly}b + E_T(1 - b)(1 - c)} + \frac{(1 - b)c}{E_T} \right)^{-1} \frac{2.28}{\pi} + E_m \left(1 - \frac{2.28}{\pi} \right) (1 - n_0)}{1 - n_0 \left(1 - \frac{2.28}{\pi} \right)} \quad (3.23)$$

3.5 Απλούστερη προσέγγιση: Παραλλαγή του νόμου των μιγμάτων για στοιβαγμένα ανθρακοϋφάσματα

Μια απλούστερη εναλλακτική θεώρηση των συνθέτων υλικών που περιέχουν υφασμένες ίνες περιγράφεται εδώ. Η θεώρηση αυτή ισχύει μόνο για υφάσματα όπου το στημόνι είναι κάθετο στο υφάδι.

3.5.1 Παράλληλη στοίβαξη των υφασμάτων

Οι ίνες (νήματα) στο στημόνι του υφάσματος ξετάζονται ξεχωριστά από αυτές στο υφάδι. Έτσι το ύφασμα αποδομείται σε δύο ανεξάρτητες στρώσεις, η κάθε μία από τις οποίες αποτελείται από ίνες παράλληλα προσανατολισμένες μεταξύ τους. Στη στρώση που αντιστοιχεί στο στημόνι οι ίνες είναι προσανατολισμένες στην κατεύθυνση του στημονιού. Στην άλλη στρώση οι ίνες είναι προσανατολισμένες στην κατεύθυνση του υφιδιού. Το ποσοστό του υλικού που ανήκει στην πρώτη στρώση είναι ίδιο με το ποσοστό των ινών στο στημόνι, x_w .

Όταν ο εφελκυσμός γίνεται κατά μήκος, π.χ., του στημονιού, το μέτρο ελαστικότητας της πρώτης στρώσης είναι: $E_1 = \phi E_f + (1 - \phi)E_m$. Το μέτρο ελαστικότητας στην άλλη στρώση είναι $E_2 = (\phi/E_f + (1 - \phi)/E_m)^{-1}$.

Θεωρώντας ότι για τις στρώσεις ισχύει ο νόμος των μιγμάτων, το μοντέλο δίνει για το σύνθετο υλικό που έχει ενίσχυση απλού υφάσματος:

$$E = x_w (\eta_t \phi E_f + (1 - \phi)E_m) + (1 - x_w) \left(\frac{\phi}{E_f} + \frac{1 - \phi}{E_m} \right)^{-1}, \quad (3.24)$$

όπου η_t είναι ένας συντελεστής που διορθώνει το E_f για την κυμάτωση των ινών, την αλληλεπίδραση του στημονιού και του υφιδιού και την επίδραση του τρόπου στοίβαξης. Προφανώς ο συντελεστής η_0 εξαρτάται από το είδος του υφάσματος που χρησιμοποιείται και τον αριθμό των υφασμάτων που στοιβάζονται στο σύνθετο.

Αν η φόρτιση γίνει σε μια γωνία θ με την κατεύθυνση του στημονιού, ως προσέγγιση μπορεί να χρησιμοποιηθούν δεύτεροι συντελεστές διόρθωσης, $\eta'_1 = \cos^4 \theta$ και $\eta'_2 = \cos^4(90 - \theta)$:

$$E = x_w (\eta'_1 \eta_t \phi E_f + (1 - \phi)E_m) + (1 - x_w) (\eta'_2 \eta_t \phi E_f + (1 - \phi)E_m) \quad (3.25)$$

$$E = x_w (\eta_t \phi E_f \cos^4 \theta + (1 - \phi)E_m) + (1 - x_w) (\eta_t \phi E_f \cos^4(90 - \theta) + (1 - \phi)E_m) \quad (3.26)$$

3.5.2 Στοίβαξη των υφασμάτων σε γωνία 45°

Αν η στοίβαξη των απλών υφασμάτων γίνει συμμετρικά σε γωνία 45°, και το σύνθετο φορτίζεται κατά μήκος κάποιων από τις ίνες του, τότε το μέτρο ελαστικότητας ισοζυγισμένων συστρωματωμάτων μπορεί να υπολογιστεί προσεγγιστικά. Εδώ μπορεί να αμεληθεί η συνεισφορά στο μέτρο ελαστικότητας των καθέτων ινών και της μήτρας, καθώς είναι αρκετά μικρή.

Στην περίπτωση αυτή εξετάζουμε τέσσερα στρώματα. Ένα, το οποίο αντιστοιχεί στις ίνες οι οποίες είναι παράλληλες προς την κατεύθυνση της φόρτισης. Ένα δεύτερο που αντιστοιχεί στις ίνες που είναι προσανατολισμένες κάθετα στις πρώτες. Και δύο που αντιστοιχούν στις ίνες που είναι προσανατολισμένες σε $\pm 45^\circ$ ως προς την κατεύθυνση του φορτίου.

Στα στρώματα στα οποία ο εφελκυσμός γίνεται κατά την κατεύθυνση των ινών του στημονιού (ή του υφαιδιού) έχουμε $E = 0.5 * 0.5 * \phi \eta_t E_f$. Στα υπόλοιπα στρώματα, όλες οι ίνες των οποίων φορτίζονται σε γωνία 45° , το μέτρο ελαστικότητας είναι $E = 0.5 \cos^4(45^\circ) E_f$. Το συνολικό μέτρο ελαστικότητας του συνθέτου σε αυτή την περίπτωση, λοιπόν, είναι:

$$E = 0.375 \eta_t \phi E_f \quad (3.27)$$

3.6 Μοντέλα για την αντοχή

Στην παρούσα εργασία, για τον υπολογισμό της αντοχής του συνθέτου υλικού, το ποσοστό των ινών που είναι προσανατολισμένες εγκάρσια στην μακροσκοπική κατεύθυνση εφελκυσμού αφαιρείται από το ϕ . Για σύνθετα υλικά με στοιβαγμένα φύλλα παράλληλα ή κάθετα μεταξύ τους και εφελκυσμό στην κατεύθυνση του στημονιού χρησιμοποιούμε, δηλαδή, $\phi/2$ ως κλάσμα όγκου των λειτουργικών ινών και ο παραπάνω τύπος γίνεται:

$$\sigma_1^* = 0.5 \phi \eta_t^* \sigma_f^* + 0.5(1 - \phi) \sigma_m^* \left(1 - 2\sqrt{\frac{\phi}{\pi}} \right) \quad (3.28)$$

Για την εκτίμηση της αντοχής σε φόρτιση σε 45° ως προς τις ίνες χρησιμοποιήθηκε το κριτήριο των Tsai - Hill (εξ. 3.19). Η εξίσωση αυτή για την περίπτωσή μας καταλήγει:

$$\sigma_{45^\circ}^* = \frac{2\eta_t^* \sigma_2^* \tau_{12}^*}{\sqrt{\sigma_2^{*2} + \tau_{12}^{*2}}} \quad (3.29)$$

Για την τιμή της τ_{12}^* πήραμε

$$\tau_{12}^* = \sigma_2^* = \sigma_m^* \left(1 - 2\sqrt{\frac{\phi}{\pi}} \right)$$

Η εκτίμηση της αντοχής των συνθέτων υλικών που παρασκευάστηκαν με στοίβαξη δύο υφασμάτων σε γωνία 45° έγινε ως εξής:

$$\sigma_{45/45}^* = \frac{\phi}{4} \sigma_f^* + \frac{\phi}{2} \cos^4 45 \sigma_f^* = \frac{3}{8} \phi \sigma_f^* \quad (3.30)$$

Κεφάλαιο 4

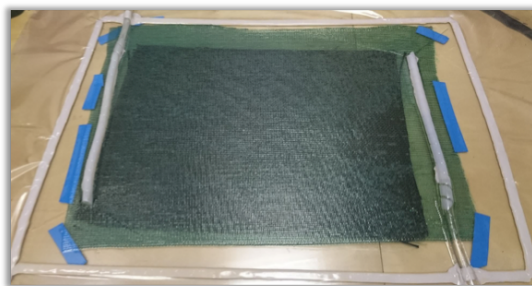
Πειραματική Διαδικασία

4.1 Εισαγωγή

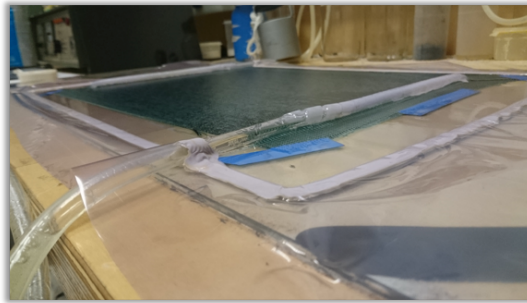
Για την αξιολόγηση των μηχανικών ιδιοτήτων και την επίδραση του τρόπου ύφανσης και έγιναν πειράματα με δοκίμια που αποτελούντο από ανθρακούφασμα απλής πλέξης ή μονοαξονικά προσανατολισμένα ανθρακονήματα, εμποτισμένα με εποξειδική ρητίνη. Τα δοκίμια κόπηκαν σε παραλληλόγραμμα, και στη συνέχεια τα μέτρα ελαστικότητάς τους μετρήθηκαν στη μηχανή εφελκυσμού στο εργαστήριο. Ενδεικτικές εικόνες των υλικών που παρασκευάστηκαν και των δοκιμών που κόπηκαν φαίνονται στα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 4.1 έως 4.4).

4.2 Περιγραφή εξοπλισμού

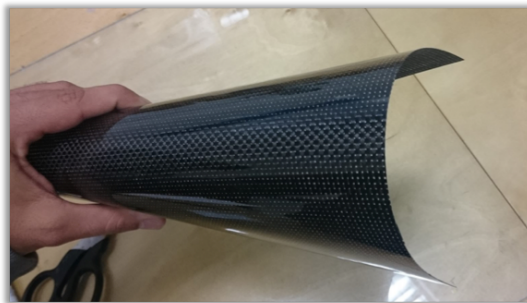
Για την κατασκευή των δειγμάτων χρησιμοποιήθηκε αντλία κενού μοντέλου VALUEVE 125, και ισχύος 0.25HP, με δυνατότητα αναρρόφησης μέχρι 0.1bar.



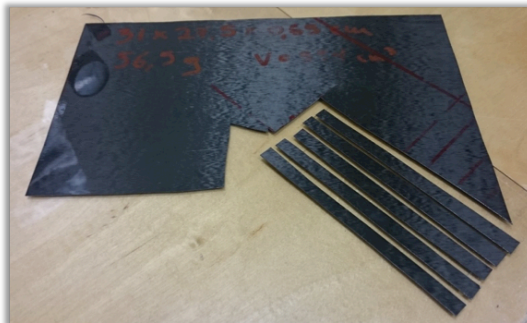
Σχήμα 4.1: Η διεργασία αναρρόφησης ρητίνης υπό κενό που χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή των συνθέτων υλικών



Σχήμα 4.2: Λεπτομέρεια του Σχήματος 4.1



Σχήμα 4.3: Ένα φύλλο (lamina) συνθέτου υλικού από ανθρακοϋφασμα απλής πλέξης και εποξειδική ρητίνη.



Σχήμα 4.4: Ένα φύλλο (lamina) συνθέτου υλικού αποτελούμενο από δύο στρώσεις μονοαξονικά προσανατολισμένων ανθρακονημάτων, στοιβαγμένες σε γωνία 90° μεταξύ τους, σε εποξειδική ρητίνη. Προσέξτε τα δοκίμια για εφελκυσμό που έχουν κοπεί έτσι ώστε ο κύριος άξονάς τους (και η κατεύθυνση επιβολής αργότερα του εφελκυστικού φορτίου) να είναι σε γωνία 45° ως προς τις κατευθύνσεις των ινών άνθρακα.



Σχήμα 4.5: Διάταξη αντλίας κενού - μανόμετρου. Φαίνεται και ο υαλοπίνακας που χρησιμοποιήθηκε ως καλούπι για τα σύνθετα υλικά.

Για την κατασκευή των δειγμάτων χρησιμοποιήθηκαν πρώτες ύλες από την εταιρία Fibertmax®, Τα δοκίμια κόπηκαν κατά διευθύνσεις 0°, 45° και 90° ως προς την διεύθυνση κατασκευής του φύλλου, καθώς επηρεάζονται οι ελαστικές σταθερές σε περίπτωση ανισότροπων ή / και μη ισορροπημένων υφασμάτων.

Πιο αναλυτικά, η διαδικασία ξεκινάει με την εφαρμογή αποκολλητικού κεριού στην γυάλινη επιφάνεια ώστε να αποκολληθεί εύκολα το σύνθετο υλικό και η επιφάνεια να μην έχει ατέλειες. Στην συνέχεια σκουπίζουμε το κερί για να εφαρμόσουμε το ανθρακοϋφασμα. Πάνω στο ύφασμα τοποθετούμε μια διάτρητη μεμβράνη(perforated film) η οποία έχει επίσης αντικολλητικές ιδιότητες πάνω στην οποία τοποθετούμε ακόμα μία ταινία αποκόλλησης (peel ply tape), μετά βάζουμε το ύφασμα ροής(flow fabric) το οποίο θα διανέμει ομοιόμορφα τη ρητίνη. Τοποθετούμε πάνω από το τελικό ύφασμα δύο κομμάτια σπειροειδή σωλήνα, στα οποία εφαρμόζουμε σωλήνες πολυαιθυλενίου, για να κάνει κύκλωμα η ρητίνη και να εφαρμοστεί η τεχνική της έγχυσης ρητίνης υπό κενό(vacuum resin infusion). Στη συνέχεια περιμετρικά των υφασμάτων τοποθετούμε μαστιχοταινία για να κολλήσει το φιλμ κενού(vacuum bag). Όταν φτάσουμε σε αυτό το σημείο κάνουμε έλεγχο της κόλλησης ώστε να μην έχουμε απώλειες, ένα βήμα που πρέπει να γίνει πριν μπει η μήτρα στο υλικό. Πιο απλά, ανοίγουμε την αντλία ώστε να υπάρξει κενό και όταν την κλείσουμε πρέπει η ένδειξη να μείνει σταθερή στο 0,1 bar. Η μια άκρη της σωλήνας συνδέεται με το δοχείο (catch-pot) που θα κρατήσει την περισσευούμενη ρητίνη το οποίο στη συνέχεια συνδέεται με την αντλία κενού. Η άλλη άκρη του κυκλώματος είναι η είσοδος της ρητίνης την οποία θα ασφαλίσουμε όταν έχει περάσει η επιθυμητή ποσότητα με ένα σφιγκτήρα(resin line clamp). Μετά από 24 ώρες αφαιρούμε τα αναλώσιμα ανακτώντας το σύνθετο υλικό στη μορφή φύλλου για την παρασκευή δοκιμίων.

Αφού ετοιμαστούν τα δοκίμια, ακολουθούν τα πειράματα σε εφελκυσμό, τα οποία λαμβάνουν χώρα στη διαθέσιμη μηχανή εφελκυσμού INSTRON στο Εργαστήριο Υλικών του Πολυτεχνείου Κρήτης. Η μηχανή αυτή έχει δυνατότητα μέτρησης με κε-



Σχήμα 4.6: Διάταξη μηχανής εφελκυσμού - ηλεκτρονικού υπολογιστή

φαλή των 1000 ή 5000 N, και σταθερό ρυθμό παραμόρφωσης (ταχύτητα παραμόρφωσης). Αυτή προσδιορίζεται από την επιβαλλόμενη ταχύτητα μετατόπισης των δαγκανών (συνήθως ορισμένη στα 0.05 mm/s). Η συσκευή παράγει αναλογική γραμμική ηλεκτρική σηματοδότηση για την μετατόπιση και το φορτίο, η οποία βαθμονομήθηκε και προσδιορίστηκε με γνωστά βάρη και μετατοπίσεις. Τα ηλεκτρικά αυτά σήματα, κατάλληλα ενισχυμένα, μεταφέρονται, μέσω ενός A/D μετατροπέα, σε ηλεκτρονικό υπολογιστή ο οποίος τα επεξεργάζεται με κατάλληλο λογισμικό. Αυτή η διάταξη φαίνεται στο Σχήμα 4.6.

4.3 Υλικά και διαδικασία παρασκευής δοκιμών

Για την παρασκευή των συνθέτων υλικών χρησιμοποιήθηκαν τα ακόλουθα υλικά:

1. Ανθρακούφασματα
 - (α) Υφασμένο
 - (β) Μονοαξονικό
2. Εποξειδική ρητίνη δύο συστατικών

3. Αναλώσιμα για τη διαδικασία έγχυσης της ρητίνης υπό κενό

Τα χαρακτηριστικά των ανθρακοϋφασμάτων (ενίσχυση) και της ρητίνης (μήτρα) που χρησιμοποιήθηκαν είναι τα ακόλουθα:

1. Υφασμένο με απλή ύφανση (συμμετρική):

- Βαρος: 160 g/m²
- Υφανση: απλή
- Στημόνι: ανθρακόνημα TR30S¹ 4 κλωστές/cm φάρδους
- Υφάδι: ανθρακόνημα TR30S 4 κλωστές/cm
- Πυκνότητα ανθρακονήματος: 1.79 g/cm³

Μηχανικές ιδιότητες

- Αντοχή σε εφελκυσμό: 4410 MPa
- Μέτρο ελαστικότητας: 235 GPa
- Επιμήκυνση θραύσης: 1,9 %

2. Μονοαξονικό (μη υφασμένο):

- Βαρος: 130g/τ.μ.
- Υφανση: Μιας κατεύθυνσης πεπλατυσμένη με X-ply ανάμεσα σε 2 πολύ λεπτές στρώσεις ανθρακονήματος
- Στημόνι: ανθρακόνημα TR50S² 100% χωρίς υφάδι
- Πυκνότητα άνθρακα: : 1.82 g/cm³

Μηχανικές ιδιότητες

- Αντοχή σε εφελκυσμό: 4900 MPa
- Μετρο ελαστικότητας: 240 GPa
- Επιμήκυνση θραύσης: 2 %

3. Εποξειδική ρητίνη:

- Δύο συστατικών· ρητίνη: Fibermax 9330, σκληρυντής: Fibermax 9054, σε αναλογία 100/22 κ.β. Πυκνότητα: 1.12 g/cm³ (@20 °C)

Μηχανικές ιδιότητες

- Μηχανικές ιδιότητες
- Αντοχή σε εφελκυσμό: 60 MPa

¹3000 ίνες / νήμα, διάμετρος ίνας 7 μm [15]

²6000 ίνες / νήμα, διάμετρος ίνας 7 μm [15]

- Αντοχή σε διάτμηση (εκτίμηση: $\tau_m^* \approx 2/3 \sigma_m^*$): 40 MPa
- Μέτρο ελαστικότητας: 2.7 GPa
- Επιμήκυνση θραύσης: 3.8 %

Παρασκευάσθηκαν σύνθετα υλικά σε μορφή πολυστρωματικών φύλλων σε διαφορετικά ποσοστά και διαφορετικούς σχετικούς προσανατολισμούς ινών άνθρακα (Πίνακας 5.1). Τα παραχθέντα δοκίμια καθαρίστηκαν, κωδικοποιήθηκαν κατά ομάδα, διεύθυνση φόρτισης και αύξοντα αριθμό, ζυγίστηκαν για τον ακριβή προσδιορισμό της κατά βάρος περιεκτικότητάς τους σε ενίσχυση και μετρήθηκαν οι εγκάρσιες διαστάσεις τους για να υπολογισθεί η ακριβής διατομή του προς εφελκυσμού στελέχους τους. Κατόπιν, εφελκυστήκαν μονοαξονικά στην συσκευή εφελκυσμού και σε θερμοκρασία δωματίου μέχρι να αστοχήσουν. Επειδή ο κινητήρας του εργαστηριακού συστήματος εφελκυσμού παρουσίασε προβλήματα λειτουργίας, η κίνηση των δαγκανών για τον εφελκυσμό των δοκιμών έγινε χειροκίνητα, φροντίζοντας η πραγματική ταχύτητα μετατόπισης των δαγκανών να είναι γύρω στα 0.04 – 0.05 mm/s.

Το ενεργό μήκος για τον υπολογισμό της παραμόρφωσης θεωρήθηκε η πραγματική απόσταση των σημείων στα οποία εφάρμοζαν οι δαγκάνες, δηλαδή από 52 έως 80 mm, όπως φάνηκαν από τα σημάδια που άφησαν στην επιφάνεια των δοκιμών.

Η βαθμονόμηση του οργάνου έγινε με τον ακόλουθο τρόπο:

Παραμόρφωση : Μετρήθηκε η απόσταση των δαγκανών και αντιστοιχήθηκε με τη διαφορά δυναμικού που προκλήθηκε στο σύστημα μέτρησης. Βρέθηκε ότι τα 100 mm μετατόπισης των δαγκανών αντιστοιχεί σε 10 V καταγραφή του ηλεκτρονικού υπολογιστή:

$$L \text{ (mm)} \rightarrow 10 \times \text{Value (V)}$$

Δύναμη : Μετρήθηκε η απόκριση της κεφαλής των 5 kN με κρέμασμα γνωστών μαζών (1 - 20 kg). Βρέθηκε ότι δύναμη 5000 N αντιστοιχεί σε διαφορά δυναμικού 10 V:

$$F \text{ (N)} \rightarrow 500 \times \text{Value (V)}$$

Καθώς δεν υπήρχαν μεγαλύτερα βάρη στο εργαστήριο, θεωρήθηκε ότι η γραμμικότητα της σχέσης αυτής επεκτείνεται μέχρι το 80% του μέγιστου φορτίου που μπορεί να δεχτεί η κεφαλή.

Μηδενισμός : Ο μηδενισμός του σήματος και για τις δύο περιπτώσεις μπορούσε να γίνει με χειροκίνητο διακόπτη πάνω στη συσκευή.

Η παραμόρφωση υπολογίσθηκε από την μετατόπιση και το ενεργό μήκος του δοκιμίου. Η τάση υπολογίσθηκε από την δύναμη και την διατομή του δοκιμίου.

Κεφάλαιο 5

Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας παρουσιάζονται σε αυτό το κεφάλαιο. Ο Πίνακας 5.1 παρουσιάζει τα χαρακτηριστικά των υλικών που παρασκευάστηκαν και τους κωδικούς των σειρών των δοκιμών που κόπηκαν από αυτά τα υλικά. Ο Πίνακας 5.2 παρουσιάζει τα αποτελέσματα των μετρήσεων εφελκυσμού αυτών των δοκιμών.

5.1 Ανθρακόνημα

Το ανθρακόνημα μετρήθηκε ανάμεσα σε ειδικές δαγκάνες για να αποφευχθεί η καταστροφή του και η αστοχία του από τις κοινές δαγκάνες. Το σχήμα 5.1 παρουσιάζει την καμπύλη τάσης παραμόρφωσης του νήματος.

Το μέτρο ελαστικότητας του ανθρακονήματος μετρήθηκε στο 172 GPa και η αντοχή του στα 1700 MPa. Οι τιμές αυτές είναι χαμηλότερες από τις αντίστοιχες τιμές των μονών ινών άνθρακα (234 GPa και 4.1 GPa, αντίστοιχα).

5.2 Μονό υφασμένο φύλλο

5.2.1 Εφελκυσμός στην κατεύθυνση του στημονιού

Στο σχήμα 5.2 παρουσιάζεται μια χαρακτηριστική καμπύλη εφελκυσμού (τάσης – παραμόρφωσης) για τα δοκίμια με κωδικό «1f». Τα δοκίμια αυτά περιέχουν ένα μόνο ανθρακοϋφασμα σε εποξειδική ρητίνη. Το κλάσμα όγκου του άνθρακα σε αυτά τα δοκίμια είναι 20 – 24 %. Ο εφελκυσμός έγινε στην κατεύθυνση του στημονιού. Το μέτρο ελαστικότητας σε αυτά τα δοκίμια είναι 16 GPa και η αντοχή τους 300 MPa.

Ο άξονας των παραμορφώσεων (strain) στο σχήμα 5.2 είναι μετατοπισμένος προς τα δεξιά κατά 0.0025, προφανώς γιατί το δοκίμιο δεν ήταν αρχικά πλήρως τεντωμένο ανάμεσα στις δαγκάνες. Έτσι το αρχικό τμήμα του διαγράμματος αντιστοιχεί στην ευθυγράμμιση του δοκιμίου στις δαγκάνες και κατόπιν αρχίζει ο εφελκυσμός. Παρόμοια μετατόπιση φαίνεται σε όλες τις μετρήσεις και η ολκιμότητα δίδεται υπερεκτιμημένη κατά το ποσό της μετατόπισης αυτής (συν άλλα πιθανά σφάλματα).

Πίνακας 5.1: Κωδικοί δοκιμίων και χαρακτηριστικά τους. Αναφέρεται το είδος και ο αριθμός φύλλων που χρησιμοποιήθηκαν και το κλάμα μάζας των ινών άνθρακα. Ο προσανατολισμός αναφέρεται ως προς την κατεύθυνση των αξόνων των ινών. Όπου δεν αναφέρεται, ο εφελκυσμός έγινε κατά μήκος των ινών.

Κωδικός	Χαρακτηριστικά
00**	Νήμα από ίνες άνθρακα, μη υφασμένο, από το υφάδι
f1	Υφασμένο, 1 φύλλο, 33.1% C σχ. προσανατολισμός εφελκυσμού: 0°
f1-45	Υφασμένο, 1 φύλλο, 34.8% C σχ. προσανατολισμός εφελκυσμού: 45°
f2	Υφασμένο, 2 φύλλα, 55.8% C σχ. προσανατολισμός εφελκυσμού: 0°
f2-0-45	Υφασμένο, 2 φύλλα, 52.2% C σχ. προσανατολισμός εφελκυσμού: 45°
f2-45-0	Υφασμένο, 2 φύλλα, 58.3% C σχ. Προσανατολισμός στοίβαξης φύλλων: 45°
f4	Υφασμένο, 4 φύλλα, 60.1% C σχ. προσανατολισμός εφελκυσμού: 0°
f2-II	Μονοαξονικό, 2 φύλλα, 36.5% C σχ. προσανατολισμός εφελκυσμού: 0°
f2-45-II	Μονοαξονικό, 2 φύλλα, 43.3% C σχ. προσανατολισμός εφελκυσμού: 45°
f4-45-II	Μονοαξονικό, 4 φύλλα, 59.4% C σχ. προσανατολισμός εφελκυσμού: 45°
f4-II	Μονοαξονικό, 4 φύλλα, 60.4% C σχ. προσανατολισμός εφελκυσμού: 0°

Πίνακας 5.2: Πειραματικά αποτελέσματα: μέσες τιμές σειρών δοκιμών

Κωδικός	Vol % C	Εμβαδόν διατομής (cm ²)	Μήκος δοκιμίων (mm)	E (GPa)	σ* (MPa)
00**	100	0.005	113.0	172	1660
f1	22.7	0.036	59.33	15.58	299.67
f1-45	24.1	0.036	65.50	3.78	99.75
f2	42.9	0.054	61.17	17.90	239.00
f2-45	39.4	0.052	67.60	4.62	132.25
f2-45-0	45.4	0.054	70.40	12.5	206
f4	46.7	0.081	79.00	20.56	430.40
f2-II	25.5	0.062	75.83	14.70	319.50
f2-45-II	30.1	0.053	77.20	3.75	101.32
f4-45-II	46.5	0.074	75.80	6.58	139.45
f4-II	48.9	0.074	74.00	17.58	406.17

Vol% C = (βάρος άνθρακα/ολικό βάρος δοκιμίου)*100

Εμβαδόν διατομής = πλάτος δοκιμίου × πάχος δοκιμίου (cm²)

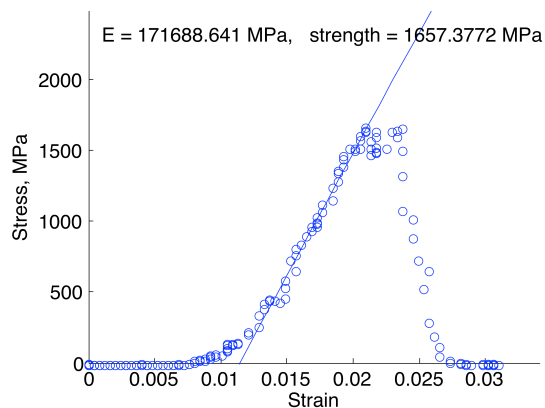
Μήκος δοκιμίων = η μετρημένη απόσταση των άκρων στα οποία το δοκίμιο στηριζόταν στις δαγκάνες στο πείραμα του εφελκυσμού

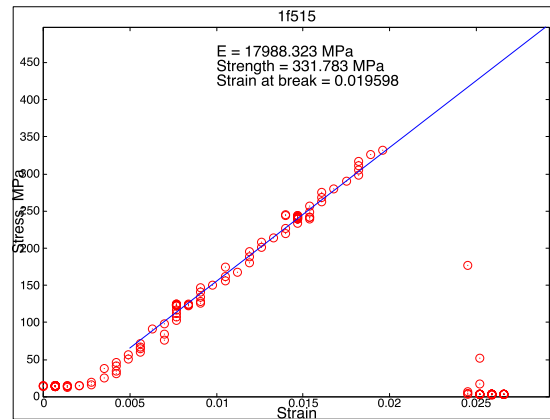
Μέτρο ελαστικότητας (GPa) = κλίση της καμπύλης σ(ε) στην αρχή του εφελκυσμού:

$$E = \left. \frac{d\sigma(t)}{d\varepsilon(t)} \right|_{t \rightarrow 0}$$

Αντοχή (MPa): μέγιστη τάση στο διάγραμμα σ(ε)

** Νήμα, μη υφασμένο, από το υφάδι

**Σχήμα 5.1:** Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης ανθρακονήματος TS30S 3k.



Σχήμα 5.2: Μονό υφασμένο φύλλο. Ο εφελκυσμός γίνεται κατά μήκος του άξονα των ινών του στημονιού

Το σχήμα 5.2 δείχνει ότι ο εφελκυσμός των συνθέτων υλικών ενισχυμένων με αν-θρακοϋφασμα καθορίζεται κυρίως από τη συμπεριφορά των ινών άνθρακα: το δοκίμιο παραμορφώνεται ελαστικά (ευθεία γραμμή) μέχρι την αστοχία του.

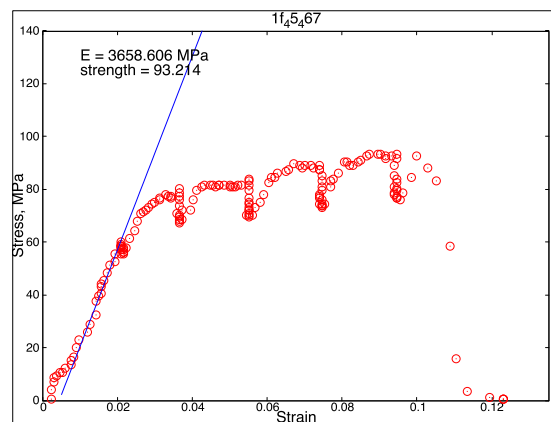
5.2.2 Εφελκυσμός σε 45°

Το σχήμα 5.3 παρουσιάζει την συμπεριφορά του συνθέτου υλικού (μονό φύλλο) όταν ο εφελκυσμός λαμβάνει χώρα σε κατεύθυνση 45° ως προς το στημόνι. Το κλάσμα όγκου του άνθρακα σε αυτά τα δοκίμια ήταν πάλι γύρω στο 24 %.

Ο εφελκυσμός στη μέτρηση αυτή έγινε χειροκίνητα και οι διακυμάνσεις στο σχήμα οφείλονται στην μη σταθερή ταχύτητα περιστροφής της μανιβέλας. Οι τιμές της τάσης που καταγράφηκαν είναι σωστές. Η συσκευή, όμως, δίνει μόνο θετικές τιμές για τις παραμορφώσεις, ακόμη και όταν το δοκίμιο χαλαρώνει. Έτσι μόνο το πρώτο μέρος της καμπύλης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως έχει με ακρίβεια, κάτι που είναι αρκετό για να δώσει δεδομένα και να υπολογισθεί το μέτρο ελαστικότητας του δοκιμίου. Επίσης η αντοχή που υπολογίζεται από το διάγραμμα αυτό είναι σωστή, αλλά όχι η ολκιμότητα, την οποία υπερεκτιμά.

Το μέτρο ελαστικότητας και η αντοχή σε εφελκυσμό σε κατεύθυνση 45° από τον άξονα του στημονιού είναι πολύ χαμηλά και οριακά υψηλότερα από αυτά της ρητίνης, με μέσες τιμές : $E \approx 3.8 \text{ GPa}$ και $\sigma^* \approx 100 \text{ MPa}$.

Χαρακτηριστική στα διαγράμματα της τάσης, όταν η φόρτιση γίνεται σε 45° γωνία προς τις ίνες, είναι η αλλαγή της κλίσης της καμπύλης γύρω σε παραμόρφωση 2 %.



Σχήμα 5.3: Μονό υφασμένο φύλλο. Ο εφελκυσμός γίνεται σε γωνία 45° ως προς τον άξονα των ινών του στημονιού

5.3 Δύο υφασμένα φύλλα στοιβαγμένα σε γωνία 0°

Σε αυτά τα δοκίμια τα (2) υφάσματα στοιβάχτηκαν το ένα πάνω στο άλλο με το στημόνι του ενός να είναι παράλληλο με το στημόνι του άλλου. Το κλάσμα όγκου αυτών των δειγμάτων ήταν γύρω στα 40%.

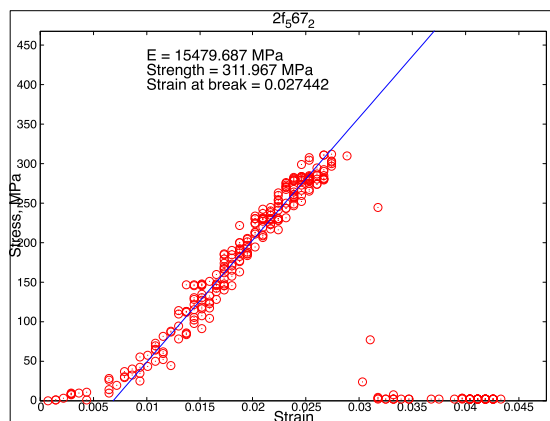
5.3.1 Εφελκυσμός στην κατεύθυνση του στημονιού

Όταν δύο ανθρακοϋφάσματα στοιβάζονται το ένα πάνω από το άλλο για να παρασκευασθεί το σύνθετο υλικό, το κλάσμα όγκου του άνθρακα αυξάνεται σε σχέση με τα σύνθετα υλικά μονού υφάσματος. Αυτό οφείλεται στην καλύτερη στοίβαξη των ινών στη μήτρα. Στο σχήμα 5.4 το σύνθετο περιέχει 40% C κατ' όγκο. Παρόλα αυτά, το μέτρο ελαστικότητας των δειγμάτων αυτών (~ 17 GPa) είναι οριακά υψηλότερη από τα δείγματα *f1* (με μονό φύλλο) και η αντοχή τους (~ 240 MPa) είναι χαμηλότερη.

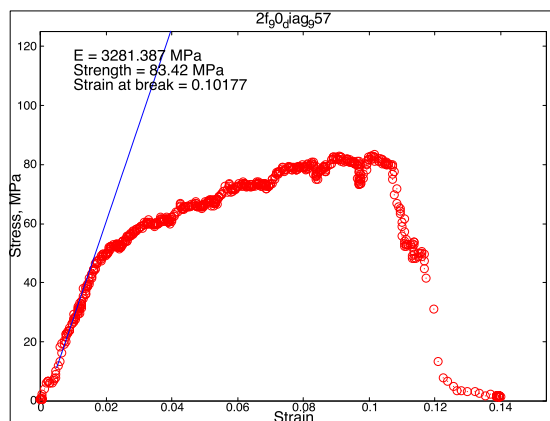
5.3.2 Εφελκυσμός σε 45°

Και σε αυτό το σχήμα (5.5) φαίνεται καθαρά η χαμηλή τιμή του μέτρου ελαστικότητας (μέσος όρος 4.5 GPa) και της αντοχής (132 MPa) όταν η φόρτιση γίνεται σε γωνία 45° προς τις κατευθύνσεις των ινών. Οι τιμές αυτές είναι, όμως μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες τιμές των συνθέτων με ένα μόνο ύφασμα.

Η χαρακτηριστική αλλαγή κλίσης σε παραμόρφωση 2% είναι εμφανής και σε αυτό το διάγραμμα.

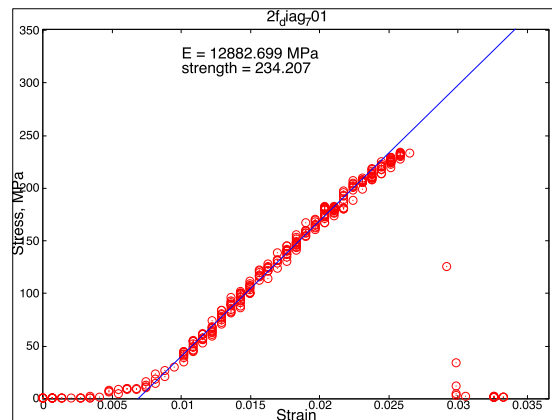


Σχήμα 5.4: Διπλό υφασμένο φύλλο (στοίβαξη σε 0°). Ο εφελκυσμός γίνεται κατά μήκος του άξονα των ινών του σημινιού.



Σχήμα 5.5: Δύο υφασμένα φύλλα στοιβαγμένα σε γωνία 0°. Ο εφελκυσμός γίνεται κατά μήκος του άξονα των ινών του σημινιού.

5.4. ΔΥΟ ΥΦΑΣΜΕΝΑ ΦΥΛΛΑ ΣΤΟΙΒΑΓΜΕΝΑ ΣΕ ΓΩΝΙΑ 45°, ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΣ ΣΤΗΝ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ ΤΟΥ ΣΤΗΜΟΝΙΟΥ47



Σχήμα 5.6: Δύο υφασμένα φύλλα στοιβαγμένα σε γωνία 45° φορτισμένα στην κατεύθυνση του στημονιού

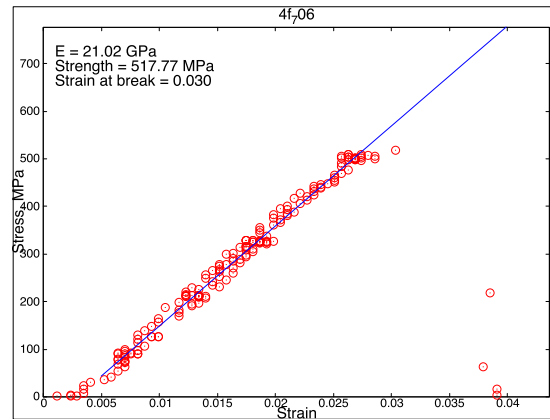
5.4 Δύο υφασμένα φύλλα στοιβαγμένα σε γωνία 45°, εφελκυσμός στην κατεύθυνση του στημονιού

Το σχήμα 5.6 παρουσιάζει την καμπύλη $\sigma\epsilon$ για τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν από δύο υφάσματα στοιβαγμένα το ένα πάνω στο άλλο με γωνία 45° ανάμεσα στους άξονες του στημονιού τους. Ο εφελκυσμός έγινε κατά μήκος του στημονιού του πρώτου φύλλου. Το στημόνι και το υφάδι του δεύτερου φύλλου ευρίσκονται τώρα σε κατεύθυνση $\pm 45^\circ$ από την κατεύθυνση εφελκυσμού.

Το κλάσμα όγκου αυτών των δειγμάτων είναι λίγο μεγαλύτερο από όλα τα άλλα, γύρω στο 45%. Η τιμή του μέτρου ελαστικότητας είναι γύρω στα 17.5 GPa και η αντοχή ~ 206 MPa.

5.5 Τέσσερα υφάσματα, στοιβαγμένα σε γωνία 0°, εφελκυσμός στην κατεύθυνση του στημονιού

Το σχήμα 5.7 παρουσιάζει την καμπύλη $\sigma\epsilon$ για τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν από τέσσερα απλά υφάσματα στοιβαγμένα παράλληλα ένα πάνω στο άλλο. Το κλάσμα όγκου αυτών των δειγμάτων ήταν 46-47%. Καθώς το κλάσμα όγκου του άνθρακα σε αυτά τα δείγματα είναι μεγαλύτερο, σε σχέση με τα δείγματα που περιέχουν ένα ή δύο φύλλα, το μέτρο ελαστικότητας και η αντοχή τους είναι ψηλότερα: 20 GPa και 430 MPa αντίστοιχα.



Σχήμα 5.7: Τετραπλό ύφασμα, στοίβαξη σε γωνία 0°, εφελκυσμός στην κατεύθυνση του στημονιού

5.6 Μονοαξονικά φύλλα

5.6.1 Δύο μονοαξονικά φύλλα στοιβαγμένα σε γωνία 90°, εφελκυσμός στην κατεύθυνση του άξονα του 1ου φύλλου

Το σχήμα 5.8 παρουσιάζει την καμπύλη $\sigma(\varepsilon)$ για σύνθετα υλικά παρασκευασμένα από μη υφασμένα φύλλα. Εδώ οι ίνες άνθρακα είναι όλες παράλληλες σε κάθε φύλλο (μονοαξονικό φύλλο). Τα δύο φύλλα στα δοκίμια αυτά στοιβάχτηκαν σε γωνία 90° μεταξύ τους. Η φόρτιση έγινε κατά μήκος των ινών του πρώτου φύλλου, άρα κάθετα στις ίνες του δεύτερου.

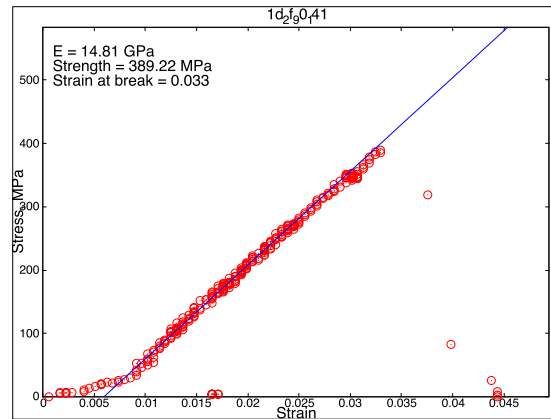
Το κλάσμα όγκου των ινών στα δοκίμια αυτά ήταν 25-30%. Το μέτρο ελαστικότητας έχει τιμή 15 GPa κατά μέσο όρο και η αντοχή φθάνει τα 400 MPa.

5.6.2 Τέσσερα μονοαξονικά φύλλα στοιβαγμένα σε γωνίες 90°, εφελκυσμός στην κατεύθυνση του άξονα του 1ου φύλλου

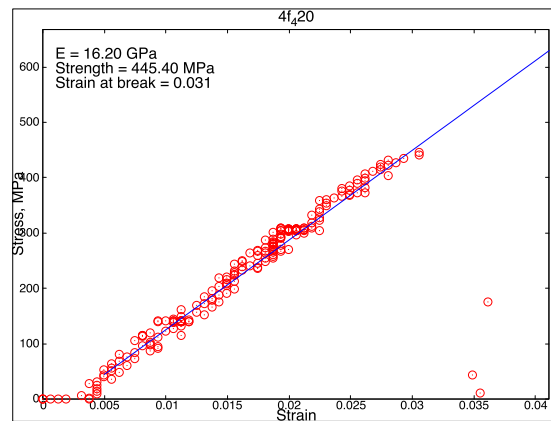
Όταν 4 μονοαξονικά φύλλα στοιβαχτούν με εναλλάξ κάθετο προσανατολισμό, το μέτρο ελαστικότητας και η αντοχή που μετράμε είναι παρόμοιο με αυτά του εδαφίου 5.5: $E \sim 16$ GPa και $\sigma \sim 400$ MPa (Σχ. 5.9).

5.6.3 Τέσσερα μονοαξονικά φύλλα στοιβαγμένα σε γωνία 45°, εφελκυσμός στην κατεύθυνση του άξονα του 1ου φύλλου

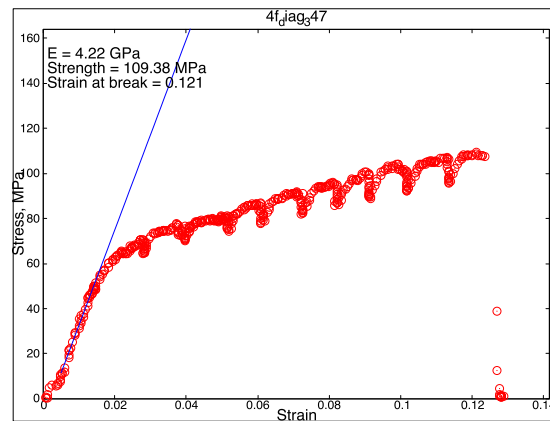
Το Σχ. 5.10 παρουσιάζει την καμπύλη $\sigma(\varepsilon)$ ένα δείγμα με τέσσερα στοιβαγμένα μονοαξονικά φύλλα (κατά 90°) και φορτισμένο σε γωνία $\pm 45^\circ$ με τις ίνες του. Η στοίβαξη σε αυτά τα δείγματα ήταν αρκετά πυκνή και το κλάσμα όγκου τους γύρω στα 47%.



Σχήμα 5.8: 2 μονοαξονικά φύλλα στοιβαγμένα σε γωνία 90°, εφελκυσμός στην κατεύθυνση των ινών του 1ου φύλλου



Σχήμα 5.9: Τέσσερα μονοαξονικά φύλλα στοιβαγμένα σε γωνίες 90°, εφελκυσμός στην κατεύθυνση του άξονα του 1ου φύλλου



Σχήμα 5.10: Τέσσερα μονοαξονικά φύλλα στοιβαγμένα σε $\pm 90^\circ$, εφελκυσμός σε γωνία 45° ως προς τον άξονα του 1ου φύλλου

Όπως και στο Σχ. 5.3 φαίνεται η μεγάλη αλλαγή της κλίσης της καμπύλης $\sigma(\varepsilon)$ σε παραμόρφωση $\sim 2\%$. Η κλίση της καμπύλης σε μικρές παραμορφώσεις δίνει μια τιμή για το μέτρο ελαστικότητας $E = 4 - 6$ GP. Η αντοχή των δειγμάτων αυτών είναι ~ 140 MPa.

Κεφάλαιο 6

Ανάλυση και συζήτηση των αποτελεσμάτων

6.1 Πυκνότητα στοίβαξης

Η πυκνότητα στοίβαξης, άρα και το κλάσμα όγκου των ινών στο σύνθετο υλικό, εξαρτάται από τον τρόπο παρασκευής και το είδος και τον αριθμό υφασμάτων που στοιβάχθηκαν. Ο τρόπος παρασκευής των υλικών, η τεχνική της έγχυσης ρητίνης υπό κενό, ήταν ο ίδιος για όλα τα δείγματα. Οι διαφορές, λοιπόν, στο κλάσμα όγκου του άνθρακα ανάμεσα στα δείγματα οφείλεται στο είδος φύλλου/υφάσματος (υφασμένο ή μονοαξονικό) και στο αριθμό τους.

Συγκρίνοντας στον Πίνακα 5.1 δείγματα με ίδιο αριθμό στοιβαγμένων φύλλων αλλά με διαφορετικά είδη, παρατηρούμε ότι το είδος υφάσματος δεν φαίνεται να έχει σημαντική επίδραση στην στοίβαξη. Η διαφορά ανάμεσα στα δείγματα f2 και f2-II (43% και 25-31%, αντίστοιχα) ίσως σημαίνει μια καλύτερη στοίβαξη των μονοαξονικών φύλλων όταν αυξάνει ο αριθμός τους.

Συγκρίνοντας τις μέσες τιμές των κατ' όγκο περιεκτικότητας ινών άνθρακα στα διάφορα δείγματα μπορούμε να δούμε ότι υπάρχει μια γενική τάση για πιο πυκνή στοίβαξη, όταν αυξάνει ο αριθμός των στοιβαγμένων φύλλων, τουλάχιστον από 1 μέχρι 4 φύλλα.

6.2 Εφελκυσμός στην κατεύθυνση του στημονιού

6.2.1 Ανθρακόνημα

Οι τιμή του μέτρου ελαστικότητας του ανθρακονήματος που χρησιμοποιήθηκε για την ύφανση του ανθρακοϋφάσματος ($E = 172 \text{ GPa}$) είναι πολύ χαμηλότερη από αυτήν που δίδεται από τον κατασκευαστή για μονές ίνες. Πιθανοί λόγοι για τη διαφορά αυτή είναι:

1. Η μη βέλτιστη φόρτιση του δείγματος στις δαγκάνες της συσκευής εφελκυσμού.

2. Το ό,τι δεν είναι όλες οι ίνες τεντωμένες στο νήμα στην αρχή του εφελκυσμού. Καθώς οι ίνες έχουν πολύ χαμηλή ολκιμότητα, είναι πιθανόν αυτές που είναι αρχικά τεντωμένες να σπάσουν πριν τεντώσουν οι υπόλοιπες.

Καθώς οι λόγοι αυτοί μπορεί να ισχύουν και στις μετρήσεις των υφασμάτων / συνθέτων υλικών, θεωρούμε τη μετρημένη αυτή τιμή ως αντιπροσωπευτική για τη συνεισφορά των ανθρακονημάτων κατά τον θεωρητικό υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας των συνθέτων υλικών.

6.2.2 Υφασμένα φύλλα

Παράλληλη στοίβαξη

Για παράλληλη στοίβαξη των υφασμάτων, από τα διαγράμματα του προηγούμενου κεφαλαίου βλέπουμε ότι το μέτρο ελαστικότητας των δειγμάτων, όταν τα σύνθετα φορτίζονται στην κατεύθυνση του στημονιού ενός από τα υφάσματα, αυξάνει με το κλάσμα όγκου των ινών που περιέχουν. Η αύξηση αυτή, όμως δεν είναι γραμμική, όπως θα περίμενε κάποιος από τον απλό κανόνα των μιγμάτων.

Η απλή, λοιπόν, θεώρηση ότι οι ίνες άνθρακα συνεισφέρουν στο μέτρο ελαστικότητας του υλικού σύμφωνα με ένα απλό παράλληλο μοντέλο, ακόμα κι όταν η φόρτιση γίνεται κατά μήκος του στημονιού, δεν επιβεβαιώνεται από τις μετρήσεις. Αυτό είναι λογικό γιατί μόνο οι μισές ίνες (το στημόνι) είναι προσανατολισμένες σε αυτήν την κατεύθυνση. Αλλά κι αυτές δεν είναι παντού παράλληλες με την κατεύθυνση στις τρεις διαστάσεις λόγω της κυμάτωσής τους.

Για να πάρουμε μια ιδέα για τους λόγους της απόκλισης από τη γραμμικότητα θα συγκρίνουμε τις μετρήσεις με το μοντέλο του εδαφίου 3.5.1.

Καθώς τα υφάσματα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν συμμετρικά, το ποσοστό των ινών στο στημόνι, x_w , στα δοκίμια αυτά ήταν 0.5. Έτσι το μοντέλο για τα σύνθετα, στα οποία τα φύλλα είναι στοιβαγμένα ώστε οι ίνες του να είναι παράλληλες ή κάθετες μεταξύ τους και η φόρτιση γίνεται κατά μήκος κάποιων ινών, καταλήγει:

$$E' = 0.5 (\eta_t \phi E_f + (1 - \phi) E_m) + 0.5 \left(\frac{\phi}{\eta_t E_f} + \frac{1 - \phi}{E_m} \right)^{-1} \quad (6.1)$$

όπου εδώ (και παρακάτω) για την τιμή του μέτρου ελαστικότητας της ίνας χρησιμοποιούμε την τιμή του μέτρου ελαστικότητας του νήματος, δηλαδή $E_f = 172$ GPa.

Αν αμελήσουμε τη συνεισφορά της μήτρας και των ινών που είναι προσανατολισμένες κάθετα στην κατεύθυνση εφελκυσμού το μέτρο ελαστικότητας μπορεί να δοθεί ως:

$$E'' = 0.5 \eta_t \phi E_f \quad (6.2)$$

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ο συντελεστής η_t χρησιμοποιείται για να περιγράψει την επίδραση της ύφανσης / είδους υφάσματος - φύλλου. Θέτοντας $\eta_t = 1$, τα αποτελέσματα των μοντέλων συγκρίνονται στον Πίνακα 6.1 με τα πειραματικά. Οι αποκλίσεις και εδώ είναι προφανείς.

Από τον Πίνακα 6.1 παρατηρούμε ότι για τα υφασμένα φύλλα f1, f2 και f4 οι διαφορές ανάμεσα στο E' και E'' είναι μικρές. Οι τιμές, όμως, των θεωρητικών προβλέψεων είναι μεγαλύτερες από τις πειραματικές.

Πίνακας 6.1: Τιμές του μέτρου ελαστικότητας (GPa) και της αντοχής που δίνονται από τα απλά μοντέλα 6.1 – 6.2 και 3.28 – 3.30 (με $\eta_t = \eta_t^* = 1$) συγκρινόμενα με τα πειραματικά.

δείγμα	E_{exp}	E'	E''	σ_{exp}^*	σ_{th}^*
f1	15.6	22.6	19.8	299.7	202
f2	17.9	40.1	37.0	239.0	361
f4	20.6	43.7	40.4	430.4	394
f2-II	14.7	24.3	21.5	319.5	217
f4-II	17.6	45.4	42.1	406.2	410
f2-45-0	12.5	29.7	27.7	206	249
f1-45	3.8	12.4	10.3	99.75	115
f2-45	4.6	18.8	17.2	82.3	118
f2-45-II	3.9	15.9	13.3	101.3	117
f4-45-II	6.7	21.6	20.2	139.5	118

Όταν τα παραπάνω σύνθετα φορτιστούν σε 45° ($\cos^4(45^\circ) = 0.35$), τότε τα μοντέλα γίνονται:

$$E'_{45} = 0.25\eta_t\phi E_f + (1 - \phi)E_m \quad (6.3)$$

$$E''_{45} = 0.25\eta_t\phi E_f \quad (6.4)$$

Τα αποτελέσματα των δειγμάτων f1-45 και f2-0-45 για $\eta_t = 1$ φαίνονται στον Πίνακα 6.1.

Στοιβαξη σε 45°

Στην περίπτωση που τα φύλλα στοιβάζονται με σχετική γωνία 45° και φορτίζονται κατά μήκος κάποιων ινών (δείγματα f2-45-0), το μοντέλο γίνεται:

$$E'_{45-45} = 0.375\eta_t\phi E_f + 0.5(1 - \phi)E_m + 0.25 \left(\frac{\phi}{\eta_t E_f} + \frac{1 - \phi}{E_m} \right)^{-1} \quad (6.5)$$

Το απλουστευμένο μοντέλο (αμελώντας τη συνεισφορά της μήτρας και των καθέτων ινών) είναι:

$$E''_{45-45} = 0.375\eta_t\phi E_f \quad (6.6)$$

Τα αποτελέσματα για $\eta_t = 1$ φαίνονται στον Πίνακα 6.1.

6.2.3 Μονοαξονικά φύλλα

Τα μοντέλα για τα μονοαξονικά φύλλα είναι τα ίδια με αυτά για τα υφασμένα φύλλα (εξισώσεις 6.1, 6.2, 6.3, αναφ66). Οι τιμές των E' , E'' κ.λπ. για αυτά τα δείγματα υπάρχουν στον πίνακα 6.1. Τυχόν διαφορές τους από τα υφασμένα πρέπει να φανούν από τις τιμές του παράγοντα διόρθωσης η_t .

Πίνακας 6.2: Τιμές του συντελεστή διόρθωσης του μέτρου ελαστικότητας (GPa) και της αντοχής στα μοντέλα 6.2 – 6.4 και 3.28 – 3.30 για να ταιριάζουν με τις πειραματικές μετρήσεις.

δείγμα	E_{exp}	η_t	η_t^*
f1	15.6	0.8	1.5
f2	17.9	0.5	0.7
f4	20.6	0.5	1.1
f2-II	14.7	0.7	1.5
f4-II	17.6	0.4	1
f2-45-0	12.5	0.5	0.8
f1-45	3.8	0.4	0.9
f2-45	4.6	0.3	0.7
f2-45-II	3.9	0.2	0.9
f4-45-II	6.7	0.3	1.1

6.2.4 Σύγκριση των υφασμάτων και των στοιβάξεών τους

Με τα πιο απλά μοντέλα ((εξισώσεις 6.1, 6.2, 6.3 και 6.6) μπορούμε να υπολογίσουμε τώρα τους συντελεστές η_t για όλα τα είδη δειγμάτων. Αυτό παρουσιάζεται στον Πίνακα 6.2.

Αξονική φόρτιση

Από τον Πίνακα 6.2 παρατηρούμε ότι οι συντελεστές διόρθωσης είναι χαμηλότεροι της μονάδας. Δηλαδή η ύφανση και η στοίβαξη των υφασμάτων για την παρασκευή των συνθέτων υλικών οδηγεί σε μείωση της συνεισφοράς των ανθρακονημάτων στην ακαμψία του συνθέτου. Για τα υφασμένα φύλλα (f1, f2 και f4) αυτό μπορεί να οφείλεται στην κυμάτωση των ινών στο στημόνι και στο υφάδι, όπως αναφέρει ο Αντωνογιαννάκης [12].

Όταν συγκρίνουμε τα μονοαξονικά φύλλα, στοιβαγμένα σε γωνίες $\pm 90^\circ$ (f2-II, f4-II), με τα υφασμένα (Πίνακας 6.2), βλέπουμε ότι ούτε αυτά έχουν υψηλές τιμές του συντελεστή η_t , αν και ελαφρά καλύτερες από αυτές των υφασμένων. Καθώς δεν αναμένεται κυμάτωση των ινών λόγω πλέξης του στημονιού πάνω και κάτω από το υφάδι σε αυτή την περίπτωση, ο πιο πιθανός λόγος για την χαμηλή ακαμψία αυτών των δειγμάτων είναι παρόμοιος με αυτόν του ανθρακονήματος: δεν είναι όλα τα νήματα τεντωμένα στο σύνθετο υλικό και, κατά τον εφελκυσμό του δείγματος στη συσκευή, εφελκύεται μόνο ένα μέρος τους.

Φαίνεται, λοιπόν, ότι ο τρόπος παρασκευής των συνθέτων είναι πολύ σημαντικός παράγοντας για την τελική ακαμψία του συνθέτου πολυστρωματικού υλικού. Αυτοματοποίηση και αποφυγή διπλώματος των νημάτων στα υφάσματα θα οδηγήσει σε υψηλότερες τιμές του η_t .

Από τον πίνακα 6.2 φαίνεται επίσης ότι η αύξηση του αριθμού των φύλλων οδηγεί γενικά σε χαμηλότερες αποδόσεις ακαμψίας των υφασμάτων στο σύνθετο. Ένα μονό

φύλλο έχει μεγαλύτερη συνεισφορά στην ακαμψία του συνθέτου από ότι πολλαπλά, ίσως διότι το πρόβλημα της κυμάτωσης των ινών του είναι μικρότερο τότε, καθώς οι περιορισμοί στην τρίτη κατεύθυνση (πάχος του συστρωματώματος) των ινών είναι λιγότεροι όταν δεν υπάρχουν άλλα φύλλα εκατέρωθεν. Ο πίνακας 6.2 δείχνει επίσης την τάση του συντελεστή η_t των υφασμένων και των μονοαξονικών φύλλων να πάρει μια τιμή 0.5 για πολλαπλά στοιβαγμένα φύλλα.

Όταν συγκρίνουμε τα αποτελέσματα των πολυστρωματικών υλικών με στοίβαξη $\pm 90^\circ$ με αυτά που στοιβάχθηκαν κατά $\pm 45^\circ$ και έχουν τον ίδιο αριθμό φύλλων, π.χ. τα δείγματα f2 και f2-0-45, βλέπουμε ότι οι συντελεστές η_t έχουν ίδια τιμή. Δηλαδή, η αποτελεσματικότητα της στοίβαξης κατά $\pm 45^\circ$ είναι ίδια με αυτήν κατά $\pm 90^\circ$. Αν, λοιπόν, η φόρτιση δεν γίνεται σε κατευθύνσεις $\pm 90^\circ$ ως προς τους κύριους άξονες του συνθέτου, τότε η στοίβαξη των φύλλων κατά $\pm 45^\circ$ είναι σαφώς πιο ευνοϊκή.

6.3 Εφέλκυσμός σε 45° από την κατεύθυνση των ινών

Ο Πίνακας 6.2 δίνει επίσης τις τιμές των συντελεστών η_t που υπολογίσθηκαν από μετρήσεις για φορτίσεις σε γωνία 45° από την κατεύθυνση του στημονιού του πρώτου φύλλου των πολυστρωματικών συνθέτων υλικών. Οι τιμές αυτές είναι πολύ χαμηλότερες από ό,τι προβλέπει η κλασική θεωρία των υλικών αυτών. Είναι προφανές ότι οι παραδοχές στις οποίες βασίζεται η θεωρία δεν ισχύουν για τα υλικά αυτά. Καθώς οι χαμηλές τιμές ισχύουν και για τα υφασμένα και για τα μονοαξονικά στοιβαγμένα φύλλα, η κυμάτωση των ινών δεν μπορεί να είναι ο λόγος της απόκλισης. Είναι πιθανόν, λοιπόν, εδώ να έχουμε την επίδραση της διατμητικής παραμόρφωσης του υλικού της μήτρας (ρητίνης), αντί της εφέλκυστικής παραμόρφωσης των ινών. Είναι επίσης πιθανόν η κάμψη των ινών να εμποδίζεται από την παρουσία (πλέξη) των εγκάρσια τοποθετημένων ινών με ασύμμετρο τρόπο και υπάρχει πρόωρη θραύση ή αποκόλληση τους ακόμη και στην περιοχή παραμορφώσεων όπου μετράμε το μέτρο ελαστικότητας.

6.4 Αντοχή

6.4.1 Φόρτιση κατά μήκος των κυρίων αξόνων του συνθέτου

Όπως ήταν αναμενόμενο, η αντοχή των δειγμάτων (Πίνακες 5.2 και 6.1) είναι μέγιστη όταν η φόρτιση γίνεται κατά μήκος των μισών τουλάχιστον ινών του συνθέτου (δείγματα f1, f2, f4, f2-II και f4-II). Αντίθετα με το μέτρο ελαστικότητας η αντοχή αυξάνει με τον αριθμό των φύλλων, για όλες τις στοιβάξεις που χρησιμοποιήσαμε. Η αντοχή δεν φαίνεται να επηρεάζεται από τον τύπο ύφανσης για τα υφάσματα που χρησιμοποιήθηκαν.

Η αντοχή των δειγμάτων που ήταν στοιβαγμένα κατά $\pm 90^\circ$ μπορεί να εκτιμηθεί θεωρητικά από τις εξισώσεις 3.28 - 3.30. Για να κάνουμε μια εκτίμηση της αποτελεσματικότητας της ύφανσης/στοίβαξης χρησιμοποιούμε ξανά έναν συντελεστή διόρθωσης, η_t^* που πολλαπλασιάζεται με την αντοχή των ανθρακονημάτων. Για τα δεί-

γμματα f1, f2, f3, f2-II και f4-II :

$$\sigma_1^* = \sigma_2^* = 0.5\phi\eta_t^*\sigma_f^* + 0.5\sigma_m^* \left(1 - 2\sqrt{\frac{\phi}{\pi}}\right)$$

Για το δείγμα f2-45-0, στο οποίο η στοίβαξη των υφασμάτων ήταν σε γωνία 45° η εκτίμηση της αντοχής έγινε:

$$\sigma_{45/45}^* = \frac{3}{8}\phi\eta_t^*\sigma_f^*$$

Για την εκτίμηση της αντοχής σε φόρτιση σε 45° ως προς τις ίνες χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση:

$$\sigma_{45^\circ}^* = \frac{0.5\phi\eta_t^*\sigma_f^*\tau_{12}^*}{\sqrt{(0.5\phi\eta_t^*\sigma_f^*)^2 + (0.5 * \sigma_m^* \left(1 - 2\sqrt{\phi/\pi}\right))^2}}$$

Οι θεωρητικές προβλέψεις για την αντοχή των συνθέτων πολυστρωτων υλικών, δηλαδή για $\eta_t = 1$ στις παραπάνω εξισώσεις, παρατίθενται στον Πίνακα 6.2. Αντίθετα με τις προβλέψεις για το μέτρο ελαστικότητας οι τιμές για την αντοχή είναι πολύ κοντά στις μετρημένες για τα παρόντα υλικά, τουλάχιστον αν η αντοχή του νήματος τεθεί ως τιμή αναφοράς. Έτσι η αποτελεσματικότητα των υφασμάτων στην ενίσχυση της αντοχής του συνθέτου έχει τιμές γύρω στο 1 και μερικές φορές πάνω από 1. Το τελευταίο πρέπει να εννοείται ως μια ένδειξη ότι τα νήματα προστατεύονται από τη μήτρα από πρόωρη θραύση και συνεισφέρουν στην αντοχή περισσότερο ως ανεξάρτητες ίνες παρά ως νήμα.

6.4.2 Φόρτιση σε 45° ως προς τον κύριο άξονα των συνθέτων

Η αντοχή των συνθέτων σε φορτίσεις υπό γωνία 45° είναι μικρότερη από την αντίστοιχη υπό φόρτιση κατά μήκος των κυρίων αξόνων των ινών του υλικού. Αλλά η μείωση είναι λιγότερη, σχετικά με την μείωση του μέτρου ελαστικότητας. Σε εφελκυσμό, σε κατεύθυνση 45°, η αντοχή του υλικού είναι περίπου το 1/3 της αντοχής του στην κατεύθυνση του στημονιού ενός φύλλου.

Η αλλαγή της κλίσης της καμπύλης $\sigma(\varepsilon)$ σε παραμόρφωση 1.5 - 2.0 % (σχήματα 5.3, 5.5 και 5.10) είναι ένδειξη αστοχίας κάποιου συστατικού του συνθέτου. Είναι πολύ πιθανόν ότι σε αυτή την παραμόρφωση αρχίζει να γίνεται αποκόλληση των στοιβαγμένων φύλλων (delamination). Αυτό μπορεί να φανεί και από φωτογραφίες των αντίστοιχων δοκιμών που τραβήχτηκαν μετά από τη θραύση τους (Σχ. 6.1)

Παρ' όλα αυτά, η σύγκριση των τιμών της αντοχής (μέγιστη τιμή της τάσης, αρκετά μακριά από την προηγούμενη αλλαγή κλίσης της καμπύλης $\sigma(\varepsilon)$) σε αυτή την περίπτωση με τις θεωρητικές (Πίνακες 6.1 και 6.2) δείχνει ότι και σε φόρτιση σε 45° η αποτελεσματικότητα του υφάσματος είναι περίπου 100%.



Σχήμα 6.1: Σύγκριση του τρόπου θραύσης δοκιμίων τα οποία φορτίστηκαν εφελκυστικά σε γωνία 0° (a) ή 45° (b: υφασμένο, c: μονοαξονικό) ως προς τον άξονα των ινών τους.

Κεφάλαιο 7

Εφαρμογή του υλικού στον ιστό ιστιοφόρου για τη στήριξη ενός εξαρτήματος

Ως εφαρμογή της παραπάνω μελέτης κατασκευάσθηκε και εφαρμόσθηκε ένας ιμάντας πρόσδεσης από σύνθετο υλικό εποξειδικής ρητίνης με ανθρακοϋφάσμα για την στερέωση ενός εξαρτήματος αρματωσιάς στον ιστό (κατάρτι) ενός ιστιοφόρου σκάφους. Το εξάρτημα (boom vang) συγκρατεί μερικώς το μεγάλο πανί (μεγίστη) του ιστιοφόρου στην βάση του ιστού του και εκτιμάται ότι μπορεί να δεχθεί δυνάμεις μικρότερες από 3000 N. Ο ιμάντας ήταν πλάτους 30 mm. Η περίμετρος του ιστού στη θέση πρόσδεσης, άρα και η περίμετρος του (συνεχούς) ιμάντα, είναι 500 mm.

Η κατασκευή του ιμάντα έγινε in situ με τύλιγμα μιας συνεχούς λωρίδας ανθρακοϋφάσματος γύρω από τον ιστό και το εξάρτημα, (2) εμποτισμό του τυλιγμένου ανθρακοϋφάσματος με εποξειδική ρητίνη με τη βοήθεια πινέλου, και (3) σκλήρυνση για 24 h σε θερμοκρασία 20 °C.

Ο τελικός ιμάντας περιείχε 8 παράλληλα φύλλα, με περιεκτικότητα ~40% κ.ο. ίνες άνθρακα. Το στημόνι τοποθετήθηκε στην κατεύθυνση του μήκους του ιμάντα (περιμετρικά στον ιστό), όπου αναμένεται να είναι και η κύρια κατεύθυνση φόρτισης. Το πάχος του ιμάντα ήταν 1.6 mm. Άρα η διατομή κάθετα προς το φορτίο ήταν $48 \times 10^{-6} \text{ m}^2$.

Το μέτρο ελαστικότητας του υλικού εκτιμήθηκε από προεκβολή των δεδομένων στα προηγούμενα κεφάλαια στα 20 GPa. Η αντοχή του θεωρήθηκε ότι είναι 430 MPa.

Με τις ιδιότητες αυτές του υλικού, η κατασκευή υπολογίζεται ότι θα μπορεί να αντέξει φορτίο (δύναμη) μέχρι 20 kN (2 τόνους βάρους) και υπερκαλύπτει τις απαιτήσεις. Η επιμήκυνση του ιμάντα τότε θα είναι μικρότερη από 2% και θα έχει προκαλέσει απομάκρυνση του εξαρτήματος από τον ιστό (gap) μικρότερη από 5 mm. Υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας η απομάκρυνση αυτή θα είναι μικρότερη από 1 mm.

Καθώς το φορτίο είναι μονοαξονικό, μια καλύτερη λύση μπορεί να ήταν το να χρησιμοποιηθεί μονοαξονικό φύλλο αντί για υφασμένο. Έτσι θα μειωνόταν η μάζα του προϊόντος διότι, όπως φάνηκε από την παρούσα μελέτη, οι κάθετες ίνες του υφαιδιού

δεν συνεισφέρουν στην αντοχή και στην ακαμψία του συνθέτου όταν φορτίζεται στην κατεύθυνση του στημονιού. Η επιλογή του υφασμένου φύλλου έγινε για να μειωθεί λίγο η ακαμψία στην κατεύθυνση του φορτίου, να αυξηθεί η ολκιμότητα και να μειωθεί η ψαθυρότητα του υλικού. Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 6.1 η αντοχή είναι λιγότερο ευαίσθητη στην ύφανση από ότι η ακαμψία. Το κόστος, όμως, ήταν η μικρή αύξηση του βάρους του προϊόντος. Παρ' όλα αυτά το τελικό βάρος του ιμάντα ήταν το 1/3 του βάρους του κολάρου από ανοξείδωτο χάλυβα που αντικατέστησε. Ένα άλλο πλεονέκτημα της εφαρμογής αυτής είναι ότι με αυτό το σύνθετο υλικό αυτό αποφεύγεται η ηλεκτρολυτική διάβρωση του αλουμινίου στην διεπαφή.

Κεφάλαιο 8

Συμπεράσματα και προτάσεις

8.1 Συμπεράσματα

Από τα αποτελέσματα των πειραμάτων και των μετρήσεων που έγιναν στην παρούσα διπλωματική εργασία μπορούν να εξαχθούν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

1. Τα πολύστρωτα σύνθετα υλικά με ανθρακοϋφάσματα και πολυμερική ρητίνη μπορούν να αντικαταστήσουν ασφαλώς μεταλλικά εξαρτήματα. Τα πλεονεκτήματα περιλαμβάνουν το χαμηλότερο βάρος του εξαρτήματος, την ευκολότερη παρασκευή και εφαρμογή του και την αποφυγή της διάβρωσης.
2. Όταν χρησιμοποιείται η τεχνική της έγχυσης ρητίνης υπό κενό και υφασμένα ή μονοαξονικά φύλλα ανθρακονήματος, η περιεκτικότητα του συνθέτου σε ίνες άνθρακα αυξάνει με τον αριθμό των στοιβαγμένων φύλλων.
3. Η ακαμψία και η αντοχή του ανθρακονήματος έχουν χαμηλότερες τιμές από αυτές των ινών άνθρακα
4. Όσον αφορά την ακαμψία (μέτρο ελαστικότητας) του συνθέτου πολύστρωτου υλικού:
 - (α) Η αποδοτικότητα των υφασμάτων μειώνεται με την αύξηση του αριθμού τους στο συστρωμάτωμα.
 - (β) Η αποδοτικότητα της στοίβαξης σε 45° είναι ίδια με αυτή σε 0° , με επιπλέον όφελος την μεγαλύτερη ιστροπικότητα του τελικού υλικού.
 - (γ) Τα μονοαξονικά υφάσματα, ακόμα και όταν στοιβάζονται συμμετρικά και εναλλάξ με γωνίες 90° αποδίδουν λίγο καλύτερα από τα υφασμένα σε εφελκυσμό κατά μήκος ενός από τους δύο κύριους άξονές τους.
 - (δ) Όταν η φόρτιση γίνει σε γωνία 45° από τους άξονες των ινών, η αποδοτικότητα των υφασμάτων είναι πολύ χαμηλότερη από ό,τι προβλέπει η θεωρία. Για μεγαλύτερη απόδοση στην περίπτωση αυτή τα υφάσματα πρέπει να στοιβάζονται σε γωνία 45° μεταξύ τους.

- (ε) Ένας εμπειρικός κανόνας για το μέτρο ακαμψίας των πολύστρωτων συνθέτων υλικών που περιέχουν ανθρακοϋφάσματα στοιβαγμένα παράλληλα είναι ο εξής:

$$E = 0.5 \times x_w \times \phi \times E_{thread}$$

όπου x_w είναι το ποσοστό των ινών στο στημόνι.

5. Όσον αφορά την αντοχή:

- (α) Η αντοχή των συνθέτων υλικών που περιέχουν ανθρακοϋφάσματα είναι πολύ υψηλή. Οι πολύ υψηλές τιμές του λόγου αντοχής/πυκνότητα των υλικών αυτών τα καθιστά κατάλληλα για να αντικαταστήσουν μέταλλα σε εφαρμογές όπου το βάρος συμφέρει να ελαχιστοποιηθεί: στις μεταφορές, αθλητικά είδη κ.α.
- (β) Η αντοχή των υλικών αυτών μπορεί να εκτιμηθεί με απλά γεωμετρικά μοντέλα με αρκετή ακρίβεια. Αυτό διευκολύνει το σχεδιασμό του προϊόντος στο οποίο θα χρησιμοποιηθούν.
- (γ) Η αποτελεσματικότητα των υφασμάτων στην αντοχή του συνθέτου μπορεί να είναι μεγαλύτερη από αυτή των ανθρακονημάτων.

8.2 Προτάσεις για περαιτέρω μελέτη

Η παρούσα εργασία, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως βάση για επόμενες εργασίες, ώστε να μελετηθούν τα ακόλουθα:

- Επέκταση του θεωρητικού μοντέλου του Αντωνογιαννάκη [12] για γωνίες στοίβαξης και φόρτισης διαφορετικές από τους άξονες της ύφανσης (off axis loading). Αξιοποίηση των αποτελεσμάτων των πειραματικών μετρήσεων σε γωνία φόρτισης 45° ως προς τους άξονες των ινών.
- Επέκταση της ανάλυσης για άλλα είδη ύφανσης (twill ή/και satin).
- Ανάπτυξη ενός θεωρητικού μοντέλου για παραμορφώσεις κοντά στο όριο θραύσης και τον μηχανισμό της αστοχίας. Γι' αυτά μπορεί να γίνει αξιοποίηση των δεδομένων των δοκιμών εφελκυσμού της παρούσης.
- Πειραματική επικύρωση των θεωρητικών μοντέλων με περισσότερες σειρές πειραμάτων. Χρήση άλλων υλικών και γεωμετριών ύφανσης.
- Επεξήγηση της διαφοράς των μηχανικών ιδιοτήτων των ανθρακονημάτων από αυτές των ινών άνθρακα

Κεφάλαιο 9

Βιβλιογραφία

- [1] Ευθύμιος Καβελάκης, Σύνθετα υλικά με θερμοπλαστική μήτρα, Διπλωματική Διατριβή Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης, Γενικό Τμήμα, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2010
- [2] Αλέξανδρος Γκότσης, Τεχνολογία Πολυμερών, Σημειώσεις μαθήματος, Γενικό Τμήμα, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2008
- [3]. Κωνσταντίνος Σπυράκος, “Ενίσχυση Κατασκευών για Σεισμικά Φορτία”. ΤΕΕ, 2004
- [4] Shang Zhong Sheng and Suong Van Hoa, Three-Dimensional Micro-Mechanical Modelling of Woven Fabric Composites, J. Composite Materials, 2001
- [5] D. Hull and W. Clyne, An Introduction to Composite Materials, Cambridge University Press, 2003
- [6] Γιώργος Παπανικολάου και Διονύσης Μουζάκης, Σύνθετα Υλικά, Εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2007
- [7] Ανδρέας Δραμηλαράκης και Ιωάννης Αντωνογιαννάκης, Χρήση σύνθετων υλικών στην επισκευή κατασκευών, Πτυχιακή Εργασία, Τμήμα Πολιτικών Δομικών Έργων-ΤΕΙ Πειραιά, 2013
- [8] <http://www.fibermaxcomposites.com/shop/carbon-fiber-fabric-br-c160p-p-100081.html?cPath=36>
- [9] Ishikawa, T. and Chou, T. W., Stiffness and strength behavior of woven fabric composites. Journal of Materials Science, 1982, 17, 3211-3220.
- [10] Kabelka, J., Prediction of the thermal properties of fibre-resin composites. In: Developments in Reinforced Plastics-3, ed. Pritchard, G. Elsevier Applied Science Publishers, London, 1984, pp. 167-202.
- [11] Naik, N. K. and Shembekar, P. S., Elastic behavior of woven fabric composites: I-Lamina analysis. Journal of Composite Materials, 1992, 26(15), 2197-2255.
- [12] Α. Αντωνογιαννάκης, Μελέτη της επίδρασης της ύφανσης των ινών στις μηχανικές ιδιότητες ινοπλισμένων σύνθετων υλικών, Διπλωματική Διατριβή Μεταπτυ-

χιακού Διπλώματος Ειδίκευσης, Γενικό Τμήμα, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2013

[13] Jane Maria Faulstich de Paival, Sérgio MayerIII, Mirabel Cerqueira Rezende, Comparison of tensile strength of different carbon fabric reinforced epoxy composites, Materials Research, Vol. 9, No. 1, 83-89, 2006

[14] Karen Ka Yan Liu, Origins of shear strength of polymers and reinforced polymers, PhD dissertation, University of Toronto, 1997.

[15] Typical properties of PYROFIL Carbon fibers, Mitsubishis Rayon Co. Ltd, <https://www.mrc.co.jp/pyrofil/english/product/cf.html>

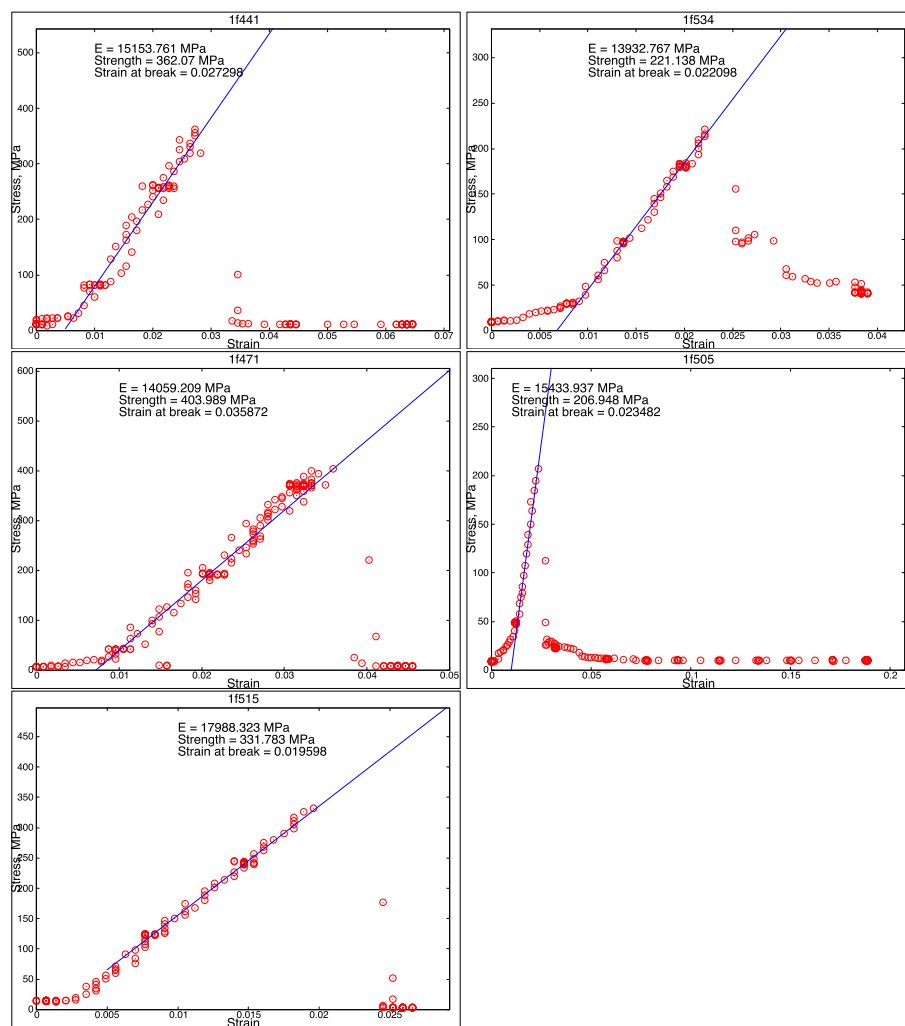
Παράρτημα Α

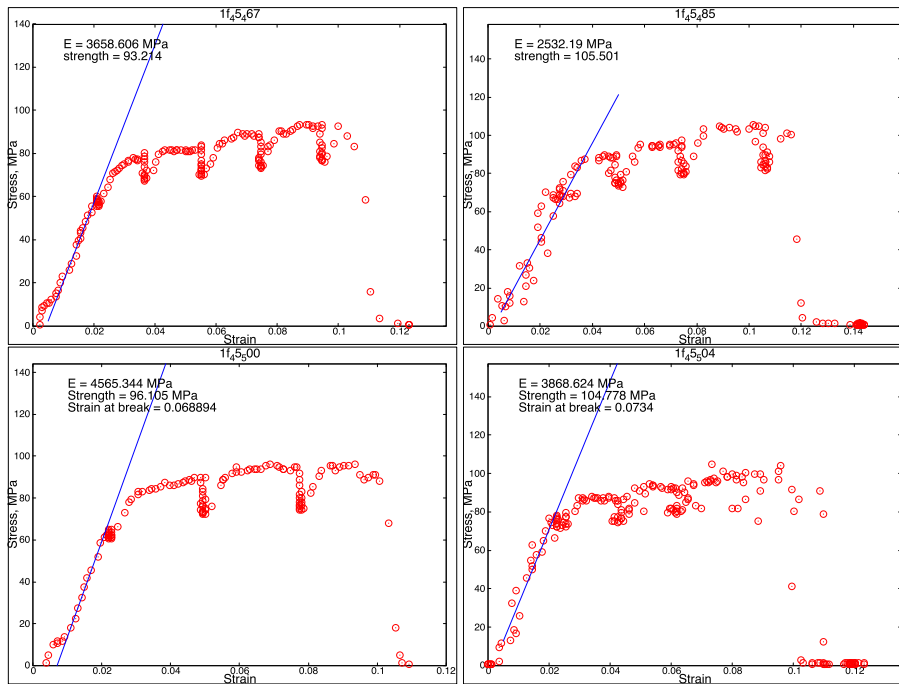
Διαγράμματα $\sigma - \varepsilon$ όλων των δοκιμίων

Στο παρόν παράρτημα παρουσιάζονται τα διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης όλων των (σχετικά) πετυχημένων μετρήσεων των δοκιμίων.

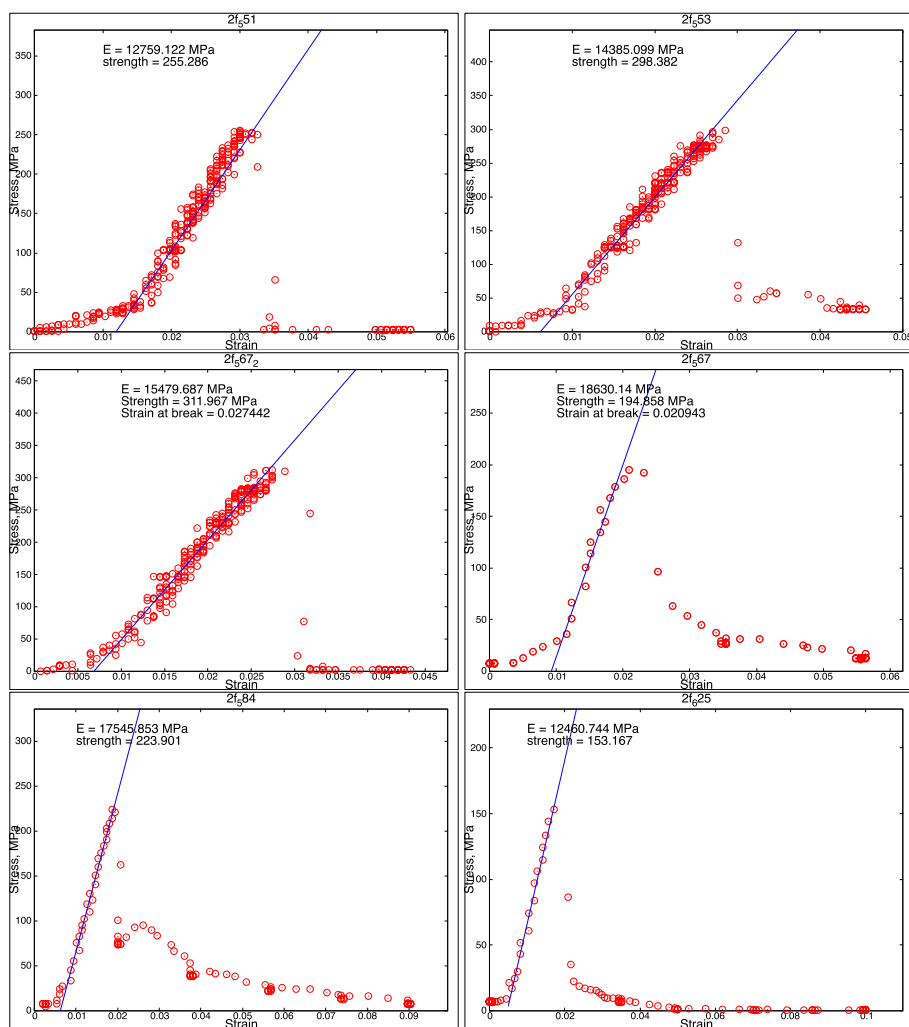
A.1 Υφασμένα φύλλα

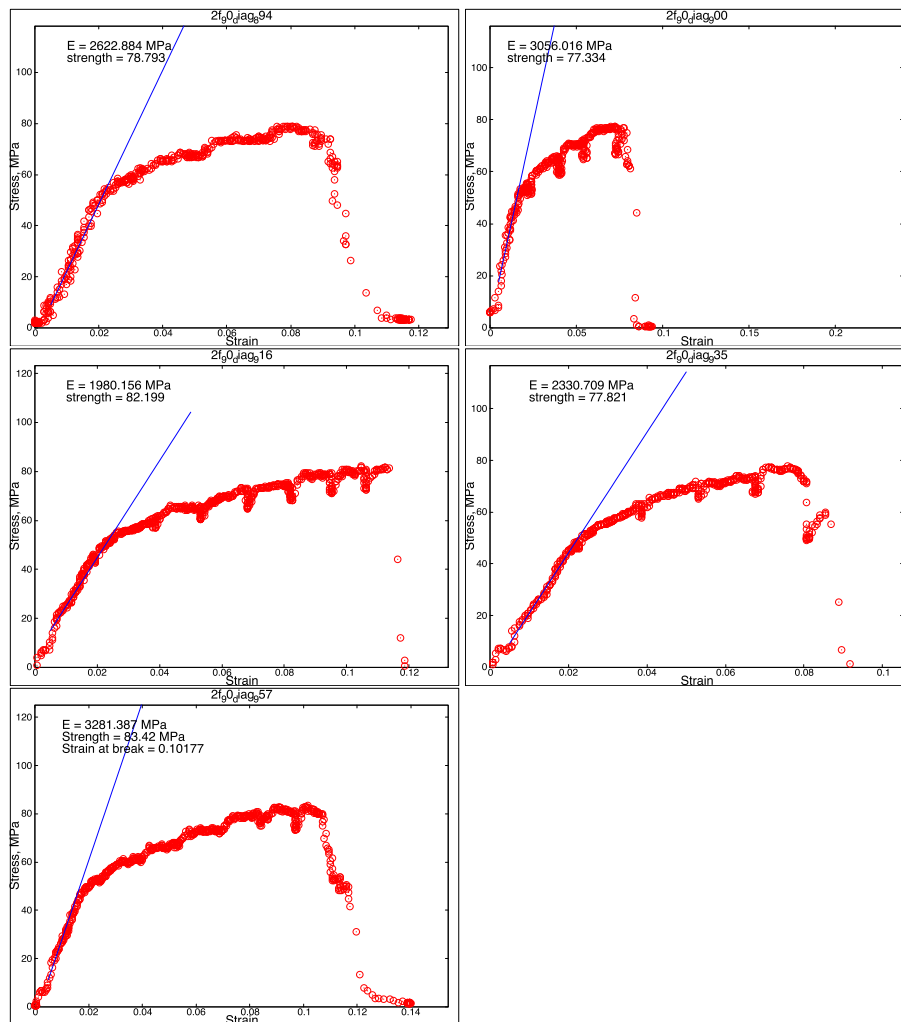
A.1.1 f1- Μονό υφασμένο φύλλο, εφελκυσμός στην κατεύθυνση του στημονιού



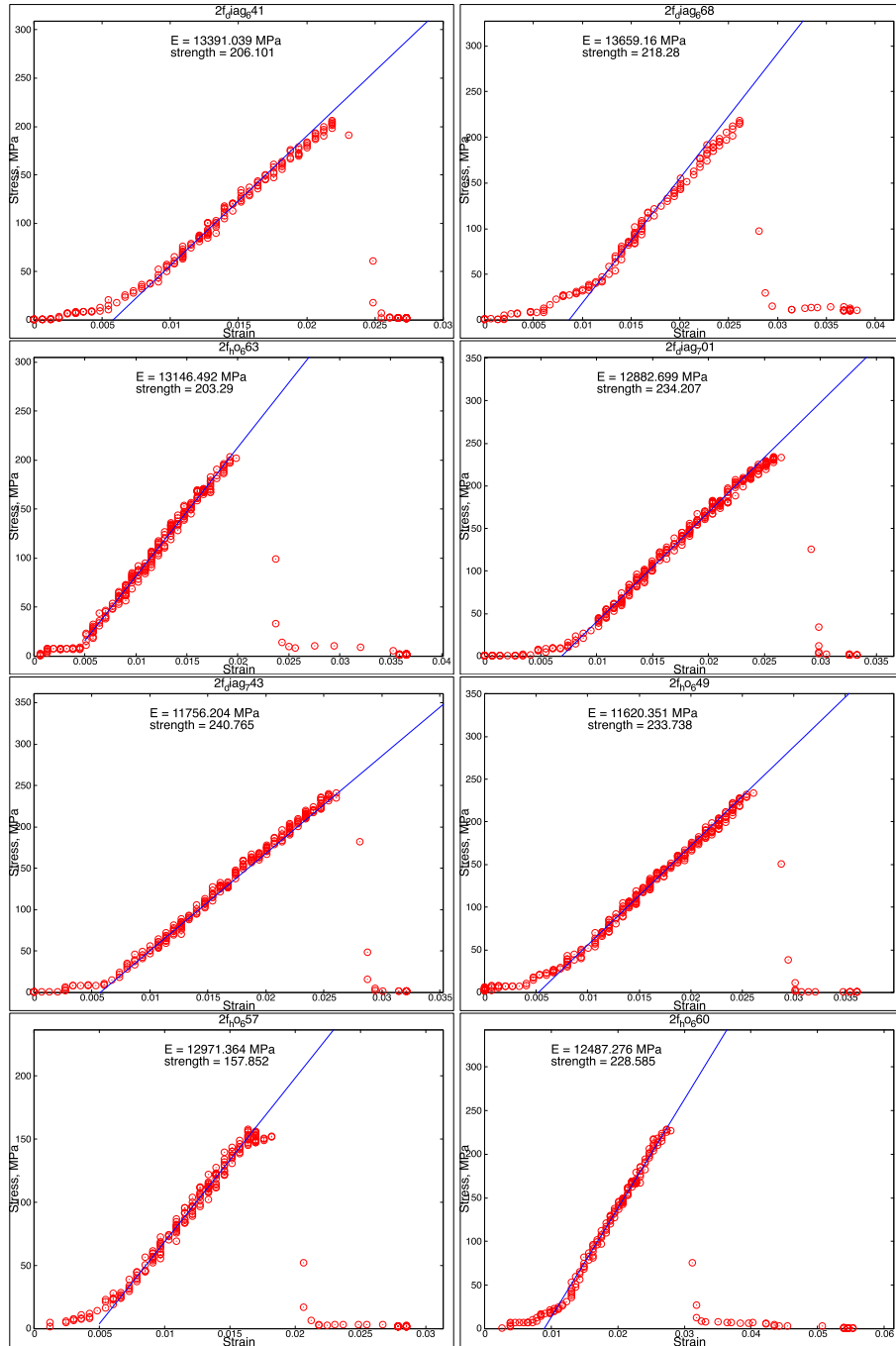
A.1.2 f1-45: Μονό υφασμένο φύλλο, εφελκυσμός σε 45°

A.1.3 f2 Διπλό υφασμένο φύλλο, εφελκυσμός στην κατεύθυνση του στημονιού

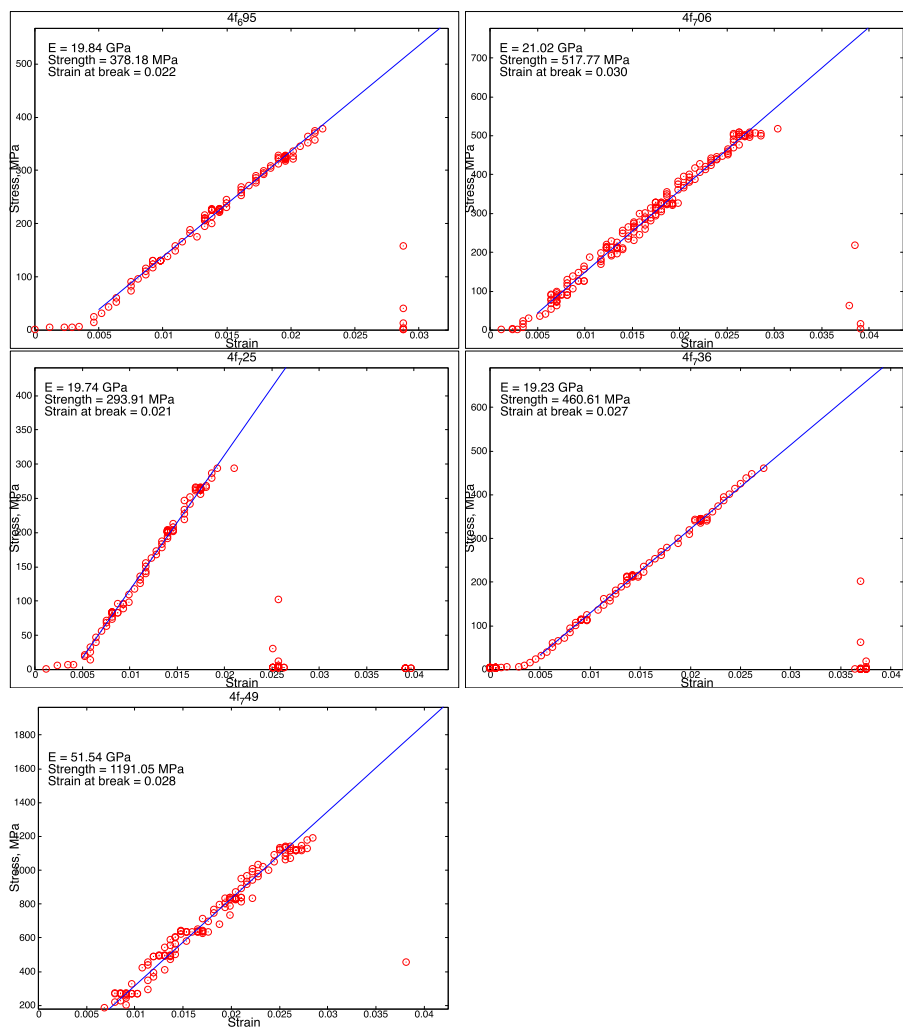


A.1.4 f2- Διπλό υφασμένο φύλλο, εφελκυσμός σε 45°

A.1.5 f2-45-0: Δύο υφασμένα φύλλα στοιβαγμένα σε γωνία 45° , εφελκυσμός στην κατεύθυνση του στημονιού

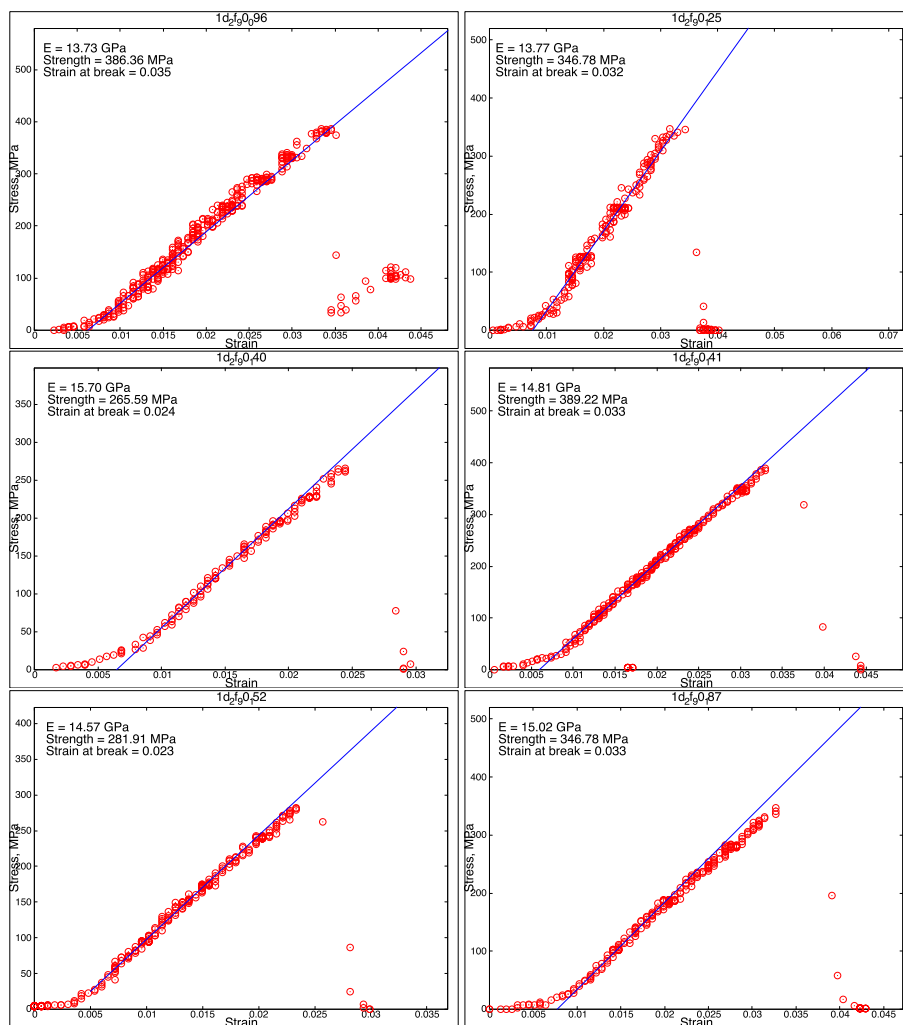


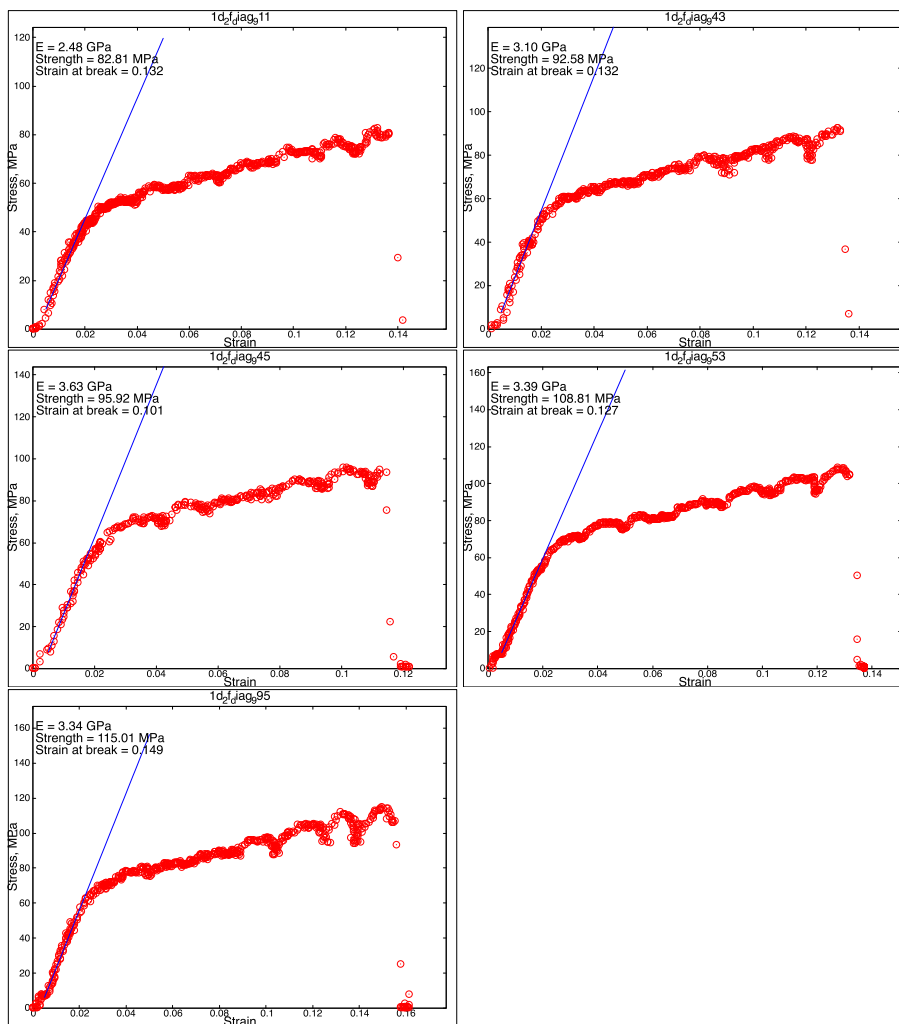
A.1.6 f4 Τετραπλό υφασμένο φύλλο, εφελκυσμός στην κατεύθυνση του στημονιού



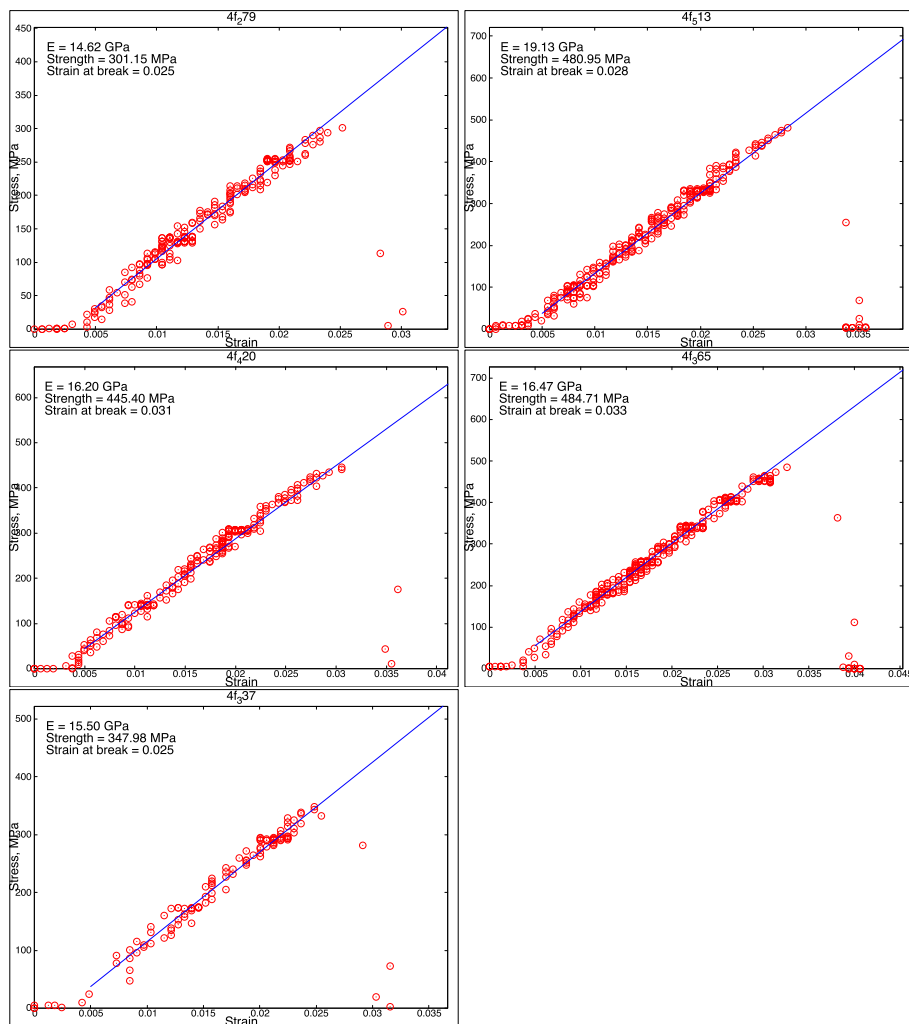
A.2 Μονοαξονικά φύλλα

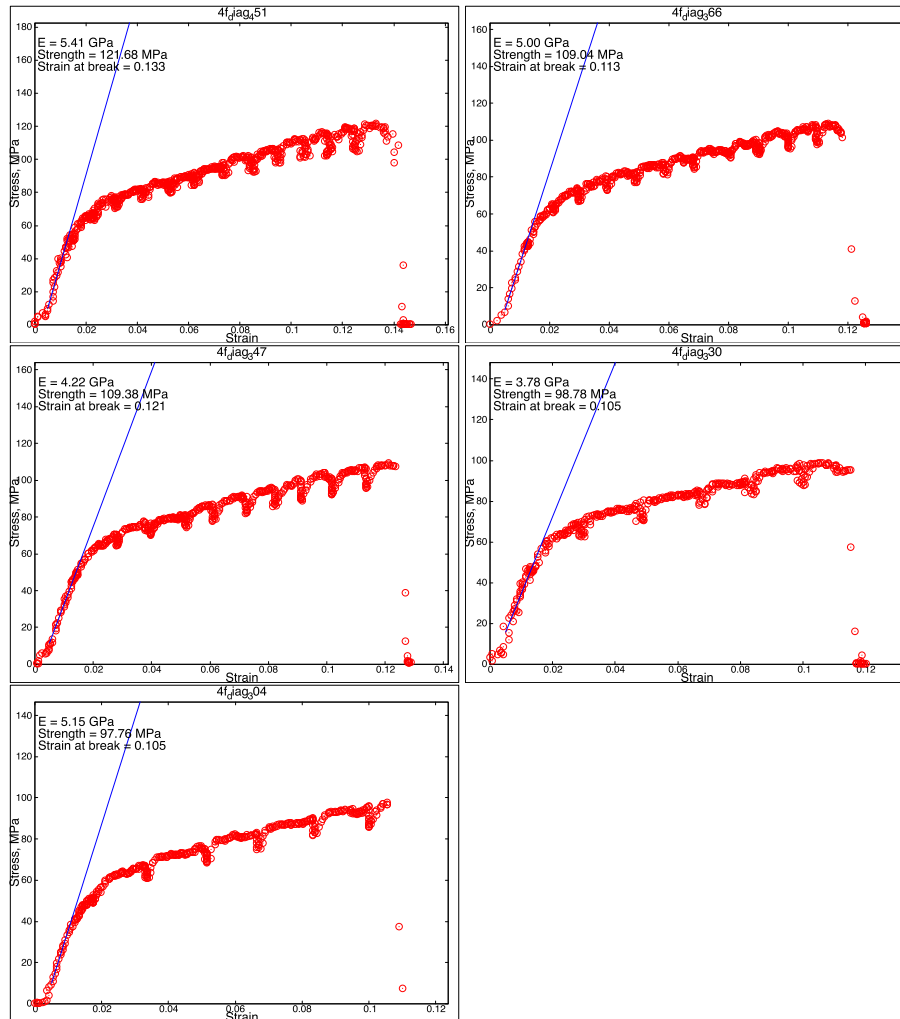
A.2.1 2f-90-II : 2 μονοαξονικά φύλλα στοιβαγμένα σε γωνία 90°, εφελκυσμός στην κατεύθυνση του άξονα του 1ου φύλλου



**A.2.2 2f-90-II : 2 μονοαξονικά φύλλα στοιβαγμένα σε γωνία 90°, εφελ-
κυσμός σε γωνία 45° ως προς τον άξονα του 1ου φύλλου**

A.2.3 4f-90-II : 4 μονοαξονικά φύλλα στοιβαγμένα σε γωνίες 90°, εφελκυσμός στην κατεύθυνση του άξονα του 1ου φύλλου



**A.2.4 4f-45-II : 4 μονοαξονικά φύλλα στοιβαγμένα σε γωνία 45°, εφελ-
κυσμός στην κατεύθυνση του άξονα του 1ου φύλλου**

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

1.1	Μηχανικές ιδιότητες-σύγκριση ρητινών [3].	11
3.1	Τυπικές τιμές αντοχής (MPa) μονοαξονικών στρώσεων ινωδών συνθέτων υλικών ($\phi \approx 0, 50$)	25
5.1	Κωδικοί δοκιμών και χαρακτηριστικά τους. Αναφέρεται το είδος και ο αριθμός φύλλων που χρησιμοποιήθηκαν και το κλάμα μάζας των ινών άνθρακα. Ο προσανατολισμός αναφέρεται ως προς την κατεύθυνση των αξόνων των ινών. Όπου δεν αναφέρεται, ο εφελκυσμός έγινε κατά μήκος των ινών.	42
5.2	Πειραματικά αποτελέσματα: μέσες τιμές σειρών δοκιμών	43
6.1	Τιμές του μέτρου ελαστικότητας (GPa) και της αντοχής που δίνονται από τα απλά μοντέλα 6.1 – 6.2 και 3.28 – 3.30 (με $\eta_t = \eta_t^* = 1$) συγκρινόμενα με τα πειραματικά.	53
6.2	Τιμές του συντελεστή διόρθωσης του μέτρου ελαστικότητας (GPa) και της αντοχής στα μοντέλα 6.2 – 6.4 και 3.28 – 3.30 για να ταιριάζουν με τις πειραματικές μετρήσεις.	54

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

1.1	Σχηματική αναπαράσταση δημιουργίας σύνθετου υλικού [7].	5
1.2	Γενικοί τύποι σύνθετων υλικών ινών [3].	6
1.3	Τύποι σύνθετων υλικών ινών	7
1.4	Ίνες υάλου [7].	8
1.5	Ίνες άνθρακα [7].	9
1.6	Ίνες πολυαραμιδίου (Kevlar) [7]	10
2.1	Διάκριση των συνθέτων υλικών ως προς τον τρόπο ενίσχυσής τους .	14
2.2	Απλή πλέξη (plain weave)[8]	16
2.3	Διαγώνια πλέξη (twill) [6]	16
2.4	Πλέξη Satin [6]	17
2.5	Υφάσματα ινών όπου φαίνεται ότι τα νήματα κρατούνται στη θέση τους με πολύ λεπτά “yarns” από ίνες γυαλιού ή πολυεστερικές ίνες[6]	18
2.6	Καλαθωτή πλέξη (basketweave) [6].	18
2.7	Υφασμα από ίνες άνθρακα [6].	19
2.8	Τύποι ινωδών ενισχύσεων συνθέτων υλικών [6]	20
3.1	Δείγμα σε εφελκυσμό	22
3.2	Τυπικό διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης	22
3.3	Το μοντέλο «κυμάτωση της ίνας» [9]	27
3.4	Η δομή του μοναδιαίου ημι-κελιού	28
3.5	Μερικοί όγκοι νημάτων και μήτρας	29
3.6	Τα τοπικά και το ολικό σύστημα συντεταγμένων.	30
3.7	Διατάξεις ελάχιστης και μέγιστης πυκνότητας μοναδιαίων κελιών . .	31
4.1	Η διεργασία αναρρόφησης ρητίνης υπό κενό που χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή των συνθέτων υλικών	35
4.2	Λεπτομέρεια του Σχήματος 4.1	36
4.3	Ένα φύλλο (lamina) συνθέτου υλικού από ανθρακοϋφασμα απλής πλέξης και εποξειδική ρητίνη.	36

4.4	Ένα φύλλο (lamina) συνθέτου υλικού αποτελούμενο από δύο στρώσεις μονοαξονικά προσανατολισμένων ανθρακονημάτων, στοιβαγμένες σε γωνία 90° μεταξύ τους, σε εποξειδική ρητίνη. Προσέξτε τα δοκίμια για εφελκυσμό που έχουν κοπεί έτσι ώστε ο κύριος άξονάς τους (και η κατεύθυνση επιβολής αργότερα του εφελκυστικού φορτίου) να είναι σε γωνία 45° ως προς τις κατευθύνσεις των ινών άνθρακα.	36
4.5	Διάταξη αντλίας κενού - μανόμετρου. Φαίνεται και ο υαλοπίνακας που χρησιμοποιήθηκε ως καλούπι για τα σύνθετα υλικά.	37
4.6	Διάταξη μηχανής εφελκυσμού - ηλεκτρονικού υπολογιστή	38
5.1	Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης ανθρακονήματος TS30S 3k.	43
5.2	Μονό υφασμένο φύλλο. Ο εφελκυσμός γίνεται κατά μήκος του άξονα των ινών του στημονιού	44
5.3	Μονό υφασμένο φύλλο. Ο εφελκυσμός γίνεται σε γωνία 45° ως προς τον άξονα των ινών του στημονιού	45
5.4	Διπλό υφασμένο φύλλο (στοίβαξη σε 0°). Ο εφελκυσμός γίνεται κατά μήκος του άξονα των ινών του στημονιού.	46
5.5	Δύο υφασμένα φύλλα στοιβαγμένα σε γωνία 0° . Ο εφελκυσμός γίνεται κατά μήκος του άξονα των ινών του στημονιού.	46
5.6	Δύο υφασμένα φύλλα στοιβαγμένα σε γωνία 45° φορτισμένα στην κατεύθυνση του στημονιού	47
5.7	Τετραπλό ύφασμα, στοίβαξη σε γωνία 0° , εφελκυσμός στην κατεύθυνση του στημονιού	48
5.8	2 μονοαξονικά φύλλα στοιβαγμένα σε γωνία 90° , εφελκυσμός στην κατεύθυνση των ινών του 1ου φύλλου	49
5.9	Τέσσερα μονοαξονικά φύλλα στοιβαγμένα σε γωνίες 90° , εφελκυσμός στην κατεύθυνση του άξονα του 1ου φύλλου	49
5.10	Τέσσερα μονοαξονικά φύλλα στοιβαγμένα σε $\pm 90^\circ$, εφελκυσμός σε γωνία 45° ως προς τον άξονα του 1ου φύλλου	50
6.1	Σύγκριση του τρόπου θραύσης δοκιμών τα οποία φορτίστηκαν εφελκυστικά σε γωνία 0° (a) ή 45° (b: υφασμένο, c: μονοαξονικό) ως προς τον άξονα των ινών τους.	57

Vitae



Ο Γιάννης Αλεξίου γεννήθηκε στις 29 Αυγούστου του 1989 στη Χαλκίδα Ευβοίας όπου ολοκλήρωσε τη πρωτοβάθμια και δευτεροβάθμια εκπαίδευση του. Εισήχθη με τη διαδικασία των πανελληνίων εξετάσεων το 2008 στη Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης. Το 2011 έκανε την πρακτική του στο Δρακόσπηλο Ευβοίας σε λατομείο αδρανών υλικών. Από τον Οκτώβριο, 2015 μέχρι τον Μάιο 2016 εργάστηκε για την παρούσα Διπλωματική Εργασία.