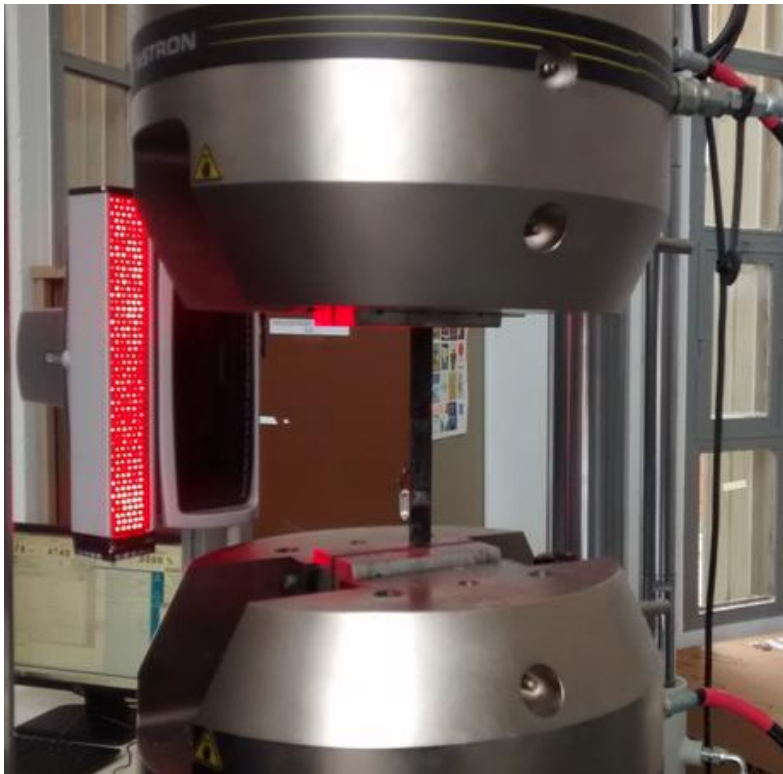


ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ



ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ: ΔΙΔΑΧΟΣ ΧΡΗΣΤΟΣ (Α.Μ. 6181)
ΖΑΦΕΙΡΟΠΟΥΛΟΣ ΛΕΩΝΙΔΑΣ (Α.Μ. 6205)

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΓΙΑΝΝΟΠΟΥΛΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ
ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟΣ ΣΥΝΕΡΓΑΤΗΣ

ΠΑΤΡΑ 2015

Υπεύθυνη Δήλωση Σπουδαστών: Οι κάτωθι υπογεγραμμένοι σπουδαστές έχουν επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνουν υπεύθυνα ότι είναι συγγραφείς αυτής της Πτυχιακής Εργασίας, έχουν δε αναφέρει στην Βιβλιογραφία τους όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποίησαν και έλαβαν ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνουν επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχουν ενσωματώσει στην εργασία τους προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχουν πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχουν αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσης.

Ο σπουδαστής

Ο σπουδαστής

(Ονοματεπώνυμο)

(Ονοματεπώνυμο)

.....

.....

(Υπογραφή)

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρόν τεύχος αποτελεί την Πτυχιακή Εργασία που εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Δυτικής Ελλάδας και αναφέρεται στη κατασκευή και μελέτη σε εφελκυσμό δοκιμίων σύνθετων υλικών, από τα εξής υλικά (ανθρακόνημα, αραμίδιο και υαλόνημα). Τα συγκεκριμένα σύνθετα υλικά κάνουν την εμφάνιση τους και αντικαθιστούν τα μεταλλικά σε διάφορες κατασκευές και προϊόντα διότι παρέχουν χαμηλό βάρος και υψηλή μηχανική αντοχή.

Η κατασκευή των δοκιμίων έγινε στο εργαστήριο της Τεχνολογίας Μηχανολογικών Υλικών (Τ.Μ.Υ.) του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Δυτικής Ελλάδας καθώς έγινε και χρήση του Μηχανολογικού εργαστηρίου για την επεξεργασία των δοκιμίων. Το πείραμα του εφελκυσμού έλαβε χώρα στο εργαστήριο Αντοχής Υλικών στο μηχάνημα INSTRON 8802 κατά τυποποίηση ASTM D3039.

Ευχαριστώ θερμά τον Επιβλέποντα Καθηγητή μου κ. Γ Γιαννόπουλο Γεώργιο, Επιστημονικό συνεργάτη του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μου προσέφερε για την πραγματοποίηση της εργασίας. Ακόμα εκφράζω θερμές ευχαριστίες στους καθηγητές κ. Τσίρκα Σωτήρη και κ. Τσινόπουλο Στέφανο για την παραχώρηση των εργαστηριακών χώρων καθώς και τους συναδέλφους που εκπονούσαν την πρακτική τους άσκηση στα αντίστοιχα εργαστήρια για την βοήθεια και το ευχάριστο περιβάλλον.

Διδάχος Χρήστος
Ζαφειρόπουλος Λεωνίδας
Φεβρουάριος 2015

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα Πτυχιακή Εργασία αναφέρεται στην κατασκευή τυποποιημένων δοκιμών εφελκυσμού κατά ASTM D3039 για ανθρακόνημα (Carbon Fiber), υαλόνημα (Fiberglass) και αραμίδιο (Kevlar). Συγκεκριμένα γίνεται αναφορά στα υλικά, τις ιδιότητες και τον τρόπο παρασκευής τους. Έπειτα αναλύεται ο τρόπος κατασκευής των σύνθετων (ύφασμα και εποξικό σύστημα) καθώς και η μέθοδος επεξεργασίας τους. Τέλος λαμβάνει χώρα το πείραμα του εφελκυσμού και η ανάλυση των αποτελεσμάτων.

Η ανάπτυξη του θέματος γίνεται σε επτά κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στην παραγωγή ινών άνθρακα, στη δομή του γραφίτικού άνθρακα και στα είδη υφασμάτων ανθρακονήματος. Επίσης αναφέρονται οι ιδιότητες των ινών του άνθρακα και τέλος γίνεται αναφορά κάποιες από τις εφαρμογές των ανθρακονημάτων.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στην παραγωγή ινών γυαλιού και στις ιδιότητες των ινών του γυαλιού. Ακόμα αναφέρονται οι χρήσεις σύνθετων υλικών ενισχυμένων με ίνες γυαλιού και τέλος αναφέρονται τα είδη υφασμάτων γυαλιού.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναπτύσσονται κάποιες γενικές πληροφορίες για το αραμίδιο και για την παραγωγή αυτού. Ακολουθούν οι ιδιότητες και διάφορες εφαρμογές του αραμιδίου.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναπτύσσονται κάποιες γενικές πληροφορίες για τα πολυμερή και στη συνέχεια αναφερόμαστε στις ρητίνες και ειδικότερα στις εποξειδικές ρητίνες η οποία είναι και το σύστημα που χρησιμοποιούμε για την παρασκευή των δοκιμών.

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στη μέθοδο τυποποίησης εφελκυσμού των δοκιμών, στις αποκλίσεις κατά τη διαδικασία και στα μικρόμετρα. Επίσης αναφέρεται στη μηχανή δοκιμών και στις μεθόδους δειγματοληψίας.

Στο έκτο κεφάλαιο αρχικά γίνεται αναφορά στον εξοπλισμό που χρειάστηκε για την παρασκευής των δοκιμών και στη συνέχεια αναφέρεται η διαδικασία παρασκευής των δοκιμών καθώς και οι τυποποιημένες διαστάσεις των δοκιμών.

Στο έβδομο κεφάλαιο αρχικά γίνεται αναφορά στη προετοιμασία της μηχανής εφελκυσμού στη συνέχεια αναφέρονται τα πειραματικά αποτελέσματα και για τα τρία υλικά οι μεταξύ τους σχέσεις και τα συμπεράσματα που προκύπτουν.

Τα σπουδαιότερα συμπεράσματα που προκύπτουν από την παρούσα εργασία είναι η τεχνογνωσία που αποκτάς για τη παρασκευή, τη συμπεριφορά και τις ιδιαιτερότητες του ανθρακονήματος, αραμιδίου και υαλοϋφάσματος. Ακόμα η πειραματική διαδικασία του εφελκυσμού φανερώνει την ψαθυρή συμπεριφορά των δοκιμών καθώς και την ιδιαίτερη φύση των ανισότροπων σύνθετων υλικών.

Π Ε Ρ Ι Ε Χ Ο Μ Ε Ν Α

ΠΡΟΛΟΓΟΣ ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1. Σύνθετα υλικά	1
2. Είδη ινών	1
3. Ταξινόμηση των σύνθετων υλικών	2
4. Επιλογή ινών και μήτρας στην κατασκευή ινώδη σύνθετων	3
5. Μέθοδος μορφοποίησης σύνθετων υλικών	4
6. Πλεονεκτήματα σύνθετων υλικών	11
7. Μειονεκτήματα σύνθετων υλικών	12
8. Εφαρμογές σύνθετων υλικών	12

1. ΑΝΘΡΑΚΟΝΗΜΑ

1.1 Γενικά	13
1.2 Ίνες άνθρακα	13
1.3 Παραγωγή ινών άνθρακα	13
1.3.1 Δομή γραφιτικού άνθρακα	14
1.3.2 Δομή επιφανειακά κατεργασμένων ινών άνθρακα	15
1.4 Παραγωγή υφασμάτων από ίνες άνθρακα	16
1.4.1 Απλή ύφανση	16
1.4.2 Διαγώνια ύφανση	17
1.4.3 Satin ύφανση	18
1.4.4 Πολυαξονικό επίπεδο ύφασμα	19
1.5 Ιδιότητες ινών άνθρακα	20
1.6 Εφαρμογές ανθρακονημάτων	23

2. ΥΑΛΟΝΗΜΑ

2.1 Γενικά	27
2.2 Παραγωγή ινών γυαλιού	30
2.3 Ιδιότητες σύνθετων υλικών από ινοπλισμένα πολυμερή	31
2.4 Διεπιφάνεια μήτρας ενίσχυσης	31
2.5 Χρήσεις σύνθετων υλικών ενισχυμένων με ίνες γυαλιού GRP (GLASS REINFORCEMENT PLASTICS)	32
2.6 Παραγωγή υφασμάτων από ίνες γυαλιού	34
2.6.1 Απλή πλέξη (Plain Weave)	35
2.6.2 Διαγώνια πλέξη (Twill)	35
2.6.3 Πλέξη σατέν (Satin)	36
2.6.4 Καλαθωτή πλέξη (Basket Weave)	36
2.6.5 Πλέξη Leno	37
2.6.6 Πλέξη Mock Leno	38
2.6.7 Πλέξη 3 αξόνων	38
2.6.8 Τρισδιάστατη πλέξη	39

3. ΑΡΑΜΙΔΙΟ	
3.1 Γενικά και παραγωγή	41
3.2 Ιδιότητες και εφαρμογές	42
3.3 Παραγωγή υφασμάτων από ίνες αραμιδίου	43
4. ΠΟΛΥΜΕΡΗ	
4.1 Γενικά	45
4.2 Ρητίνες	45
4.2.1 Εποξειδικές ρητίνες	46
5. ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΣ ΚΑΤΑ ASTM	
5.1 Γενικά	49
5.2 Μέθοδος δοκιμών	49
5.3 Αποκλίσεις κατά τη διαδικασία	50
5.4 Μικρόμετρο	51
5.5 Μηχανή δοκιμών	52
5.5.1 Αρπάγες	52
5.5.2 Ευθυγράμμιση συστήματος	53
5.5.3 Καταγραφή παραμόρφωσης	53
5.5.4 Κλιματισμός χώρου	54
5.6 Δοκίμια και δειγματοληψία	54
5.6.1 Γεωμετρία	55
5.6.1.1 Επιθέματα	55
5.6.1.2 Μήκος, Πλάτος και Πάχος	56
5.6.1.3 Ασφάλιση στις αρπάγες και χρήση επιθεμάτων	56
5.6.1.4 Επιθέματα τριβής	57
5.6.1.5 Μήκος επικολλημένου επιθέματος	57
5.6.1.6 Μέσο επικόλλησης επιθεμάτων	57
5.6.2 Προετοιμασία δοκιμίων	58
5.6.2.1 Ταχύτητα δοκιμής	59
5.6.2.2 Περιβάλλον δοκιμής	60
5.6.2.3 Εισαγωγή δοκιμίου	61
5.6.2.4 Καταγραφή δεδομένων	62
5.6.2.5 Τύπος αστοχίας	62
5.6.3 Υπολογισμοί	63
5.6.4 Μέτρο ελαστικότητας σε εφελκυσμό	63
5.6.4.1 Αξονική τάση	64
5.6.5 Λόγος Poisson	65
5.6.6 Θραύση και αντοχή	66
5.6.6.1 Αστοχία σε αξονική φόρτιση	66
5.6.6.2 Αστοχία σε εγκάρσια εφελκυστική παραμόρφωση	68
6. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	
6.1 Γενικά	69
6.2 Εξοπλισμός για την παρασκευή δοκιμίων	69
6.2.1 Υφάσματα	69
6.2.2 Ρητίνες	72
6.2.3 Πνευματικό σύστημα	72

6.2.4	Καλούπι	74
6.2.5	Αναλώσιμα	77
6.2.6	Εξοπλισμός υγιεινής	77
6.3	Διαδικασία για την κατασκευή των δοκιμίων	79
6.4	Διαστάσεις δοκιμίων	85

7. ΠΕΙΡΑΜΑ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ

7.1	Γενικά	87
7.2	Προετοιμασία μηχανής εφελκυσμού	88
7.3	Πειραματικά αποτελέσματα αραμιδίου (KEVLAR)	93
7.4	Πειραματικά αποτελέσματα ανθρακονήματος (CARBON FIBER)	98
7.5	Πειραματικά αποτελέσματα υαλονήματος (FIBERGLASS)	103
7.6	Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων	109
7.7	Συμπεράσματα	110

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

ASTM = Αμερικάνικη Εταιρεία Δοκιμών και Υλικών
UTS = Βέλτιστη αντοχή.
SMC = Συνεχής μορφοποίηση ελάσματος.
CFPR = Ανθρακόνημα ενισχυμένο με πλαστικό.
GRP = Σύνθετα υλικά ενισχυμένα με ίνες γυαλιού

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1. ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

Σύνθετα είναι τα υλικά τα οποία μακροσκοπικά αποτελούνται από δύο ή περισσότερα χημικά ευδιάκριτα συστατικά μέρη που έχουν μια συγκεκριμένη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ τους. Τεχνολογικά, τα πιο σπουδαία σύνθετα υλικά είναι εκείνα στα οποία η διασπαρμένη φάση έχει τη μορφή της ίνας. Οι στόχοι σχεδιασμού τέτοιων υλικών αναφέρονται στην υψηλή αντοχή και δυσκαμψία τους, με αποτέλεσμα τα ινώδη σύνθετα υλικά να παρουσιάζουν εξαιρετικά υψηλές τιμές ειδικής αντοχής (εφελκυστική αντοχή/ειδικό βάρος) και ειδικού μέτρου ελαστικότητας (μέτρο ελαστικότητας/ειδικό βάρος). Τα υλικά αυτά έχουν παραχθεί με χρήση χαμηλής πυκνότητας ινών και μητρικών υλικών. Τα σύνθετα υλικά με ίνες μπορούν να είναι είτε ισότροπα είτε ανισότροπα. Επίσης, σε αντίθεση με τα ενισχυμένα λόγω διασποράς σύνθετα, η αντοχή τους αυξάνεται τόσο σε θερμοκρασία δωματίου όσο και σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Ένα σπουδαίο χαρακτηριστικό των περισσότερων υλικών, ιδιαίτερα των ψαθυρών, είναι ότι οι ίνες μικρής διαμέτρου είναι πολύ πιο ανθεκτικές από το αντίστοιχο υλικό από το οποίο αποτελούνται. Η πιθανότητα της παρουσίας μιας επιφανειακής ατέλειας, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε θραύση, ελαχιστοποιείται με την ελάττωση του όγκου του υλικού και αυτό το χαρακτηριστικό χρησιμοποιείται προ όφελος των ινωδών συνθέτων υλικών. Επίσης, τα υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται για ίνες ενίσχυσης έχουν μεγάλες εφελκυστικές αντοχές. Τα συνηθέστερα υλικά που χρησιμοποιούνται ως ίνες είναι ο άνθρακας, το γυαλί και το αραμίδιο. Υπάρχουν όμως και άλλων ειδών ίνες (οι ίνες είναι στη μορφή συνεχών νημάτων), πλεγμένες ή ραμμένες μονοδιάστατα ή δισδιάστατα.

2. ΕΙΔΗ ΙΝΩΝ

Ανθρακονήματα: Οι ίνες ανθρακονήματος χωρίζονται σε κατηγορίες υψηλής αντοχής, μεσαίου μέτρου ελαστικότητας, υψηλού μέτρου ελαστικότητας και πολύ υψηλού μέτρου ελαστικότητας. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε κατασκευές υψηλής αντοχής και στιβαρότητας όπου τα πλεονεκτήματα του χαμηλού βάρους υπερκαλύπτουν το επιπλέον κόστος υλικού.

Υαλονήματα: Τα πλέον χρησιμοποιούμενα είναι τα E-glass, S-glass και τα Quartz. Χρησιμοποιούνται σε ειδικές εφαρμογές όπως η βαλλιστική, όπου οι διηλεκτρικές ιδιότητες είναι κρίσιμες. Το υαλόνημα είναι χαμηλότερου κόστους του ανθρακονήματος αλλά βαρύτερο και φτωχότερο μηχανικών ιδιοτήτων σε αντοχή και στιβαρότητα.

Αραμίδιο: Γνωστό από τα εμπορικά ονόματα Kevlar, Tecnona ή Twaron το αραμίδιο συνήθως χρησιμοποιείται όπου αναμένεται ζημιά από κρούση. Το αραμίδιο έχει την ιδιότητα να απορροφά και να διαχέει ενέργεια όπως επίσης και την ιδιότητα να αντιστέκεται στην απόξεση αλλά υποφέρει από μικρή αντοχή σε θλίψη.

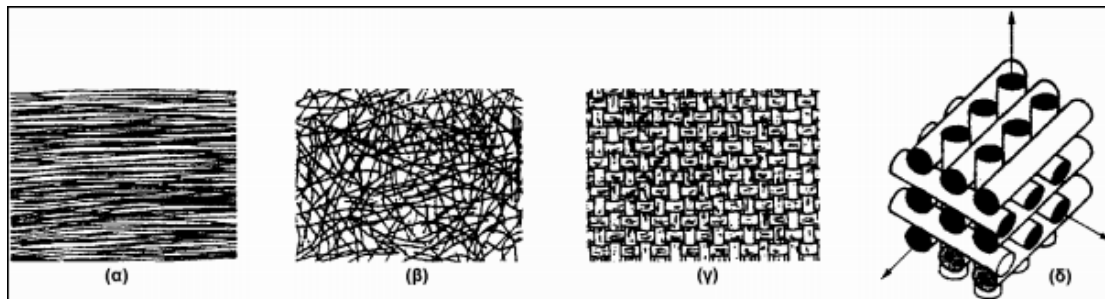
Dyneema: Το Dyneema είναι ένα πολύ υψηλού μοριακού βάρους πολυαιθυλένιο. Χρησιμοποιείται κυρίως για εφαρμογές που απαιτούν αντοχή και χαμηλή πυκνότητα. Παρόλα αυτά έχει μικρή αντοχή στην θερμοκρασία καθώς και μικρή αντοχή σε θλίψη όπως το αραμίδιο.

Zylon: Οι ίνες του διαθέτουν ανώτερη αντοχή σε εφελκυσμό από τις ίνες αραμιδίου. Έχουν επίσης εξαιρετική αντοχή σε κρούση και υψηλή αντοχή στην θερμοκρασία. Οι αδυναμίες τους περιλαμβάνουν φτωχή αντοχή σε θλίψη και φτωχή αντοχή σε υπέρυθη ακτινοβολία.

3. ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Ανάλογα με τη μορφή του συστατικού ενίσχυσης, τα σύνθετα κατατάσσονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες. Τα ινώδη σύνθετα (fibrous composites) στα οποία γίνεται η ενίσχυση με εμπότισμό των ινών της μήτρας. Τα στρωματικά σύνθετα (laminated composites) τα οποία παράγονται με επαλληλία των στρώσεων του υλικού καθώς και τα κοκκώδη σύνθετα (particulate composites) στα οποία η ενίσχυση επιτυγχάνεται με τυχαία και ακανόνιστη τοποθέτηση σωματιδίων στο υλικό της μήτρας.

Ακόμα τα ινώδη σύνθετα υλικά διακρίνονται περαιτέρω ανάλογα με τον προσανατολισμό και τη διάταξη των ινών μέσα στη μήτρα. Σύμφωνα με την ταξινόμηση αυτή τα ινώδη σύνθετα διακρίνονται σε μονοδιευθυντικά σύνθετα, στα οποία οι ίνες έχουν όλες την ίδια διεύθυνση. Τα πολυδιευθυντικά σύνθετα στα οποία η κατεύθυνση των ινών είναι είτε τυχαία είτε προσανατολισμένη (σύνθετα με ίνες σε πλέξη ή τρισσορθογώνια ύφανση). (Σχήμα 1.1)



Σχήμα 1.1: Τύποι διάταξης των ινών: (α) μονοδιευθυντικές ίνες, (β) ίνες τυχαίου προσανατολισμού, (γ) ίνες με τη πλέξη ύφανσης, (δ) ίνες με τρισσορθογώνια πλέξη.

Μία επιπλέον διάκριση των ινωδών συνθέτων στηρίζεται στο λόγο μήκους προς διάμετρο, (A/D) των ινών, οι οποίες διακρίνονται: Σε συνεχείς ή μεγάλου μήκους ίνες (continuous fibers), όταν είναι $(A/D) \geq 100$. Σε ασυνεχείς ή κοντές ίνες (discontinuous fibers), όταν είναι $(A/D) < 100$, οι οποίες λόγω του μικρού τους μήκους δεν χρησιμοποιούνται ως ενίσχυση σε μια διεύθυνση αλλά βρίσκουν εφαρμογή με τη μορφή πλέγματος τυχαίας διεύθυνσης ινών και τα νηματίδια ή τριχίτες (whiskers) με $D < 1 \mu\text{m}$ και $A \cong 100 \mu\text{m}$ (πρόκειται για λεπτούς μονοκρυστάλλους κεραμικού υλικού).

4. ΕΠΙΛΟΓΗ ΙΝΩΝ ΚΑΙ ΜΗΤΡΑΣ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΙΝΩΔΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ

Κατά την επιλογή των υλικών ενίσχυσης και μήτρας, κατά το σχεδιασμό ενός σύνθετου υλικού, είναι αναγκαίο να λαμβάνουμε υπόψη και άλλες παραμέτρους όπως: η διάμετρος, το μήκος, η κατ' όγκο περιεκτικότητα των ινών στο σύνθετο υλικό, η ευθυγράμμιση και χωρική διάταξη των ινών εντός του υλικού της μήτρας και η συμβατότητα μεταξύ τους. Όλες αυτές οι ιδιότητες προσδιορίζουν και τις τελικές ιδιότητες του ινώδους σύνθετου υλικού.

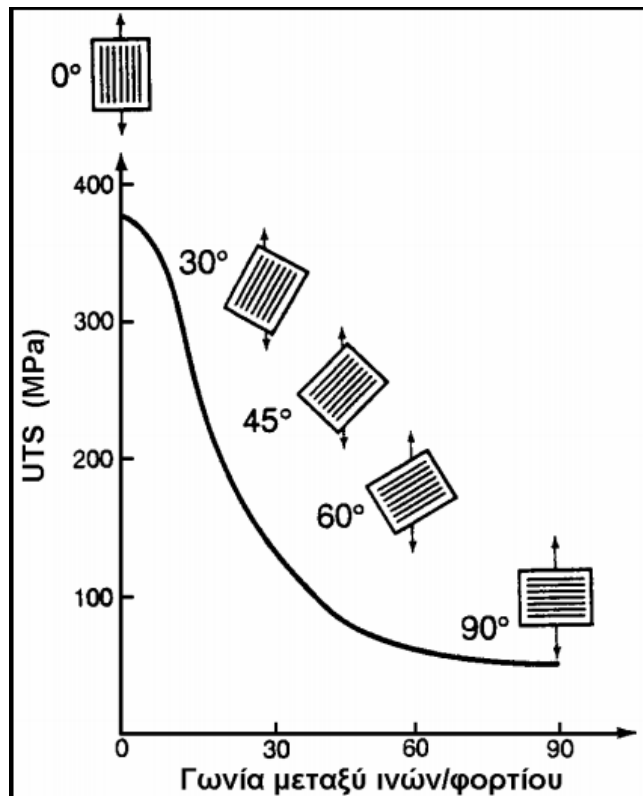
Βασική γεωμετρική παράμετρος είναι ο συντελεστής σχήματος της ίνας (s) (aspect ratio) που είναι ο λόγος του μήκους (A) προς την ακτίνα (r) των ινών και αποτελεί κριτήριο για το χαρακτηρισμό των ινών ως συνεχών ή ασυνεχών. Οι πρώτες προσδίδουν στο σύνθετο μεγαλύτερη αντοχή από τις δεύτερες. Γενικά, η αντοχή των ινών αυξάνεται με αύξηση του μήκους και μείωση της διαμέτρου τους. Στις ασυνεχείς ίνες υπάρχει ένα κρίσιμο μήκος (A_c), για μια δεδομένη διάμετρο ίνας (d), που ορίζεται από τη παρακάτω σχέση:

$$l_c = \frac{\sigma_f \cdot d}{2 \cdot \tau} \quad (1.1)$$

Όπου σ_f η αντοχή της ίνας σε εφελκυσμό και τ η διατμητική τάση στη διεπιφάνεια μήτρας-ίνας. Αν το μήκος της ίνας είναι μικρότερο του κρίσιμου μήκους l_c , η ενίσχυση που προσφέρει στο σύνθετο είναι πολύ μικρή, ενώ αν είναι μεγαλύτερο του ($>15 \cdot l_c$), η ίνα συμπεριφέρεται ως συνεχής. Η αντοχή και η στιβαρότητα ενός σύνθετου υλικού, αυξάνονται, με αύξηση της κατ' όγκο αναλογίας των περιεχόμενων ινών. Για ποσοστά υψηλότερα του 80%, τίθενται προβλήματα στην κατασκευή του σύνθετου, αφού οι ίνες δεν μπορούν να καλυφθούν πλήρως από το υλικό της μήτρας. Πολλές φορές, για την καλύτερη ενίσχυση της μήτρας δεν χρησιμοποιείται ένας μόνο τύπος ινών, αλλά μίγμα δύο ή περισσότερων τύπων, γνωστά και ως υβριδικά σύνθετα (hybrid composites).

Μελετώντας το προσανατολισμό των ινών οι συνεχείς, μονοδιευθυντικές ίνες παρουσιάζουν ισχυρή ανισοτροπία και η μηχανική τους αντοχή εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη διεύθυνση επιβολής του φορτίου. Ίνες διαφόρων προσανατολισμών είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν, ώστε η προσφερόμενη ενίσχυση του σύνθετου να είναι όσο το δυνατόν ισότροπη.

Από το παρακάτω (Σχήμα 1.2) συνάγεται ότι για σύνθετο υλικό με μονοδιευθυντικές ίνες, η βέλτιστη στιβαρότητα (μέτρο της οποίας είναι το μέτρο ελαστικότητας, E) και η βέλτιστη αντοχή, (UTS) επιτυγχάνονται εάν η εφαρμοζόμενη τάση είναι πάντοτε παράλληλη προς τον προσανατολισμό των ινών. Συνήθως, ένα σύνθετο υλικό δεν είναι μονοστρωματικό, αλλά πολυστρωματικό. Όταν οι ίνες κάθε στρώσης έχουν τον ίδιο προσανατολισμό, το σύνθετο συμπεριφέρεται ως ανισότροπο ενώ, όταν η ενίσχυση μονοδιευθυντικών ινών βρίσκεται υπό τη μορφή διαδοχικών στρώσεων διαφορετικού προσανατολισμού, το σύνθετο αποκτά ισότροπη συμπεριφορά.



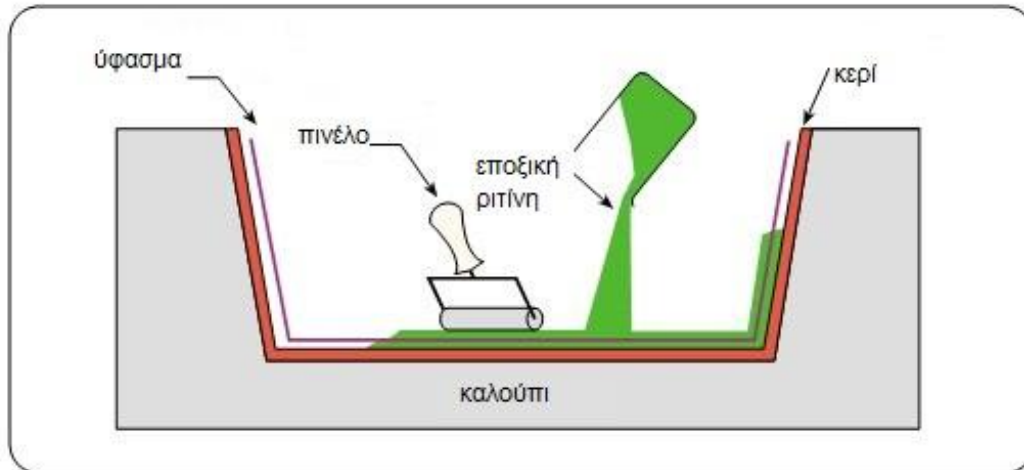
Σχήμα 1.2: Επίδραση του προσανατολισμού των ινών στην αντοχή σε εφελκυσμό συνθέτου υλικού εποξειδικής μήτρας με ίνες E-γυαλιού.

Τέλος η καλή συνάφεια μήτρας-ινών είναι πολύ σημαντική για την καλή λειτουργία του συνθέτου. Η διεπιφάνεια μήτρας-ινών, ορίζεται ως η κοινή επιφάνεια μεταξύ των δύο συστατικών υλικών, καθώς και η περιοχή στα σύνορα αυτής της επιφάνειας. Οι αναπτυσσόμενοι δεσμοί στη διεπιφάνεια μήτρας-ινών πρέπει να είναι αρκετά ισχυροί, ώστε να εξασφαλίζεται η μεταφορά των τάσεων μεταξύ των δύο συστατικών του σύνθετου. Η κακή συνάφεια έχει ως αποτέλεσμα την εκρίζωση (pull out) των ινών από τη μήτρα, που οδηγεί σε ταχύτερη αστοχία του υλικού. Γι' αυτό το λόγο, κατά το σχεδιασμό του σύνθετου, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι συντελεστές θερμικής διαστολής μήτρας και ινών και η αναγκαιότητα επικάλυψης των ινών με κάποιο συνδετικό υλικό. Συγκεκριμένα οι ίνες γυαλιού επενδύονται με ουσίες που εξασφαλίζουν τη συνάφεια με τη μήτρα και την αντίσταση του συνθέτου στην υγρασία. Ενώ οι ίνες άνθρακα επικαλύπτονται με οργανικές ουσίες, για αύξηση της συνάφειάς τους με τη μήτρα ή με Ni, όταν χρησιμοποιούνται με μεταλλικές μήτρες (Ag, Al).

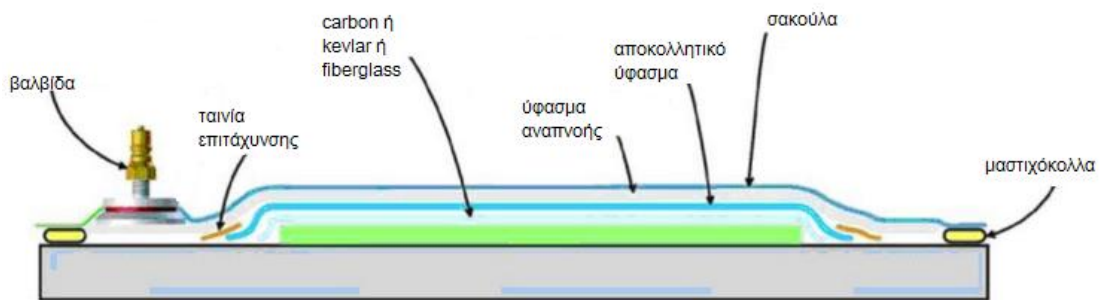
5. ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Η μορφοποίηση ινωδών συνθέτων υλικών περιλαμβάνει συνήθως τα ακόλουθα τρία στάδια. Την παραγωγή των ινών, την διάταξη των ινών σε ιστό, πλέγμα ή πακέτα (yarn, tow, roving), όπου οι μεμονωμένες ίνες ομαδοποιούνται κατάλληλα ανά 100-100.000 και τέλος η εισαγωγή των ινών στη μήτρα. Με βάση το υλικό της μήτρας, οι μέθοδοι μορφοποίησης ινωδών συνθέτων υλικών κατατάσσονται στις εξής κατηγορίες: Πρώτη κατηγορία τα σύνθετα οργανικής μήτρας τα οποία διαχωρίζονται σε ασυνεχής

μορφοποίησης και παράγονται με χειροποίητη στρώση (hand lay-up) ή χύτευση σε θάλαμο πίεσης (pressure bag) είτε με χύτευση σε διαιρετό καλούπι (matched die-moulding) και τα συνεχής μορφοποίησης σύνθετα τα οποία παράγονται με περιέλιξη νημάτων (filament winding) ή με συνεχής μορφοποίηση ελασμάτων (sheet moulding process, SMC) είτε μορφοποιούνται με εμβάπτιση (pultrusion) (Σχήματα 1.3, 1.4, 1.5, 1.6, 1.7, 1.8, 1.9, 1.10) και (Εικόνες 1.1, 1.2).



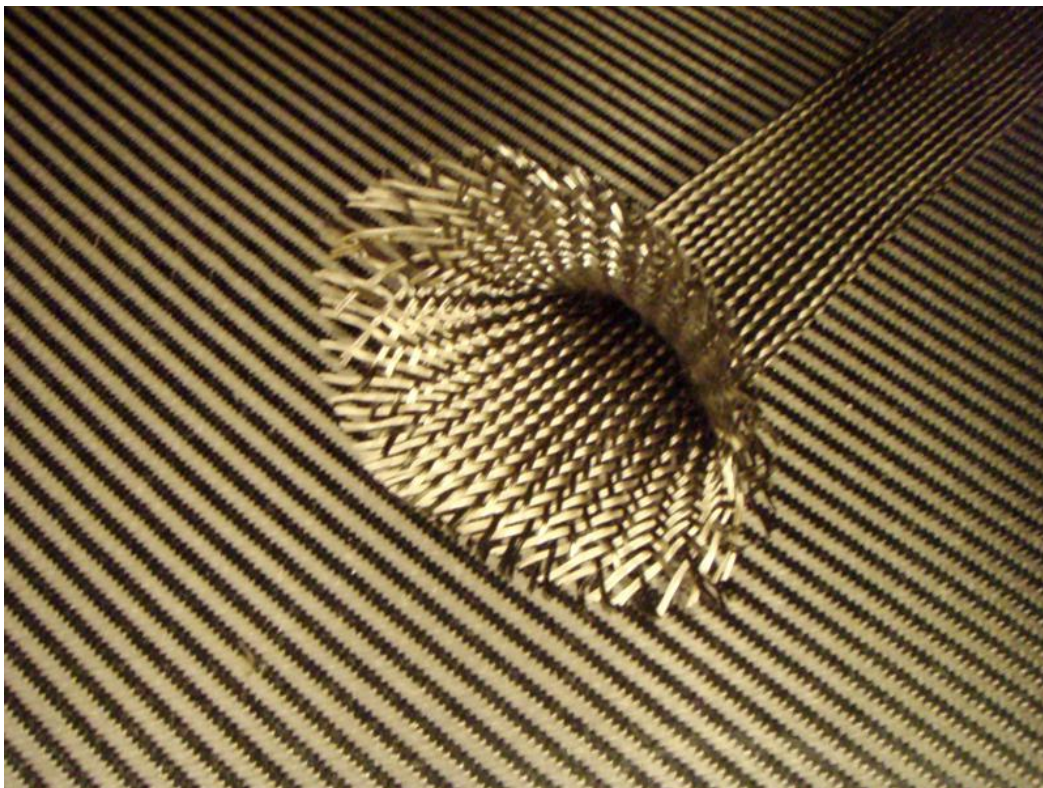
Σχήμα 1.3: Στρώση με το χέρι.(Απλή τεχνική, αλλά αργή και επίπονη. Πλέγματα ινών τοποθετούνται κατά στρώσεις σε καλούπι. Η ρητίνη (μαζί με τους καταλύτες και επιταχυντές) απλώνεται στις ίνες (με έγχυση ή επάλειψη ή ψεκασμό). Ακολουθεί συμπίεση με ρολό προς τη μείωση πορώδους και εξασφάλιση καλής συνάφειας ινών μήτρας. Η πλάκα συνθέτου υποβάλλεται σε ξήρανση.)



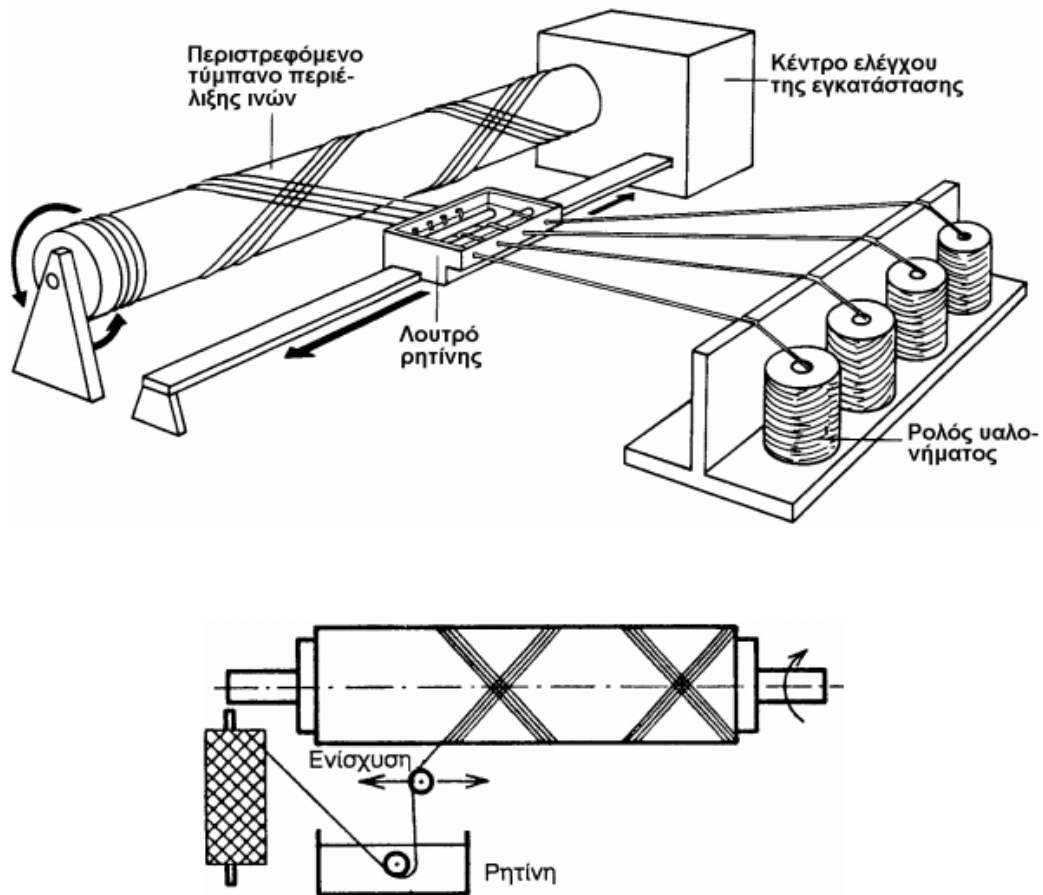
Σχήμα 1.4: Χύτευση σε θάλαμο υποπίεσης. Το μονωμένο περιβάλλον απομονώνει τον αέρα και την υγρασία επιτρέποντας σε ύφασμα και εποξική ρητίνη να πολυμεριστούν με ομοιογένεια.



Εικόνα 1.1: Διαιρετό καλούπι, από σκελετό ποδηλάτου. Το ύφασμα ανθρακονήματος τοποθετείται με το χέρι στο αρσενικό και το θηλυκό καλούπι, κλείνει και ακολουθεί η διαδικασία παραγωγής του.

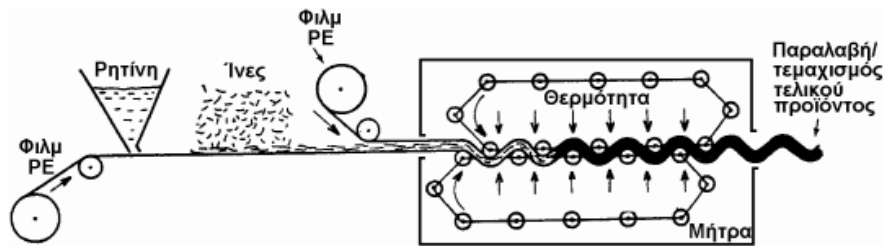
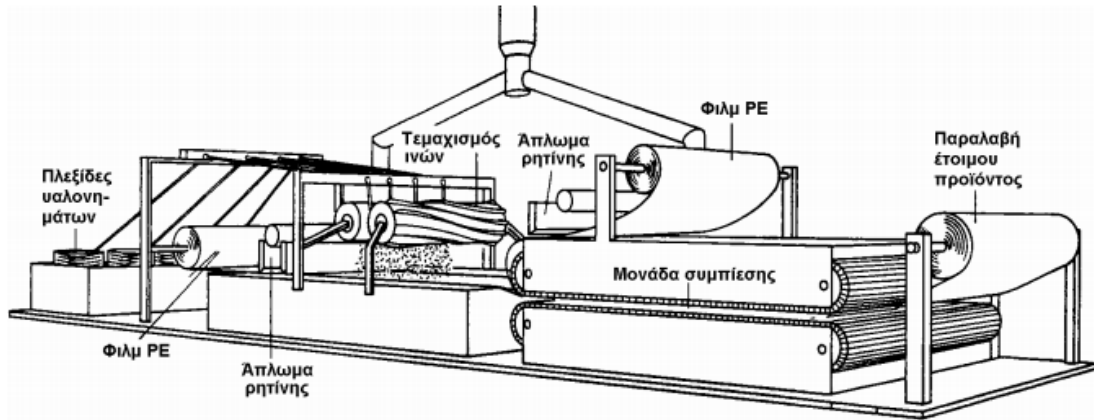


Εικόνα 1.2: Σωληνωτό ανθρακοϋφασμα.



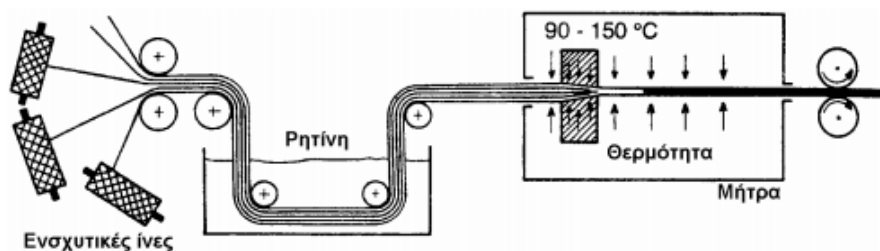
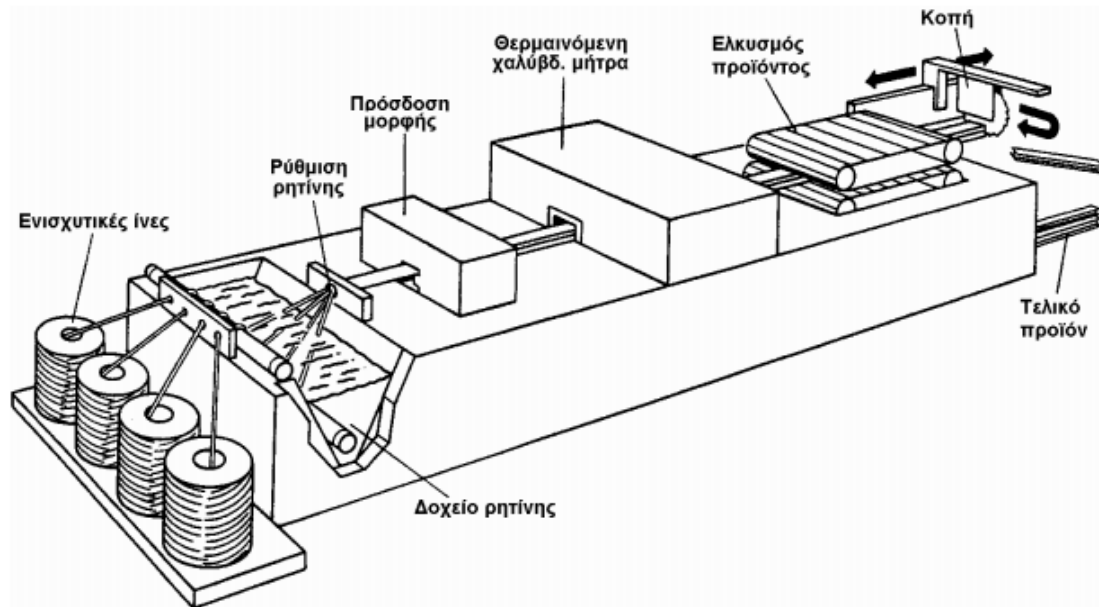
Σχήμα 1.5: Συνεχής μορφοποίηση σύνθετου με περιέλιξη νήματος.

Η τεχνική αυτή εφαρμόζεται κυρίως στην παραγωγή κοίλων κυλίνδρων, υψηλών προδιαγραφών. Οι ίνες εμβαπτίζονται αρχικά σε λουτρό ρητίνης και στη συνέχεια περιτυλίσσονται σε καλούπι επιθυμητού σχήματος. Ο εμποτισμός της στρώσης σε ρητίνη μπορεί να γίνεται ταυτόχρονα ή να ακολουθεί. Το προϊόν που προκύπτει ξηραίνεται στον αέρα ή σε κλίβανο. Ο ισχυρός προσανατολισμός των ινών δίνει κελύφη με υψηλή μηχανική αντοχή. Εφαρμόζεται κυρίως στη κατασκευή δεξαμενών καυσίμου και χημικών αγωγών υψηλής πίεσης.



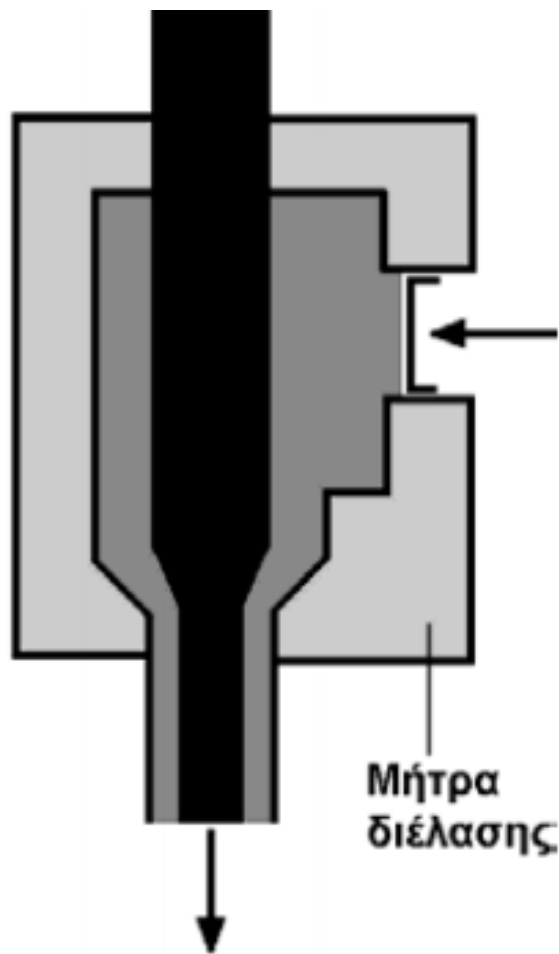
Σχήμα 1.6: Συνεχής μορφοποίηση ελάσματος (sheet moulding process, SMC)

Πρόκειται για μια νέα σχετικά τεχνική, με πολλές εφαρμογές στην αυτοκινητοβιομηχανία. Συνεχείς ίνες γυαλιού τεμαχίζονται σε ίνες μήκους (5 cm) και αποτίθενται απευθείας σε στρώμα ρητίνης που κινείται σε λεπτό φιλμ πολυαιθυλενίου (PE). Δεύτερο στρώμα ρητίνης αποτίθεται με όμοιο τρόπο πάνω στο πρώτο, δημιουργώντας έτσι ένα sandwich υλικό με πυρήνα τις ενισχυτικές ίνες. Το σύνθετο υλικό που προκύπτει τυλίγεται σε ρόλους και αφήνεται να στερεοποιηθεί, οπότε και επιτυγχάνεται καλή συνάφεια μεταξύ μήτρας-ινών. Μετά το πέρας της διαμόρφωσης, η πλάκα συνθέτου κόβεται σε επιθυμητό μέγεθος και γεωμετρία και τοποθετείται σε θερμό μεταλλικό καλούπι, σε θερμοκρασία 150°C, όπου εφαρμόζεται υδραυλική πίεση και το αρχικό έλασμα μορφοποιείται στο τελικό προϊόν. Τα προϊόντα της μεθόδου έχουν μεγάλες διαστάσεις και υψηλή ομοιογένεια.

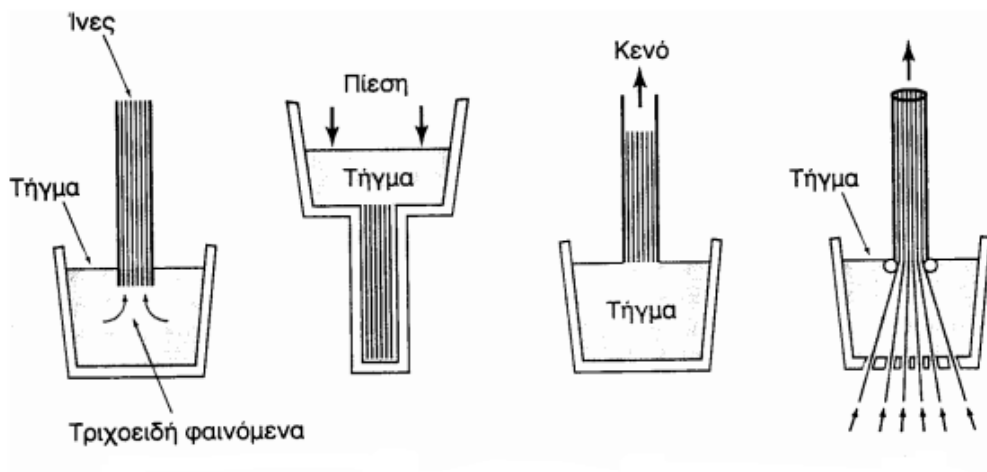


Σχήμα 1.7: Μορφοποίηση με εμβάπτιση (pultrusion).

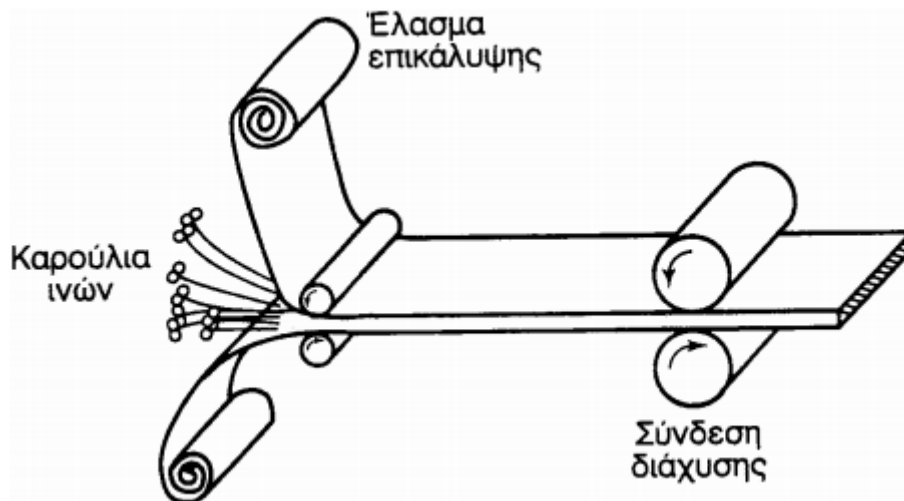
Η παρούσα τεχνική μορφοποίησης εφαρμόζεται όταν απαιτείται σταθερή διατομή προϊόντος (σωλήνες, αγωγοί, δοκοί, κλπ.). Ίνες μεγάλου μήκους, διευθετημένες παράλληλα μεταξύ τους εμβαπτίζονται κατά τρόπο συνεχή σε λουτρό ρητίνης και οδηγούνται σε θερμαινόμενη χαλύβδινη μήτρα, όπου το προϊόν λαμβάνει την τελική του διατομή. Λόγω της υψηλής συγκέντρωσης ινών και του ισχυρού προσανατολισμού τους παράλληλα προς τον επιμήκη άξονα του προϊόντος, παρατηρείται υψηλή μηχανική αντοχή κατά τη διεύθυνση αυτή. Δεύτερη κατηγορία τα σύνθετα μεταλλικής μήτρας, τα οποία παράγονται με συνδιέλαση (co-extrusion) είτε με συμπίεση σε στερεή κατάσταση ή με απόθεση υλικού στη μήτρα (Σχήμα 1.9, 1.10, 1.11). Πρόκειται για ταυτόχρονη διέλαση των συστατικών υλικών του συνθέτου και ενδείκνυται η εφαρμογή της στην περίπτωση παρόμοιας ολκιμότητας ινών και μήτρας. Όταν οι ίνες είναι ψαθυρές, η κατεργασία λαμβάνει χώρα σε υψηλές θεοκρασίες. Η ενίσχυση της μήτρας με την τεχνική της συνδιέλασης δεν είναι θεαματική, εξασφαλίζεται όμως καλλίτερη στιβαρότητα και χαμηλότερη πυκνότητα του συνθέτου.



Σχήμα 1.8: Συνδιέλαση (co-extrusion).



Σχήμα 1.9: Μορφοποίηση με χύτευση με τη βοήθεια τριχοειδών φαινομένων, πίεση βαρύτητας, εφαρμογή κενού και συνεχή χύτευση.



Σχήμα 1.10: Μορφοποίηση σύνθετων μεταλλικής μήτρας με συμπίεση.

Στο παραπάνω σχήμα βλέπουμε συνεχείς ίνες, υπό μορφή ταινιών, να τοποθετούνται μεταξύ δύο μεταλλικών ελασμάτων και το σύστημα συμπιέζεται κατάλληλα, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται συγκόλληση πίεσης και πολύ καλή πρόσφυση μεταξύ ινών και ελασμάτων, έτσι προκύπτει σύνθετο υλικό τύπου sandwich.

6. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Τα σύνθετα υλικά προσφέρουν την δυνατότητα για βελτιστοποίηση κατασκευών. Τα βασικά πλεονεκτήματά τους είναι:

- 1) Η χαμηλή πυκνότητα, η υψηλή αντοχή και το μεγάλο μέτρο ελαστικότητας έχουν ως αποτέλεσμα να μπορούν να κατασκευαστούν γερές κατασκευές με χαμηλό βάρος.
- 2) Οι ίνες σύνθετου μπορούν να έχουν την κατεύθυνση της βασικής καταπόνησης κάνοντας την κατασκευή αποδοτικότερη. Πολύ ανθεκτική σε διάβρωση και γενικά σε αντίξοες συνθήκες περιβάλλοντος.
- 3) Βελτιωμένες ιδιότητες συντονισμού και απόσβεσης.
- 4) Δυνατότητα κατασκευής πολύπλοκων σχημάτων.
- 5) Πολύ χαμηλή θερμική διαστολή.
- 6) Πολύ καλή αντοχή σε κόπωση.
- 7) Δυνατότητα χρήσης σε κατασκευές ασφαλείας.
- 8) Φθαρμένες κατασκευές μπορούν να επισκευασθούν ευκολότερα.

7. ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

- 1) Υψηλό κόστος κατασκευής.
- 2) Ελλιπής τεχνολογία μαζικής παραγωγής για σύνθετα υψηλής απόδοσης.
- 3) Δυσκολία στην ανακύκλωση σύνθετων θερμοσκληρυνόμενης μήτρας και σύνθετων θερμοπλαστικής μήτρας με ίνες γυαλιού.
- 4) Ελλιπής γνώση στο σχεδιασμό με ανισότροπα υλικά.
- 5) Αβεβαιότητα στην πρόβλεψη της μακροπρόθεσμης συμπεριφοράς και των μηχανισμών αστοχίας.
- 6) Περιορισμένη βιομηχανική δυναμικότητα (παγκόσμια παραγωγή άνθρακα μόνο 30000 τόνους).

8. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ
ΑΕΡΟΝΑΥΠΗΓΙΚΗ	ΦΤΕΡΑ,ΦΛΑΠΣ,ΠΤΕΡΥΓΙΑ ΕΛΙΚΩΝ, ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΡΟΣΓΕΙΩΣΗΣ
ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΑ	ΚΑΡΟΣΕΡΙ,ΜΕΡΗ ΠΡΟΦΥΛΑΚΤΗΡΩΝ, ΑΞΟΝΕΣ, ΘΗΚΕΣ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΣΤΑΤΕΣ
ΝΑΥΠΗΓΙΚΗ	ΣΚΑΡΙΑ,ΚΑΤΑΣΤΡΩΜΑΤΑ,ΥΠΕΡΔΟΜΕΣ,ΚΑΤΑΡΤΙΑ
ΟΙΚΟΔΟΜΕΣ	ΕΠΕΝΔΥΣΕΙΣ, ΟΡΟΦΕΣ, ΑΝΤΙΠΥΡΙΚΗ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ
ΧΗΜΙΚΗ	ΣΩΛΗΝΩΣΕΙΣ, ΔΟΧΕΙΑ ΠΙΕΣΗΣ, ΔΕΞΑΜΕΝΕΣ
ΕΞΟΡΥΞΗ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ	ΥΠΕΡΔΟΜΕΣ ΣΕ ΠΛΑΤΟΡΜΕΣ, ΑΝΤΙΠΥΡΙΚΗ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ, ΣΩΛΗΝΩΣΕΙΣ
BUSINESS	ΕΠΙΠΛΑ , ΝΤΟΥΛΑΠΙΑ
ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ /ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ	ΔΙΚΟΠΤΕΣ, ΜΟΝΩΤΕΣ, ΠΑΝΕΛ, ΚΟΥΤΙΑ ,ΝΤΟΥΛΑΠΙΑ
ΟΙΚΙΑΚΑ	ΕΠΙΠΛΑ, ΨΥΓΕΙΑ,ΠΛΥΝΤΗΡΙΑ,ΚΟΥΤΙΑ ΜΕΤΡΗΤΩΝ

1. ΑΝΘΡΑΚΟΝΗΜΑ

1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Το ανθρακόνημα ή ίνες άνθρακα είναι υλικό το οποίο αποτελείται από ίνες κυρίως άνθρακα. Οι ίνες αποτελούνται από άτομα άνθρακα των οποίων οι δεσμοί είναι περίπου παράλληλοι με τον άξονα της ίνας, γεγονός που προσδίδει στο ανθρακόνημα υψηλή στιβαρότητα και αντοχή σε θραύση και χαμηλό συντελεστή θερμικής διαστολής. Λόγω αυτών των ιδιοτήτων, σε συνδυασμό με το χαμηλό βάρος και την αντοχή στα χημικά, τα ανθρακονήματα αρχίζουν να χρησιμοποιούνται όλα και περισσότερο στην αεροναυπηγική, τη πολιτική μηχανική και την κατασκευή οχημάτων. Παρόλα αυτά, η χρήση τους περιορίζεται ότι η παραγωγή τους είναι πολύ πιο δαπανηρή από ότι η παραγωγή υαλοβάμβακα ή ίνες από πλαστικό. Για την παραγωγή των ανθρακονημάτων χρησιμοποιείται πολυακρυλονιτρίλιο (PAN), ίνες τεχνητού μεταξιού (rayon) και πίσσα. Κατά τη διάρκεια της παραγωγής γίνεται δυνατό να αλλάξουν οι θερμοκρασίες με τέτοιο τρόπο ώστε να παραχθούν ίνες με διάφορες ιδιότητες.

1.2 ΙΝΕΣ ΑΝΘΡΑΚΑ

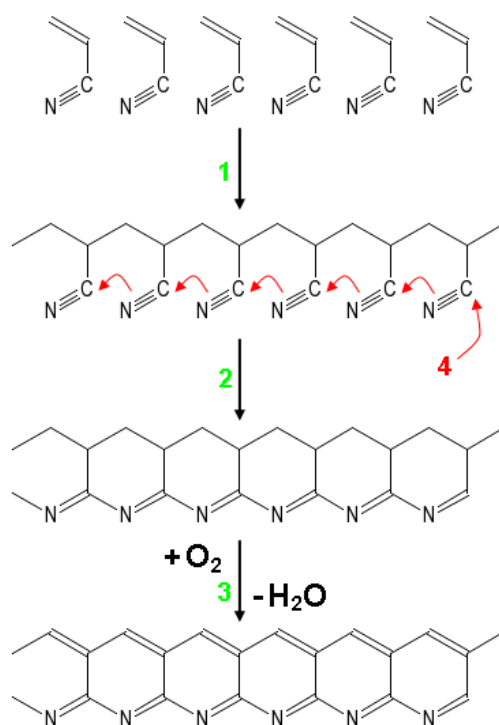
Οι ίνες άνθρακα έχουν μελετηθεί εκτενώς από το 1960 λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών τους, όπως την υψηλή αντοχή τους (3-7 GPa), το υψηλό μέτρο ελαστικότητας (200-500 GPa), την θλιπτική αντοχή (1-3 GPa), το μέτρο διάτμησης (10-15 GPa) και την χαμηλή πυκνότητα (1,75- 2,00 gr/cm³). Οι ίνες άνθρακα προέρχονται από διάφορες πρόδρομες ουσίες, συμπεριλαμβανομένων των ισότροπων και των μεσοφασικών υλικών, αλλά και των πολυακρυλονιτριλίων (PAN). Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι οι τελευταίες ουσίες είναι και οι ευρύτερα χρησιμοποιούμενες σήμερα. Οι ίνες άνθρακα που παρασκευάζονται από την πίσσα μπορεί να παρουσιάζουν συντελεστή αγωγιμότητας, αλλά και θερμικές και ηλεκτρικές αγωγιμότητες τόσο υψηλές όσο τα 900 (GPa) , 1000 (W / Mk), και 10⁶ (S / m), αντίστοιχα. Οι ιδιότητες των ινών άνθρακα τις καθιστούν χρήσιμα ενισχυτικά μέσα για σύνθετες εφαρμογές. Οι ίνες άνθρακα έχουν μετατραπεί σε ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο υλικό στην αεροδιαστημική βιομηχανία, ενώ η χρήση τους σε αυτοκίνητα, αθλητικά είδη και άλλες βιομηχανίες συνεχίζει να κατακτά όλο και περισσότερο έδαφος όσο το κόστος τους εξακολουθεί να μειώνεται.

1.3 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΙΝΩΝ ΑΝΘΡΑΚΑ

Οι ίνες άνθρακα είναι ένα πολυμερές που παρουσιάζει την μορφή του γραφίτη. Στον γραφίτη, ως γνωστόν, τα άτομα άνθρακα είναι διατεταγμένα με την μορφή φύλλων από εξαγωνικούς αρωματικούς δακτυλίους. Οι ίνες άνθρακα είναι γραφίτης στον οποίον τα φύλλα είναι μακριά και λεπτά, σαν ταινίες. Ένα σύνολο από τέτοιες λουρίδες μαζί αποτελούν μια ίνα άνθρακα. Οι ίνες αυτές δεν χρησιμοποιούνται από μόνες τους, αλλά για να ενισχύσουν άλλα (θερμοστατικά) υλικά, όπως εποξικές ρητίνες. Τα ενισχυμένα με ίνες άνθρακα υλικά είναι πολύ ισχυρά σε σχέση με το βάρος τους. Ίνες άνθρακα

μπορούν να παραχθούν με χρησιμοποίηση ως πρώτης ύλης ίνες πολυακρυλονιτριλίου (PAN), είτε ίνες κυτταρίνης (Rayon), ή ίνες πίσσας (κατόπιν κατάλληλης νηματοποίησης). Για την παραγωγή όλων των παραπάνω κατηγοριών ινών-άνθρακα απαιτείται να ακολουθηθεί μία σειρά βημάτων. Αρχικά η διαδικασία περιλαμβάνει κάποια πρώτα στάδια νηματοποίησης-οξειδωσης. Αυτό συμπεριλαμβάνει υγρό και στεγνό στροβιλισμό ακολουθούμενο από τέντωμα των ινών. Έπειτα η διαδικασία σταθεροποίησης της ίνας, η οποία την προστατεύει από πιθανή τήξη λόγω των υψηλών θερμοκρασιών επεξεργασίας. Επόμενο στάδιο της διαδικασίας θερμικής επεξεργασίας που καλείται ανθρακοποίηση με σκοπό την απομάκρυνση τυχόν προσμίξεων. Τέλος, διαδικασία θερμικής επεξεργασίας που καλείται γραφίτοποίηση και η οποία βελτιώνει τις ιδιότητες που έχει αποκτήσει η ίνα από την διαδικασία της εξανθράκωσης. (Σχήμα 1.1).

Αξίζει εδώ να σημειωθεί πως για να παραχθεί ίνα με υψηλό μέτρο ελαστικότητας, θα πρέπει να προσανατολιστούν κατάλληλα οι γραφίτικοί κρύσταλλοι. Το γεγονός αυτό επιτυγχάνεται από ποικίλα είδη θερμικών και εφελκυστικών διαδικασιών. Για παράδειγμα, εφαρμογή μιας συνεχούς δύναμης για μεγάλο χρονικό διάστημα θα οδηγούσε σε έντονη επιμήκυνση της ίνας και κατ' επέκταση η παράλληλη μείωση υλικού κατά τόπους σε πιθανή αστοχία υλικού.



Σχήμα 1.1: Σχηματισμός ίνας άνθρακα από PAN, στο 1 βλέπουμε να ενεργοποιείται ο πολυμερισμός. Στο 2 γίνεται η δόμηση σε χαμηλή θερμοκρασία. Τέλος στο 3 σε υψηλή θερμοκρασία πλέον αφαιρείται το υδρογόνο και έχουμε μια ολοκληρωμένη δομή.

1.3.1 Δομή γραφίτικού άνθρακα.

Οι ίνες άνθρακα της κατηγορίας αυτής ανήκουν στους θερμικά μη γραφίτοποιημένους άνθρακες. Διακρίνονται σε ισότροπες και ανισότροπες

ίνες. Οι πρώτες ίνες που κατασκευάστηκαν με πρόδρομο υλικό την πίσσα είχαν ισότροπη δομή και οι γραφικές στοιβάδες δεν παρουσίαζαν κανένα προσανατολισμό, ενώ το μέτρο ελαστικότητας τους ήταν χαμηλό. Οι ίνες αυτές με πλαστική παραμόρφωση σε υψηλές θερμοκρασίες (τανυσμός κατά τη γραφίτοποίησή τους) μπορούν να μετατραπούν σε ανισότροπες ίνες άνθρακα έχοντας μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας. Ωστόσο, μεγαλύτερο τεχνολογικό ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι ίνες, οι οποίες είναι ανισότροπες ήδη από το στάδιο της ανθρακοποίησής τους. Επίσης, οι ίνες αυτές αποτελούνται σχεδόν αποκλειστικά από χημικώς καθαρό άνθρακα, σε ποσοστό 99.9%. Δεν είναι χημικές ενώσεις ή κράματα, όπως τα συμβατικά υλικά κατασκευής για παράδειγμα το αλουμίνιο ή το ασάλι που συνήθως περιέχουν μικρά ποσά από άλλα μέταλλα. Το δομικό συστατικό των ινών αυτών είναι μονο-ινίδια (monofilaments), τα οποία είναι προσανατολισμένα παράλληλα στον άξονα της ίνας. Κάθε μονο-ινίδιο αποτελείται από στρώματα γραφικών επιπέδων, τα οποία συγκρατούνται μεταξύ τους με δυνάμεις Van der Waals, ενώ τα άτομα άνθρακα κάθε στρώματος ενώνονται με ισχυρούς ομοιοπολικούς δεσμούς $s+p_z$ (όπου s ο ισχυρότερος τύπος ομοιοπολικού δεσμού και z ο δεσμικός άξονας). Έχουν παρατηρηθεί και μελετηθεί τόσο άμορφες αλλά και κρυσταλλικές περιοχές δομής γραφίτη, που εναλλάσσονται με τυχαίο τρόπο. Ανάλογα με την τελική θερμοκρασία γραφίτοποίησης, τα γραφικά πλέγματα άλλοτε μπορεί να είναι εκτεταμένα και συνεχή κατά μήκος της ίνας και άλλοτε όχι, ενώ δεν παρουσιάζουν την τυπική A-B-A τοποθέτηση κατά τον άξονα z , γεγονός που σε συνδυασμό με την απόσταση μεταξύ τους (που στον γραφίτη είναι ελαφρώς μικρότερη) δομικά διαφοροποιεί τις ίνες άνθρακα από του γραφίτη.

1.3.2 Δομή επιφανειακά κατεργασμένων ινών άνθρακα

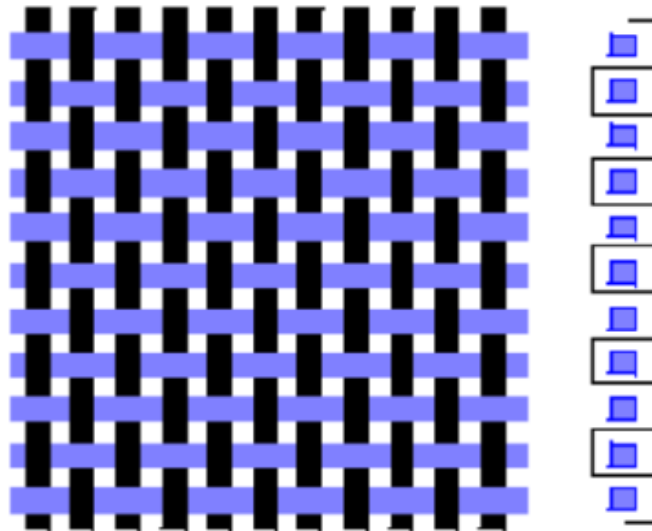
Η επιφανειακή σύσταση των ινών άνθρακα, οι οποίες προέρχονται από διάφορες κατασκευαστικές διαδικασίες, αποτελείται από σεβαστές ποσότητες οξυγόνου καθώς και ίχνη αζώτου και υδρογόνου. Το οξυγόνο αυτό μπορεί να προέρχεται είτε από την πρώτη ύλη, η οποία γίνεται μέρος της χημικής δομής της ίνας σαν αποτέλεσμα ατελούς ανθρακοποίησης είτε ενώνεται χημικά με την επιφάνεια μέσω κάποιας επιφανειακής επεξεργασίας των ινών. Όλες οι επιφανειακές επεξεργασίες τείνουν να τροποποιήσουν την διεπιφανειακή περιοχή των ινών άνθρακα αυξάνοντας την επιφανειακή περιοχή, και έτσι αυξάνεται ο αριθμός των σημείων επαφής ή αυξάνεται η αντιδραστικότητα της περιοχής μέσω σχηματισμού επιφανειακών λειτουργικών ομάδων, οι οποίοι παρέχουν χημικό δεσμό μεταξύ ρητίνης και μήτρας. Η ακριβής δομή των ινών άνθρακα διαφέρει ανάλογα με τη συγκεκριμένη μέθοδο επιφανειακής επεξεργασίας. Έτσι, για παράδειγμα, όσο αφορά τις οξειδωτικές επεξεργασίες, όταν η οξείδωση γίνεται από την αέρια φάση σε υψηλές θερμοκρασίες, προκαλείται υποβάθμιση των ινών και δημιουργία (βελονών) στη δομή τους με αποτέλεσμα να μειώνονται οι αντοχές τους ενώ όταν η διεργασία της οξείδωσης γίνεται από την υγρή φάση είναι πιο ήπια και δεν προκαλεί υποβάθμιση των ινών. Όσο αφορά τις μη οξειδωτικές μεθόδους, κατά την επικάλυψη των ινών με πολυμερή, οι αντοχές των ινών και κυρίως η αντοχή σε διάτμηση αυξάνονται λόγω του ότι δημιουργείται ένας ισχυρός δεσμός στο γραφικό υπόβαθρο.

1.4 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΥΦΑΣΜΑΤΩΝ ΑΠΟ ΙΝΕΣ ΑΝΘΡΑΚΑ

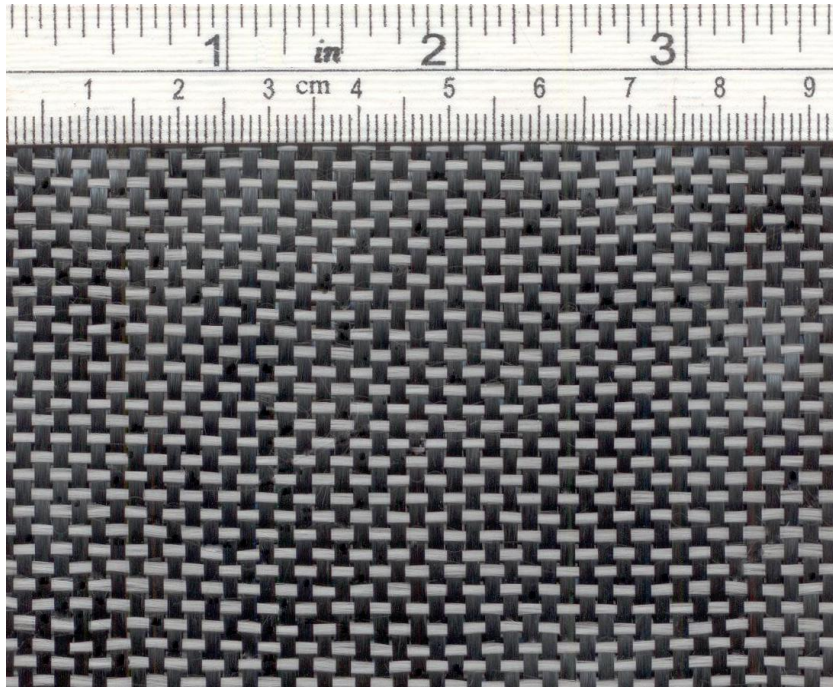
Οι ίνες ενίσχυσης μπορεί να είναι πλεγμένες σε υφάσματα. Οι ίνες που έχουν κατεύθυνση αυτήν του τυλίγματος (στο ρόλο που είναι τυλιγμένο το ύφασμα) ονομάζονται ίνες τυλίγματος (wrapfibers) και αυτές που έχουν κάθετη κατεύθυνση από αυτήν που ονομάζονται υφάδια. Υπάρχουν πολλά είδη υφάσματος που χρησιμοποιούνται συνήθως στην βιομηχανία.

1.4.1 Απλή ύφανση

Ίνες τυλίγματος πλέκονται με τα υφάδια κάθε φορά που τα συναντούν. Το τελικό ύφασμα είναι πολύ σταθερό, αλλά δύσκολο να ακολουθήσει απότομες αλλαγές στην επιφάνεια που εφαρμόζεται (καλούπτι). Τέτοιου είδους πλεκτά μπορούν να έχουν πολύ περισσότερες ίνες τυλίγματος και να μοιάζουν σχεδόν με την μορφή του μονοδιευθυντικού. (Σχήμα 1.2), (Εικόνα 1.2)



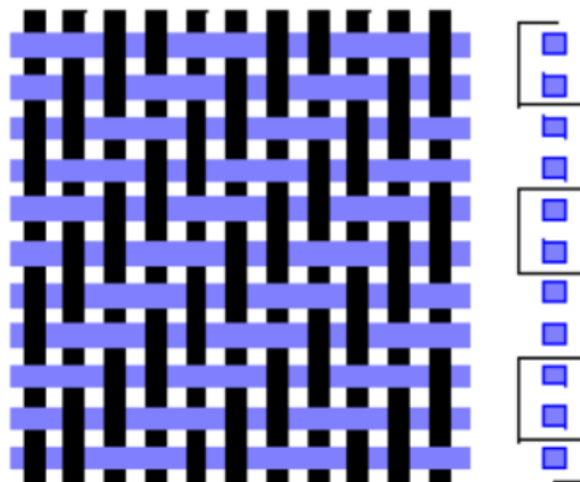
Σχήμα 1.2: Πλέξη μονής διεύθυνσης.



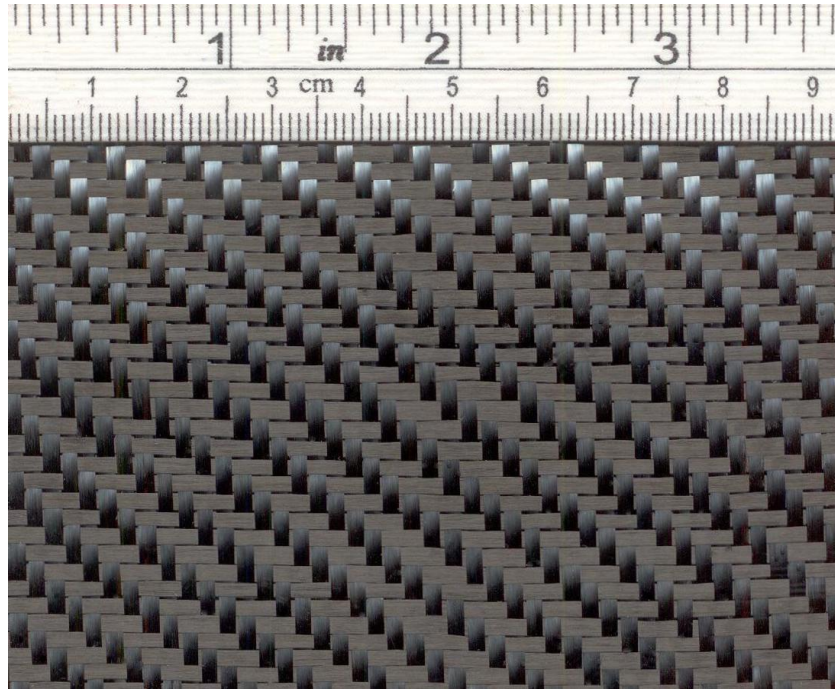
Εικόνα 1.1: Ανθρακοϋφασμα μονής πλέξης, κωδικός C125U, βάρος 125 gr/m². Στημόνι 78% T300 ανθρακόνημα του υφάσματος, 4,8 κλωστές ανά εκατοστό. Υφάδι 22% υαλοϋφασμα C 968 tex του υφάσματος, 4 κλωστές ανά εκατοστό.

1.4.2 Διαγώνια ύφανση

Οι ίνες περνούν πάνω και κάτω από κάποιον αριθμό δεσμίδων ινών, π.χ. 2x2 διαγώνια ύφανση είναι ένα ύφασμα του οποίου οι ίνες περνούν 2 δεσμίδες από πάνω και 2 από κάτω. Αυτή η ύφανση χρησιμοποιείται σε πιο πολύπλοκες επιφάνειες. (Σχήμα 1.3),(Εικόνα 1.2)



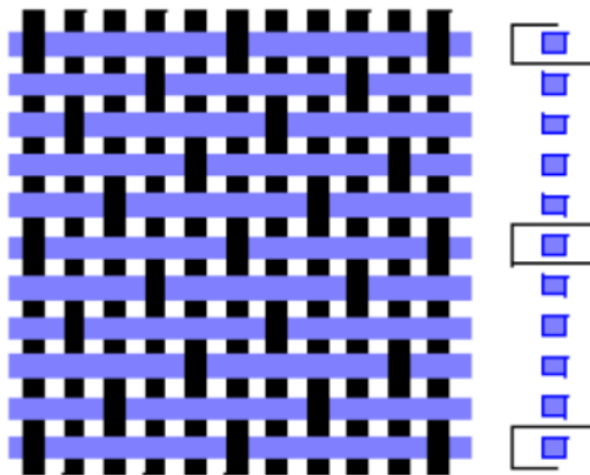
Σχήμα 1.3: Ανθρακοϋφασμα με διαγώνια πλέξη.



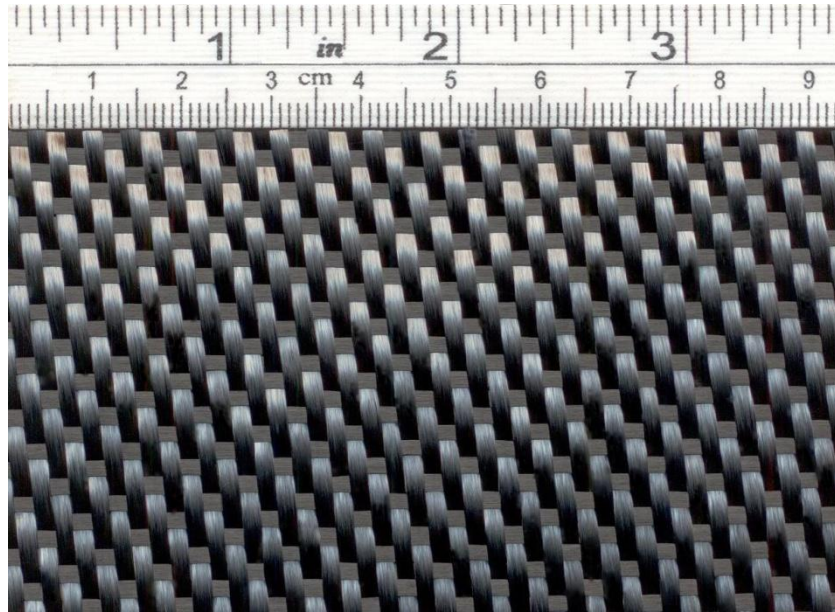
Εικόνα 1.2: Ανθρακοϋφασμα με διαγώνια πλέξη C200T2, βάρος 193 gr/m². Στημόνι 50% 3K TR30S ανθρακόνημα του υφάσματος, 4,8 κλωστές ανά εκατοστό. Υφάδι 50% 3K TR30S ανθρακόνημα του υφάσματος, 4,8 κλωστές ανά εκατοστό.

1.4.3 Satin ύφανση

Οι ίνες περνούν πάνω από έναν αριθμό δεσμίδων αλλά κάτω από μόνο μία. Αυτή η πλέξη παράγει πολύ πιο επίπεδο ύφασμα που εύκολα ακολουθεί πολύπλοκες επιφάνειες. Το μειονέκτημα αυτής της πλέξης είναι ότι στην μία πλευρά του έχει κυρίως ίνες τυλίγματος ενώ στην άλλη κυρίως υφάδια.(Σχήμα 1.4),(Εικόνα 1.3)



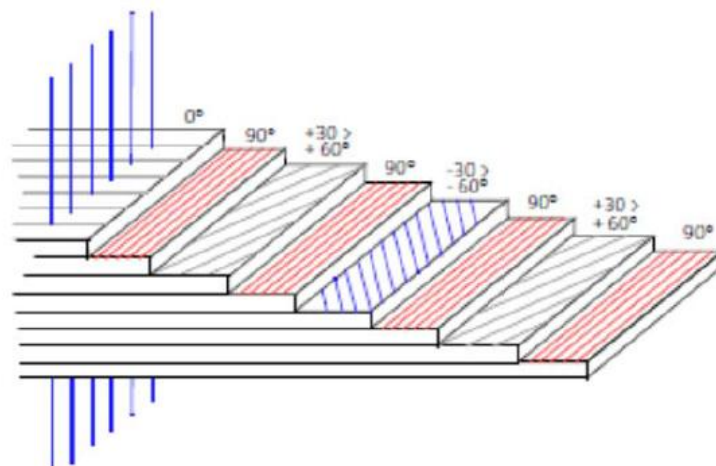
Σχήμα 1.4: Ανθρακοϋφασμα με satin ύφανση.



Εικόνα 1.3: Ανθρακοϋφασμα με satin πλέξη C381S5 T400HB, βάρος 380 gr/m². Στημόνι 50% 6K T400HB ανθρακόνημα του υφάσματος, 4,7 κλωστές ανά εκατοστό. Υφάδι 50% 6K T400HB ανθρακόνημα του υφάσματος, 4,7 κλωστές ανά εκατοστό.

1.4.4 Πολυαξονικό επίπεδο ύφασμα

Ένα πολυαξονικό ύφασμα αποτελείται από μονοδιευθυντικά υφάσματα με διαφορετικές κατευθύνσεις ραμμένα μεταξύ τους και μπορεί να χρησιμοποιηθεί όπως και το πλεκτό ύφασμα. Πολυδιευθυντικά υφάσματα μπορούν να παραχθούν σε πάχη που δεν είναι πρακτικό ή οικονομικό να παραχθούν τα πλεκτά υφάσματα. Επίσης τα πολυδιευθυντικά υφάσματα μπορούν να ακολουθήσουν πολύπλοκες επιφάνειες ενώ επιτυγχάνεται γρήγορα μεγάλο μέρος διαστρωμάτωσης. Παρόλα αυτά πρέπει να δοθεί μεγάλη προσοχή ώστε η διαστρωμάτωση να είναι ισορροπημένη και τα βαριά υφάσματα είναι δύσκολο να αντιγράψουν μικρές λεπτομέρειες. (Σχήμα 1.5)



Σχήμα 1.5: Επίπεδη πολυαξονική ύφανση.

1.5 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΙΝΩΝ ΑΝΘΡΑΚΑ

Η κυριότερη χρήση των ινών άνθρακα μέχρι σήμερα γίνεται ασφαλώς στον τομέα των ενισχυμένων συνθετικών ρητινών. Κατά την εφαρμογή μας ενδιαφέρουν πρωτίστως οι μηχανικές ιδιότητες των ινών άνθρακα, καθώς επίσης η χρησιμοποίηση κατάλληλης μήτρας πλαστικού υλικού και η συνάφεια μεταξύ των ινών άνθρακα και της μήτρας, έτσι ώστε να αξιοποιούνται πληρέστερα οι σπουδαίες μηχανικές ιδιότητες των ινών .

Κατά την ανθρακοποίηση των οξειδωμένων ινών πολυακριλονιτριλίου, αυτές μετατρέπονται σε πολυμερή άνθρακα, η δομή του οποίου μοιάζει με εκείνη του γραφίτη. Ως συνέπεια του τανυσμού κατά την οξείδωση και την ακόλουθη ανθρακοποίηση, οι στοιβάδες του άνθρακα αποκτούν κατεύθυνση παράλληλη προς τον άξονα της ίνας. Η σχηματιζόμενη μικροδομή χαρακτηρίζεται από υψηλή αντοχή και ακαμψία. Επίσης, η επιμήκυνση των ινών αυτών είναι πλήρως ελαστική και η αντίσταση σε κόπωση και διάβρωση είναι άριστη. Τα τελευταία χρόνια έχουν παραχθεί ίνες άνθρακα με ακόμα καλύτερες μηχανικές ιδιότητες. Οι σπουδαιότερες αυτές βελτιώσεις αναφέρονται στη μεγάλη βελτίωση της επιμήκυνσης θραύσεως σε 2% με μια ουσιώδη αύξηση της αντοχής, ενώ το μέτρο ελαστικότητας παρουσίασε μια μικρότερη βελτίωση σε περίπου 240 GPa. Στην εισαγωγή του ενδιάμεσου μέτρου ελαστικότητας ινών άνθρακα ($E=300$ GPa) με αντοχή εφελκυσμού μεγαλύτερη από 5 GPa και αντίστοιχη επιμήκυνση θραύσεως μέχρι 1.7%. Τέλος έχει παρατηρηθεί βελτίωση στις αρκετά υψηλότερες τιμές της αντοχής εφελκυσμού (3 GPa) και του μέτρου ελαστικότητας (440 GPa) στην περίπτωση των HM-ινών άνθρακα. (Εικόνα 1.4)



Εικόνα 1.4: Καλάμι ψαρέματος από ανθρακόνημα υψηλού μέτρου ελαστικότητας.

Οι φυσικές ιδιότητες του στοιχειακού άνθρακα εμφανίζονται και στην ινώδη μορφή του υπό την αλλοτροπική δομή του γραφίτη. Έτσι, οι ίνες άνθρακα δεν παρουσιάζουν σημείο τήξης υπό κανονική πίεση, έχουν μικρή τάση ατμών μέχρι υψηλές θερμοκρασίες, υψηλό σημείο εξάχνωσης και πολύ

χαμηλό συντελεστή θερμικής διαστολής που δίνει στην ίνα άνθρακα και στα σύνθετα υλικά ένα μεγάλο βαθμό διαστασιακής σταθερότητας . Σε αντίθεση με τις ίνες υάλου, οι ίνες άνθρακα είναι ισχυρά ανισότροπες. Η ανισοτροπία αυτή επηρεάζει και τον συντελεστή θερμικής διαστολής, ο οποίος σε διεύθυνση παράλληλη του άξονα των ινών είναι διαφορετικός από αυτόν σε διεύθυνση κάθετη στον άξονα των ινών.

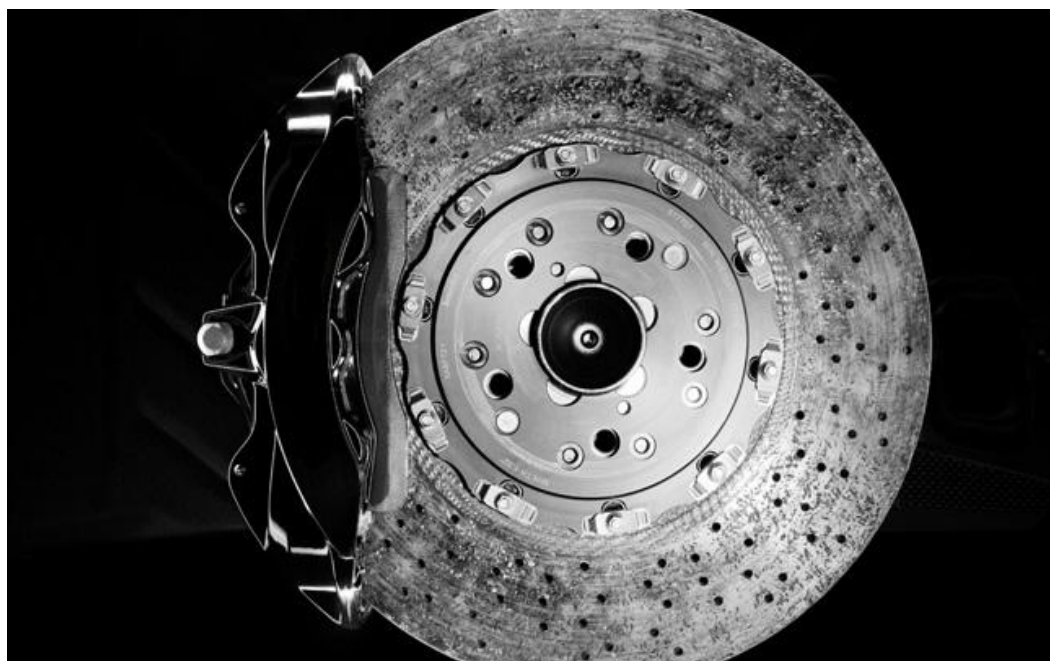
Είναι χημικώς αδρανές υλικό, με υψηλή αντίσταση στα περισσότερα οξέα, άλατα και διαλύτες, εκτός ισχυρών οξειδωτικών μέσων, ενώ δεν απορροφούν σχεδόν καθόλου νερό. Η θερμική σταθερότητά τους είναι αξιοσημείωτη απουσία οξυγόνου μέχρι τους 3000 °C, καθώς είναι άτηκτες και άφλεκτες, ενώ παρουσία του καίγονται γύρω στους 400 °C. Λόγω της χημικής τους αδράνειας δεν αποτελούν κίνδυνο για την υγεία, εκτός από ερεθισμούς στο δέρμα που μπορούν να προκληθούν λόγω του μεγέθους των ινιδίων. Είναι επίσης βιοσυμβατές με το ανθρώπινο σώμα (π.χ. εφαρμογή τους σε τεχνητές αρθρώσεις). (Εικόνα 1.5)



Εικόνα 1.5: Τεχνητή άρθρωση, πόδια από ανθρακόνημα.

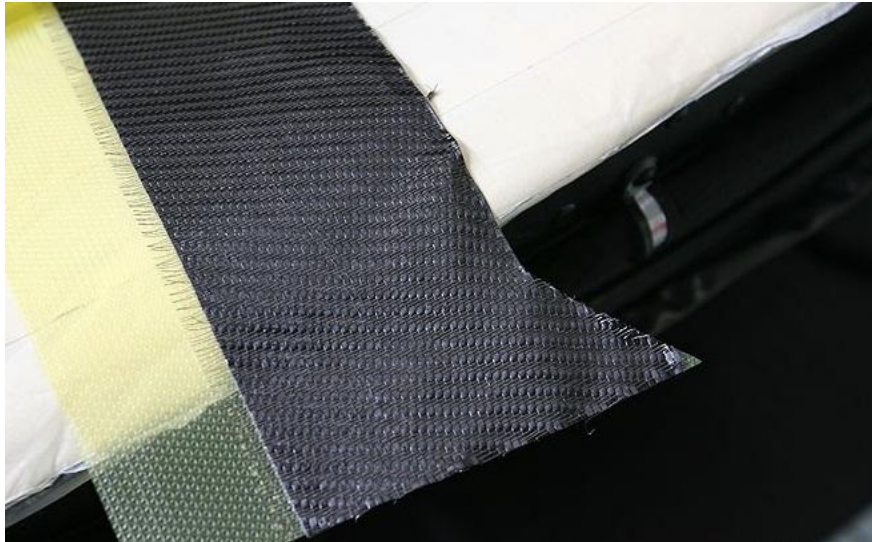
Οι ίνες άνθρακα είναι ψαθυρές και κατά την επεξεργασία τους σπάνε σχετικά εύκολα. Για αυτό τον λόγο, είναι απαραίτητη μια εξωτερική επεξεργασία που ονομάζεται ‘κολλάρισμα’ (sizing). Αυτή η προστατευτική επεξεργασία βοηθά στην καλύτερη συνάφεια της ίνας με το υλικό σύνδεσης. Μειονέκτημα της παραπάνω επεξεργασίας είναι, ότι σε μεγάλους χρόνους αποθήκευσης, η προστατευτική αυτή επιφάνεια σκληραίνει και η ίνα δεν είναι πλέον εύκαμπτη. Τέλος, μια ακόμα ιδιότητα των ινών αυτών είναι η

ανθεκτικότητά τους σε δονήσεις. Οι δυναμικές ιδιότητες των γραφιτικών στοιβάδων είναι πολύ καλύτερες από εκείνες άλλων υλικών (π.χ. αλουμίνιο, χάλυβας). Επομένως, οι ίνες άνθρακα υψηλού μέτρου ελαστικότητας και υψηλής αντοχής σε εφελκυσμό χρησιμοποιούνται στην παραγωγή συνθέτων υλικών για την κατασκευή μεγάλου αριθμού αντικειμένων που χρησιμοποιούνται στην αεροδιαστημική, στην προσθετική και στην αθλητική βιομηχανία. Από την άλλη πλευρά, η βιομηχανική παραγωγή ινών άνθρακα χαμηλού μέτρου ελαστικότητας έχει αυξηθεί τα τελευταία χρόνια. Οι ίνες αυτές είναι αρκετά φθηνότερες και έχουν πεδία πρακτικών εφαρμογών, όπως για παράδειγμα ως φίλτρα, επιφάνειες ρόφησης, επικαλυπτικά κλπ. Πέραν όμως από την ενίσχυση πολυμερών, οι ίνες άνθρακα χρησιμοποιούνται, σε μικρότερη έκταση, για την ενίσχυση μετάλλων ή κεραμικών υλικών (Εικόνα 1.6,1.7). Εξάλλου οι ίνες αυτές χρησιμοποιούνται και χωρίς την μορφή του ενισχυμένου υλικού, όπως για θερμική μόνωση φούρνων υψηλών θερμοκρασιών και για ηλεκτρόδια μπαταριών.



Εικόνα 1.6: Κεραμικά φρένα με ενίσχυση ανθρακονημάτων.

Οι ίνες άνθρακα δεν έχουν μαγνητικές ιδιότητες ενώ εμφανίζουν καλή ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα κατά τον παράλληλο άξονα στα γραφικά επίπεδα, η οποία οφείλεται σε μη εντοπισμένα ηλεκτρόνια που βρίσκονται στο χώρο μεταξύ των επιπέδων αυτών. Εξαιτίας της καλής αγωγιμότητας των ινών, πρέπει να αποφεύγεται η παρεμβολή τους σε ηλεκτρικά κυκλώματα (π.χ. σε περίπτωση πυρκαγιάς).



Εικόνα 1.7: Ανθρακόνημα με ενίσχυση τιτανίου (κατασκευαστής Pagani).

1.6 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΑΝΘΡΑΚΟΝΗΜΑΤΩΝ

Στο τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας κερδίζει χρόνο με το χρόνο έδαφος απέναντι στα μέταλλα και τα κράματα τους. Συγκεκριμένα η κατασκευή πλαισίων (monocoque) προσφέρει υψηλές μηχανικές ιδιότητες (ακαμψία πλαισίου) καθώς και πολύ χαμηλό βάρος.(π.χ. ένα συμβατικό πλαίσιο από χάλυβα ζυγίζει 600+ kgf ενώ ένα ανθρακονήματος λιγότερο από 100 kgf). Τμήματα μη αναρτώμενης μάζας όπως ζάντες, ψαλίδια, ελατήρια (Εικόνα 1.8,1.9) κατασκευάζονται από ανθρακονήματα με τεράστια οφέλη αλλά απαγορευτικό κόστος απόκτησης. Το CFPR (carbon fiber reinforced plastic) ανθρακόνημα ενισχυμένο με πλαστικό είναι μια προσπάθεια της BMW και SGL group να τριπλασιάσει τη παραγωγή ανθρακονημάτων από 3000 τόνους το έτος σε 9000 τόνους ετησίως και να κάνει τα ανθρακονήματα ανταγωνιστικά απέναντι στα μέταλλα (Εικόνα 1.10). Τέλος η επανάσταση στον τομέα των ανθρακονημάτων και όχι μόνο, είναι η τρισδιάστατη εκτύπωση (3D printing). (Εικόνα 1.11)



Εικόνα 1.8: Ζάντες ανθρακονήματος 19" (βάρος 5.7 Kgf).



Εικόνα 1.9: Ελατήριο ανθρακονήματος.



Εικόνα 1.10: Πλαίσιο μονοκομπε από CFRP (βάρος 150 Kgr).

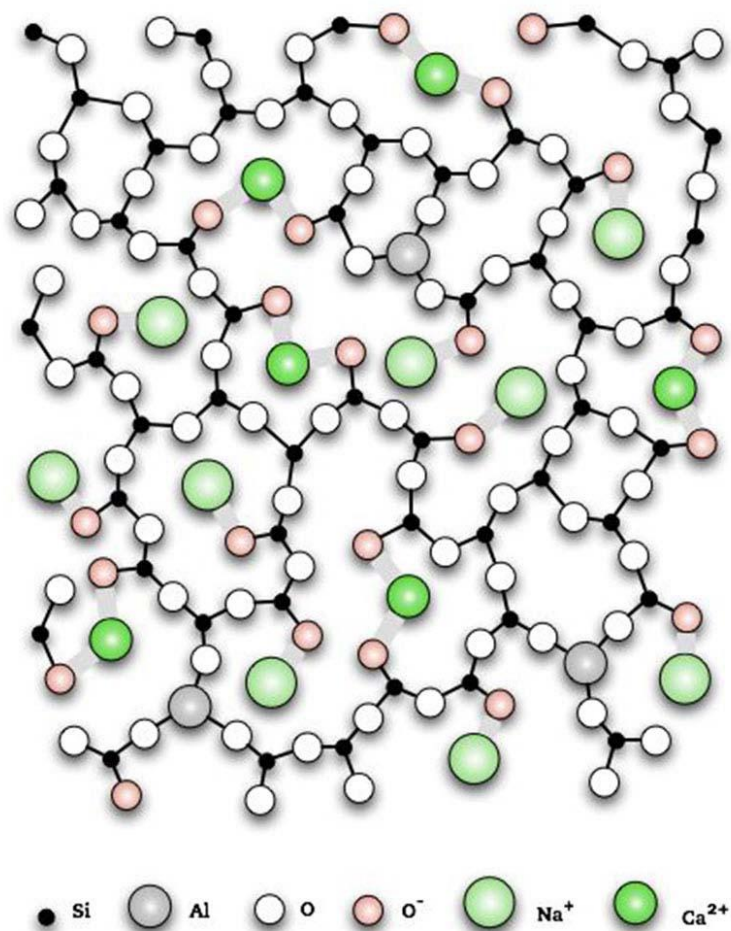


Εικόνα 1.11: Τρισδιάστατος εκτυπωτής ανθρακονήματος.

2. ΥΑΛΟΝΗΜΑ

2.1 ΓΕΝΙΚΑ

Τα υαλονήματα εμφανίστηκαν για πρώτη φορά στο εμπόριο το 1939 και η χρήση τους συνεχίζεται επιτυχώς μέχρι και σήμερα. Είναι από τους πλέον διαδεδομένους τύπους ενισχυτικών ινών στα σύνθετα πολυμερικής μήτρας. Η δομική τους βάση είναι τα οξειδία πυριτίου, ασβεστίου, βορίου και αλουμινίου. Θεωρούνται από τα πιο φθηνά ενισχυτικά υλικά. Χαρακτηριστική δομή του γυαλιού παρουσιάζεται στο (Σχήμα 2.1)



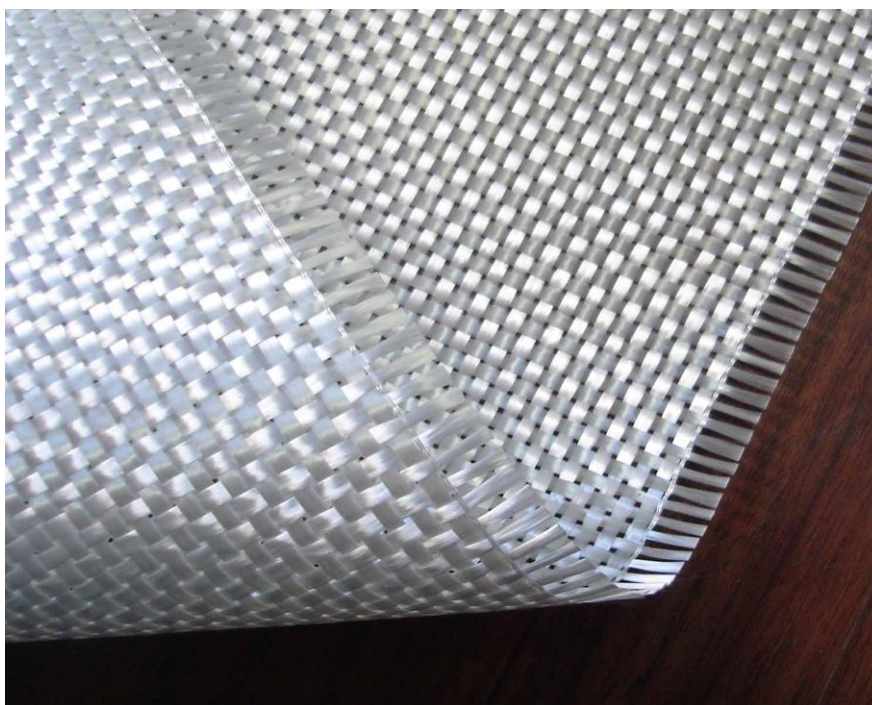
Σχήμα 2.1: Άμορφη δομή του γυαλιού.

Οι ίνες γυαλιού παράγονται με μηχανικό τρόπο από ύαλο που τήκεται. Το κύριο χαρακτηριστικό της υάλου είναι ότι δεν παρουσιάζει ούτε πλήρως κρυσταλλική δομή, αλλά ούτε και ιδιότητες ρευστού. Ανάλογα με το είδος της εφαρμογής για το οποίο αναπτύχθηκαν, υπάρχουν έξι διαφορετικοί τύποι υαλονημάτων με μικρές διαφορές στη χημική τους σύσταση, τα τρία από τα οποία είναι τα κάτωθι. Οι κύριες φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των υάλων πυριτίας παρουσιάζονται στον (Πίνακα 2.1).

Πίνακας 2.1: Χημική σύσταση και ιδιότητες ενισχυτικών ινών γυαλιού

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΤΥΠΟΣ			SiO ₃ καθαρή
	E	C	S	
ΧΗΜΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ(%)				
SiO ₂	54	60	65	>99.5
Al ₂ O ₃	16	25	25	-
B ₂ O ₃	8	-	-	-
CaO	17	9	-	-
MgO	5	6	10	-
ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ(GPA)	75	80	84	72
ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΕΦΕΛΚΙΣΜΟ(MPA)	2100-3400	2500-4400	2800-4800	3500-8800
ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ(g/cm ³)	2,54	2,5	2,48	2,2
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΤΗΞΗΣ(°C)	900-1200	1400-1600	1400-1600	1720
ΜΕΓΙΣΤΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΧΡΗΣΗΣ(°C)	550	650	650	750

Το **E-glass** (electrical) πρόκειται για τα συχνότερα χρησιμοποιούμενα υαλονήματα με καλές ηλεκτρικές ιδιότητες, αντοχή και δυσκαμψία, καθώς και πολύ καλή συμπεριφορά στην αλλαγή των καιρικών συνθηκών, αλλά με μέτρια αντοχή σε χημικά αντιδραστήρια. (Εικόνα 2.1)



Εικόνα 2.1: Υαλοϋφασμα τύπου E-glass.

Τα **C-glass** (corrosion) είναι υαλονήματα με υψηλή αντίσταση στη χημική διάβρωση, έχουν όμοια εμφάνιση και καλύτερες μηχανικές ιδιότητες από τις ίνες τύπου E και η τιμή τους στην αγορά είναι υψηλότερη.

Το **S-glass** (stiffness) είναι ακριβότερο υλικό από το E-glass, αλλά με υψηλότερη δυσκαμψία και θερμική αντοχή. Χρησιμοποιείται κυρίως στην αεροπορική βιομηχανία. (Εικόνα 2.2)



Εικόνα 2.2: Υαλοϋφασμα τύπου S-glass στρατιωτικής χρήσης, κατασκευαστής (HEXCEL) .

Οι δύο τύποι που χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση κατασκευών είναι η ύαλος-E και η ύαλος-S. Αν και, όπως φαίνεται στον (Πίνακα 2.2), η ύαλος-S έχει μεγαλύτερη αντοχή και μέτρο ελαστικότητας από την ύαλο-E, λόγω του υψηλού της κόστους έχει η ύαλος-S περιορισμένη εφαρμογή σε σχέση με την ύαλο-E. Τα βασικά πλεονεκτήματα των υάλων αυτών είναι το σχετικά χαμηλό κόστος και η υψηλή αντοχή, ενώ στα κύρια μειονεκτήματα τους εντάσσονται το χαμηλό μέτρο ελαστικότητας και η μικρή αντοχή τους έναντι φθοράς από τη τριβή. Όταν περιέχονται μεγάλα ποσοστά SiO_2 (99,5%) παρατηρούνται αυξημένες τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων της ίνας και της μέγιστης θερμοκρασίας χρήσης του συνθέτου. Γι' αυτό το λόγο, σε ειδικές εφαρμογές, όπου απαιτούνται υψηλές μηχανικές ιδιότητες σε υψηλή θερμοκρασία, χρησιμοποιούνται ίνες από 100% καθαρό πυρίτιο. Οι ίνες υάλου, αν και ανθεκτικές στους περισσότερους διαλύτες, αντιδρούν με ορισμένες αλκαλικές ενώσεις και ισχυρά οξέα. Η 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, η ύαλος δεν παρουσιάζει ερπυσμό, είναι όμως

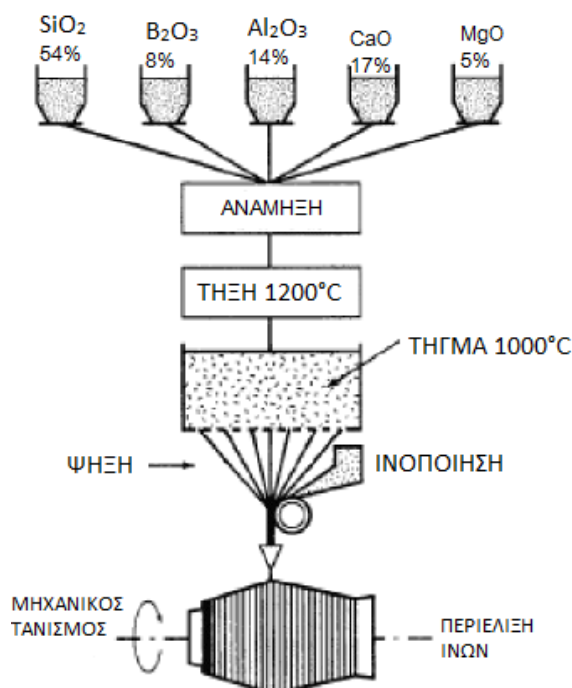
ευπαθής σε διάβρωση. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι παραπάνω ιδιότητες επηρεάζονται σημαντικά από τις περιβαλλοντικές συνθήκες καθώς, και τη μήτρα που επιλέγεται για την παραγωγή του σύνθετου υλικού.

Πίνακας 2.2:

ΕΙΔΟΣ ΥΑΛΟΝΗΜΑΤΟΣ	ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ	ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ	ΕΠΙΜΗΚΥΝΣΗ ΘΡΑΥΣΗΣ	ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ
	(MPa)	(GPa)	(%)	(gr/cm ³)
Ύαλος -E	2000-3000	70-75	3,0-4,5	2,54
Ύαλος- S	3500-4800	85-90	4,5-5,5	2,48

2.2 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΙΝΩΝ ΓΥΑΛΙΟΥ

Η παραγωγή ινών γυαλιού γίνεται με εκβολή τήγματος γυαλιού μέσα από μήτρα με διάτρητο πυθμένα (Σχήμα 2.2) και περιλαμβάνει τις ακόλουθες φάσεις. Αρχικά η πρώτη ύλη τοποθετείται σε δεξαμενή, όπου και τήκεται. Έπειτα το τήγμα τροφοδοτείται σε σειρά κυλινδρικών δοχείων με διάτρητο πυθμένα (διάμετρος οπών 1-2 mm). Το γυαλί ρέει μέσα από τις οπές του πυθμένα υπό την επίδραση της βαρύτητας. Οι παραγόμενες ίνες συγκεντρώνονται σε ένα σύνολο και τανύζονται μηχανικά μέχρι να αποκτήσουν την κατάλληλη διάμετρο και ακολουθεί η ψύξη τους. Ακολούθως οι ίνες διέρχονται από ιμάντα που επιβάλλει σε αυτές προστατευτικό λιπαντικό συνδετικό υλικό (binder) ή ειδικά κολλοειδή πρόσθετα (sizings) που δρουν ως προστατευτικές επικαλύψεις για την καλύτερη πρόσφυση στη διεπιφάνεια ινών-μήτρας. Τέλος περιτυλίσσονται ανά δέσμες γύρω από τύμπανο που περιστρέφεται και τα ρολά ινών υφίστανται ξήρανση πριν υποβληθούν σε οποιαδήποτε περαιτέρω διεργασία μορφής.



Σχήμα 2.2: Διεργασίες παραγωγής υαλονημάτων.

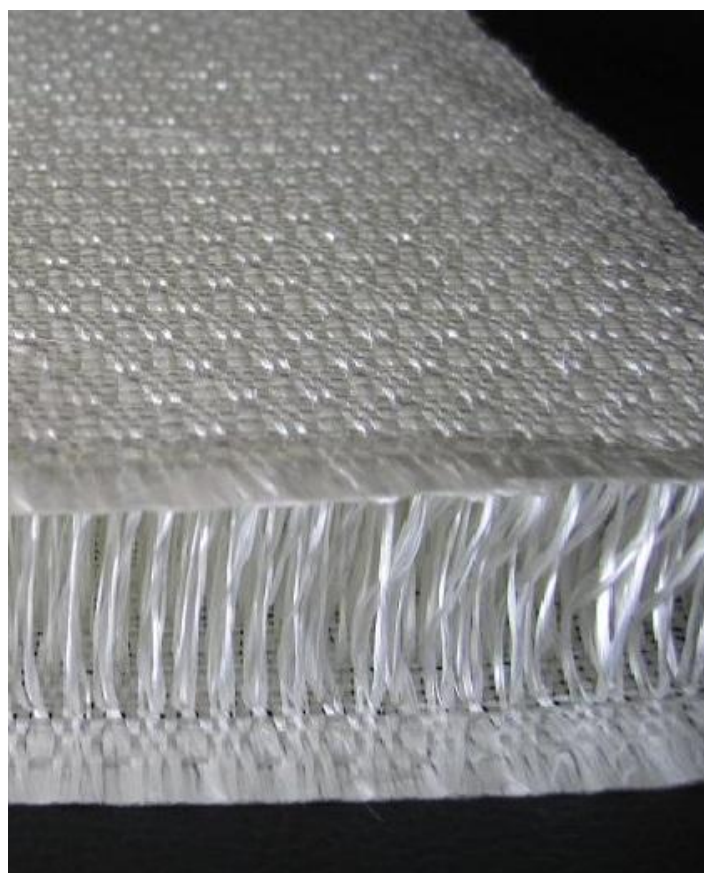
2.3 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΑΠΟ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ

Όπως προαναφέρθηκε, οι τυπικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών περιλαμβάνουν το χαμηλό ειδικό βάρος, τον υψηλό λόγο αντοχής προς βάρος και τον υψηλό λόγο μέτρου ελαστικότητας προς βάρος. Επίσης τα περισσότερα σύνθετα υλικά από ινοπλισμένα πολυμερή είναι εξαιρετικά ανθεκτικά σε ηλεκτροχημική διάβρωση. Ένα άλλο χαρακτηριστικό των σύνθετων υλικών από ινοπλισμένα πολυμερή είναι η σχεδόν γραμμική καμπύλη έντασης – παραμόρφωσης έως την αστοχία τους. Παρόλο που τα υλικά που συνθέτουν τις μήτρες επιδέχονται πλαστική παραμόρφωση, οι ίνες γενικά συμπεριφέρονται μόνο ελαστικά. Καθώς όμως η συμπεριφορά του σύνθετου υλικού καθορίζεται κυρίως από τη συμπεριφορά των ινών, οι οποίες αποτελούν και τον κύριο φορέα μεταφοράς του φορτίου, πολύ σπάνια τα ινοπλισμένα πολυμερή παρουσιάζουν πλαστική παραμόρφωση ή έστω διαρροή. Αντίθετα η θραύση είναι η τυπική μορφή αστοχίας ενός σύνθετου υλικού που καταπονείται από οριακή τιμή τάσης.

2.4 ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΜΗΤΡΑΣ - ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ

Η ανάπτυξη των μηχανικών ιδιοτήτων, στα ενισχυμένα πολυμερή, μέχρι των μεγίστων δυνατών τιμών, είναι δυνατή μόνο όταν εξασφαλίζεται η πλήρης συνεργασία των συστατικών τους. Προκειμένου να εξασφαλιστεί η πλήρης συνεργασία μεταξύ της μήτρας και του μέσου ενίσχυσης είναι απαραίτητο να επιτυγχάνονται η πλήρη επαφή και η ανάπτυξη ισχυρού συγκολλητικού δεσμού. Η δυνατότητα για πλήρη επαφή ελέγχεται από την ικανότητα του τήγματος του πολυμερούς να διαβρέξει πλήρως την επιφάνεια του μέσου ενίσχυσης. Αυτή η ικανότητα εξαρτάται από τη διεπιφανειακή τάση μεταξύ των δύο υλικών. Μεταβολή της επιφανειακής τάσεως, ώστε να λάβει τιμές που να πληρούν τις απαιτήσεις για πλήρη διαβροχή, είναι δυνατή με τη χρήση ειδικών τασιενεργών (διαβρέκτες). Αυτά χρησιμοποιούνται στην επιφάνεια του μέσου ενίσχυσης ή στη μάζα του τήγματος του πολυμερούς. Η μη πλήρης επαφή έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία φυσαλίδων αέρα στη μάζα του υλικού με αποτέλεσμα τη μείωση της αντοχής. Η πλήρης διαβροχή επιτυγχάνεται όταν εξαφανισθούν οι φυσαλίδες, που οφείλονται στα σημεία μη επαφής των υλικών, και απαιτεί ένα χρονικό διάστημα για να συμπληρωθεί. Ο ρυθμός διαβροχής είναι συνάρτηση του ιξώδους του τήγματος, της επιφανειακής τάσης, της τυχόν επεξεργασίας και της μορφής της επιφάνειας του μέσου ενίσχυσης. Η ισχύς του συγκολλητικού δεσμού, που είναι δυνατό να αναπτυχθεί ανάμεσα στη μήτρα και το μέσο ενίσχυσης, εξαρτάται βασικά από τη φύση του. Η ισχυροποίηση του συγκολλητικού δεσμού επιτυγχάνεται με την αύξηση της επιφάνειας επαφής (Πρόκειται για μια επεξεργασία του μέσου ενίσχυσης που έχει ως αποτέλεσμα την τράχυνση της. Ανάλογα με το βαθμό τράχυνσης η αρχικά λεία επιφάνεια αποκτά ένα πολύ μεγαλύτερο ανάπτυγμα.) και με τροποποίηση της επιφάνειας επαφής (Έχει ως σκοπό τη δημιουργία μιας νέας επιφάνειας που μπορεί να αναπτύξει έναν ισχυρότερο συγκολλητικό δεσμό με το πολυμερές.) Σε πολλά σύνθετα, το μέσο ενίσχυσης αποτελείται από ανεξάρτητα στρώματα από ίνες που ενώνονται μεταξύ τους. Σε αυτήν την περίπτωση πρέπει να ελεγχθεί όχι μόνο η σύνδεση μεταξύ ίνας-μήτρας αλλά και η σύνδεση μεταξύ των ίδιων των στρωμάτων, μια και έλλειψη καλής σύνδεσης τους μπορεί να προκαλέσουν αστοχία. Για τη αποφυγή του

φαινομένου μια λύση είναι η τριαξονική ύφανση που χρησιμοποιείται για να προσανατολίσει τις ίνες, η οποία ταυτόχρονα συγκρατεί τα διάφορα στρώματα των ινών. (Εικόνα 2.3)



Εικόνα 2.3: 3D υαλοϋφασμα.

2.5 ΧΡΗΣΕΙΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΜΕ ΙΝΕΣ ΓΥΑΛΙΟΥ GRP (GLASS REINFORCEMENT PLASTICS)

Ναυπηγική: Ο τομέας της ναυπηγικής αποτελεί ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα ενός τομέα όπου τα σύνθετα υλικά ενισχυμένα με ίνες γυαλιού (GRP, glass reinforcement plastics) έχουν αντικαταστήσει σχεδόν πλήρως τα παραδοσιακά υλικά και ιδιαίτερα το ξύλο. Η χαμηλή πυκνότητα, η μεγάλη αντίσταση σε διάβρωση και η ευκολία παραγωγής ολόσωμων τμημάτων του σκάφους με χύτευση σε καλούπια, είναι οι παράμετροι που οδήγησαν στην ανάπτυξη μικρών βιομηχανιών κατασκευής σκαφών αναψυχής ενώ η μείωση του κόστους των επισκευών οδήγησε στην χρήση των υλικών αυτών στον ευρύτερο τομέα της ναυπηγικής. (Εικόνα 2.4)

Μεταφορές: Περίπου 60.000 τόνοι το χρόνο GRP σε διάφορες μορφές χρησιμοποιούνται στις χερσαίες μεταφορές στη δυτική Ευρώπη, ενώ στις ΗΠΑ η αντίστοιχη συνολική κατανάλωση GRP στον τομέα των χερσαίων μεταφορών είναι μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερη. Ο λόγος της χρήσης των GRP στις χερσαίες μεταφορές οφείλεται κατά ένα μέρος στην μείωση του βάρους και άρα στην εξοικονόμηση ενέργειας (καυσίμων). Η χρήση ενισχυμένων πλαστικών πλαισίων για την κατασκευή αμαξωμάτων (αυτοκινήτων), περιορίζεται προς το παρόν σε μικρή κλίμακα και ιδιαίτερα για

την κατασκευή αμαξωμάτων αγωνιστικών αυτοκινήτων. Εκτός όμως από την Παρασκευή αμαξωμάτων, τα GRP χρησιμοποιούνται και για την κατασκευή καμπινών στα φορτηγά αυτοκίνητα, στην κατασκευή προφυλακτήρων και σε πολλά άλλα εξαρτήματα της αυτοκινητοβιομηχανίας. Τέλος ανακοινώθηκε ότι γίνεται εξέλιξη ελατηρίων από υαλόνημα τα οποία θα τοποθετηθούν σε αυτοκίνητα παραγωγής από το 2018 με τεράστια οφέλη στη μη αναρτώμενη μάζα των οχημάτων.(Εικόνα 2.5)



Εικόνα 2.4: Κατασκευή σκάφους από υαλόνημα.



Εικόνα 2.5: Ελατήριο υαλονήματος (κατασκευαστής AUDI)

Ηλεκτρικά είδη: Οι ίνες γυαλιού παράγονται σε διάφορους τύπους. Ένας από αυτούς είναι ο τύπος E-glass, όπου το πρόθεμα E αναφέρεται στον όρο electrical. Ο τύπος αυτός έχει κατασκευασθεί ειδικά για ηλεκτρικές εφαρμογές και ιδιαίτερα για εφαρμογές όπου απαιτείται ηλεκτρική μόνωση. Έτσι, αυτός ο τύπος γυαλιού όταν αναμιχθεί με πλαστική μήτρα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή ηλεκτρικών εξαρτημάτων πολύπλοκου σχήματος που να είναι ηλεκτρικά μονωμένα. Τέτοια είδη είναι οι ηλεκτρικοί διακόπτες, οι ηλεκτρικοί διανομείς, οι υποδοχείς ηλεκτρικών λαμπτήρων και άλλα προϊόντα. Καλωδιακοί αγωγοί σταθερής διατομής και σχήματος για μόνωση μετασχηματιστών κατασκευάζονται από GRP με τη μέθοδο Pultrusion.

Αντιδιαβρωτικές κατασκευές: Εφαρμογές στην παραγωγή κατασκευών ανθεκτικών σε χημική διάβρωση. Γενικά, οι εφαρμογές των GRP στην γεωργία και στην κατασκευή δεξαμενών και σωλήνων για βιομηχανικούς σκοπούς (χημική βιομηχανία) βασίζεται στον συνδυασμό του χαμηλού ειδικού βάρους και την αντίσταση σε διάβρωση του υλικού αυτού. Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα των GRP είναι η κατασκευή δεξαμενών και αναρροφητήρων για την αποθήκευση τοξικών χημικών ουσιών, σωλήνων για την μεταφορά νερού και αποχετευτικών λυμάτων, δεξαμενών νερού και κρασιού καθώς και στην κατασκευή εγκαταστάσεων για τη παραγωγή χημικών ουσιών, όπως στην παραγωγή χλωρίου. (Εικόνα 2.6)



Εικόνα 2.6: Δεξαμενή GRP για αποθήκευση υγρών.

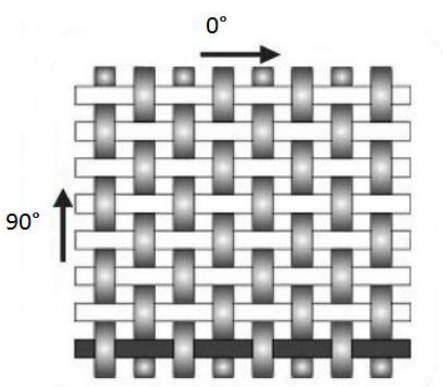
2.6 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΥΦΑΣΜΑΤΩΝ ΑΠΟ ΙΝΕΣ ΥΑΛΟΥ

Οι ίνες των σύνθετων υλικών τοποθετούνται με διάφορους τρόπους ανάλογα με τις ανάγκες της κάθε εφαρμογής. Η ανάπτυξη της κατηγορίας των

σύνθετων υλικών με ενίσχυση τύπου υφάσματος προέκυψε εξαιτίας της απλούστερης διαδικασίας κατασκευής τους. Βάσει του τρόπου τοποθέτησης (ύφανση) και του συνδυασμού των ινών στο συνδετικό υλικό, τα σύνθετα υλικά ινών κατατάσσονται στις ακόλουθες κατηγορίες.

2.6.1 Απλή Πλέξη (Plain Weave)

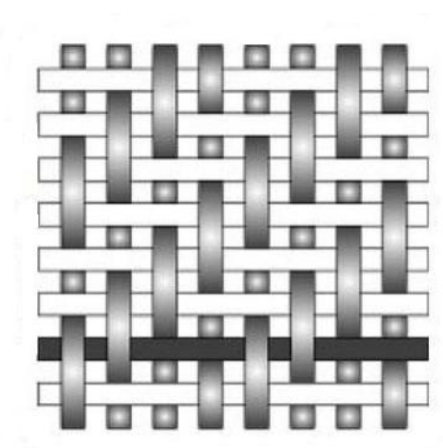
Το ύφασμα είναι συμμετρικό, με καλή σταθερότητα και πορώδη ιδιότητες. Ωστόσο τα υφάσματα απλής πλέξης έχουν σχετικά χαμηλές μηχανικές ιδιότητες σε σχέση με τα υφάσματα άλλων πλέξεων, λόγω των πολλών πτυχώσεων που έχουν οι ίνες. (Σχήμα 2.3)



Σχήμα 2.3: Απλή πλέξη.

2.6.2 Διαγώνια Πλέξη (Twill)

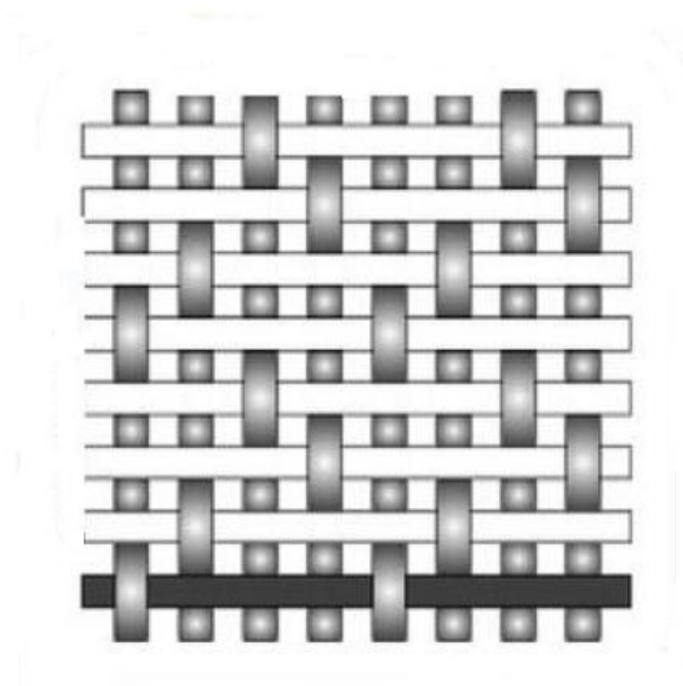
Ένας ή περισσότεροι διαμήκης θύσανοι ινών περνούν εναλλάξ πάνω και κάτω από έναν ή περισσότερους εγκάρσιους θυσάνους με επαναληπτικό τρόπο. Αυτό δημιουργεί την οπτική αίσθηση μιας ευθείας ή διαγώνιας σπαστής ράβδου, εξού και η ονομασία Twill. Τα υφάσματα με διαγώνια πλέξη έχουν μεγαλύτερη πυκνότητα ινών ανά μονάδα επιφάνειας και καλύτερη δυνατότητα εμποτισμού σε σχέση με τα υφάσματα απλής πλέξης. Επίσης, λόγω της λιγότερο κυματοειδούς μορφής τα υφάσματα αυτά έχουν ομαλότερη επιφάνεια και ελαφρώς καλύτερες μηχανικές ιδιότητες. (Σχήμα 2.4)



Σχήμα 2.4: Διαγώνια πλέξη.

2.6.3 Πλέξη Σατέν (Satin)

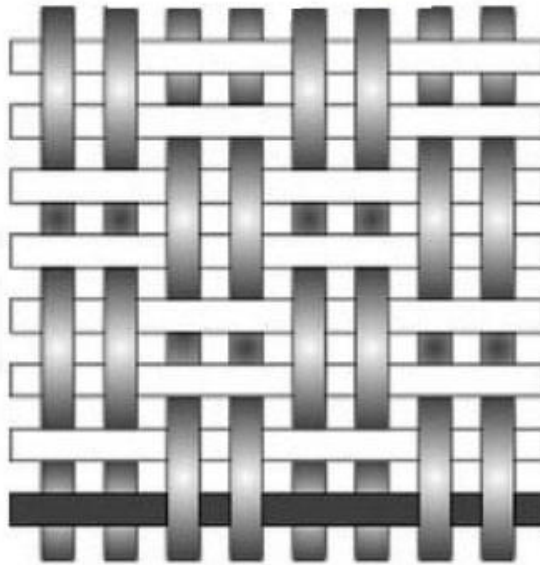
Οι σατέν πλέξεις είναι στη πραγματικότητα διαγώνιες πλέξεις τροποποιημένες ώστε να δημιουργούν λιγότερες διασταυρώσεις των εγκαρσίων και διαμήκη θυσάνων ινών. Τα υφάσματα αυτών των πλέξεων είναι πολύ-επίπεδα, εμποτίζονται εύκολα και έχουν καλύτερες μηχανικές ιδιότητες από τα προαναφερόμενα λόγω των ακόμη λιγότερων πτυχώσεων των θυσάνων. Ωστόσο, η χαμηλή σταθερότητα και ασυμμετρία κάνουν την μία κατεύθυνση του υφάσματος να έχει κυρίως κατακόρυφες ή οριζόντιες ίνες, ενώ η άλλη τις υπόλοιπες. Κατά τη χρήση αυτών των πλέξεων χρειάζεται προσοχή ώστε να μην δημιουργηθούν τάσεις εξαιτίας αυτής της ασυμμετρίας στη μορφή. (Σχήμα 2.5)



Σχήμα 2.5: Πλέξη σατέν.

2.6.4 Καλαθωτή Πλέξη (Basket Weave)

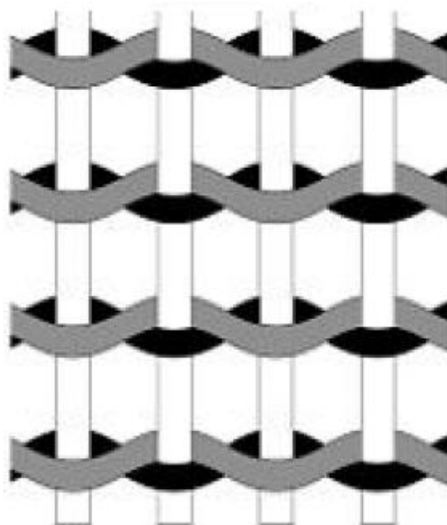
Η πλέξη αυτή είναι αντίστοιχη με την απλή, μόνο που δύο ή περισσότεροι θύσανοι ινών περνούν εναλλάξ πάνω και κάτω από δύο ή περισσότερους κατακόρυφους θυσάνους. Η πλέξη αυτή είναι ισχυρότερη και πιο σταθερή από την απλή. Υπάρχουν υφάνσεις (2-2, 8-4, 5-2). (Σχήμα 2.6)



Σχήμα 2.6: Καλαθωτή πλέξη.

2.6.5 Πλέξη Leno

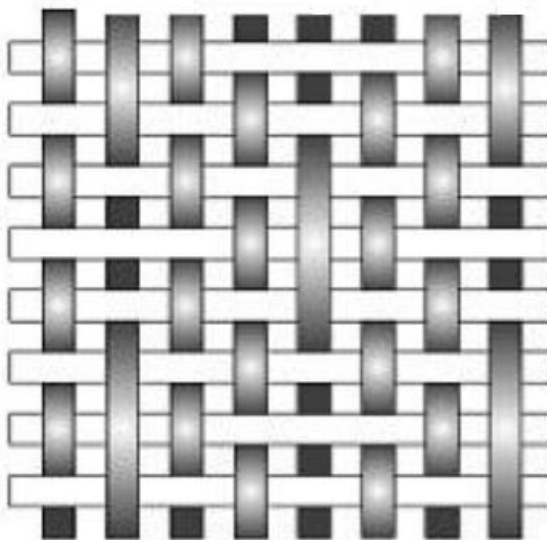
Η ύφανση αυτή βελτιώνει τη σταθερότητα των ανοικτών υφασμάτων με χαμηλό ρυθμό ινών. Είναι μια μορφή απλής πλέξης στη οποία οι διπλανοί διαμήκης θύσανοι ινών πλέκονται γύρω από διαδοχικούς εγκάρσιους ώστε να δημιουργηθεί ένα σπειροειδές ζεύγος, κλειδώνοντας με αυτό τον τρόπο κάθε κατακόρυφο θύσανο στο ίδιο μέρος. Τα υφάσματα με αυτή την πλέξη χρησιμοποιούνται πάντοτε σε συνδυασμό με υφάσματα διαφορετικών πλέξεων επειδή λόγω της μορφής τους δεν μπορούν να δημιουργήσουν ένα αποτελεσματικό σύνθετο υλικό. (Σχήμα 2.7)



Σχήμα 2.7: Πλέξη Leno.

2.6.6 Πλέξη Mock Leno

Είναι μια έκδοση της απλής ύφανσης, στην οποία υπάρχουν σποραδικοί οριζόντιοι θύσανοι ινών, σε ίσα διαστήματα αλλά συνήθως αρκετούς θύσανους μακριά αποκλίνουν από το συνηθισμένο μοτίβο (πάνω-κάτω κάθε ένας θύσανος) και το κάνουν κάθε δύο ή περισσότερους. Το ίδιο συμβαίνει με παρόμοια συχνότητα και στην κατακόρυφη διεύθυνση και το τελικό αποτέλεσμα είναι ένα ύφασμα με αυξημένο πάχος, πιο τραχεία επιφάνεια και πρόσθετο πορώδες. (Σχήμα 2.8)



Σχήμα 2.8: Πλέξη Mock Leno.

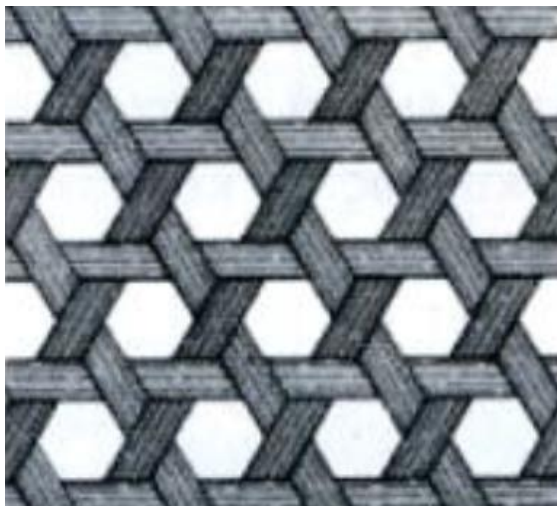
Σε όλες τις παραπάνω πλέξεις τι κοινό σημείο είναι ότι οι διασταυρώσεις γίνονται στις 90°. Είναι όμως πιθανό να κατασκευαστούν (διαγώνια πλεκτά) με κλίση 45° ή 60°. Αν το πλεκτό δημιουργείτε από πλέξιμο είναι δυνατό να παραχθεί ένα ύφασμα στο οποίο τα στημόνια (warp) και τα υφάδια (fill) είναι ίσια ή παράλληλα, χωρίς στρέβλωση, όπως προέρχεται από την ύφανση. Τα νήματα κρατούνται στη θέση τους με πολύ λεπτές πλεξούδες από ίνες γυαλιού ή πολυεστερικές ίνες. Αυτού του είδους τα πλεκτά, που ονομάζονται (non-crimp) μη κατσαρά, δημιουργούν ισχυρότερα και πιο δύσκαμπτα σύνθετα υλικά, διότι οι ίνες είναι ευθυγραμμισμένες.

Πίνακας 2.3: Χαρακτηριστικά πλέξης 2 αξόνων.

ΙΔΙΟΤΗΤΑ	PLAIN	TWILL	SATIN	BASKET	LENO	MOCK LENO
ΣΤΑΘΕΡΟΤΗΤΑ	****	***	**	**	*****	***
ΠΟΡΩΔΕΣ	***	****	*****	**	*	***
ΟΜΑΛΟΤΗΤΑ	**	***	*****	**	*	**
ΙΣΟΡΡΟΠΙΑ	****	****	**	****	**	****
ΣΥΜΜΕΤΡΙΑ	*****	***	*	***	*	****
ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΣ	**	***	*****	**	*****	**

2.6.7 Πλέξη 3 αξόνων

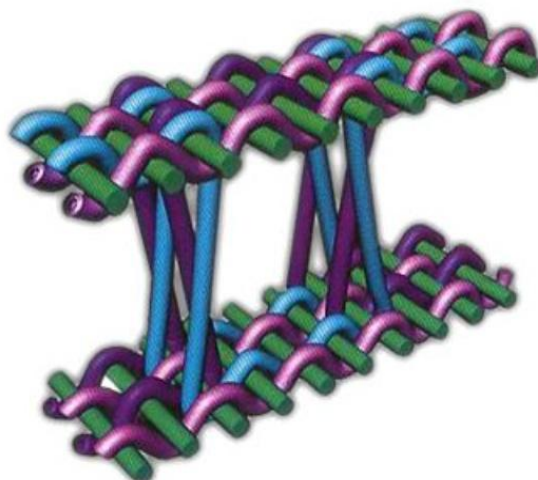
Στη πλέξη τριών αξόνων, μια συνεχή πλεξίδα ινών τέμνεται υπό γωνία 60° με άλλες δύο, όπου από τη μια περνάει από πάνω και από την άλλη από κάτω. Έτσι σχηματίζεται η παρακάτω δομή. (Σχήμα 2.9)



Σχήμα 2.9: Πλέξη τριών αξόνων.

2.6.8 Τρισδιάστατη πλέξη

Η τρισδιάστατη πλέξη αποτελείται από δύο επίπεδα υφάσματα τα οποία είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους με κάθετες στήλες από θυσάνους ινών. Αυτή η δομή ονομάζεται (σάντουιτς). Όταν το ύφασμα διαπλοίζεται με θερμοσκληρυνόμενη ρητίνη, τότε το ύφασμα απορροφά αμέσως την ρητίνη και λόγω των κάθετων ινών, το ύψος του υφάσματος αυξάνεται μέχρι ενός προκαθορισμένου σημείου. Το σύνθετο υλικό τρισδιάστατης πλέξης έχει άριστες μηχανικές ιδιότητες και αρκετή ευελιξία και γι' αυτό χρησιμοποιείται ευρέως σε πολλές εφαρμογές στη βιομηχανία, όπως σε πλοία, σιδηρόδρομους, αυτοκίνητα, αεροπλάνα, δεξαμενές διπλού τοιχώματος κ.ά. (Σχήμα 2.10)

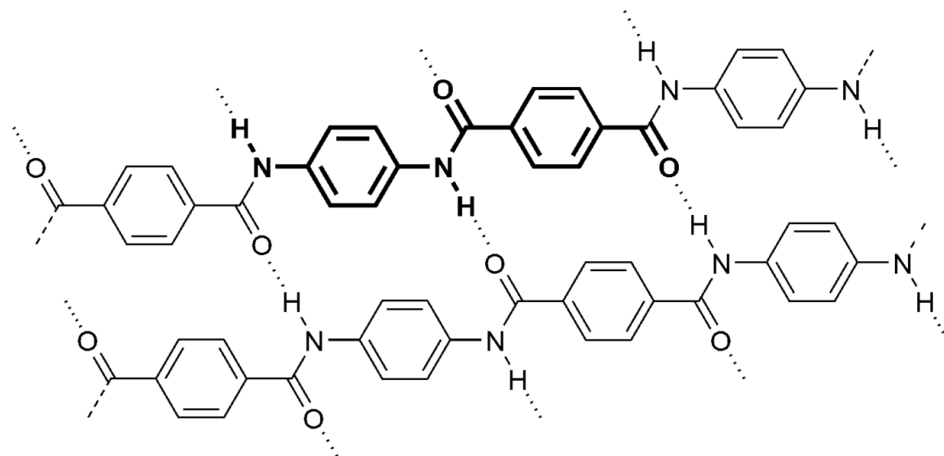


Σχήμα 2.10: Δομή τρισδιάστατης πλέξης.

3. ΑΡΑΜΙΔΙΟ

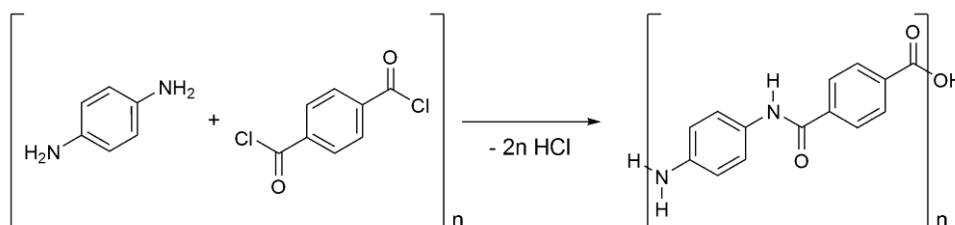
3.1 ΓΕΝΙΚΑ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗ

Η πιο επιτυχής οργανική ίνα που παρασκευάστηκε βιομηχανικά είναι εκείνη που αναπτύχθηκε από την χημικό Stephanie Kwolek για την εταιρεία DuPont με την επωνυμία Kevlar. Δεν υπάρχουν λεπτομέρειες για τον τρόπο παρασκευής της αλλά σύμφωνα με την αρχική πατέντα του 1968 οι ίνες Kevlar βασίζονται στο πολυπαραβενζαμίδιο και έχουν μέτρο ελαστικότητας 130 (GPa). Υπάρχουν δύο τύποι ινών Kevlar το Kevlar 29 και το Kevlar 49. Το Kevlar 29 έχει υψηλή αντοχή και μέτριο μέτρο ελαστικότητας. Το Kevlar 49 έχει υψηλότερο μέτρο αλλά την ίδια αντοχή με το Kevlar 29 και είναι το πλέον κατάλληλο για ενίσχυση συνθέτων υλικών. Χρησιμοποιείται συνήθως σε βαλλιστικές εφαρμογές. Η αντοχή του σε θλίψη είναι ιδιαίτερα χαμηλή.



Σχήμα 3.1: Δομή αραμιδίου (Kevlar)

Οι ίνες αραμιδίου είναι ισχυρά ανισότροπες με ισχυρούς ομοιοπολικούς δεσμούς στην διεύθυνση των ινών και ασθενείς δεσμούς υδρογόνου μεταξύ των αλυσίδων. Ο ισχυρά ανισότροπος χαρακτήρας οδηγεί σε χαμηλό μέτρο διάτμησης, και χαμηλές εγκάρσιες και θλιπτικές ιδιότητες. (Σχήμα 3.1, 3.2)



Σχήμα 3.2: Διαδικασία παραγωγής αραμιδίου (Kevlar)

3.2 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Το αραμίδιο (Kevlar) έχει μεγάλη αντοχή σε εφελκυσμό της τάξεως των 3620 Μπα. Ακόμα έχει την ιδιότητα να διατηρεί τις μηχανικές του ιδιότητες σε θερμοκρασίες από -196°C έως 160°C . Συγκεκριμένα σε πολικές θερμοκρασίες έχει παρατηρηθεί μια μικρή βελτίωση των ιδιοτήτων του αραμιδίου ενώ σε υψηλές θερμοκρασίες εμφανίζει μια μείωση στην αντοχή του της τάξης του 10 με 20%. Το μεγάλο πλεονέκτημα του αραμιδίου είναι η υψηλή μηχανική του αντοχή σε κρουστικά φορτία γι αυτό και βλέπουμε να χρησιμοποιείται σε γιλέκα, θωρακισμένα οχήματα και κράνη.(Εικόνα 3.1, 3.2)



Εικόνα 3.1: Τοποθέτηση Kevlar σε πόρτα οχήματος για θωράκιση.



Εικόνα 3.2: Κράνος μετά την απορρόφηση της κρούσης από σφαίρα.

3.3 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΥΦΑΣΜΑΤΩΝ ΑΠΟ ΙΝΕΣ ΑΡΑΜΙΔΙΟΥ

Οι ίνες αραμιδίου πλέκονται όπως ακριβώς οι ίνες ανθρακονημάτων και υαλοϋφασμάτων σε απλή, διαγώνια και σατέν πλέξη. (Εικόνα 3.3)



Εικόνα 3.3: Ύφασμα βαλλιστικού αραμιδίου μονής πλέξης, κωδικός K468P, βάρος 460 gr/m^2 . Στημόνι 50% 3300 tdex αραμίδιο του υφάσματος, 6,7 κλωστές ανά εκατοστό. Υφάδι 50% 3300 tdex του υφάσματος, 6,7 κλωστές ανά εκατοστό.

4. ΠΟΛΥΜΕΡΗ

4.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η φυσική συμπεριφορά των πολυμερών, για παράδειγμα κατά την διαδικασία της θέρμανσης τους, επιβάλλει μια συσχέτιση με τη μοριακή τους δομή, γεγονός που οδηγεί στην κατάταξη των πολυμερών σε τρεις κατηγορίες, τα θερμοπλαστικά, τα θερμοσκληρυνόμενα και τα ελαστομερή. Ουσιαστικά, αυτή η κατάταξη των πολυμερών παρουσιάζει μεγάλη σημασία και πρακτική εφαρμογή. Δηλαδή, κάποιος γνωρίζοντας σε ποια κατηγορία ανήκει κάποιο πολυμερές, αμέσως προσανατολίζεται σχετικά με την μοριακή δομή του και γενικότερα με την φυσική συμπεριφορά του. Συγκεκριμένα, θερμοσκληρυνόμενα (thermosettings) είναι εκείνα τα πολυμερή που στην τελική φάση επεξεργασίας, με την επίδραση της θερμότητας, αποκτούν διασταυρούμενες συνδέσεις προς σχηματισμό πλέγματος. Τα μόρια, δηλαδή, συνδέονται σταθερά με κύριους δεσμούς μεταξύ τους και έτσι επιτυγχάνεται τέτοια συνοχή στο πλέγμα, ώστε δεν μπορεί πλέον το πολυμερές να μεταβεί στην πλαστική κατάσταση. Η διαδικασία, λοιπόν, της θερμοσκληρύνσεως είναι μη αναστρέψιμη.

4.2 ΡΗΤΙΝΕΣ

Τα πολυμερή ανάλογα με την μορφή στην οποία διατίθενται για την περαιτέρω επεξεργασία τους διακρίνονται σε διάφορες κατηγορίες. Μεταξύ αυτών και οι συνθετικές ρητίνες. Οι συνθετικές ρητίνες είναι χαμηλού μοριακού βάρους ενδιάμεσα προϊόντα ή πρώτες ύλες από μακρομοριακές ενώσεις που βρίσκονται στην υγρή κατάσταση ή είναι διαλυτά ή τηκόμενα στερεά και που λαμβάνουν την απαιτούμενη αντοχή για τις συγκεκριμένες εφαρμογές μόνο κατόπιν της κατάλληλης επεξεργασίας τους. Διακρίνονται σε δύο κατηγορίες :

1) Βασικές Ύλες για βερνίκια, επιχρίσματα και κόλλες, φερόμενες με την μορφή διαλυμάτων και γαλακτωμάτων.

2) Τεχνικές Ρητίνες ως συνδετικά μέσα για ξύλινα αντικείμενα, δέρματα, τεχνητό λίθο και ενδιάμεσα προϊόντα για την κυρίως επεξεργασία των πολυμερών, ενώ συνήθως μαζί με τα πρόσθετα επεξεργάζονται προς μια «μάζα μορφώσεως», δηλαδή ως πρώτη ύλη για την παραγωγή των τελικών εμπορικών προϊόντων του πολυμερούς με μορφοποίηση υπό θέρμανση και πίεση.

Οι τεχνητές ρητίνες αποτελούνται από μία ευρεία συλλογή πολυμερών:

1) Σκληρυνόμενες τεχνητές ρητίνες :

Θερμοσκληρυνόμενες Ρητίνες: Σκληραίνουν μόνιμα κατά τη διάρκεια του πολυμερισμού και σκλήρυνσής τους (curing). Τέτοιες είναι οι φαινολικές ή φαινοπλάστης (phenolic), οι εποξειδικές (epoxy), οι βινυλεστερικές (vinylester)

και οι πολυεστερικές (polyester) ρητίνες, οι οποίες αποτελούν και τις περισσότερο χρησιμοποιούμενες. Αυτές αναμειγνυόμενες με φυτικές ρητίνες (κυρίως με κολοφώνιο), με λινέλαιο ή με τερεβινθέλαιο δίνουν πολλά είδη υλικών, τα οποία διαλύονται μόνο στα έλαια.

Μονομερείς Ρητίνες Χυτεύσεως : πολυμεθακρυλικό μεθύλιο

2) Ρητίνες για βερνίκια , μέσα διαποτίσεως, κόλλες κλπ

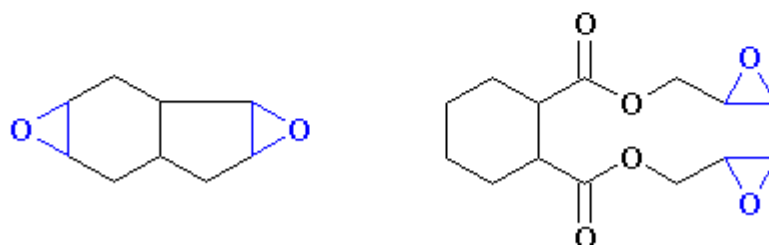
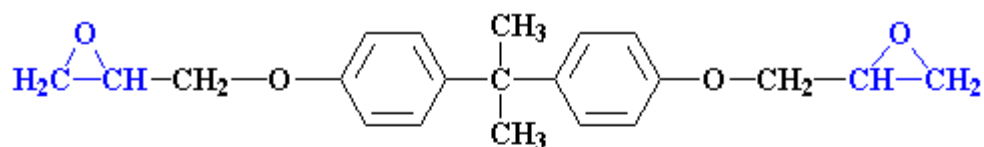
Θερμοπλαστικές Ρητίνες: Είναι διαλύματα πτητικών διαλυτών (20-60%) και επίσης αραιές υδατικές διασπορές. Τέτοιες είναι το πολυχλωριούχο βινύλιο, πολυοξικό βινύλιο, πολυβινυλική αλκοόλη.

Ρητίνες σκληρυνόμενες ως πλέγμα : Τέτοιες είναι ρητίνες φορμόλης – ουρίας (αμινοπλάστες), οι οποίες διαλύονται στο οινόπνευμα και στους υδρογονάνθρακες, οι ακόρεστες πολυεστερικές ρητίνες, οι εποξειδικές ρητίνες, η πολυουρεθάνη, οι γλυκεροφθαλικές ρητίνες.

4.2.1 ΕΠΟΞΕΙΔΙΚΕΣ ΡΗΤΙΝΕΣ

Αν και αναπτύχθηκαν ευρέως κατά τον Δεύτερο Παγκόσμιο πόλεμο, οι εποξειδικές ρητίνες έγιναν εμπορικά διαθέσιμες κατά το 1950, προσφέροντας υψηλή απόδοση σε υψηλές θερμοκρασίες και διαβρωτικά περιβάλλοντα. Λόγω των ιδιοτήτων τους, βρίσκουν μεγάλη εφαρμογή στη βιομηχανία και μια από τις πιο διαδεδομένες εφαρμογές τους είναι η χρήση τους ως μήτρες στα σύνθετα υλικά. Εποξειδικό ή πολυεποξειδικό είναι ένα θερμοσκληρυνόμενο πολυμερές. Οι εποξειδικές ρητίνες αποτελούνται από αλυσίδες που έχουν τουλάχιστον δύο επόξυ-ομάδες. Οι εποξειδικές ρητίνες ανήκουν στην κατηγορία των θερμοσκληρυνόμενων πολυμερών και χαρακτηρίζονται από την παρουσία του οξιρανικού δακτυλίου. Ανάλογα με τον αριθμό των δακτυλίων που βρίσκονται παρόντες στο μόριο, οι εποξειδικές ρητίνες χωρίζονται σε διδραστικές (δύο οξιρανικοί δακτύλιοι), ή πολυδραστικές (τρεις ή περισσότεροι δακτύλιοι). Ο οξιρανικός δακτύλιος αντιδρά με ένα ευρύ φάσμα άλλων οργανικών ενώσεων. Για την ένωση δύο μορίων στα άκρα των οποίων υπάρχει η συγκεκριμένη ομάδα, απαιτείται ένα τρίτο μόριο που ουσιαστικά χρησιμοποιείται ως συνδετικός κρίκος, έτσι ώστε να ξεκινήσει η αντίδραση που οδηγεί στο σχηματισμό ενός τρισδιάστατου δικτύου. Το τρίτο αυτό μόριο ονομάζεται σκληρυντής και συνήθως είναι κάποιος διδραστικός ανυδρίτης ή αμίνη. Ενόστε, χρησιμοποιούνται και άλλες χημικές ουσίες που ονομάζονται εκκινητές, για να ξεκινήσει ομαλότερα η διαδικασία της αντίδρασης (Σχήμα 4.1). Οι εποξειδικές ρητίνες που κυκλοφορούν στο εμπόριο αποτελούνται συνήθως από μίγματα μακρομορίων που φέρουν στα άκρα τους τον οξιρανικό δακτύλιο, περιέχουν αρωματικούς δακτυλίους και συνοδεύονται από συστήματα σκληρυντών και εκκινητών. Από πλευράς σύστασης οι εποξειδικές ρητίνες μπορεί να στερεές ή ρευστές. Οι στερεές εποξειδικές ρητίνες είναι άκαμπτα άμορφα στερεά που μοιάζουν με γυαλί. Μελετώντας την δομή των εποξειδικών ρητινών με κάποιο πρόσθετο όπως σκληρυντής, πλαστικοποιητής με την βοήθεια ηλεκτρονικών μικροσκοπίων, παρατηρούμε ότι οι ρητίνες αποτελούνται από σχεδόν μικρού μεγέθους μακρομόρια τρισδιάστατα διακλαδωμένα δίκτυα ή συσσωματώματα, μέτριου

μοριακού βάρους, τοποθετημένα σε ένα πλαίσιο από μόρια μικρού μοριακού βάρους. Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα των στερεών εποξειδικών ρητινών σε σχέση τις υγρές ρητίνες είναι η εύκολη επεξεργασία τους, η μηχανική αντοχή, η υψηλή χημική αντίσταση και το άριστο κολλώδες.



Σχήμα 4.1: Εποξικά μονομερή.

Οι κυριότερες ιδιότητες των υγρών εποξειδικών ρητινών είναι οι παρακάτω:

1) Χαμηλή υδροσκοπικότητα, καλή διαστατική σταθερότητα και ικανοποιητική αντοχή στην επίδραση ύδατος, οξέων, βάσεων και πολλών οργανικών διαλυτών. Είναι υγρά με χαμηλό ιξώδες, όπως και τα μίγματά τους με πρόσθετα (πλαστικοποιητές, σκληρυντές), με αποτέλεσμα την εύκολη κατεργασία τους.

2) Η επεξεργασία των ρητινών είναι εύκολη και γρήγορη για θερμοκρασίες από 50C μέχρι 1500C και εξαρτάται από την εκλογή του πρόσθετου.

3) Υψηλές μηχανικές ιδιότητες που μπορεί να οφείλονται στη μικρή συστολή τους, έτσι μειώνεται η παρουσία τάσεων.

4) Άριστη ηλεκτρική μόνωση.

5) Υψηλή δύναμη συγκόλλησης. (Στην σύγχρονη τεχνολογία πλαστικών είναι από τις μεγαλύτερες που έχουν παρατηρηθεί). Αυτή η ιδιότητα αποτελεί έναν σημαντικό παράγοντα για τις πολλές εφαρμογές.

- 7) Ποικιλία εφαρμογών. Οι βασικές τους ιδιότητες μπορούν να τροποποιούνται κάθε φορά ανάλογα με τις απαιτήσεις της συγκεκριμένης εφαρμογής. (Ανάμειξη με κάποιο πρόσθετο της επιλογής μας, χρήση τροποποιητικών και συνθέσεων).
- 8) Καλή χημική αντίσταση που εξαρτάται από το πρόσθετο που χρησιμοποιείται. Συνολικά οι εποξειδικές ρητίνες έχουν πολύ υψηλή αντίσταση στα καυστικά και καλή μέχρι άριστη στα οξέα.
- 9) Μικρή συστολή κατά τον πολυμερισμό και κατά την διάρκεια της επεξεργασίας τους. Αυτή η μικρή συστολή είναι ένα μεγάλο πλεονέκτημα για τις εποξειδικές ρητίνες.

5. ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΣ ΚΑΤΑ ASTM

5.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία ασχολείται με τη μηχανική δοκιμή σύνθετων πολυμερικών υλικών υπό συνθήκες μονοαξονικής εφελκυστικής φόρτισης, σύμφωνα με τις απαιτήσεις του διεθνούς προτύπου ASTM D3039 «Πρότυπη Μέθοδος Δοκιμής για τον προσδιορισμό των Ιδιοτήτων σε Εφελκυσμό Σύνθετων Υλικών Πολυμερικής Μήτρας» (Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials) της Αμερικανικής Εταιρείας Δοκιμών και Υλικών (American Society for Testing and Materials, ASTM). Στόχος είναι να έρθουμε σε επαφή με το πρότυπο ASTM, κυρίως τις πληροφορίες που παρέχει, τις οδηγίες εκτέλεσης πειραμάτων, και όλα τα σημεία που πρέπει να ληφθούν υπόψη για να είναι η δοκιμή πιστοποιημένη κατά ASTM. (Εικόνα 5.1)

Με την προτεινόμενη μέθοδο μπορούν να προσδιοριστούν οι εφελκυστικές ιδιότητες σύνθετων υλικών πολυμερικής μήτρας με ενίσχυση ινών υψηλού μέτρου ελαστικότητας. Η μέθοδος αφορά σύνθετα υλικά συνεχών και ασυνεχών ινών στα οποία οι στρώσεις είναι συμμετρικές ως προς την διεύθυνση φόρτισης. Οι τιμές που αναφέρονται είναι είτε σε μονάδες (SI) είτε σε μετρικές (ίντσες-πόδια) και πρέπει να θεωρούνται μέρος του προτύπου. Οι μετρικές μονάδες εμφανίζονται σε αγκύλες. Οι τιμές που αναφέρονται στα 2 συστήματα μονάδων δεν είναι ακριβώς ισοδύναμες, έτσι κάθε σύστημα πρέπει να χρησιμοποιείται αυτόνομα. Ο συνδυασμός τιμών από τα 2 συστήματα μονάδων μπορεί να οδηγήσει σε αποκλίσεις από το πρότυπο. Τέλος οι κανόνες ασφαλείας που πρέπει να τηρούνται κατά τη διάρκεια των δοκιμών περιγράφεται στο πρότυπο.

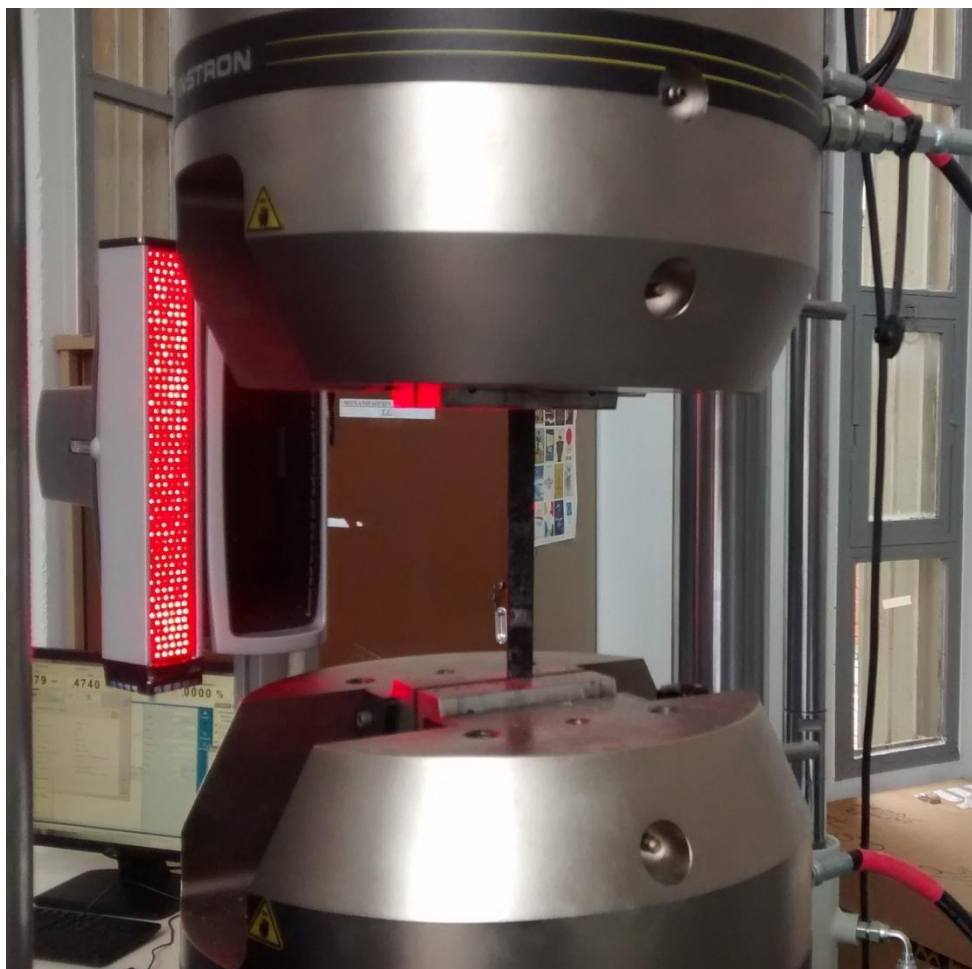
5.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΟΚΙΜΩΝ

Μια λεπτή λωρίδα υλικού σταθερής ορθογώνιας διατομής τοποθετείται στις αρπάγες ενός πλαισίου μηχανικών δοκιμών και υποβάλλεται σε μονότονη εφελκυστική φόρτιση ενώ καταγράφεται το φορτίο. Η αντοχή του υλικού προσδιορίζεται από την τιμή του μέγιστου φορτίου του δοκιμίου πριν την αστοχία. Εφόσον η παραμόρφωση του δοκιμίου καταγράφεται μέσω επιμηκυνσιόμετρων ή άλλου καταγραφικού παραμόρφωσης, μπορεί να προσδιοριστεί η συμπεριφορά τάσης-παραμόρφωσης του υλικού, από την οποία είναι δυνατή η εξαγωγή της αντοχής του υλικού, του μέτρου ελαστικότητας σε εφελκυσμό, του λόγου Poisson και της παραμόρφωσης μετάβασης. Η παρούσα μέθοδος δοκιμών έχει σχεδιαστεί ώστε να παράγει δεδομένα εφελκυστικών ιδιοτήτων για τον καθορισμό των προδιαγραφών των υλικών, για έρευνα και ανάπτυξη, για διασφάλιση ποιότητας, για δομικό σχεδιασμό και ανάλυση. Παράγοντες που επηρεάζουν την εφελκυστική απόκριση του υλικού είναι τα υλικά, οι μέθοδοι παρασκευής τους, ο τρόπος τοποθέτησης των στρώσεων των δοκιμίων, οι μέθοδοι παρασκευής των δοκιμίων, οι μέθοδοι μηχανικής κατεργασίας των δοκιμίων, το περιβάλλον δοκιμής και η ευθυγράμμιση των δοκιμίων στις αρπάγες, καθώς και ο τύπος των αρπαγών. Ακόμα σημαντικό ρόλο παίζει η ταχύτητα της δοκιμής, η

διάρκεια της φόρτισης και η θερμοκρασία του περιβάλλοντος κατά την κατασκευή των δοκιμών αλλά και κατά το πείραμα του εφελκυσμού.

Κατά το πείραμα οι ιδιότητες που μπορούν να μετρηθούν κατά μήκος της διεύθυνσης φόρτισης, μέσω της παρούσας μεθόδου περιλαμβάνουν:

- Αντοχή σε εφελκυσμό
- Παραμόρφωση θραύσης
- Μέτρο ελαστικότητας εφελκυσμού
- Λόγος Poisson
- Παραμόρφωση μετάβασης



Εικόνα 5.1: Πείραμα εφελκυσμού κατά ASTM D3039 σε σερβουδραυλική μηχανή (INSTRON 8802), 260 (kN) δυναμικότητα. Τυποποιημένο δοκίμιο ανθρακονήματος (C200P)

5.3 ΑΠΟΚΛΙΣΕΙΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Κατά την παρασκευή των υλικών και των δοκιμών οι συνήθεις κακές πρακτικές παρασκευής του υλικού όπως η απώλεια ελέγχου της ευθυγράμμισης των ινών και βλάβη προκαλούμενη από κακή τεχνική μηχανικής κατεργασίας των δοκιμών είναι γνωστές αιτίες που οδηγούν σε μεγάλη διασπορά πειραματικών δεδομένων στα σύνθετα υλικά. Δεύτερον το σύστημα ασφάλισης στις αρπάγες είναι υπεύθυνο για ένα μεγάλο ποσοστό των αστοχιών που συντελούνται μέσα στις αρπάγες, ιδιαίτερα όταν

συνδυάζονται με μεγάλη διασπορά δεδομένων, υποδηλώνει προβληματική ασφάλιση του δοκιμίου στις αρπάγες. Η κακή ευθυγράμμιση του συστήματος οδηγεί σε υπερβολική κάμψη του δοκιμίου, σε πρόωρη αστοχία καθώς και σε ανακριβή υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας. Πρέπει να καταβάλλεται κάθε δυνατή προσπάθεια ώστε να αποφεύγεται η επιβολή κάμψης από το σύστημα δοκιμής στο υλικό. Κάμψη μπορεί να προκύψει σαν αποτέλεσμα της απώλειας ευθυγράμμισης του συστήματος αρπαγών ή και από τα δοκίμια τα ίδια αν τοποθετηθούν λανθασμένα στις αρπάγες ή αν είναι εκτός ορίων ανοχής λόγω κακής κατασκευής. Αν υπάρχει αμφιβολία ως προς την ευθυγράμμιση του συστήματος δοκιμών επιβάλλεται επανατοποθέτηση των δοκιμίων. Σε πολυστρωματικά σύνθετα που περιέχουν στρώσεις εκτός-άξονα παρατηρείται πρόωρη αστοχία και χαμηλότερες τιμές δυσκαμψίας. Για αυτό το λόγο η αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας πολυστρωματικών με στρώσεις υπό γωνία μπορεί να υποτιμηθεί δραστικά. Σαν φαινόμενο δεν είναι σημαντικό σε ψευδο-ισότροπα πολυστρωματικά που περιέχουν σημαντικό αριθμό στρώσεων 0° .

5.4 Μικρόμετρα.

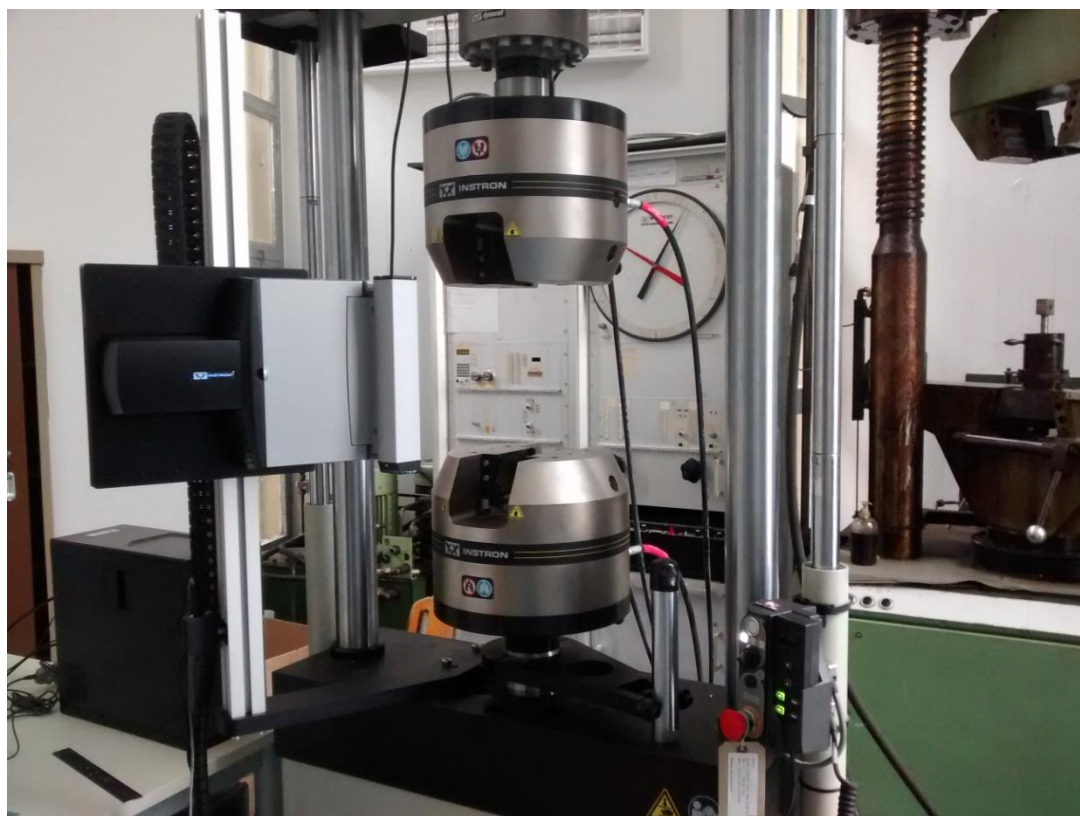
Το πάχος του δοκιμίου πρέπει να μετράται με παχύμετρο διεπαφής διπλής μπίλιας ονομαστικής διαμέτρου 4-5mm [0.16 έως 0.20 in]. Στο πλάτος του δοκιμίου πρέπει να μετράται με μικρόμετρο επίπεδης κεφαλής. Η ακρίβεια των οργάνων πρέπει να είναι επαρκής ώστε να διαβάζει στο 1% του πάχους και του πλάτους του δοκιμίου. Για τυπικές γεωμετρίες δοκιμίων, η ορθή μέτρηση πάχους και του πλάτους προϋποθέτει όργανο με ακρίβεια 62.5 (μm) [60.0001 in]. Οι μετρήσεις κατά τη κατασκευή των δοκιμίων έγιναν με ψηφιακό παχύμετρο που απεικονίζεται στην (Εικόνα 5.2).



Εικόνα 5.2: Ψηφιακό παχύμετρο, ακρίβεια 0.01mm

5.5 Μηχανή δοκιμών.

Η μηχανή δοκιμών πρέπει να είναι εφοδιασμένη με μια σταθερή και μια κινούμενη κεφαλή. Ο μηχανισμός οδήγησης των κεφαλών της μηχανής δοκιμών πρέπει να είναι ικανός να προσδίδει στην κινητή κεφαλή ελεγχόμενη ταχύτητα σε σχέση με την σταθερή κεφαλή, καθώς και να είναι υπάρχει η δυνατότητα να ρυθμιστεί η ταχύτητα της κινούμενης κεφαλής. Η συσκευή ανίχνευσης φορτίου της μηχανής δοκιμών πρέπει να είναι ικανή να δείχνει το συνολικό φορτίο που φέρει το δοκιμαζόμενο δοκίμιο. Η συσκευή θα πρέπει να είναι πρακτικά απαλλαγμένη από υστέρηση αδράνειας στον καθορισμένο ρυθμό δοκιμής και πρέπει να δείχνει το φορτίο με ακρίβεια $\pm 1\%$ στο στιγμιαίο επίπεδο φόρτισης. Το επίπεδο φόρτισης μπορεί να είναι σχετικά μικρό ώστε να επιτρέπει τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας ή πολύ μεγαλύτερο για τον προσδιορισμό της αντοχής, ή και τα δύο, ως απαιτείται κατά περίπτωση. (Εικόνα 5.3)



Σχήμα 5.3: INSTRON 8802, μηχανή εφελκυσμού του εργαστηρίου αντοχής υλικών

5.5.1 Αρπάγες.

Καθεμία από τις κεφαλές της μηχανής δοκιμών πρέπει να φέρει αρπάγη η οποία θα συγκρατεί το δοκίμιο με τρόπο ώστε η διεύθυνση επιβολής του φορτίου στο δοκίμιο να συμπίπτει με τον διαμήκη άξονα του δοκιμίου. Οι αρπάγες θα πρέπει να είναι ικανές να ασκήσουν επαρκή πλευρική πίεση (70 bar στην πειραματική μας διάταξη) ώστε να αποτρέπεται η ολίσθηση μεταξύ της επιφάνειας της αρπάγης και του δοκιμίου. Εφόσον

χρησιμοποιούνται επιθέματα, οι αρπάγες θα πρέπει να είναι αρκετά μακριές ώστε να προεξέχουν του λοξότμητου μέρους του επιθέματος κατά περίπου 10 έως 15 mm [0.5 in]. Είναι ιδιαίτερα επιθυμητό να γίνεται χρήση αρπαγών που έχουν τη δυνατότητα να αυτο-ευθυγραμμίζονται με περιστροφή, ώστε να ελαχιστοποιούνται οι καμπτικές τάσεις στο δοκίμιο. Η χρήση ελαφρώς οδοντωτών επιφανειών, με 1 περίπου οδόντωση/mm [25 οδοντώσεις/in], έχει αποδειχθεί ικανοποιητική σε σφηνοειδείς απράγες, δεδομένου ότι οι επιφάνειες διατηρούνται καθαρές και αιχμηρές. Χοντροειδείς οδοντώσεις μπορεί να προκαλέσουν τοπική αστοχία μέσα στην αρπάγη σε δοκίμια χωρίς επιθέματα. Σε υδραυλικές αρπάγες έχουν χρησιμοποιηθεί με επιτυχία ομαλές επιφάνειες, ή διεπιφάνειες από σμυριδόπανο, ή και τα δύο. (Εικόνα 5.4)



Εικόνα 5.4: Αρπάγες μηχανής εφελκυσμού 1-12 (mm) μηχανής INSTRON 8802.

5.5.2 Ευθυγράμμιση συστήματος.

Μια κακή ευθυγράμμιση συστήματος μπορεί να οδηγήσει σε πρόωρη αστοχία, σε μεγάλη διασπορά των δεδομένων των ελαστικών ιδιοτήτων, ή και τα δυο. Το σημείο μηδενικής παραμόρφωσης μπορεί να ληφθεί είτε πριν είτε μετά την ασφάλιση του δοκιμίου στις αρπάγες. Κατόπιν, παρακολουθείται η παραμόρφωση στο δοκίμιο ελέγχου ευθυγράμμισης κατά τη διάρκεια της διαδικασίας ασφάλισης στις αρπάγες, κατά τη διάρκεια της εφελκυστικής φόρτισης, ή και στις δύο περιπτώσεις.

5.5.3 Καταγραφή παραμόρφωσης.

Οι τιμές της παραμόρφωσης προσδιορίζονται είτε μέσω επιμηκυνσιομέτρου είτε μέσω άλλης συσκευής καταγραφής παραμόρφωσης.

Η προσάρτηση του αισθητήρα παραμόρφωσης στο δοκίμιο δεν πρέπει να προκαλεί βλάβη στην επιφάνεια του δοκιμίου. Για τον υπολογισμό του λόγου Poisson το δοκίμιο πρέπει να προετοιμάζεται ώστε να μετράται η παραμόρφωση τόσο στην διαμήκη όσο και στην πλευρική κατεύθυνση. Για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας, η διαμήκης παραμόρφωση πρέπει να μετράται ταυτόχρονα και στις δυο όψεις του δοκιμίου, ώστε να επιτρέπεται διόρθωση σε περίπτωση κάμψης του δοκιμίου.

5.5.4 Κλιματισμός χώρου.

Όταν απαιτείται η δοκιμή υλικών σε μη-κανονικές συνθήκες, πρέπει να χρησιμοποιείται θάλαμος κλιματισμού με έλεγχο της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας. Ο θάλαμος πρέπει να είναι ικανός να διατηρήσει την θερμοκρασία εντός $\pm 3^{\circ}\text{C}$ [$\pm 5^{\circ}\text{F}$] και την σχετική υγρασία εντός $\pm 3\%$. Οι συνθήκες του θαλάμου θα πρέπει να παρακολουθούνται είτε συνεχώς μέσω αυτόματου συστήματος είτε χειροκίνητα σε τακτά χρονικά διαστήματα. Κάθε δοκιμή σε μη-συμβατικές ατμόσφαιρες θα πρέπει να γίνεται σε θάλαμο περιβαλλοντικής δοκιμής. Ο θάλαμος θα πρέπει να είναι ικανός να διατηρήσει κατά τη διάρκεια της δοκιμής, το ενεργό μήκος του δοκιμίου στις επιθυμητές συνθήκες περιβάλλοντος. Στο εργαστήριο τεχνολογίας υλικών η κατασκευή των δοκιμίων έλαβε χώρα τους καλοκαιρινούς μήνες (Ιούνιος Ιούλιος 2014) και επικρατούσε υψηλή θερμοκρασία καθώς και υψηλά επίπεδα υγρασίας. Στο μηχανολογικό εργαστήριο όπου έγινε η επεξεργασία των δοκιμίων (περίοδος Ιούλιος, Σεπτέμβριος, Οκτώβριος) επικρατούσαν παρόμοιες συνθήκες. Τέλος στο εργαστήριο της αντοχής υλικών η θερμοκρασία και υγρασία του χώρου διατηρήθηκε σε φυσιολογικά επίπεδα μέσω του συστήματος κλιματισμού (Δεκέμβριος 2014).

5.6 ΔΟΚΙΜΙΑ ΚΑΙ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ

Για κάθε πειραματική συνθήκη θα πρέπει να δοκιμάζονται τουλάχιστον 5 δοκίμια, εκτός και αν είναι δυνατό να ληφθούν αξιόπιστα αποτελέσματα με χρήση λιγότερων δοκιμίων, όπως στην περίπτωση ενός σχεδιασμένου πειράματος. (Εικόνα 5.5)



Εικόνα 5.5: Τυποποιημένα δοκίμια εφελκυσμού

5.6.1 Γεωμετρία.

Ο σχεδιασμός δοκιμίων για καθορισμό της μηχανικής συμπεριφοράς, ειδικά εκείνων που χρησιμοποιούν επιθέματα στις άκρες, παραμένει σε μεγάλο βαθμό τέχνη περισσότερο από επιστήμη. Σήμερα ακόμη δεν υπάρχει απόλυτη συμφωνία στη βιομηχανία σχετικά με τον βέλτιστο τρόπο κατασκευής της επιφάνειας που θα ασφαλίσει στις αρπάγες. Καθένα από τα μεγάλα εργαστήρια δοκιμής σύνθετων υλικών έχει αναπτύξει δικές του μεθόδους για τα σύνθετα υλικά που χρησιμοποιεί και τα περιβάλλοντα του εργαστηρίου τους. Αν συγκρίναμε τις μεθόδους αυτές θα βλέπαμε ότι διαφέρουν πολύ, γεγονός που κάνει εξαιρετικά δύσκολο να προταθεί μια κοινή προσέγγιση ή ένα σύνολο προσεγγίσεων. Εξαιτίας αυτής της δυσκολίας, ο ορισμός της γεωμετρίας του δοκιμίου κατακερματίζεται στα ακόλουθα τρία μέρη, που συζητούνται περαιτέρω στις αντίστοιχες παραγράφους.

Πίνακας 5.1: Απαιτήσεις γεωμετρίας δοκιμίων εφελκυσμού

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΑΠΑΙΤΗΣΗ
Σχήμα	Σταθερή ορθογωνική διατομή
Ελάχιστο μήκος	Μήκος αρπάγων + 2× πάχος+ενεργό μήκος
Ελάχιστο πλάτος	Τυποποίηση
Ανοχή ελάχιστου πλάτους	±1% του πλάτους
Ελάχιστο πάχος	τυποποίηση
Ανοχή ελάχιστου πάχους	±4% του πάχους
Επιπεδότητα δοκιμίου	Επίπεδο με ελαφρά πίεση του δακτύλου
Υλικό	Carbon, Kevlar, Fiberglass
Κατεύθυνση ινών	Τυποποίηση κατασκευαστή
Πάχος επιθεμάτων	±1% του πάχους των επιθεμάτων
Γωνία λοξότμησης επιθεμάτων	5 έως 90°
Σκαλοπάτι επιθέματος-δοκιμίου	Εξομαλυσμένα

5.6.1.1 Επιθέματα.

Τα επιθέματα δεν είναι απαραίτητα. Η σημαντικότερη παράμετρος για την επιλογή των ανοχών του δοκιμίου και των μεθόδων ασφάλισης στις αρπάγες είναι η επιτυχής επιβολή φορτίου στο δοκίμιο χωρίς την πρόωρη αστοχία του σαν αποτέλεσμα σημαντικών ασυνεχειών. Κατά συνέπεια, η απόφαση για το αν θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν επιθέματα και ο καθορισμός των κύριων παραμέτρων σχεδιασμού τους μπορεί να παρθεί με βάση το τελικό αποτέλεσμα: αν δηλαδή ο τύπος και η θέση της αστοχίας είναι αποδεκτά. Αν ο τύπος αστοχίας είναι ικανοποιητικά επαναλαμβανόμενος και αποδεκτός, τότε δεν υπάρχει λόγος αλλαγής της χρησιμοποιούμενης μεθόδου ασφάλισης στις αρπάγες.

5.6.1.2 Μήκος, Πλάτος και Πάχος.

Το πλάτος και πάχος του δοκιμίου πρέπει να επιλέγεται με τρόπο ώστε να διευκολύνεται η αστοχία του δοκιμίου μέσα στο ενεργό μήκος και να διασφαλίζεται η ύπαρξη ικανού αριθμού ινών στη διατομή του υλικού, στατιστικά αντιπροσωπευτικού του κύριου όγκου του υλικού. Το μήκος του δοκιμίου θα πρέπει κανονικά να είναι αρκετά μεγαλύτερο από το απαιτούμενο ώστε να ελαχιστοποιούνται οι καμπτικές τάσεις που προκαλούνται από ελαφρές εκκεντρότητες στις αρπάγες. Το ενεργό μήκος του δοκιμίου πρέπει να κρατείται όσο το δυνατόν μακρύτερα από τις αρπάγες. Επίσης ο όγκος του υλικού που φορτίζεται πρέπει να είναι αρκετός ώστε να παράγεται ένα στατιστικά αξιόπιστο αποτέλεσμα. Οι ελάχιστες απαιτήσεις για σχεδιασμό δοκιμίων, όπως περιγράφονται στον (Πίνακα 5.1), είναι από μόνες τους ανεπαρκής για να δημιουργηθεί ένα σωστά διαστασιολογημένο σχέδιο δοκιμίου με σωστές ανοχές. Συνεπώς, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη συστάσεις για άλλες σημαντικές διαστάσεις, όπως αυτές που αναφέρονται στον (Πίνακα 5.2) για τυπικές διατάξεις υλικών. Ένας αριθμός εργαστηρίων δοκιμών έχει βρει ότι οι γεωμετρικές αυτές παράγουν αποδεκτού τύπου αστοχίες για ένα μεγάλο εύρος σύνθετων υλικών. Ωστόσο η χρήση τους δεν εγγυάται την επιτυχία.

Πίνακας 5.2: Γεωμετρικές δοκιμίων εφελκυσμού

Κατεύθυνση ινών	Πλάτος mm (in)	Συνολικό μήκος mm (in)	Πάχος mm (in)	Μήκος επιθέματος mm (in)	Πάχος επιθέματος mm (in)	Γωνία λοξότμησης
0°	15 (0.5)	250 (10.0)	1.0 (0.040)	56 (2.25)	1.5 (0.062)	7 ή 90°
90°	25 (1.0)	175 (7.0)	2.0 (0.080)	25 (1.0)	1.5 (0.062)	90°
Ισορροπημένα	25 (1.0)	250 (10.0)	2.5 (1.000)	Σμυριδόπνο	—	—
Τυχαία	25 (1.0)	250 (10.0)	2.5 (1.000)	Σμυριδόπνο	—	—

5.6.1.3 Ασφάλιση στις αρπάγες και χρήση επιθεμάτων.

Ένας μεγάλος αριθμός διατάξεων υλικών όπως τα πολυστρωματικά σύνθετα πολλών διευθύνσεων, υλικά βασισμένα σε υφάσματα ή ενωμένες στρώσεις διαποτισμένων ινών, μπορούν αν δοκιμαστούν χωρίς επιθέματα. Ωστόσο, η χρήση επιθεμάτων συνιστάται ανεπιφύλακτα κατά την καταστροφική δοκιμή υλικών μιας διεύθυνσης (ή πολυστρωματικά με έντονη συμμετοχή ινών μιας διεύθυνσης), όταν το φορτίο εφαρμόζεται στη διεύθυνση των ινών. Στον (Πίνακα 5.2) παρουσιάζονται οι προτεινόμενες σημαντικές διαστάσεις για τυπικές διατάξεις υλικών. Ένα αριθμός εργαστηρίων δοκιμών έχουν βρει ότι οι διαστάσεις αυτές παράγουν αποδεκτού τύπου αστοχίες για ένα μεγάλο εύρος συστημάτων υλικών. Ωστόσο η χρήση τους δεν εγγυάται την επιτυχία κάθε υπαρκτού ή μελλοντικού υλικού. Η επιλογή της γεωμετρίας επιθέματος που προάγει την αστοχία στο ενεργό μήκος του δοκιμίου εξαρτάται από το υλικό του δοκιμίου, την διεύθυνση των στρώσεων και το είδος των χρησιμοποιούμενων αρπαγών. Σε προσεκτικά-χειριζόμενες μη-σφηνοειδείς αρπάγες που λειτουργούν με πίεση, έχουν με επιτυχία

χρησιμοποιηθεί τετραγωνισμένα επιθέματα 90°. Σε σφηνοειδείς αρπάγες χρησιμοποιούνται με μεγάλη επιτυχία επιθέματα με μικρές γωνίες λοξότμησης (7 έως 10°) και με εξομαλυσμένο σκαλοπάτι μετάβασης από το επίθεμα στο δοκίμιο. Για λόγους ευθυγράμμισης, είναι ουσιώδες τα επιθέματα να είναι του ίδιου πάχους.

5.6.1.4 Επιθέματα τριβής.

Δεν χρειάζεται πάντα τα επιθέματα να επικολλούνται στο υπό δοκιμή υλικό, για να βοηθούν στην αποτελεσματική εισαγωγή φορτίου στο δοκίμιο. Έχουν χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε αρκετές εφαρμογές επιθέματα τριβής, που ουσιαστικά είναι μη-επικολλημένα επιθέματα που συγκρατούνται στη θέση τους μέσω της πίεσης από την αρπάγη. Τέτοια επιθέματα χρησιμοποιούνται συχνά σε συνδυασμό με σμυριδόπανο ή κάποιο άλλο ελαφρώς στιλβωτικό μέσο μεταξύ του επιθέματος και του δοκιμίου. Ωστόσο το στιλβωτικό μέσο πρέπει να είναι ικανό να αντέχει σημαντικά θλιπτικά φορτία. Μερικά είδη σμυριδόπανων έχουν αποδειχθεί αναποτελεσματικά για αυτές τις εφαρμογές εξαιτίας της αποσύνθεσης του στιλβωτικού μέσου υπό την επίδραση της πίεσης. Το πλέον κοινά χρησιμοποιούμενο υλικό επικολλώμενων επιθεμάτων είναι το σύνθετο πολυμερικής μήτρας με ενίσχυση από συνεχείς ίνες υάλου τύπου E (πλεκτού ή μη) σε γεωμετρία στρώσεων (0/90°). Το υλικό του επιθέματος συνήθως εφαρμόζεται υπό γωνία 45° ως προς τη διεύθυνση φόρτισης ώστε να δώσει μια ομαλή διεπιφάνεια. Άλλες γεωμετρίες που έχουν χρησιμοποιηθεί με επιτυχία συμπεριλαμβάνουν τα επιθέματα χάλυβα ή επιθέματα από το ίδιο υλικό με αυτό που δοκιμάζεται.

5.6.1.5 Μήκος επικολλημένου επιθέματος.

Όταν χρησιμοποιούνται επικολλώμενα επιθέματα, το ελάχιστο ενδεικνυόμενο μήκος επιθέματος μπορεί αν υπολογιστεί βάσει της ακόλουθης απλής εξίσωσης. Δεδομένου ότι η σχέση δεν λαμβάνει υπόψη την συγκέντρωση των τάσεων που είναι γνωστό ότι αναπτύσσεται στα άκρα των επικολλημένων τμημάτων, το μήκος των επιθεμάτων που υπολογίζεται από τη σχέση θα πρέπει κανονικά να προσαυξάνεται κατά κάποιον παράγοντα, ώστε να μειώνονται οι πιθανότητες αστοχίας στα άκρα αυτά.

$$L_{min} = \frac{F_{tu} \cdot h}{2 \cdot F_{su}} \quad (1.2)$$

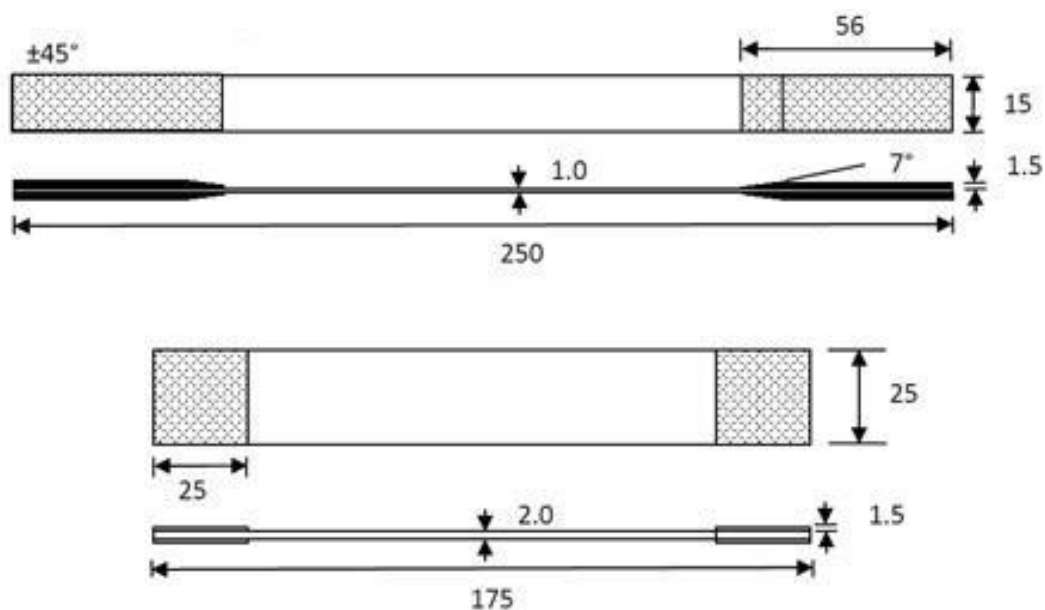
όπου:

L_{min} = ελάχιστο μήκος επιθέματος mm (in)
 F_{tu} = εφελκυστική αντοχή του υλικού Mpa (psi)
 h = πάχος δοκιμίου mm (in)
 F_{su} = διατμητική αντοχή Mpa (psi)

5.6.1.6 Μέσο επικόλλησης επιθεμάτων.

Οποιοδήποτε συγκολλητικό υψηλής επιμήκυνσης (δύσθραυστο) που ανταποκρίνεται στις περιβαλλοντικές απαιτήσεις μπορεί να χρησιμοποιηθεί

για την επικόλληση των επιθεμάτων στο υπό δοκιμή υλικό. Είναι επιθυμητή η δημιουργία μια ομοιόμορφης διεπιφάνειας συγκολλητικού υλικού με ελάχιστο πάχος ώστε να μειώνεται η πιθανότητα ανάπτυξης ανεπιθύμητων τάσεων στην κατασκευή. Σχήμα 5.1



Σχήμα 5.1: Σχέδια δοκιμών εφελκυσμού και θλίψης mm.

5.6.2 Προετοιμασία δοκιμών.

Η ευθυγράμμιση των ινών αποτελεί κρίσιμο παράγοντα. Ακατάλληλη ευθυγράμμιση οδηγεί σε μείωση των μετρούμενων ιδιοτήτων. Λανθασμένη ευθυγράμμιση μπορεί επίσης να οδηγήσει σε αύξηση του συντελεστή μεταβλητότητας. Η κατασκευή των δοκιμών είναι επίσης εξαιρετικά σημαντικός παράγοντας. Στα δοκίμια που κατασκευάζονται ένα-ένα ανεξάρτητα αποφεύγονται φαινόμενα άκρων ή κοπής, όπως μπορεί να συμβεί όταν δοκίμια κόβονται από μεγαλύτερες πλάκες. Αν τα δοκίμια κόβονται από πλάκες, πρέπει να δοθεί προσοχή ώστε να αποφεύγονται οι εγκοπές, τραχιές ή ανώμαλες επιφάνειες, ή αποκολλήσεις εξαιτίας ακατάλληλων πρακτικών μηχανικής κατεργασίας. Οι τελικές διαστάσεις λαμβάνονται μετά από υδατο-λιπαντή μικροτόμηση, φρεζάρισμα ή λείασμα. Η χρήση εργαλείων με ίχνη διαμαντιού έχει αποδειχθεί εξαιρετικά αποτελεσματική σε πολλά συστήματα υλικών. Οι άκρες πρέπει να είναι επίπεδες και παράλληλες εντός των προσδιορισμένων ανοχών. Τα δοκίμια πρέπει να τιτλοφορούνται ώστε να διαχωρίζονται μεταξύ τους και να είναι ανιχνεύσιμα ως προς την πρώτη ύλη. Η σήμανση πρέπει να γίνεται με τρόπο ώστε να παραμένει αναλλοίωτη από τη μέθοδο δοκιμής αλλά και να μην επηρεάζει την δοκιμή. (Εικόνα 5.6, 5.7)



Εικόνα 5.6: Ευθυγράμμιση υφασμάτων (Kevlar, Carbon, Fiberglass).

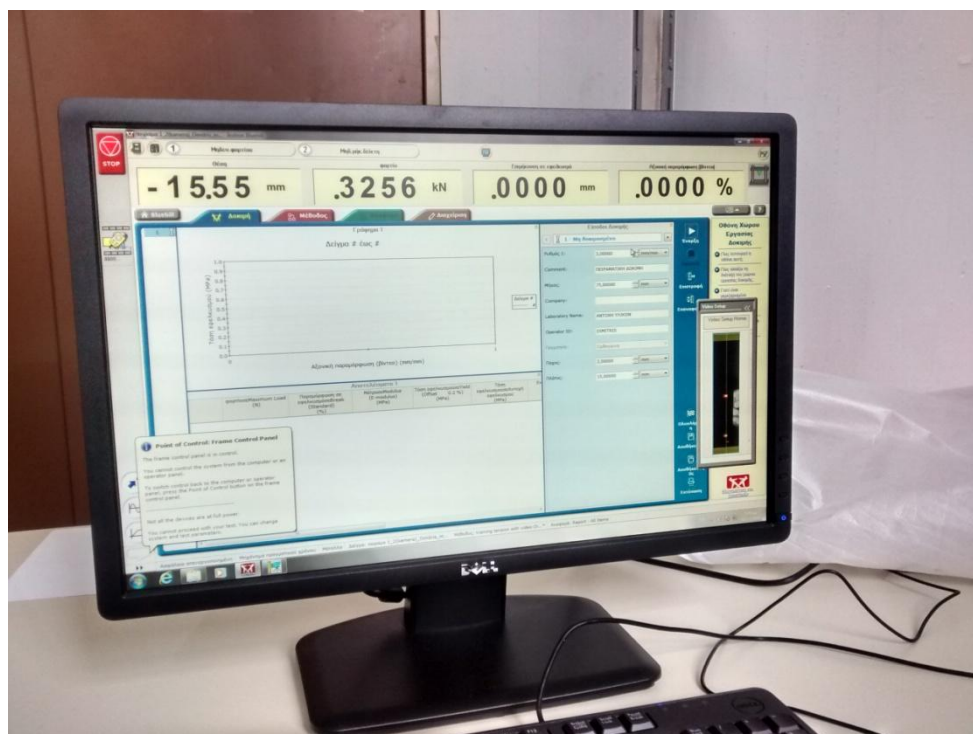


Εικόνα 5.7: Κοπή ανθρακοϋφάσματος με ηλεκτρικό ψαλίδι.

5.6.2.1 Ταχύτητα δοκιμής.

Η ταχύτητα της δοκιμής πρέπει να επιλέγεται με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτυγχάνεται σχεδόν σταθερός ρυθμός παραμόρφωσης στο ενεργό μήκος του δοκιμίου. Εάν η μηχανή δοκιμής δεν διαθέτει έλεγχο παραμόρφωσης, αυτός μπορεί να προσεγγιστεί μέσω επαναλαμβανόμενης παρακολούθησης και ρύθμισης του ρυθμού επιβολής φορτίου ώστε να διατηρείται σταθερός

ρυθμός παραμόρφωσης, όπως μετράται από την απόκριση του καταγραφέα παραμόρφωσης ως προς το χρόνο. Ο ρυθμός παραμόρφωσης πρέπει να επιλέγεται με τέτοιο τρόπο ώστε να οδηγεί σε αστοχία σε διάστημα 1 έως 10 λεπτών. Αν η αντοχή του υλικού δεν μπορεί να εκτιμηθεί με κάποιο ορθολογικό τρόπο, θα πρέπει να γίνουν προκαταρκτικές δοκιμές χρησιμοποιώντας τυπικές ταχύτητες έως ότου γίνουν γνωστές η παραμόρφωση θραύσης και η ενδοτικότητα του συστήματος, ώστε να μπορεί να ρυθμιστεί ο ρυθμός παραμόρφωσης. Σε δοκιμές υπό σταθερή ταχύτητα μετατόπισης της κεφαλής ένας τυπικός ρυθμός μετατόπισης της κεφαλής είναι (2 mm/min) [0.05 in/min]. (Εικόνα 5.8)



Εικόνα 5.8: Δεδομένα κατά την πειραματική διαδικασία του εφελκυσμού.

Η χρήση σταθερής ταχύτητας κεφαλής σε μηχανή δοκιμών με υψηλή ενδοτικότητα μπορεί να οδηγήσει σε ρυθμό παραμόρφωσης που είναι πολύ μικρότερος από αυτόν που απαιτείται. Επίσης, η χρήση σφηνοειδών αρπαγών μπορεί να προσδώσει ακραία ενδοτικότητα στο σύστημα, ειδικά όταν γίνεται ταυτόχρονη χρήση επιθεμάτων από υλικά με υψηλή ενδοτικότητα. Σε τέτοιες περιπτώσεις έχουν μετρηθεί πραγματικοί ρυθμοί παραμόρφωσης 10 με 50 φορές μικρότεροι από την τιμή που υπολογίζεται βάσει της ταχύτητας της κεφαλής.

5.6.2.2 Περιβάλλον δοκιμής.

Το δοκίμιο πρέπει να κλιματίζεται στο επιθυμητό προφίλ υγρασίας και, αν είναι δυνατό, να δοκιμάζεται στις ίδιες συνθήκες. Σε περιπτώσεις όπου απαιτείται δοκιμή σε υγρά περιβάλλοντα και υψηλή θερμοκρασία, οι δυνατότητες των κοινών περιβαλλοντικών θαλάμων των μηχανών δοκιμής είναι δυνατόν να είναι ανεπαρκείς. Σε τέτοιες περιπτώσεις, το περιβάλλον της

μηχανικής δοκιμής μπορεί να χρειαστεί να τροποποιηθεί, για παράδειγμα, να γίνει η δοκιμή σε υψηλή θερμοκρασία αλλά χωρίς έκθεση σε υγρασία, αλλά με καθορισμένο χρονικό όριο εξαγωγής από τον περιβαλλοντικό θάλαμο πριν την αστοχία. Κάθε μεταβολή του περιβάλλοντος δοκιμής θα πρέπει να αναφέρεται.

5.6.2.3 Εισαγωγή δοκιμίου.

Το δοκίμιο τοποθετείται στις αρπάγες της μηχανής με προσοχή ώστε ο διαμήκης άξονας του δοκιμίου να είναι ευθυγραμμισμένος με την διεύθυνση της δοκιμής. Κατόπιν κλείνονται οι αρπάγες και καταγράφεται η πίεση που χρησιμοποιείται, εάν πρόκειται για υδραυλικές ή πνευματικές αρπάγες. Σε σφηνοειδείς απράγες, οι επιφάνειες των σιαγόνων πρέπει να είναι παράλληλες μεταξύ τους, ώστε να αποφεύγεται η εισαγωγή καμπτικών ροπών στο δοκίμιο που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε πρόωρη αστοχία του στην περιοχή της αρπάγης. Όταν δεν γίνεται χρήση επιθεμάτων, για την αποφυγή της ολίσθησης και την αποφυγή της πρόκληση βλάβης στην επιφάνεια του δοκιμίου από την οδόντωση της αρπάγης, μπορεί να γίνει χρήση μιας λωρίδας σμυριδόπανου μέτριας τραχύτητας (P80 έως P150), μεταξύ του δοκιμίου και της επιφάνειας της αρπάγης. Η λωρίδα πρέπει να είναι διπλωμένη στη μέση ώστε να αγκαλιάζει και τις δύο πλευρές του δοκιμίου και η τραχεία πλευρά πρέπει να ακουμπά στην επιφάνεια της αρπάγης, και όχι στην επιφάνεια του δοκιμίου. Όταν χρησιμοποιούνται δοκίμια με επιθέματα, τα δοκίμια πρέπει να εισάγονται στις αρπάγες με τρόπο ώστε οι σιαγόνες να προεξέχουν του λοξόμητου μέρους του επιθέματος κατά περίπου 10 έως 15 mm [0.5 in]. Τα δοκίμια με επιθέματα που προεξέχουν εκτός των αρπαγών είναι επιρρεπή σε αστοχία στις άκρες των επιθεμάτων εξαιτίας υψηλών διατμητικών τάσεων. (Εικόνα 5.9)



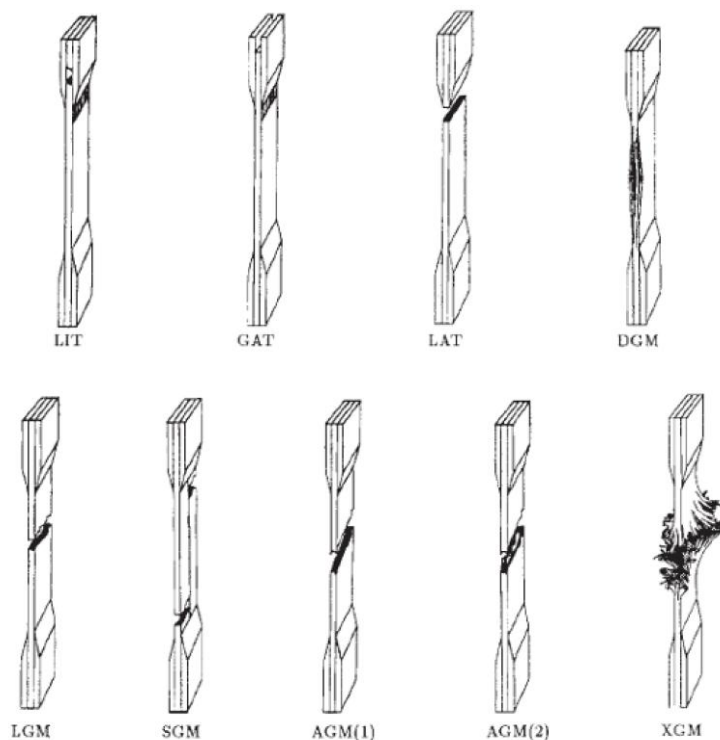
Εικόνα 5.9: Τοποθέτηση και ευθυγράμμιση δοκιμίου.

5.6.2.4 Καταγραφή δεδομένων.

Ζεύγη τιμών φορτίου και παραμόρφωσης (ή μετατόπισης) καταγράφονται συνεχόμενα ή σε τακτά χρονικά διαστήματα. Αν παρατηρηθεί μεταβατική περιοχή ή αρχική αστοχία στρώσεων, πρέπει να καταγραφούν οι τιμές του φορτίου, της παραμόρφωσης και ο τύπος αστοχίας σε αυτά τα σημεία. Αν το δοκίμιο μελετάται καταστροφικά, πρέπει να καταγραφούν το μέγιστο φορτίο, το φορτίο θραύσης και η παραμόρφωση (ή μετατόπιση) όσο το δυνατόν κοντύτερα στη στιγμή του σπασίματος. Άλλα σημαντικά δεδομένα που μπορούν να βοηθήσουν στην κατανόηση των ανωμαλιών της δοκιμής και πιθανών προβλημάτων στην ασφάλιση ή στην ολίσθηση του δοκιμίου στις αρπάγες, είναι η μεταβολή του φορτίου σαν συνάρτηση της μετατόπισης της κεφαλής της μηχανής δοκιμών και η μεταβολή του φορτίου σαν συνάρτηση του χρόνου.

5.6.2.5 Τύπος αστοχίας.

Ο τύπος και η θέση της αστοχίας του υλικού πρέπει να καταγράφεται. Αν είναι δυνατόν, η αστοχία θα πρέπει να κατηγοριοποιείται με βάση τους τυπικούς κωδικούς αστοχίας τριών- γραμμάτων που φαίνονται στο (Σχήμα 5.2). Αν ένα σημαντικός αριθμός δοκιμών αστόχησαν σε θέσεις που απέχουν από την αρπάγη απόσταση ίση μέχρι και ένα πλάτος δοκιμίου, ο τρόπος εισαγωγής του φορτίου πρέπει να επανεξεταστεί. Οι παράμετροι που πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι ο βαθμός ευθυγράμμισης των επιθεμάτων, το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένα, η γωνία λοξότμησης, το συγκολλητικό υλικό, ο τύπος της αρπάγης, η πίεση και ο βαθμός ευθυγράμμισης της αρπάγης. (Πίνακας 5.3)



Σχήμα 5.5: Δεδομένα.

Πίνακας 5.3: Κωδικοποίηση τύπων αστοχίας δοκιμών εφελκυσμού

Γράμμα	Αστοχία	Γράμμα	Αστοχία	Γράμμα	Αστοχία
A	Γωνία	I	Εσωτερική	B	Κορυφή
D	Συγκέντρωση τάσεων	A	Τριβή	T	Πάτος
G	Τριβή	W	Αρπάγη	L	Αριστερά
L	Πλευρική	G	Οργάνου	R	Δεξιά
M	Πολυαξονική	M	Πολλαπλή	M	Κέντρο
S	Ρωγμή	V	Τυχαία	V	Τυχαίο
X	Έκρηξη	U	Άγνωστο	U	Άγνωστο
O	Άλλο	-	-	-	-

5.6.3 Υπολογισμοί.

Ο υπολογισμός της αντοχής σε εφελκυσμό γίνεται μέσω της παρακάτω εξίσωσης. Το αποτέλεσμα πρέπει να αναφέρεται με ακρίβεια τριών σημαντικών ψηφίων.

$$F_{tu} = \frac{P_{\max}}{A} \quad (1.3)$$

όπου:

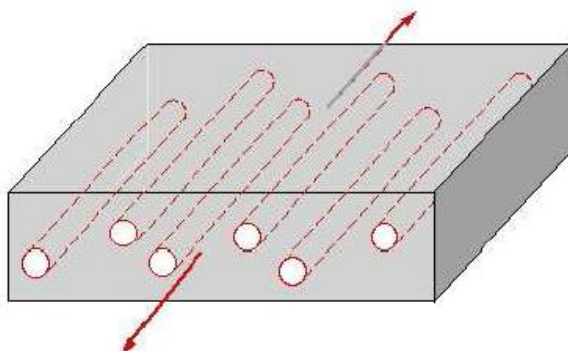
F_{tu} = αντοχή σε εφελκυσμό, MPa (psi)

P_{\max} = μέγιστο φορτίο πριν τη θραύση, N (lbf)

A = επιφάνεια διατομής, mm² (in²)

5.6.4 Μέτρο ελαστικότητας σε εφελκυσμό.

Ο στόχος του παρόντος κεφαλαίου είναι να υπολογίσουμε τις μηχανικές ιδιότητες των συνθέτων υλικών βασισμένοι στις ιδιότητες των συστατικών τους. Οι συνήθεις παραδοχές της θεωρίας ελαστικότητας των συνθέτων υλικών είναι ότι η ίνα και η μήτρα συμπεριφέρονται σαν ιδανικά ελαστικά υλικά. Δεύτερον η διεπιφάνεια ανάμεσα στη μήτρα και στην ίνα είναι απειροστικά λεπτή και υπάρχει τέλεια συμβατότητα στις παραμορφώσεις των ινών και της μήτρας. (Σχήμα 5.6)



Σχήμα 5.6: Ινοπλισμένο σύνθετο.

Θεωρούμε ένα μονοαξονικό ινοπλισμένο σύνθετο όπως στο σχήμα. Οι τάσεις στην ίνα και στη μήτρα είναι:

$$\sigma_f = E_f \cdot \varepsilon_f \quad (1.4) \text{ και } \quad \sigma_m = E_m \cdot \varepsilon_m \quad (1.5)$$

Εάν το μέτρο ελαστικότητας της ίνας είναι πολύ μεγαλύτερο από το μέτρο της μήτρας, τότε η τάση στην ίνα θα είναι πολύ μεγαλύτερη από την τάση στη μήτρα.

5.6.4.1 Αξονική τάση.

Το συνολικό φορτίο, P , που φέρει το σύνθετο είναι το άθροισμα των φορτίων που φέρουν οι ίνες και η μήτρα (A είναι η επιφάνεια διατομής):

$$P = \sigma_1 \cdot A \quad (1.6), \quad P_f = \sigma_f \cdot A_f \quad (1.7) \quad P_m = \sigma_m \cdot A_m \quad (1.8)$$

$$P = P_m + P_f = \sigma_1 \cdot A \quad (1.9)$$

Όταν υπάρχει τέλεια επαφή ανάμεσα στην ίνα και στη μήτρα, τότε:

$$\varepsilon_f = \varepsilon_m = \varepsilon_1 \quad (2)$$

Εισάγοντας τα μέτρα ελαστικότητας της ίνας και της μήτρας:

$$\sigma_1 = E_1 \cdot \varepsilon_1 \quad (2.1) \quad \sigma_f = E_f \cdot \varepsilon_1 \quad (2.2) \quad \sigma_m = E_m \cdot \varepsilon_1 \quad (2.3)$$

Αντικαθιστώντας στις παραπάνω έχουμε:

$$P = P_m + P_f \rightarrow E_1 \cdot \varepsilon_1 \cdot A = E_m \cdot \varepsilon_m \cdot A_m + E_f \cdot \varepsilon_f \cdot A_f \rightarrow$$

$$E_1 = E_f \cdot \frac{A_f}{A} + E_m \cdot \frac{A_m}{A} = E_m \cdot (1 - \varphi) + \varphi \cdot E_f \quad (2.4)$$

Όπου φ είναι το κλάσμα όγκου των ινών. Οι δείκτες που χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν τις χωρικές κατευθύνσεις είναι: (1 = Αξονική κατεύθυνση), (2 = Εγκάρσια κατεύθυνση στο επίπεδο του φύλλου), (3 = η τρίτη κατεύθυνση, συνήθως κάθετα στο επίπεδο του φύλλου). Υπόλοιποι δείκτες στις εξισώσεις είναι: m η μήτρα και f η ίνα.

Το ποσοστό του αξονικού φορτίου που φέρεται από τις ίνες είναι:

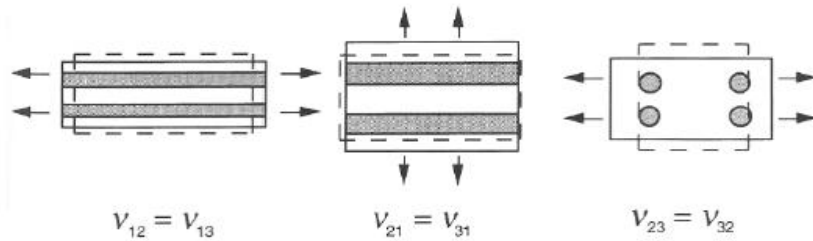
$$\frac{P_f}{P} = \frac{\frac{E_f}{E_m}}{\frac{E_f}{E_m} - \frac{1 - \varphi}{\varphi}} \quad (2.5)$$

5.6.5 Λόγος Poisson.

$$\text{Ο λόγος του Poisson ορίζεται ως: } \nu_{ij} = -\frac{\varepsilon_j}{\varepsilon_i} \quad (2.6)$$

Για τα ισοπλισμένα σύνθετα υλικά υπάρχουν 3 ανεξάρτητα στοιχεία του ν_{ij} , και ισχύει (Σχήμα 5.7)

$$\frac{\nu_{12}}{E_1} = \frac{\nu_{21}}{E_2} \quad (2.7) \quad \text{και} \quad G_{23} = \frac{E_2}{2 \cdot (1 + \nu_{23})} \quad (2.8)$$



Σχήμα 5.7: Δεδομένα

Για ισότροπα συστατικά μπορούμε να υπολογίσουμε τις τιμές των στοιχείων του λόγου του Poisson. Θεωρώντας το παράλληλο μοντέλο (ίσες παραμορφώσεις) έχουμε $\varepsilon_{1f} = \varepsilon_{1m} = \varepsilon_1$ τότε:

$$\varepsilon_{2f} = \nu_f \cdot \varepsilon_{1f} = -\nu_f \cdot \frac{\sigma_1 \cdot f}{E_f} \quad (2.9)$$

$$\varepsilon_{1m} = \nu_m \cdot \varepsilon_{1m} = -\nu_m \cdot \frac{\sigma_1 \cdot m}{E_m} \quad (3)$$

$$\varepsilon_2 = -\left[\frac{\varphi \nu_f \cdot \sigma_1 \cdot f}{E_f} + \frac{(1-\varphi) \cdot (\nu_m \cdot \sigma_1 \cdot m)}{E_m} \right] \quad (3.1) \rightarrow$$

$$\varepsilon_2 = -\varphi \nu_f \cdot \varepsilon_1 - (1-\varphi) \cdot \nu_m \cdot \varepsilon_1 \quad (3.2) \rightarrow$$

$$\nu_{12} = -\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = \varphi \nu_f + (1-\varphi) \nu_m \quad (3.3)$$

$$\text{και } \nu_{21} = [\varphi \cdot \nu_f + (1-\varphi) \cdot \nu_m] \frac{E_2}{E_1} < \nu_{12} \quad (3.4)$$

Για το ν_{23} εξετάζουμε τη μεταβολή του όγκου:

$$\frac{\Delta V}{\Delta V_0} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = \frac{\sigma_H}{K} \quad (3.5)$$

Υπό πίεση έχουμε: $\sigma_H = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} = \frac{\sigma_2}{3}$ (3.6) και

$$\varepsilon_3 = \frac{\sigma_3}{3K} = \varepsilon_1 = \varepsilon_2 \quad (3.7)$$

Με τον ίδιο τρόπο βρίσκουμε το K (bulk modulus). Ίσες τάσεις:

$$K = \frac{\sigma_H}{\frac{\Delta V}{V_0}} = \left[\frac{\varphi}{K_f} + \frac{1 - \varphi}{K_m} \right]^{-1} \quad (3.8)$$

Για ισότροπο υλικό:

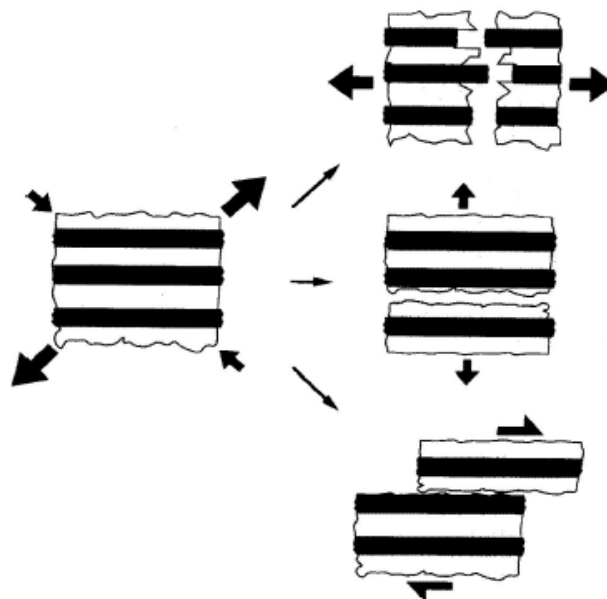
$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)} \quad (3.9)$$

5.6.6 Θραύση και αντοχή.

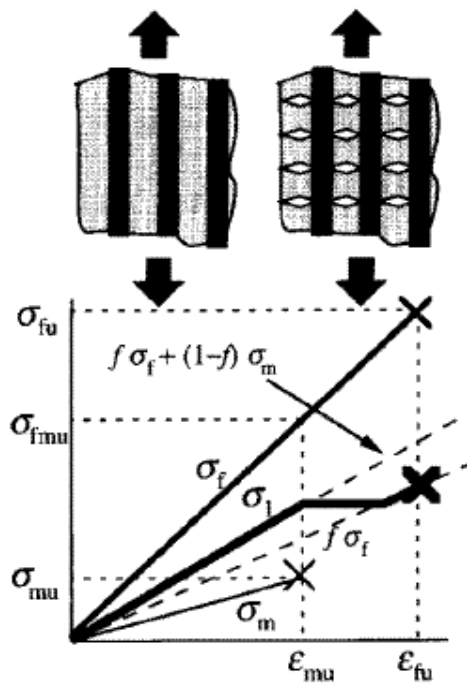
Για την εξέταση της αντοχή του συνθέτου υλικού σε αξονικό φορτίο, θεωρούμε ένα μονοαξονικό στρώμα με συνεχείς ίνες. Η μήτρα και οι ίνες είναι τελείως ελαστικές μέχρι τη θραύση τους.

5.6.6.1 Αστοχία σε αξονική φόρτιση.

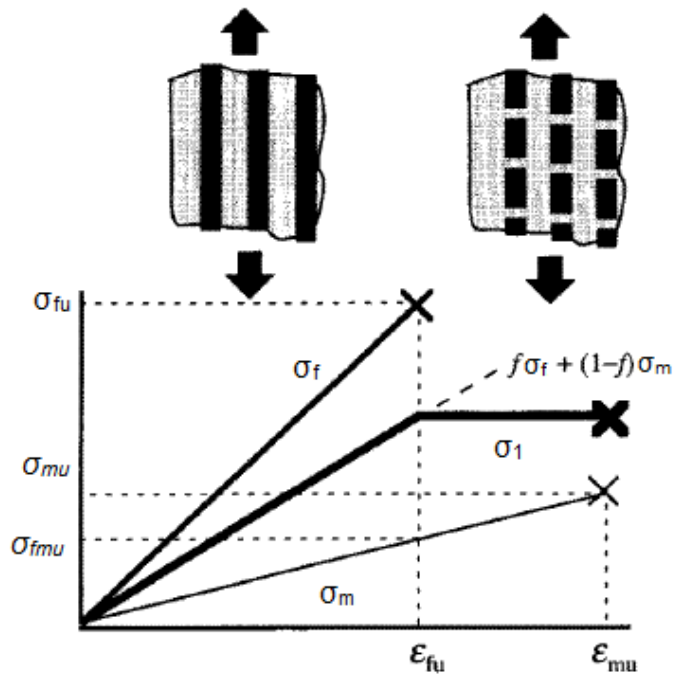
Εδώ διακρίνουμε δύο περιπτώσεις, όταν η μήτρα έχει χαμηλότερη ολκιμότητα ή όταν η ίνα έχει χαμηλότερη ολκιμότητα (Σχήμα 5.8, 5.9, 5.10).



Σχήμα 5.8: Αστοχία ενός ινοπλισμένου συνθέτου υλικού.



Σχήμα 5.9: Η αντοχή του συνθέτου όταν η μήτρα έχει χαμηλότερη ολκιμότητα από την ίνα.



Σχήμα 5.10: Η αντοχή του συνθέτου όταν η μήτρα έχει υψηλότερη ολκιμότητα από την ίνα.

5.6.6.2 Αστοχία σε εγκάρσια εφελκυστική παραμόρφωση.

Οι ίνες εμποδίζουν την παραμόρφωση της μήτρας και δημιουργούν συγκέντρωση τάσεων στις διεπιφάνειες. Η αστοχία επέρχεται τότε σε παραμόρφωση μικρότερη από την ολκιμότητα της μήτρας. Οι τάσεις δίπλα στην ίνα είναι πολύ μεγαλύτερες από την ονομαστική και επεκτείνονται σε μήκος 5 διαμέτρων. Σε αυτή την περίπτωση θεωρούμε τις ίνες σαν κενά και η αντοχή γίνεται:

$$\sigma^2 = \sigma_m \cdot \left[1 - 2 \left(\frac{\varphi}{\pi} \right)^{1/2} \right] \quad (4)$$

6. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

6.1 ΓΕΝΙΚΑ

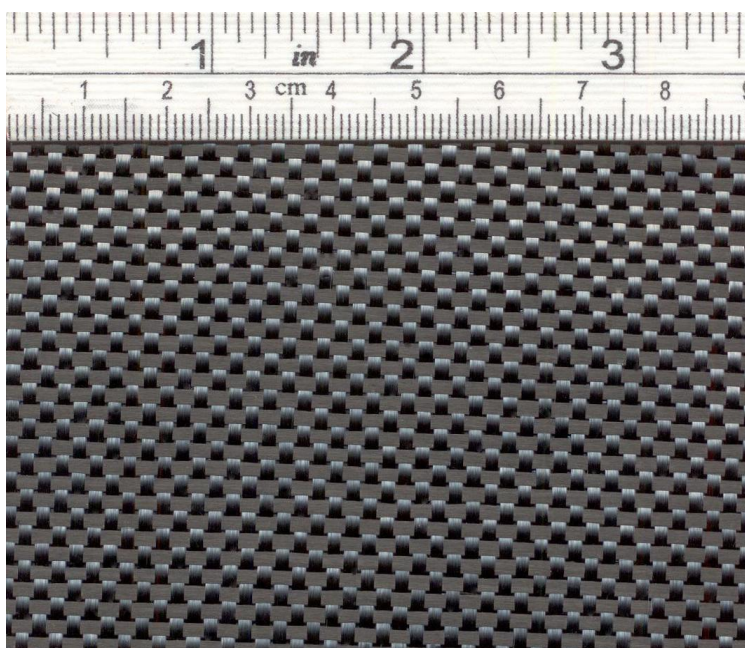
Η παρασκευή των δοκιμίων πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο Τεχνολογίας Υλικών του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε, η επεξεργασία και το φινίρισμα έλαβαν χώρα στο Μηχανολογικό Εργαστήριο και το πείραμα του εφελκυσμού έλαβε χώρα στον εργαστηριακό χώρο της Αντοχής Υλικών.

6.2 ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Ύστερα από έρευνα αγοράς που πραγματοποιήθηκε στο διαδίκτυο έγινε επιλογή των ακόλουθων υφασμάτων σύνθετων υλικών για τη κατασκευή τυποποιημένων δοκιμίων σύνθετων υλικών κατά τυποποίηση ASTM D3039. Ακόμα προμηθευτήκαμε ένα σύστημα εποξικής ρητίνης για την δημιουργία των σύνθετων υλικών καθώς και μια αντλία κενού για την παρασκευή των δοκιμίων υπό συνθήκες κενού (vacuum infusion). Τέλος έγινε αγορά αναλώσιμων καθώς και χρήση του εξοπλισμού των εργαστηριακών χώρων.

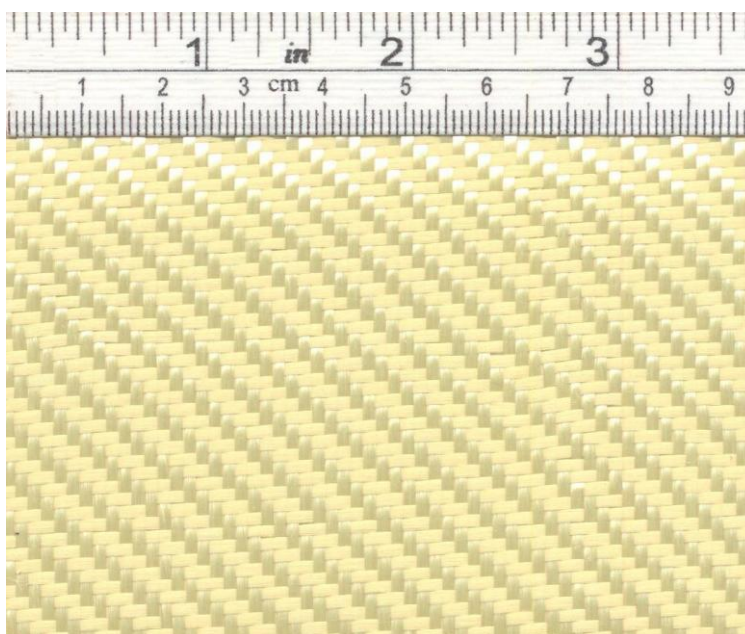
6.2.1 Υφάσματα.

Τα υφάσματα τα προμηθευτήκαμε από την εταιρία FIBERMAX COMPOSITES η οποία έχει έδρα στο Βόλο. Ακολουθούν τα υφάσματα με τις προδιαγραφές τους: (Εικόνα 6.1,6.2,6.3)

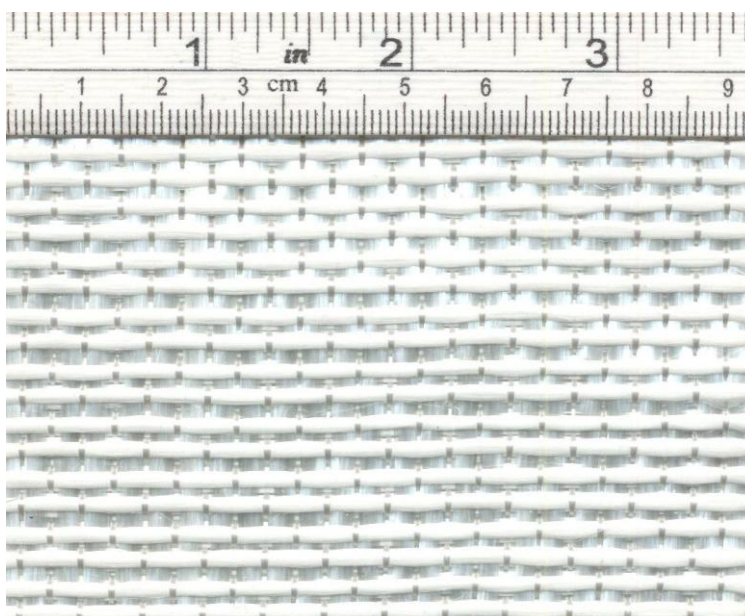


Εικόνα 6.1: Ανθρακοϋφασμα μονής πλέξης, κωδικός C200P, βάρος 193 gr/m². Σημόνι 50% 3K TR30S ανθρακόνημα του υφάσματος, 4,8 κλωστές

ανά εκατοστό. Υφάδι 50% ανθρακόνημα 3K TR30S του υφάσματος, 4.8 κλωστές ανά εκατοστό. Αντοχή σε εφελκυσμό 4410 (MPa). Μέτρο ελαστικότητας 235 (GPa). Μήκυνση θραύσης 1.9 (%). Πάχος 0.2 (mm).



Εικόνα 6.2: Ύφασμα αραμιδιού τουίλ 2·2 πλέξης, κωδικός K170T2, βάρος 170 gr/m². Στημόνι 50% 1260 dtex του υφάσματος, 6.7 κλωστές ανά εκατοστό. Υφάδι 50% 1260 dtex του υφάσματος, 6.7 κλωστές ανά εκατοστό. Αντοχή σε εφελκυσμό 2987 (MPa). Μέτρο ελαστικότητας 91 (GPa). Μήκυνση θραύσης 3.1 (%). Πάχος 0.1 (mm).

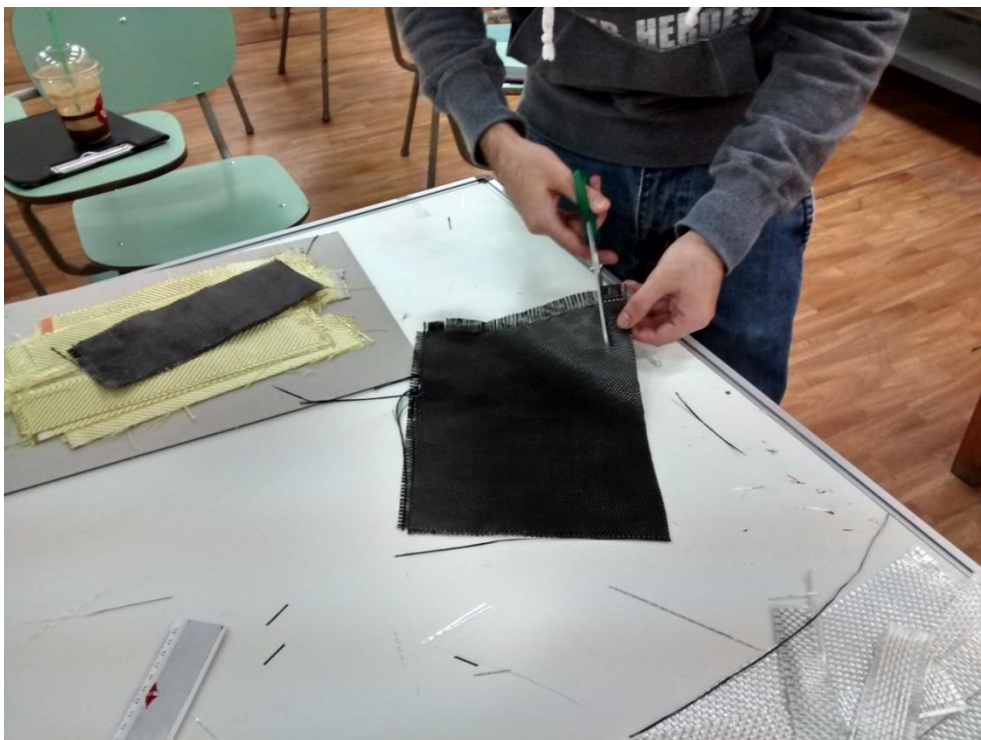


Εικόνα 6.3: Ύφασμα υαλονήματος 3D non crimp πλέξης, κωδικός G1830Z, βάρος 1830 gr/m². Στημόνι 52% υαλόνημα E (3x) 1100 tex του υφάσματος, 8 κλωστές ανά εκατοστό. Υφάδι 48% υαλόνημα E (4x) 134 tex του υφάσματος, 11.4 κλωστές ανά εκατοστό. Πάχος 1.2 (mm).

Τα υφάσματα λόγω της ευαίσθητης δομής τους φυλάσσονται σε μέρος μακριά από υγρασία και σκόνη, κατά το άνοιγμα τους τα τοποθετούμε με προσοχή σε κάποια επίπεδη επιφάνεια και το κόψιμο τους γίνεται με μεγάλη προσοχή και ηρεμία έτσι ώστε να μην χαλάσει η πλέξη τους. Η κοπή τους έγινε με το χέρι και απαιτήσε αρκετό χρόνο και υπομονή. (Εικόνα 6.4,6.5)



Εικόνα 6.4: Ύφασμα υαλονήματος 3D non crimp πλέξης σε διαδικασία κοπής στο εργαστήριο Τεχνολογίας Υλικών.



Εικόνα 6.5: Ύφασμα ανθρακνήματος σε διαδικασία κοπής.

Η κοπή των υφασμάτων σε λωρίδες ώστε να επιτύχουμε τη διάσταση της τυποποίησης των 15 (mm) γίνεται με μια προσαύξηση 20% στα άκρα του υφάσματος έτσι ώστε να αποφύγουμε τις διαταράξεις της πλέξης γύρω από τη περιοχή της κοπής.

6.2.2 Ρητίνες.

Το σύστημα της εποξικής ρητίνης και σκληρυντή με κωδικό R481/H50 αποτελείται από 0.64 κιλά ρητίνης και 0.36 κιλά σκληρυντή. Εφαρμόζεται με το χέρι και σε συστήματα τεχνολογίας κενού αναρρόφησης, έχει ήπια οσμή και άριστες μηχανικές ιδιότητες. (Εικόνα 6.6)

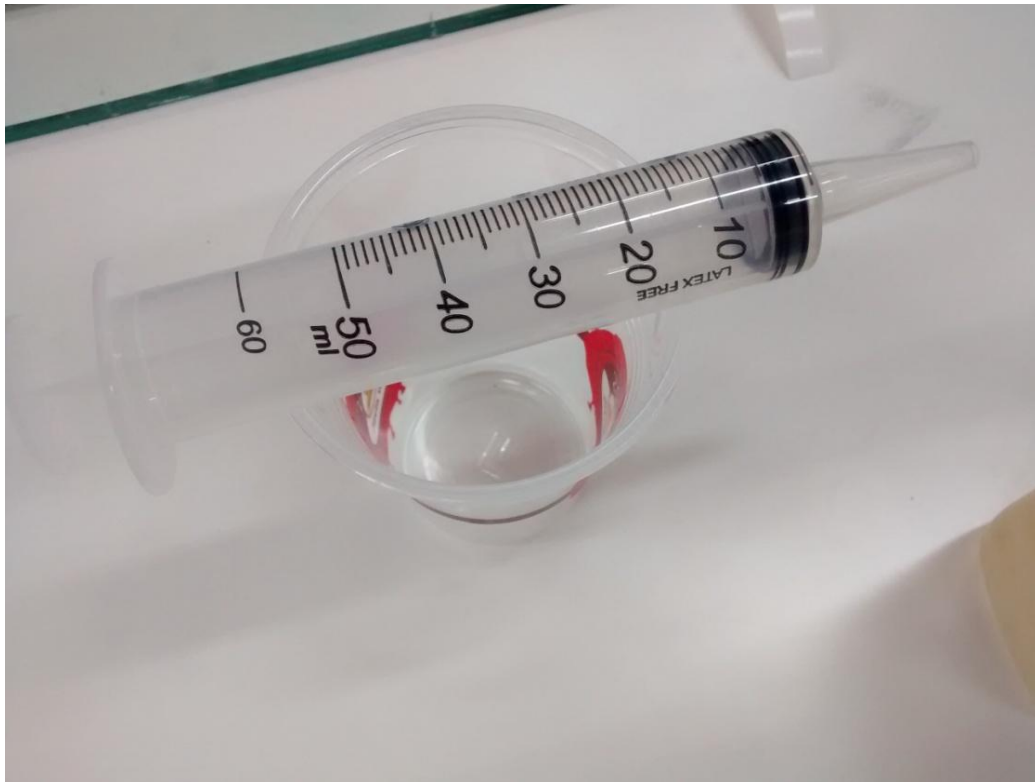


Εικόνα 6.6: R481/H50.

Η ανάμιξη γίνεται βάση των οδηγιών στη συσκευασία, η αναρρόφηση των ουσιών γίνεται με σύριγγα, ύστερα από την εναπόθεση της ρητίνης και του σκληρυντή στο δοχείο γίνεται ανάδευση με αριστερόστροφη φορά καθώς και δεξιόστροφη έτσι ώστε να γίνει πλήρη ανάμιξη. Αφήνουμε το ρευστό μας να ηρεμίσει για 2-3 λεπτά και να αποβάλει παγιδευμένες φυσαλίδες. Κατά την διαδικασία γίνεται χρήση γαντιών και μάσκας φίλτρου άνθρακα για την ασφάλεια και την διατήρηση της υγιεινής. (Εικόνα 6.7)

6.2.3 Πνευματικό σύστημα.

Το πνευματικό μας σύστημα αποτελείται από την αντλία κενού (vacuum pump), τα σωληνάκια σιλικόνης ή PVC, φίλτρο αέρα, διανομέα, αρνητικό μανόμετρο, 3 διακόπτες αέρα, αντάπτορας για τη σακούλα κενού, ύφασμα αποκόλλησης, ύφασμα αναπνοής, φιλμ κενού, διάτρητη μεμβράνη και μαστηχοταινία. (Εικόνα 6.8,6.9)



Εικόνα 6.7: Σύριγγα και δοχείο έτοιμα προς ανάδευση της ρητίνης και του σκληρυντή.



Εικόνα 6.8: Πακέτο αντλίας κενού (FIBERMAX).



Εικόνα 6.9: Αντλία κενού, σωλήνας PVC, μανόμετρο, παγίδα και αντάπτορας για τη σακούλα κενού.

6.2.4 Καλούπι.

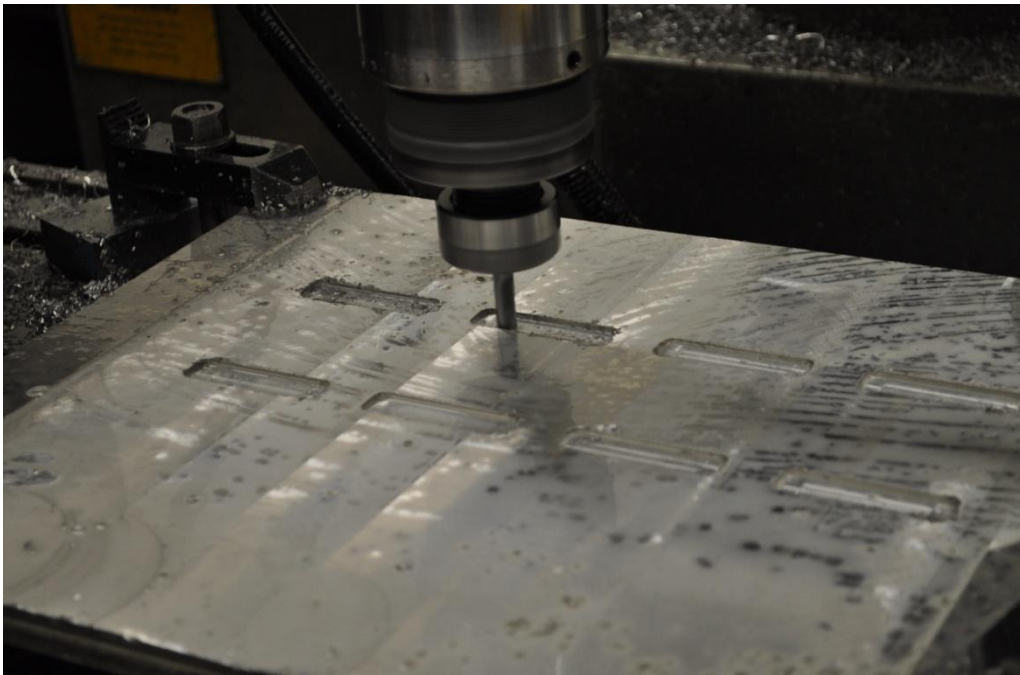
Αρχικά είχε σχεδιαστεί και κοπεί μεταλλικό καλούπι στη φρέζα CNC του εργαστηρίου CNC/CAD-CAM από το οποίο και κατασκευάσαμε μια παρτίδα δοκιμίων. Ύστερα δοκιμάσαμε να χρησιμοποιήσουμε μια επίπεδη γυάλινη επιφάνεια η οποία και μας παρήγαγε δοκίμια άριστης γεωμετρικά ποιότητας οπότε το καλούπι που έλαβε χώρα η διαδικασία είναι ένα γυαλί πάχους 10 (mm), μήκους 500 (mm) και πλάτους 500 (mm). (Εικόνα 6.10,6.11,6.12,6,13)



Εικόνα 6.10: Κοπή μεταλλικής πλάκας αλουμινίου για το καλούπι.



Εικόνα 6.11: Διαδικασία φρεζαρίσματος



Εικόνα 6.12: Διαδικασία κοπής γεωμετρίας επιθεμάτων.

Η κοπή του αλουμινίου, η τοποθέτηση του προπλάσματος στη φρέζα καθώς και η γραφή του κώδικα G της εργαλειομηχανής έλαβαν χώρα στο εργαστήριο CNC με τη βοήθεια των συναδέλφων που εκπονούσαν τη πρακτική τους άσκηση.



Εικόνα 6.13: Διαδικασία ξεχονδρίσματος.



Εικόνα 6.14: Καλούπι παρασκευής δοκιμίων σύνθετων υλικών.

Το συγκεκριμένο καλούπι έχει σχεδιαστεί να παράγει 2 δοκίμια σύνθετων υλικών τυποποιημένων διαστάσεων κατά ASTM D3039. Το βάθος της χάραξης είναι 1 (mm) για τα κύριο σώμα του δοκιμίου και 2 (mm) για τα επιθέματα. Παρατηρήθηκε ότι προσδίδει στα δοκίμια μια καμπυλότητα η οποία είναι καταστροφική για τα δεδομένα πειραματικής χρήσης σε εφελκυσμό. (Εικόνα 6.14)

Η επιλογή του γυαλιού ως καλούπι για τα δοκίμια έγινε για τον λόγο ότι η επιφάνεια του είναι δίχως ατέλειες, εύκολη στη μεταφορά και καθαρίζει με ευκολία μετά από κάθε παρασκευή παρτίδας. (Εικόνα 6.15)



Εικόνα 6.15: Καλούπι και τοποθέτηση μαστιχοταινίας.

6.2.5 Αναλώσιμα.

Στα αναλώσιμα για την διαδικασία παραγωγής των δοκιμίων ανήκουν, τα σωληνάκια PVC, το φίλτρο αέρα, το ύφασμα αποκόλλησης, το ύφασμα αναπνοής, το φιλμ κενού, η διάτρητη μεμβράνη, η μαστιχοταινία καθώς και τα γάντια μιας χρήσης, οι μάσκες με φίλτρο άνθρακα και τα γυαλόχαρτα.

Τα προαναφερθέντα υλικά είναι απαραίτητα για την κατασκευή των δοκιμίων στο στάδιο παρασκευής τους καθώς και στο στάδιο επεξεργασίας τους. Αρνητικό στην όλη διαδικασία είναι το ότι δεν καθίστανται ικανά για επαναχρησιμοποίηση.

6.2.6 Εξοπλισμός υγιεινής.

Η παρασκευή των σύνθετων υλικών από ανθρακόνημα, αραμίδιο και υαλόνημα κρύβει κινδύνους και γι αυτό πρέπει να τηρούνται βασικοί κανόνες ασφαλείας και υγιεινής. Κατά την κοπή των υφασμάτων λόγω της πολύ μικρής διατομής των ινών 1 έως 15 (μm) επιβάλλεται η χρήση γαντιών ώστε να αποφευχθεί τυχόν ερεθισμός της επιδερμίδας. Κατά τον πολυμερισμό της ρητίνης με τον σκληρυντή τα αέρια που εκλύονται από την αντίδραση προκαλούν ερεθισμούς στα μάτια καθώς και στο αναπνευστικό, η χρήση μάσκας αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της εργασίας. Έπειτα κατά την επεξεργασία των δοκιμίων η κοπή και το τρίψιμο των δοκιμίων απελευθερώνει

στην ατμόσφαιρα σκόνη η οποία πρέπει να καταστέλλεται άμεσα μέσω του συστήματος κλιματισμού ή κάποιας φυσικής ροής αέρα. Μείζον πρόβλημα δημιουργεί η σκόνη από τα ανθρακονήματα με αρκετά μεγάλες επιπτώσεις στην υγεία του ανθρώπου.(Εικόνα 6.16,6.17,6.18)



Εικόνα 6.16: Μάσκες με φίλτρο άνθρακα.



Εικόνα 6.17: Χρήση εξοπλισμού ασφαλείας

6.3 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Αρχικά τα υφάσματα απλώθηκαν από τα ρολά τους με μεγάλη προσοχή ώστε να μην παραμορφωθεί η πλέξη τους. Η κοπή του ανθρακονήματος καθώς και του υαλονήματος έγινε με ψαλίδι χειρός. Το αραμίδιο κόπηκε σε μηχανή διάτμησης για πάχη έως 30 (mm) γιατί το ψαλίδι (μάσαγε) το ύφασμα.

Το καλούπι κερώνεται ώστε να μπορεί να ξεκολλήσει το σύνθετο που παράγουμε (Εικόνα 6.18,6.19). Το φίλτρο αέρα, το ύφασμα αποκόλλησης, το ύφασμα αναπνοής και η διάτρητη μεμβράνη κόβονται με ψαλίδι σε διαστάσεις ώστε να μπορούν να χωρέσουν εντός των ορίων που δημιουργούμε με τη μαστιχοταινία. Το φιλμ κενού κόβεται έτσι ώστε να μπορεί να κολληθεί στη μαστιχοταινία (κρίσιμο σημείο για την δημιουργία κενού).



Εικόνα 6.18: Κοπή υφάσματος αποκόλλησης.



Εικόνα 6.19: Κέρωμα καλουπιού.

Επόμενο βήμα είναι η ανάμιξη του σκληρυντή με την εποξική ρητίνη και η τοποθέτηση των στρώσεων των υφασμάτων στο καλούπι για τον εμποτισμό τους. (Εικόνα 6.20,6.21,6.22)



Εικόνα 6.20: Εποξικό σύστημα ρητίνης-σκληρυντή.

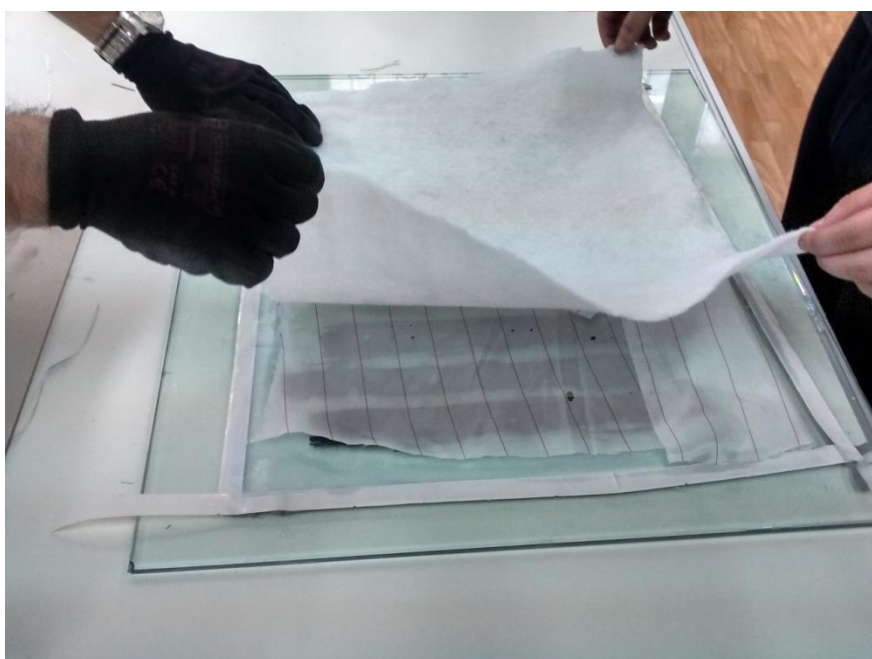


Εικόνα 6.21: Τοποθέτηση στρώσεων υφασμάτων ανθρακονήματος.

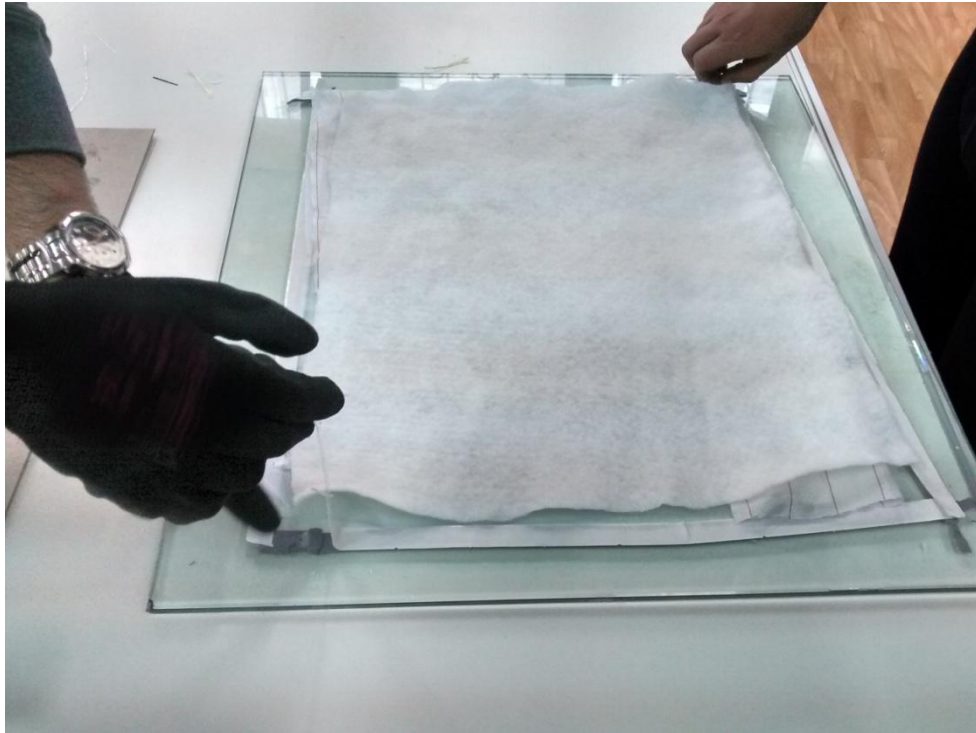


Εικόνα 6.22: Τοποθέτηση στρώσεων υφασμάτων αραμιδίου.

Επόμενο διαδικασία η δημιουργία του ασκού κενού (vacuum pump). Τοποθετούμε αρχικά το ύφασμα αποκόλλησης, επόμενο το φίλτρο αέρα και το ύφασμα αναπνοής. Κύριος στόχος είναι η δημιουργία ενός μονωμένου περιβάλλον σε συνθήκες κενού. Το φιλμ κενού τοποθετείται με προσοχή ώστε να εφαρμόζει τέλεια με τη μαστηχοταινία. Πιέζουμε με το δάκτυλο μας σε όλο το μήκος της διαδρομής καθώς ελέγχουμε για σημεία που μπορεί να εισχωρήσει αέρας. Τελικός και καθοριστικός έλεγχος πραγματοποιείται με το μανόμετρο και την ένδειξη του, που μας επιβεβαιώνει το κενό στη διάταξη μας. (Εικόνα 6.23,6.24,6.25)



Εικόνα 6.23: Τοποθέτηση υφάσματος αποκόλλησης και φίλτρο αέρα .

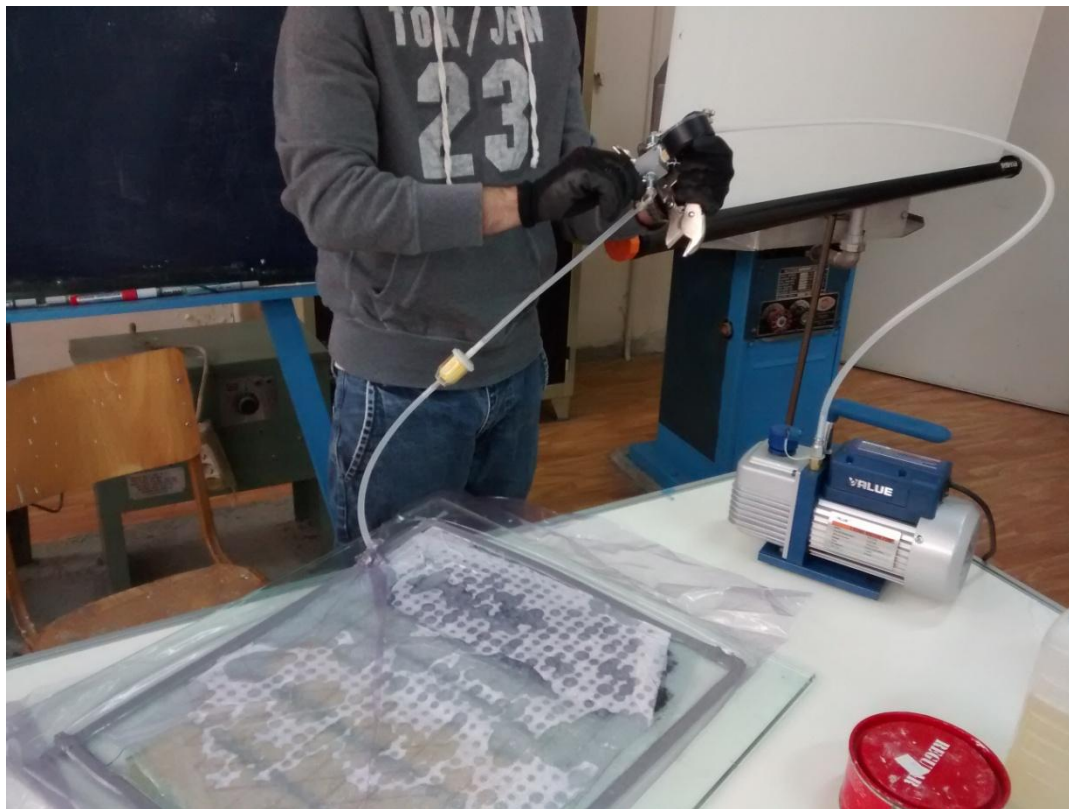


Εικόνα 6.24: Αφαίρεση προστατευτικού μασιχοταινίας για να τοποθετηθεί το φιλμ κενού.



Εικόνα 6.25: Τοποθέτηση φιλμ κενού.

Επόμενο βήμα η σύνδεση του καλουπιού με το πνευματικό σύστημα για να γίνει έλεγχος στο περιβάλλον κενού που δημιουργήσαμε. Ύστερα από τον έλεγχο και αφού επιβεβαιωθεί η αρτιότητα της διάταξης αφήνουμε την αντλία κενού να λειτουργήσει και να αποβάλει από το ρευστό εποξικό σύστημα τις παγιδευμένες φυσαλίδες αέρα. (Εικόνα 6.26)



Εικόνα 6.26: Διάταξη κατασκευής σύνθετων υλικών με αντλία κενού και εποξικό σύστημα.

Η παραπάνω διαδικασία έχει διάρκεια 5 με 6 ώρες λόγω της χειρονακτικής προετοιμασίας όσων περιγράφηκαν. Για την παραγωγή των δοκιμών χρειάστηκε η επανάληψη των παραπάνω διαδικασιών 9 φορές, κατά την διάρκεια των δύο πρώτων κύκλων εργασιών έγινε εξοικείωση και πειραματισμός με διάφορες μεθόδους και τεχνικές. Αυτό είχε αποτελέσματα μη επιθυμητά παράγωγα, οπότε απορρίψαμε τεχνικές και υιοθετήσαμε καινούριες. Η γενική φιλοσοφία ήταν πείραμα και δοκιμή (test and try).

Το καλούπι σε περιβάλλον κενού δημιουργεί τις απαραίτητες προϋποθέσεις για να γίνει ο πολυμερισμός του εποξικού συστήματος. Η δευτερογενής φάση όπου ανασχηματίζεται μοριακά η δομή του και στερεοποιείται, καθώς και η τριτογενής φάση όπου το ύφασμα του σύνθετου γίνεται ένα ενιαίο σώμα με το εποξικό σύστημα.

Επόμενη φάση στην διαδικασία παραγωγής των δοκιμών είναι το ξεκαλούπωμα των δοκιμών. Το κέρι που έχει περαστεί το καλούπι βοηθάει στο να ξεκολλήσει το δοκίμιο αλλά είναι μια διαδικασία που απαιτεί υπομονή και προσοχή λόγω των αιχμηρών πλέον προπλασμάτων. Τα δοκίμια πλέον είναι έτοιμα για επεξεργασία και μεταφέρονται στο μηχανολογικό εργαστήριο για κοπή και λείανση ώστε να τους προσδώσουμε την επιθυμητή γεωμετρία.

Τοποθετώντας τα σε μέγγενες γίνεται κοπή με πριόνι χειρός με λεπίδα για σύνθετα υλικά πάχους 5 έως 15 (mm). Ύστερα γίνεται ξεχόνδρισμα και λείανση με γυαλόχαρτα (No 80, 120 και 180). (Εικόνα 6.27)

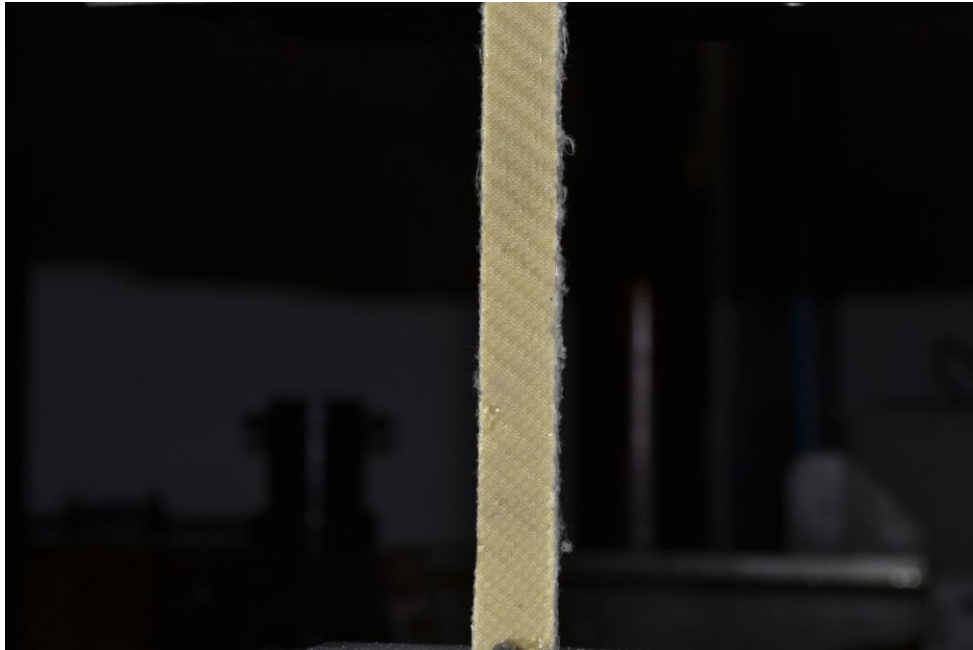


Εικόνα 6.27: Διάφορα γυαλόχαρτα που χρησιμοποιήθηκαν.

Ο κορμός του εκάστοτε δοκιμίου καθώς και τα επιθέματα τους αποκτούν τις προδιαγραφές τους. Είναι έτοιμα πλέον να κολληθούν τα επιθέματα με το κύριο σώμα. Το Kevlar λόγω της ιδιαίτερης δομής του καθίσταται δύσκολο να επεξεργαστεί με γυαλόχαρτο. (Εικόνα 6.27,6.28)



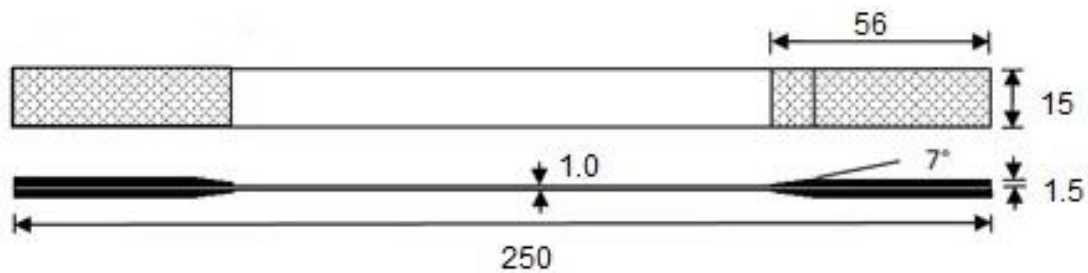
Εικόνα 6.28: Εποξική κόλλα γενικής χρήσης (BISON).



Εικόνα 6.29: Δοκίμιο αραμιδίου, φαίνεται η ιδιαιτερότητα της δομής της ίνας στα άκρα όπου έχει υποστεί επεξεργασία.

6.4 ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Οι διαστάσεις όπως έχουμε προαναφέρει βασίζονται στη τυποποίηση ASTM D3039. Το υαλόνημα λόγω της πλέξης του έχει πάχος 1.1 (mm) οπότε οι διαστάσεις του αυξήθηκαν βάση κανόνων τυποποίησης στις ακόλουθες. (Σχήμα 6.1), (Πίνακας 6.1)



Σχήμα 6.1: Διαστάσεις δοκιμίων ανθρακονήματος και αραμιδίου.

Πίνακας 6.1: Διαστάσεις δοκιμίων

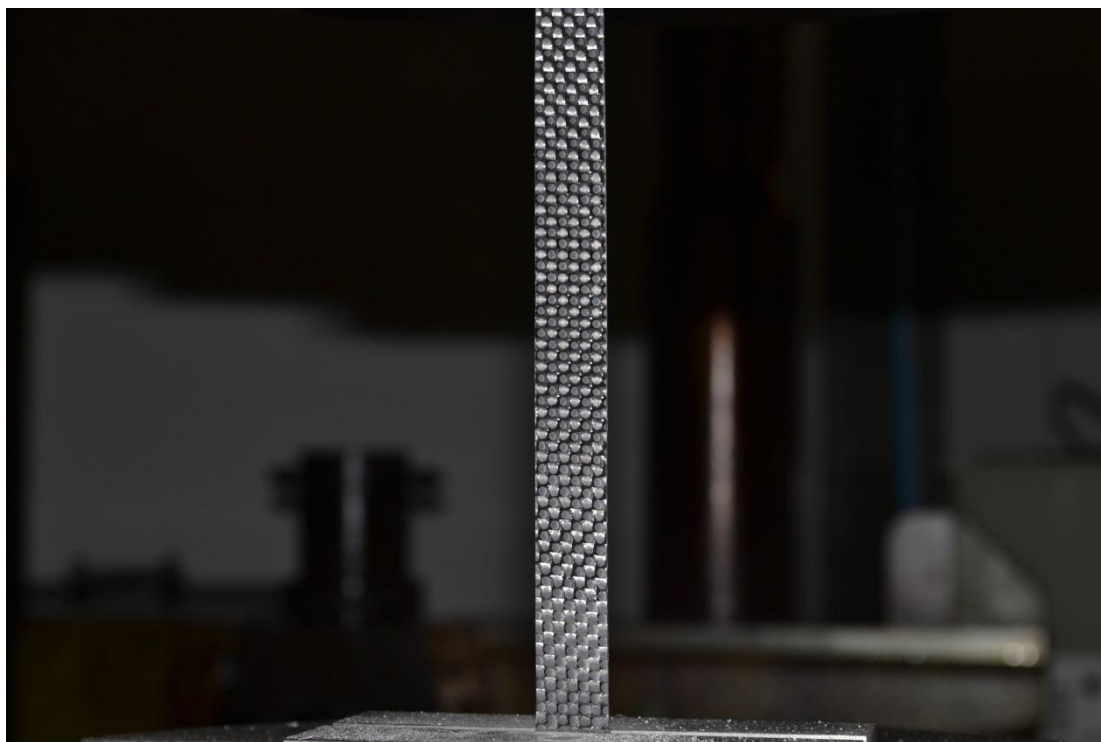
ΥΛΙΚΟ	ΠΑΧΟΣ (mm)	ΜΗΚΟΣ (mm)	ΠΛΑΤΟΣ (mm)
CARBON	1	250	15
KEVLAR	1	250	15
FIBERGLASS	4	250	15

Τα υφάσματα τα οποία χρησιμοποιήσαμε έχουν το εξής πάχος (Πίνακας 6.2) και η διαστρωμάτωση τους απαιτήθηκε για τη παρασκευή των δοκιμίων.

Πίνακας 6.2: Στρώσεις υφασμάτων

ΥΛΙΚΟ	ΠΑΧΟΣ ΥΦΑΣΜΑΤΟΣ (mm)	ΣΤΡΩΣΕΙΣ	ΠΑΧΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ (mm)
CARBON	0.2	4	1
KEVLAR	0.1	6	1
FIBERGLASS	1.1	3	4

Τα δοκίμια αποτελούνται από δύο συστατικά το εποξικό σύστημα ρητίνης σκληρυντή και τα υφάσματα ανθρακονήματος, υαλονήματος και αραμιδίου. Το πάχος των δοκιμίων αποτελείται από μια αναλογία των παραπάνω υλικών και η τελική τους επιλογή έγινε ύστερα από διάφορες δοκιμές. Παράδειγμα: το ύφασμα ανθρακονήματος έχει πάχος 0.2 (mm), τέσσερις στρώσεις υφάσματος μας παρέχουν πάχος 0.8 (mm), το εποξικό σύστημα ποτίζοντας τα υφάσματα και το περιβάλλον κενού κατά τον πολυμερισμό του μας παρέχουν ένα σύνθετο υλικό ανθρακονήματος πάχους 1 (mm). (Εικόνα 6.30)



Εικόνα 6.30: Δοκίμιο ανθρακονήματος τοποθετημένο στη μηχανή εφελκυσμού κατά το πείραμα εφελκυσμού.

7. ΠΕΙΡΑΜΑ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ

7.1 ΓΕΝΙΚΑ

Το πείραμα εφελκυσμού τυποποιημένων δοκιμίων κατά ASTM d3039 πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο Αντοχής Υλικών του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε, στη μηχανή εφελκυσμού INSTRON 8802, δυναμικότητας 260 (KN), διαδρομή εμβόλων 75 (mm), βέλτιστη ακρίβεια 0.001 (mm) και 0,001 (KN), προστασία δείγματος 500 (N). (Εικόνα 7.1)



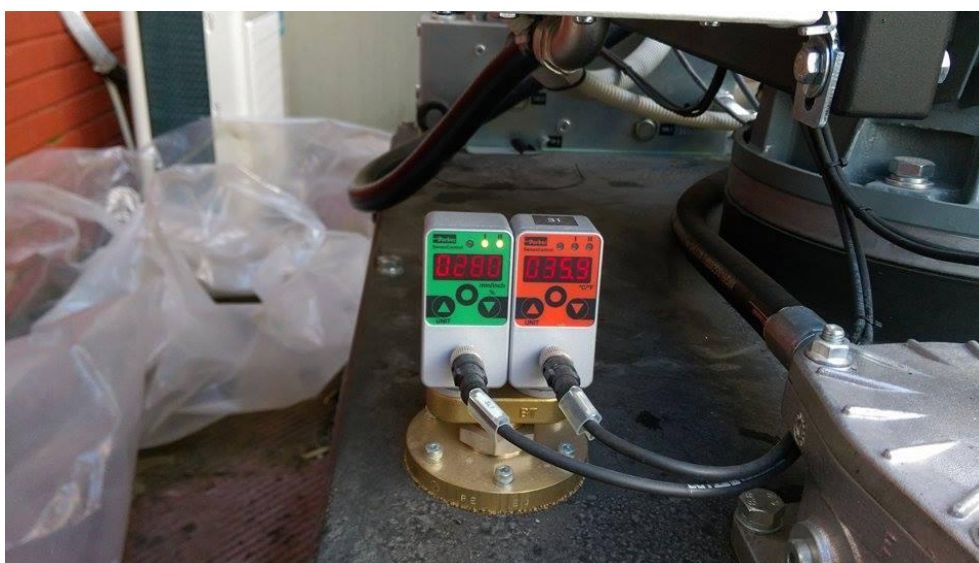
Εικόνα 7.1: Μηχανή εφελκυσμού INSTON 8802.

7.2 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΜΗΧΑΝΗΣ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ

Η μηχανή του εφελκυσμού για τη λειτουργία της απαιτεί προετοιμασία. Το υδραυλικό της σύστημα πρέπει να βρίσκεται εντός των ορίων των προδιαγραφών (πίεση, θερμοκρασία) καθώς και το λογισμικό της σύστημα χρειάζεται καθορισμό παραμέτρων. (Εικόνα 7.2,7.3,7.4)



Εικόνα 7.2: Ηλεκτροκινητήρας μηχανής εφελκυσμού.



Εικόνα 7.2: Λίτρα και θερμοκρασία λαδιού.



Εικόνα 7.3: Πίεση και θερμοκρασία αντλίας.

Επόμενη διαδικασία είναι η τοποθέτηση των αρπάγων, λόγω των διαστάσεων των δοκιμών επιλέγουμε το ζευγάρι επίπεδων αρπάγων 1 έως 12 (mm). (Εικόνα 7.4, 7.5)

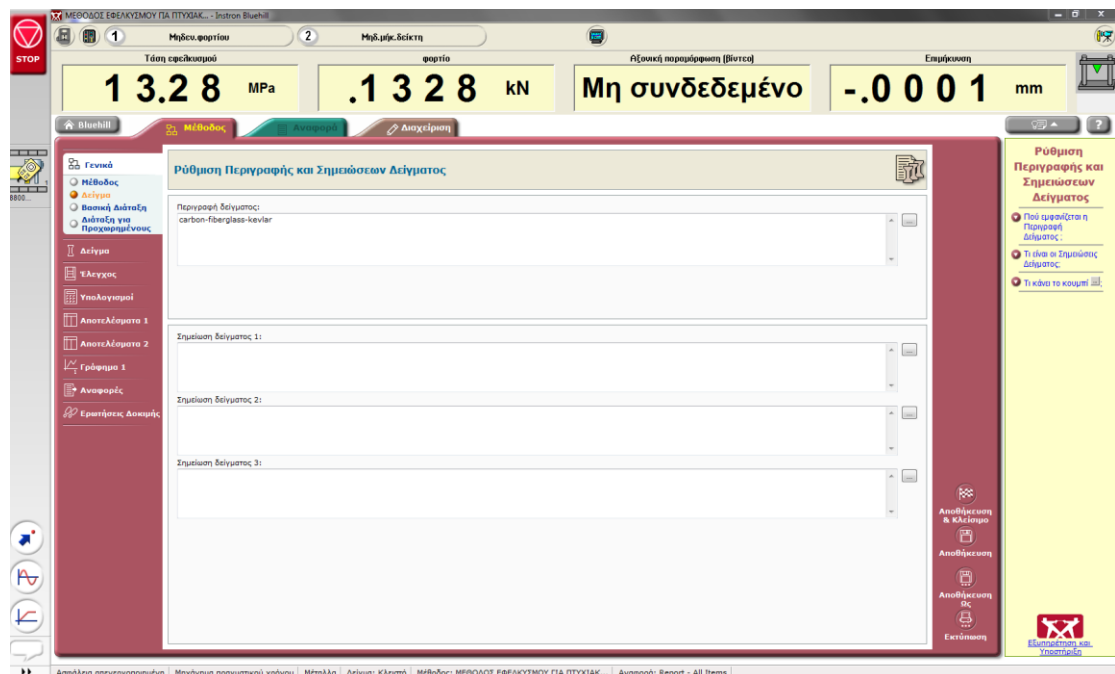


Εικόνα 7.4: Επίπεδη αρπάγη.



Εικόνα 7.5: Τοποθέτηση αρπάγης στη μηχανή.

Επόμενη διαδικασία η παραμετροποίηση του λειτουργικού προγράμματος της μηχανής. (Εικόνα 7.6, 7.7, 7.8, 7.9, 7.10)



Εικόνα 7.6: Λειτουργικό περιβάλλον λογισμικού μηχανής INSTRON 8802.

Είσοδοι Δοκιμής

< **1 - Μη δοκιμασμένο** +

Ρυθμός 1: 0,50000 mm/min

Comment: ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΖΑΦΕΙΡΟΠΟΥΛΙ

Μήκος: 138,00000 mm

Πάχος: 4,00000 mm

Πλάτος: 15,00000 mm

Γεωμετρία: Ορθογώνιο

Σημείωμα δείγματος 1:
FIBERGLASS No 2

▶ Έναρξη
■ Διακοπή
⏪ Επιστροφή
⏩ Επαναφορά

Εικόνα 7.7: Ορισμός διαστάσεων για τα δοκίμια υαλονήματος.

Ρύθμιση Ελέγχου - Τέλος της Δοκιμής

Τέλος Δοκιμής 1
Κριτήριο 1: Ρυθμός φορτίου
Ευσαισθησία (%): 70,00000

Τέλος δοκιμής 2
Κριτήριο 2: Επιμήκυνση σε εφελκυσμό
Τιμή 2: 20,00000 mm

Τέλος δοκιμής 3

Τέλος δοκιμής 4

Δράση: Διακοπή

Εικόνα 7.8: Ορισμός ευαισθησίας στο 70% και ορίου ασφαλείας στα 20 (mm).

Ρύθμιση Ελέγχου - Δεδομένα

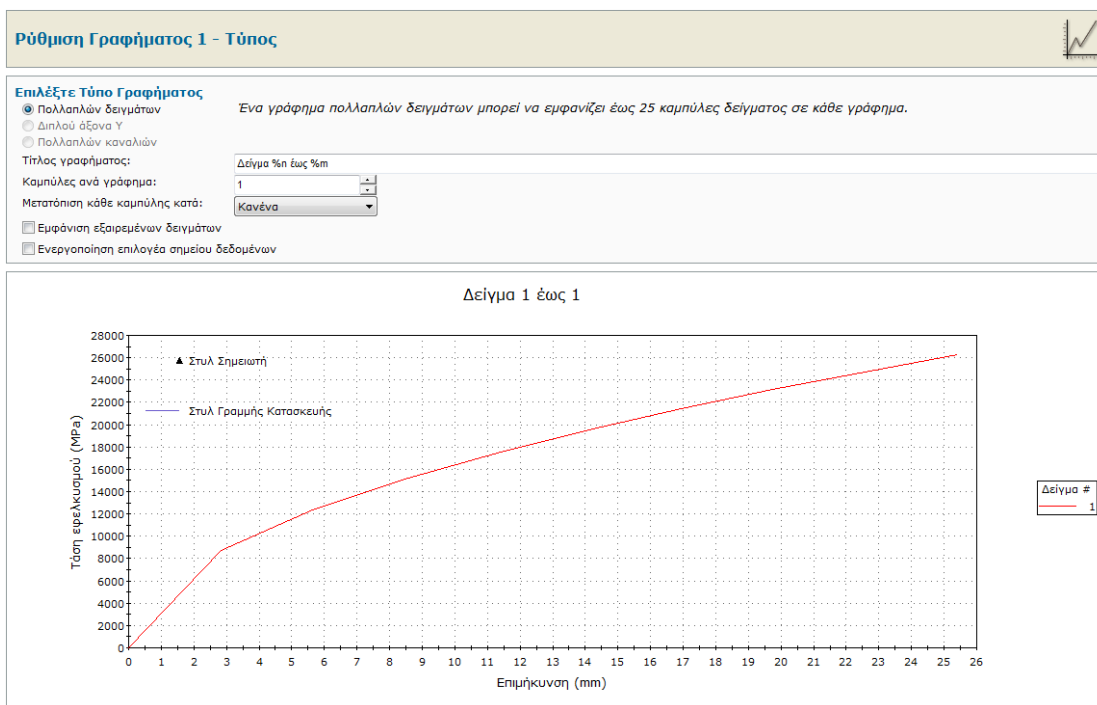
Καταγραφή δεδομένων: Χειροκίνητος

Κριτήρια 1
 Κανάλι 1: Χρόνος
 Χρονικό διάστημα 1: 50,00000 ms

Κριτήρια 2

Κριτήρια 3

Εικόνα 7.9: Ορισμός χρονικών καταγραφών ανά 50 (ms).

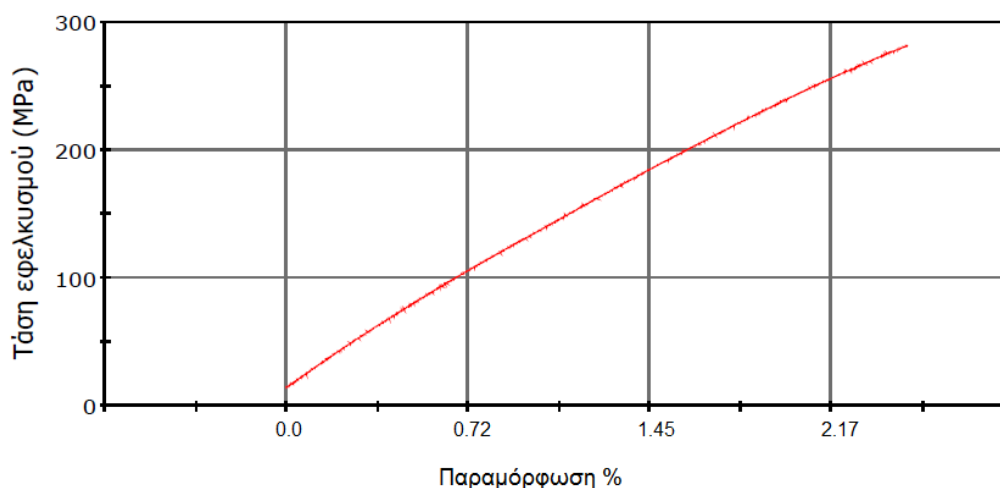


Εικόνα 7.10: Επιλογή τύπου γραφήματος πολλαπλών δειγμάτων.

Η πειραματική διαδικασία του εφελκυσμού τυποποιημένων δοκιμίων από ανθρακόνημα (carbon), αραμίδιο (Kevlar) και υαλόνημα (fiberglass) έλαβε χώρα χρονικά το Δεκέμβριο του 2014. Ακολουθούν τα διαγράμματα τάσης παραμόρφωσης και μετρήσεις στο μέγιστο φορτίο (kN), η αντοχή σε εφελκυσμό (MPa), η δυσθραυστότητα (J), η επιμήκυνση στη θραύση (mm), η παραμόρφωση στο μέγιστο φορτίο (%), η παραμόρφωση στη θραύση (%) και η χρονική διάρκεια της φόρτισης έως τη θραύση (sec).

7.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΡΑΜΙΔΙΟΥ (KEVLAR)

Ακολουθούν τα πειραματικά αποτελέσματα των δοκιμών αραμιδίου (KEVLAR1 έως KEVLAR6) και οι πίνακες με τα αποτελέσματα τους. (Σχήμα 7.1, 7.2, 7.3, 7.4, 7.5, 7.6, 7.7) και οι πίνακες (Πίνακας 7.1, 7.2, 7.3, 7.4, 7.5, 7.6).

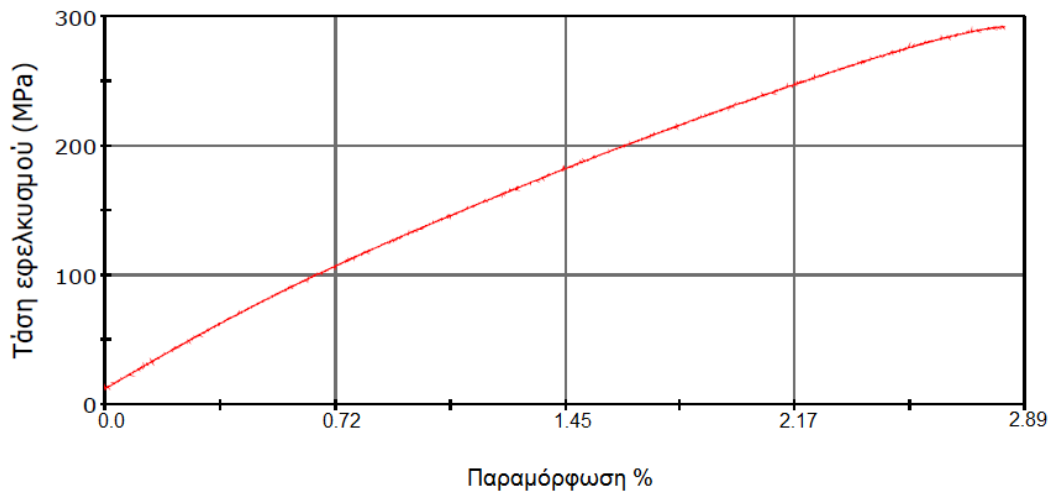


Σχήμα 7.1: Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης δοκιμίου (KEVLAR1).

Το παραπάνω διάγραμμα φανερώνει ένα υλικό ψαθυρής συμπεριφοράς το οποίο κατά τη φόρτιση του απέκτησε μια επιμήκυνση (3.42 mm) τριπλάσια σε σχέση με την αντίστοιχη των ανθρακονημάτων. Η αντοχή του σε εφελκυστικό φορτίο είναι η μισή της αντίστοιχης του ανθρακονήματος. Το πρώτο δοκίμιο σύμφωνα με τον (Πίνακα 5.3) και την (Εικόνα 7.11) αστόχησε σε μορφή τύπου (LAT).

Πίνακας 7.1: Αποτελέσματα πειράματος

Μέγιστο φορτίο (kN)	8.46
Τεχνητό όριο διαρροής (0.2 %) (MPa)	-
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	281.84
Δυσθραυστότητα (J)	16.24
Παραμόρφωση στο μέγιστο φορτίο (%)	2.34
Παραμόρφωση στη θραύση (%)	2.34
Επιμήκυνση στη θραύση (mm)	3.42
Χρόνος έως τη θραύση (sec)	204.99

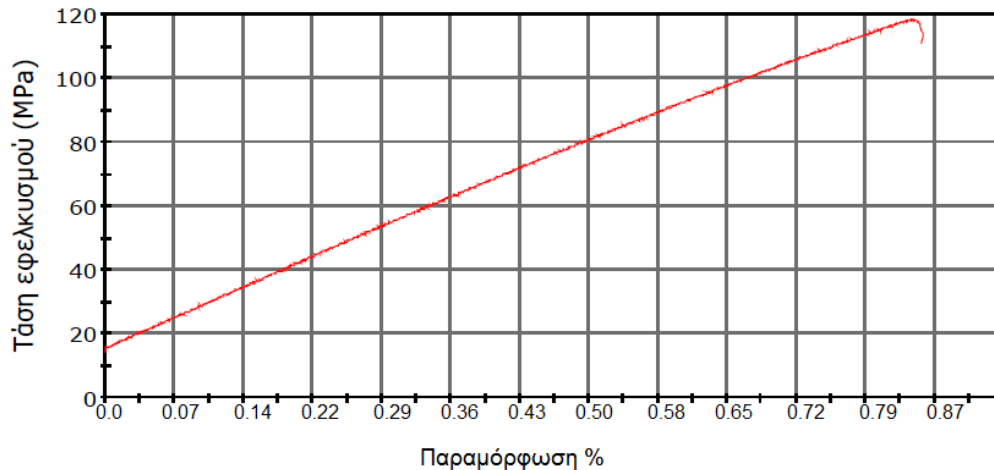


Σχήμα 7.2: Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης δοκιμίου (KEVLAR2).

Το δεύτερο δοκίμιο αραμιδίου εμφανίζει μια ψευδοψαθυρή συμπεριφορά, είναι το ισχυρότερο δοκίμιο με πραγματική τάση σε αντοχή 300.10 (MPa), αλλά και το δοκίμιο με τη μεγαλύτερη παραμόρφωση στη θραύση σχεδόν 3%, αρκετά μεγάλη για ψαθυρό υλικό. Τέλος σύμφωνα με τον (πίνακα 5.3) και την (Εικόνα 7.11) αστόχησε σε μορφή τύπου (LAT).

Πίνακας 7.2: Αποτελέσματα πειράματος

Μέγιστο φορτίο (kN)	8.77
Τεχνητό όριο διαρροής (0.2 %) (MPa)	276.52
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	292.29
Δυσθραυστότητα (J)	20.11
Παραμόρφωση στο μέγιστο φορτίο (%)	2.67
Παραμόρφωση στη θραύση (%)	2.67
Επιμήκυνση στη θραύση (mm)	3.90
Χρόνος έως τη θραύση (sec)	234.15

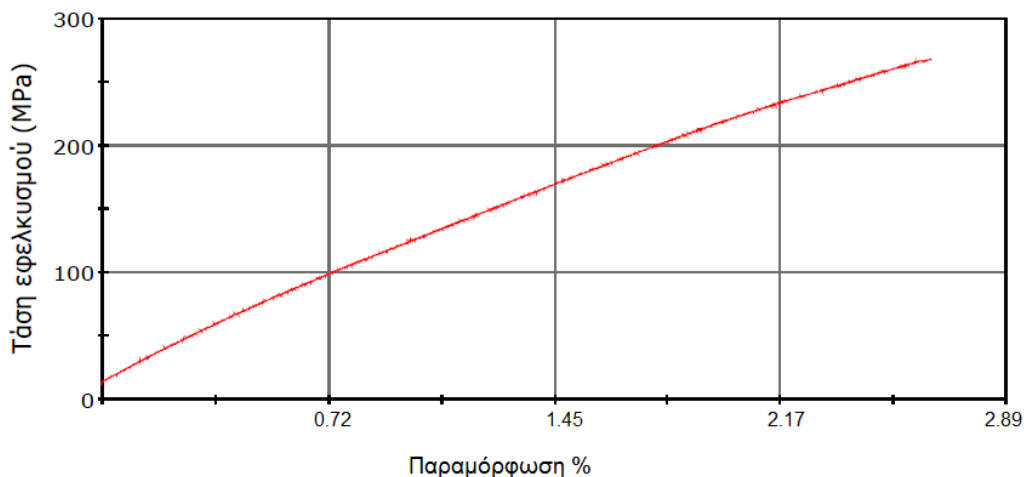


Σχήμα 7.3: Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης δοκιμίου (KEVLAR3).

Το τρίτο δοκίμιο αστόχησε αρκετά νωρίς, η συμπεριφορά του ήταν καθαρά ψαθυρή και σύμφωνα με τον (Πίνακα 5.3) και την (Εικόνα 7.11) αστόχησε σε μορφή τύπου (AGM). Το ότι αστόχησε σε τόσο μικρό φορτίο οφείλεται σε τυχόν εγκλωβισμένες φυσαλίδες αέρα ή τη μη πλήρη διαβροχή των ινών από το εποξικό σύστημα. Ένας δεύτερος λόγος είναι η παραμόρφωση του προσανατολισμού των ινών στο στημόνι του αραμιδίου ή η μη σωστή ευθυγράμμιση των υφασμάτων κατά την τοποθέτησή τους στο καλούπι.

Πίνακας 7.3: Αποτελέσματα πειράματος

Μέγιστο φορτίο (kN)	3.55
Τεχνητό όριο διαρροής (0.2 %) (MPa)	-
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	118.46
Δυσθραυστότητα (J)	2.42
Παραμόρφωση στο μέγιστο φορτίο (%)	0.79
Παραμόρφωση στη θραύση (%)	0.81
Επιμήκυνση σε εφελκυσμό στη θραύση (mm)	1.18
Χρόνος έως τη θραύση (sec)	69.90

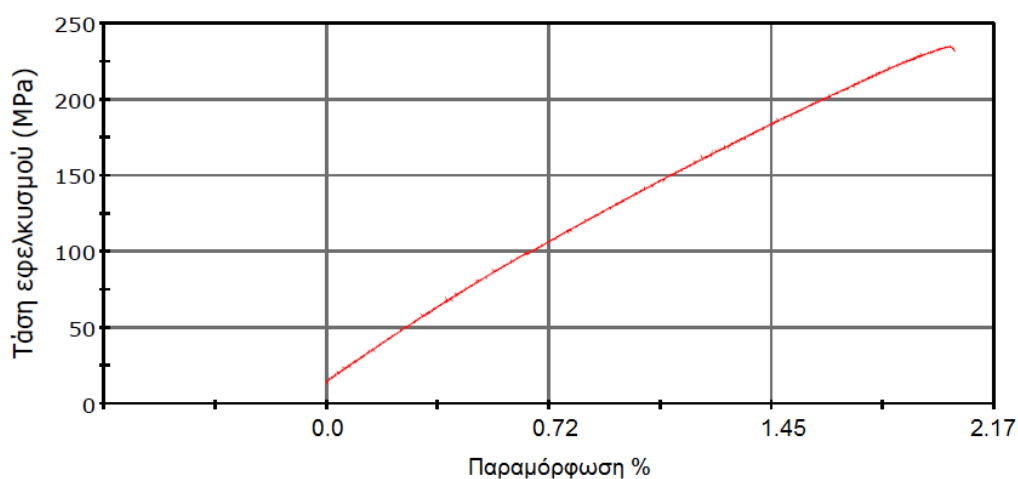


Σχήμα 7.4: Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης δοκιμίου (KEVLAR4).

Το τέταρτο δοκίμιο παρουσιάζει όμοια συμπεριφορά με το δεύτερο.

Πίνακας 7.4: Αποτελέσματα πειράματος

Μέγιστο φορτίο (kN)	8.05
Τεχνητό όριο διαρροής (0.2 %) (MPa)	267.41
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	268.23
Δυσθραυστότητα (J)	16.85
Παραμόρφωση σε εφελκυσμό σε (%)	2.50
Παραμόρφωση στο μέγιστο φορτίο (%)	2.51
Παραμόρφωση στη θραύση (%)	3.66
Χρόνος έως τη θραύση (sec)	219.25

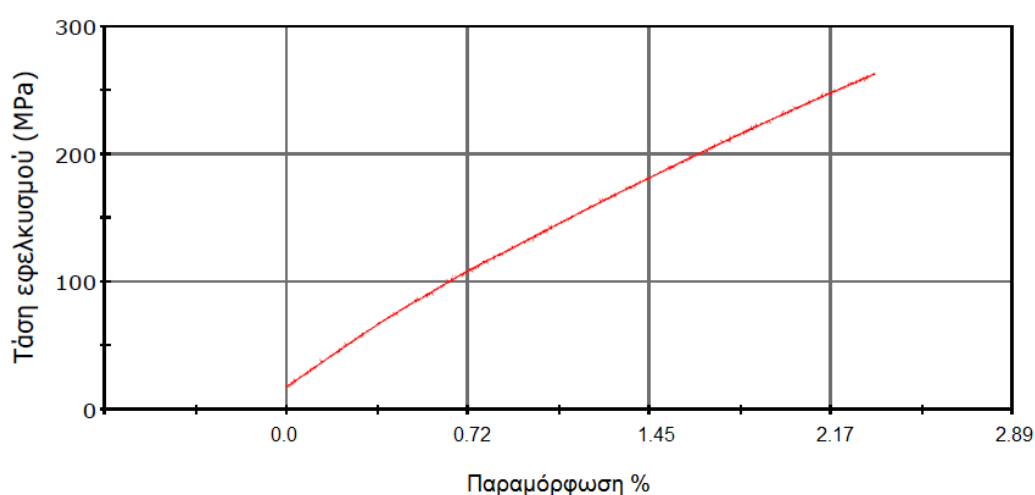


Σχήμα 7.5: Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης δοκιμίου (KEVLAR5).

Το πέμπτο δοκίμιο εμφανίζει κοινή συμπεριφορά με το πρώτο.

Πίνακας 7.5: Αποτελέσματα πειράματος

Μέγιστο φορτίο (kN)	7.04
Τεχνητό όριο διαρροής (0.2 %) (MPa)	-
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	234.79
Δυσθραυστότητα (J)	11.38
Παραμόρφωση στο μέγιστο φορτίο (%)	1.92
Παραμόρφωση στη θραύση (%)	1.93
Επιμήκυνση στη θραύση (mm)	2.81
Χρόνος έως τη θραύση (sec)	167.8



Σχήμα 7.6: Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης δοκιμίου (KEVLAR6).

Το έκτο δοκίμιο παρουσιάζει όμοια συμπεριφορά με το πέμπτο και πρώτο, ο τύπος αστοχίας του είναι θραύση κοντά στο κάτω επίθεμα και οι τιμές των μετρήσεων κινούνται γύρω από την ίδια περιοχή.

Πίνακας 7.6: Αποτελέσματα πειράματος

Μέγιστο φορτίο (kN)	7.89
Τεχνητό όριο διαρροής (0.2 %) (MPa)	-
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	262.86
Δυσθραυστότητα (J)	14.58
Παραμόρφωση στο μέγιστο φορτίο (%)	2.21
Παραμόρφωση στη θραύση (%)	2.22
Επιμήκυνση στη θραύση (mm)	3.24
Χρόνος έως τη θραύση (sec)	194.00

Τα δοκίμια αραμιδίου (Kevlar) μετά την φόρτιση τους σε εφελκυσμό αστόχησαν στα ακόλουθα σημεία. Ενδιαφέρον παρουσιάζει ότι αστόχησαν

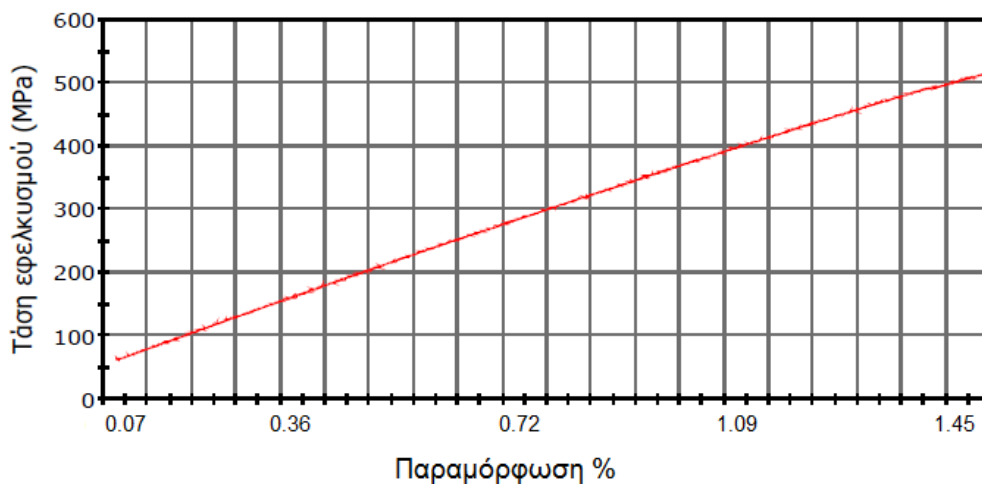
κοντά στο κάτω επίθεμα εκτός του τρίτου δοκιμίου το οποίο αστόχησε σχεδόν στη μέση του μήκους του. (Εικόνα 7.11)



Σχήμα 7.11: Δοκίμια αραμιδίου μετά το πείραμα εφελκυσμού, από αριστερά είναι το πρώτο και συνεχίζει η αρίθμηση τους ως το έκτο.

7.4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΘΡΑΚΟΝΗΜΑΤΟΣ (CARBON FIBER)

Ακολουθούν τα πειραματικά αποτελέσματα των δοκιμών ανθρακονήματος (CARBONFIBER1 έως CARBONFIBER5) και οι πίνακες με τα αποτελέσματα τους. (Σχήμα 7.7, 7.8, 7.9, 7.10, 7.11) και οι πίνακες (Πίνακας 7.7, 7.8, 7.9, 7.10, 7.11).

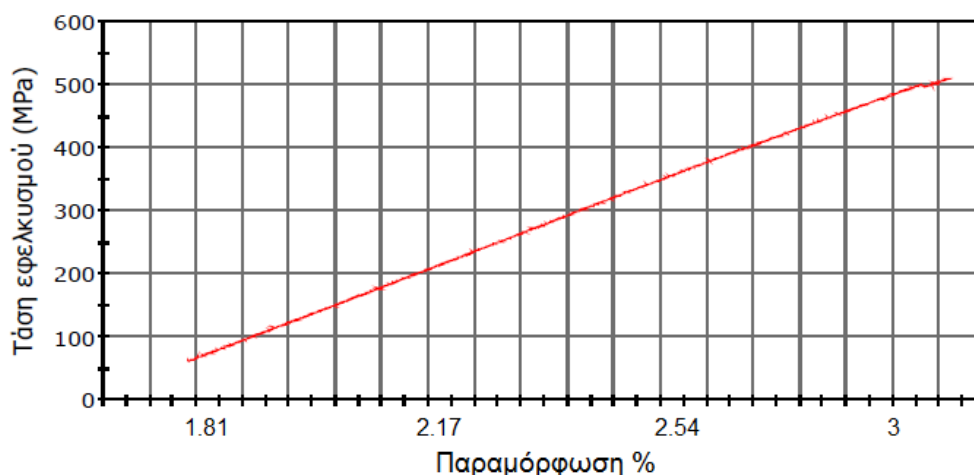


Σχήμα 7.7: Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης δοκιμίου (CARBONFIBER1).

Το πρώτο δοκίμιο ανθρακονήματος παρουσιάζει μια καθαρά ψαθυρή συμπεριφορά με μέγιστη παραμόρφωση 1.5% και αντοχή σε εφελκυσμό τα 515.12 (MPa). Σύμφωνα με τον (πίνακα 5.3) και την (Εικόνα 7.11) αστόχησε σε μορφή τύπου (AGM) και (LGM). Εντυπωσιακό αλλά και αναμενόμενο η διπλάσια αντοχή που εμφανίζει σε σχέση με το αραμίδιο (Kevlar) για δοκίμια πάχους 1 (mm).

Πίνακας 7.7: Αποτελέσματα πειράματος

Μέγιστο φορτίο (kN)	7.73
Τεχνητό όριο διαρροής (0.2 %) (MPa)	-
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	515.12
Δυσθραυστότητα (J)	8.75
Παραμόρφωση στο μέγιστο φορτίο (%)	1.34
Παραμόρφωση στη θραύση (%)	1.34
Επιμήκυνση στη θραύση (mm)	1.96
Χρόνος έως τη θραύση (sec)	117.30

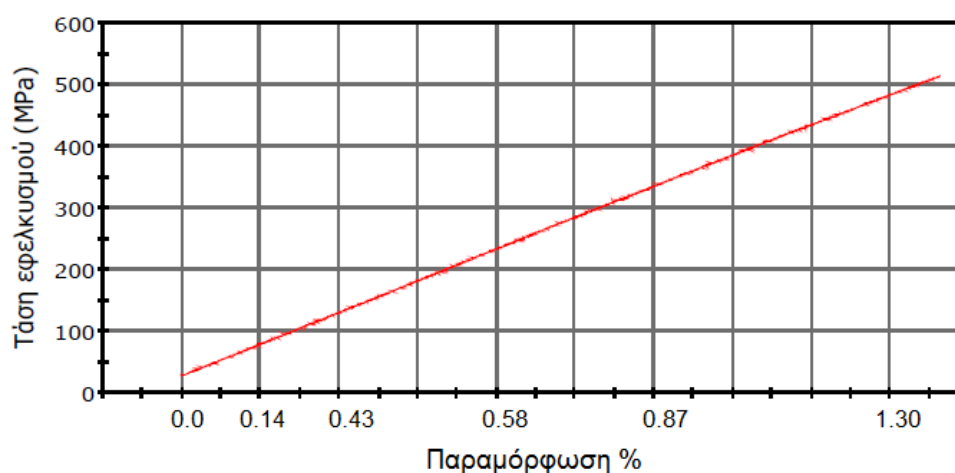


Σχήμα 7.8: Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης δοκιμίου (CARBONFIBER2).

Το δεύτερο δοκίμιο ανθρακονήματος εμφανίζει την ίδια ψαθυρή συμπεριφορά των υπολοίπων. Στο διάγραμμα εκτός της προφόρτισης που εμφανίζεται παρατηρούμε και ότι δεν έχουμε μηδενίσει κατά την αρχικοποίηση του πειράματος. Σύμφωνα με τον (πίνακα 5.3) και την (Εικόνα 7.11) αστόχησε σε μορφή τύπου (SGM) και (LAT).

Πίνακας 7.8: Αποτελέσματα πειράματος

Μέγιστο φορτίο (kN)	7.65
Τεχνητό όριο διαρροής (0.2 %) (MPa)	-
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	510.12
Δυσθραυστότητα (J)	7.19
Παραμόρφωση στο μέγιστο φορτίο (%)	1.12
Παραμόρφωση στη θραύση (%)	1.12
Επιμήκυνση στη θραύση (mm)	1.64
Χρόνος έως τη θραύση (sec)	98.25

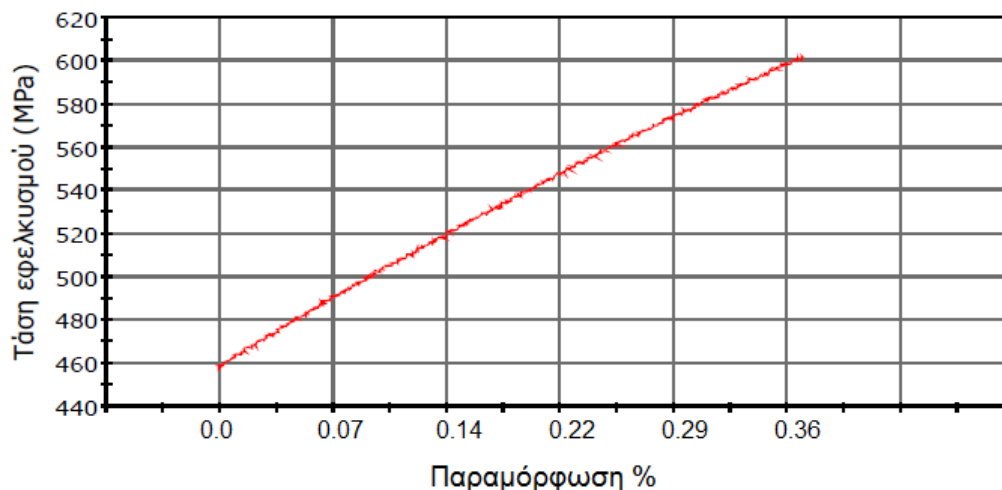


Σχήμα 7.9: Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης δοκιμίου (CARBONFIBER3).

Το τρίτο δοκίμιο εμφανίζει την ίδια ψαθυρή συμπεριφορά του πρώτου και του δεύτερου. Το αποτέλεσμα αυτό είναι ικανοποιητικό αφού δεν έχουμε σημάδια αστοχίας. Σύμφωνα με τον (Πίνακα 5.3) και την (Εικόνα 7.11) αστόχησε σε μορφή τύπου (AGM), αστοχία ακριβώς στο μέσο της γεωμετρίας.

Πίνακας 7.9: Αποτελέσματα πειράματος

Μέγιστο φορτίο (kN)	7.70
Τεχνητό όριο διαρροής (0.2 %) (MPa)	-
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	513.06
Δυσθραυστότητα (J)	7.91
Παραμόρφωση στο μέγιστο φορτίο (%)	1.32
Παραμόρφωση στη θραύση (%)	1.32
Επιμήκυνση στη θραύση (mm)	1.92
Χρόνος έως τη θραύση (sec)	115.25

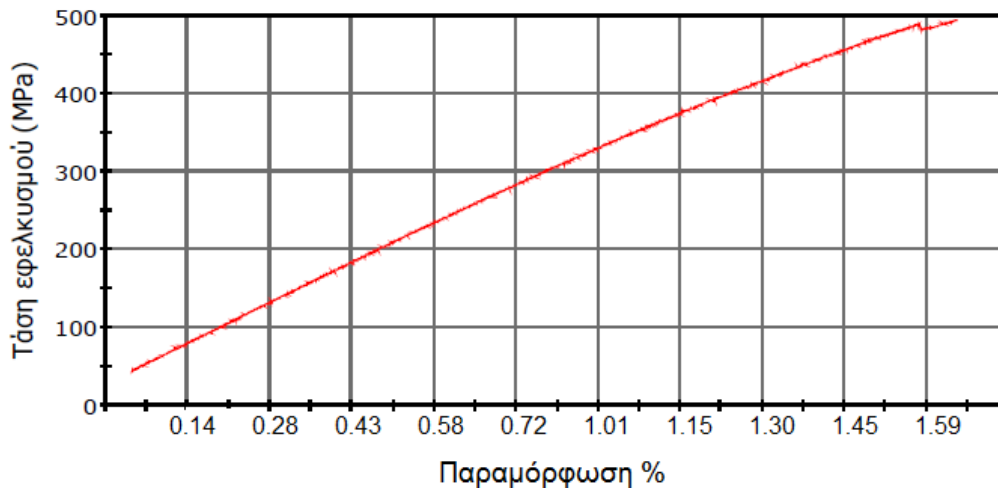


Σχήμα 7.10: Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης δοκιμίου (CARBONFIBER4).

Το τέταρτο δοκίμιο αποτελεί το πιο εντυπωσιακό και επιτυχημένο δοκίμιο καθώς εμφανίζει ψαθυρή συμπεριφορά με παραμόρφωση στη θραύση 0.4%. Η αντοχή σε εφελκυσμό είναι 602.55 (MPa). Σύμφωνα με τον (Πίνακα 5.3) και την (Εικόνα 7.11) αστόχησε σε μορφή τύπου (XGM) με έκρηξη του δοκιμίου και εκτόξευση θραυσμάτων στο χώρο, συγκεκριμένα μόνο τα επιθέματα παρέμειναν στη μηχανή εφελκυσμού.

Πίνακας 7.10: Αποτελέσματα πειράματος

Μέγιστο φορτίο (kN)	9.04
Τεχνητό όριο διαρροής (0.2 %) (MPa)	-
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	602.55
Δυσθραυστότητα (J)	4.11
Παραμόρφωση στο μέγιστο φορτίο (%)	0.35
Παραμόρφωση στη θραύση (%)	0.35
Επιμήκυνση στη θραύση (mm)	0.51
Χρόνος έως τη θραύση (sec)	30.75



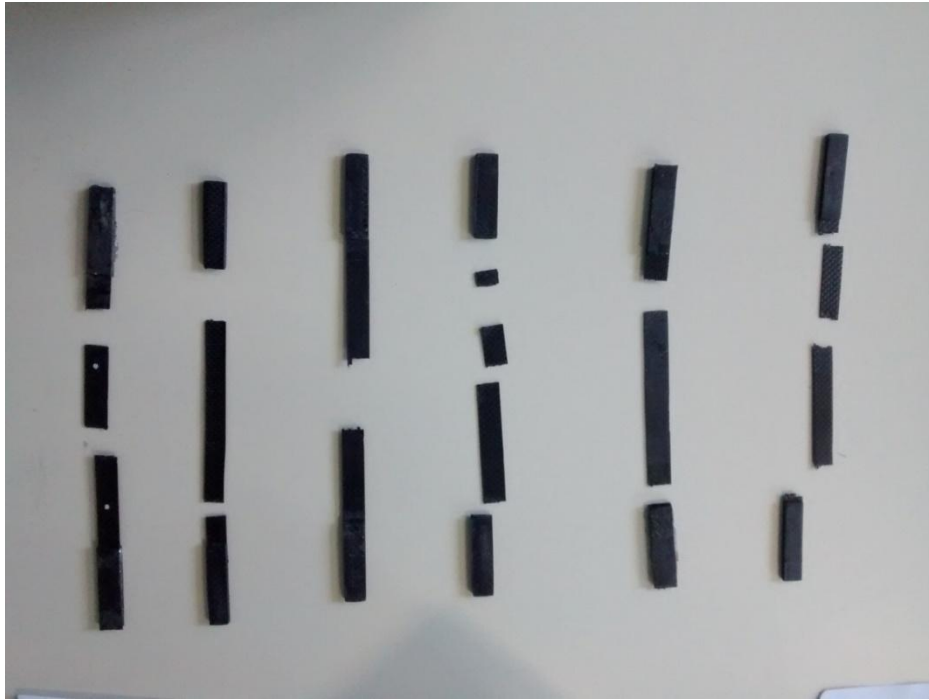
Σχήμα 7.11: Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης δοκιμίου (CARBONFIBER5).

Το πέμπτο δοκίμιο εμφανίζει την ίδια φαθυρή συμπεριφορά με τα προηγούμενα τέσσερα, η μηχανή δεν μηδενίστηκε κατά την αρχικοποίηση του πειράματος οπότε και εμφανίζεται στον άξονα x αρνητικές τιμές. Τέλος παρατηρούμε ένα γλίστρημα του δοκιμίου από τις αρπάγες λίγο πριν τη θραύση, το οποίο εμφανίζεται στο διάγραμμα μας με το σκαλοπάτι που κάνει.

7.11: Αποτελέσματα πειράματος

Μέγιστο φορτίο (kN)	7.17
Τεχνητό όριο διαρροής (0.2 %) (MPa)	-
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	494.59
Δυσθραυστότητα (J)	4.47
Παραμόρφωση στο μέγιστο φορτίο (%)	1.38
Παραμόρφωση στη θραύση (%)	1.38
Επιμήκυνση στη θραύση (mm)	2.00
Χρόνος έως τη θραύση (sec)	120.50

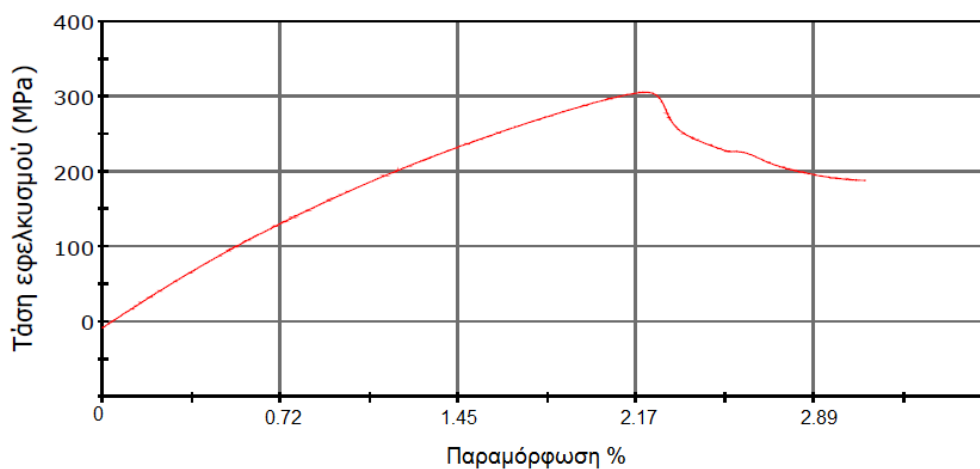
Τα δοκίμια ανθρακονήματος (Carbon fiber) μετά την φόρτιση τους σε εφελκυσμό αστόχησαν στα ακόλουθα σημεία. Το διάγραμμα και τα αποτελέσματα του έκτου δοκιμίου της παρακάτω φωτογραφίας δεν αποθηκεύτηκαν κατά την διεξαγωγή του πειράματος, οπότε και απουσιάζουν. (Εικόνα 7.12)



Εικόνα 7.12: Δοκίμια ανθρακονήματος μετά το πείραμα εφελκυσμού.

7.5 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΥΑΛΟΝΗΜΑΤΟΣ (FIBERGLASS)

Ακολουθούν τα πειραματικά αποτελέσματα των δοκιμών υαλονήματος (FIBERGLASS1 έως FIBERGLASS5) και οι πίνακες με τα αποτελέσματά τους. (Σχήμα 7.12, 7.13, 7.14, 7.15, 7.16) και οι πίνακες (Πίνακας 7.12, 7.13, 7.14, 7.15, 7.16). Η 3D πλέξη του υαλοϋφάσματος μας υποχρέωσε λόγω πάχους να δημιουργήσουμε δοκίμια 4 (mm), σύμφωνα πάντα με τις παραχωρήσεις της τυποποίησης. Εκτός του τέταρτου δοκιμίου τα υπόλοιπα γλιστράνε από τις αρπάγες όπως και παρουσιάζεται στα ακόλουθα διαγράμματα.

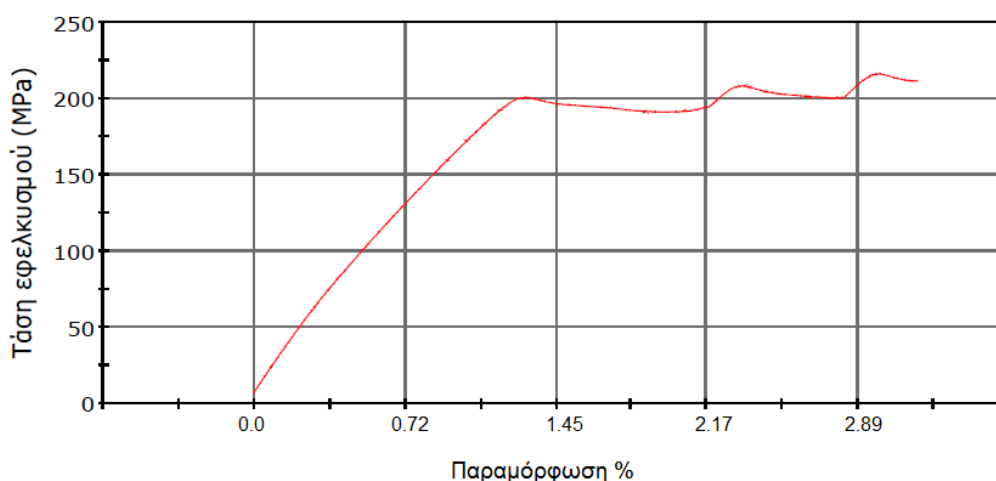


Σχήμα 7.12: Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης δοκιμίου (FIBERGLASS1).

Το πρώτο διάγραμμα υαλονήματος βλέπουμε ότι εμφανίζει μια ψευδοθαυρή συμπεριφορά. Η φόρτιση σε εφελκυστικό φορτίο που αντέχει το δοκίμιο πριν τη θραύση είναι αντίστοιχο των δοκιμίων αραμιδίου, παρόλο της διαφοράς στο πάχος. Σύμφωνα με τον (Πίνακα 5.3) και την (Εικόνα 7.11) αστόχησε σε μορφή τύπου (DGM), δηλαδή υπήρξε συγκέντρωση τάσεων στο κέντρο του δοκιμίου.

Πίνακας 7.12: Αποτελέσματα πειράματος

Μέγιστο φορτίο (kN)	18.35
Τεχνητό όριο διαρροής (0.2 %) (MPa)	280.48
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	305.83
Δυσθραυστότητα (J)	31.99
Παραμόρφωση στο μέγιστο φορτίο (%)	2.19
Παραμόρφωση στη θραύση (%)	3.11
Επιμήκυνση στη θραύση (mm)	4.28
Χρόνος έως τη θραύση (sec)	364.05

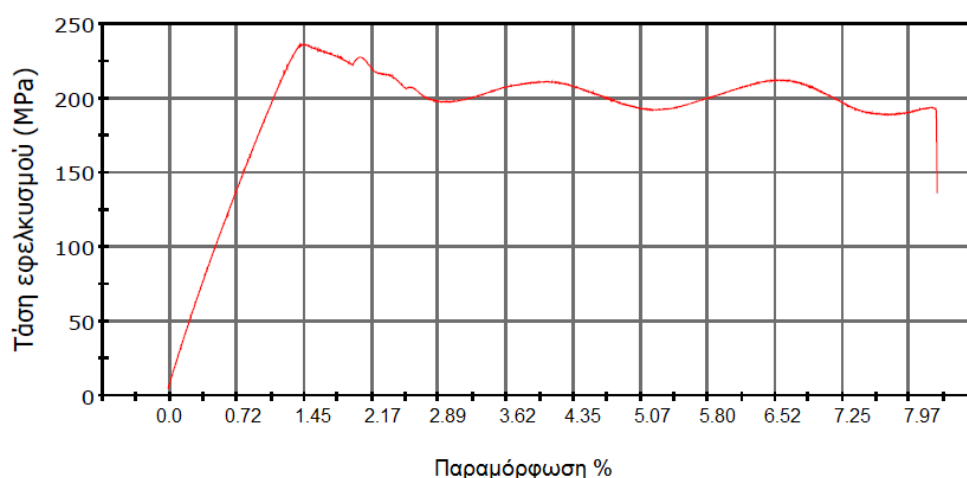


Σχήμα 7.13: Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης δοκιμίου (FIBERGLASS2).

Το δεύτερο δοκίμιο βλέπουμε ότι εμφανίζει ολίσθηση στις αρπάγες το οποίο οφείλεται αρχικά στη μη ικανή πίεση που εφαρμόζουν οι αρπάγες στη περιοχή των επιθεμάτων του δοκιμίου. Αυξάνοντας τη πίεση στις αρπάγες βλέπουμε το κυματισμό πριν τη θραύση. Σύμφωνα με τον (πίνακα 5.3) και την (Εικόνα 7.11) αστόχησε σε μορφή τύπου (DGM), δηλαδή υπήρξε συγκέντρωση τάσεων στο κέντρο του δοκιμίου. (Εικόνα 7.13)

Πίνακας 7.13: Αποτελέσματα πειράματος

Μέγιστο φορτίο (kN)	12.99
Τεχνητό όριο διαρροής (0.2 %) (MPa)	199.48
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	216.42
Δυσθραυστότητα (J)	40.53
Παραμόρφωση στο μέγιστο φορτίο (%)	2.99
Παραμόρφωση στη θραύση (%)	3.18
Επιμήκυνση στη θραύση (mm)	4.39
Χρόνος έως τη θραύση (sec)	348.15

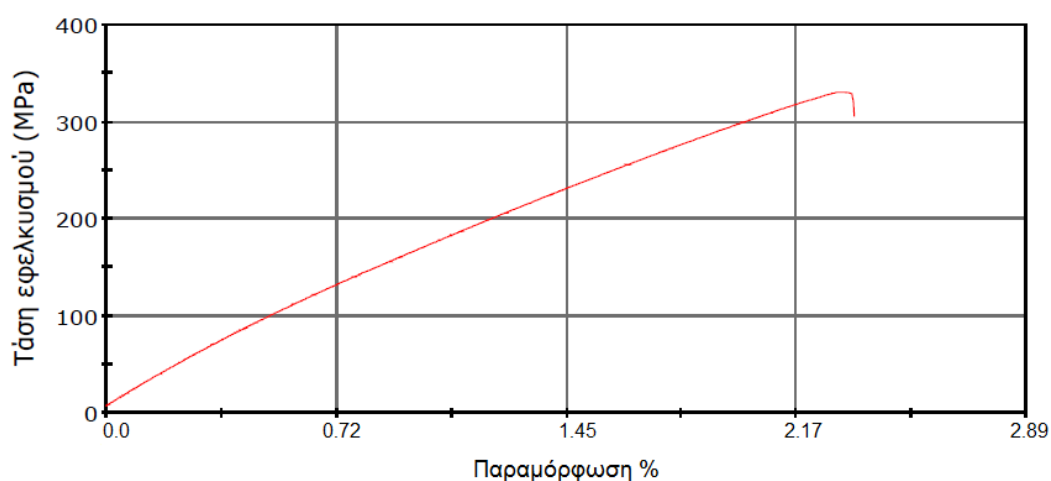


Σχήμα 7.14: Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης δοκιμίου (FIBERGLASS3).

Το τρίτο δοκίμιο υαλονήματος αστοχεί μέσα στην άνω αρπάγη (Εικόνα 7.14) και γι αυτό βλέπουμε την μέγιστη παραμόρφωση να λαμβάνει τη τιμή 8%. Τα αποτελέσματα δεν τα θεωρούμε αξιόπιστα. Σύμφωνα με τον (Πίνακα 5.3) και την (Εικόνα 7.11) αστόχησε σε μορφή τύπου (LIT), δηλαδή υπήρξε συγκέντρωση τάσεων στο επίπεμο του δοκιμίου, αυτό οφείλεται σε τυχόν εγκλωβισμένες φυσαλίδες αέρα ή τη μη πλήρη διαβροχή των ινών από το εποξικό σύστημα. Ένας δεύτερος λόγος είναι η παραμόρφωση του προσανατολισμού των ινών στο στημόνι του αραμιδίου ή η μη σωστή ευθυγράμμιση των υφασμάτων κατά την τοποθέτησή τους στο καλούπι.

Πίνακας 7.14: Αποτελέσματα πειράματος

Μέγιστο φορτίο (kN)	14.18
Τεχνητό όριο διαρροής (0.2 %) (MPa)	235.01
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	207.22
Δυσθραυστότητα (J)	36.97
Παραμόρφωση στο μέγιστο φορτίο (%)	1.47
Παραμόρφωση στη θραύση (%)	8.27
Επιμήκυνση στη θραύση (mm)	11.41
Χρόνος έως τη θραύση (sec)	180.80

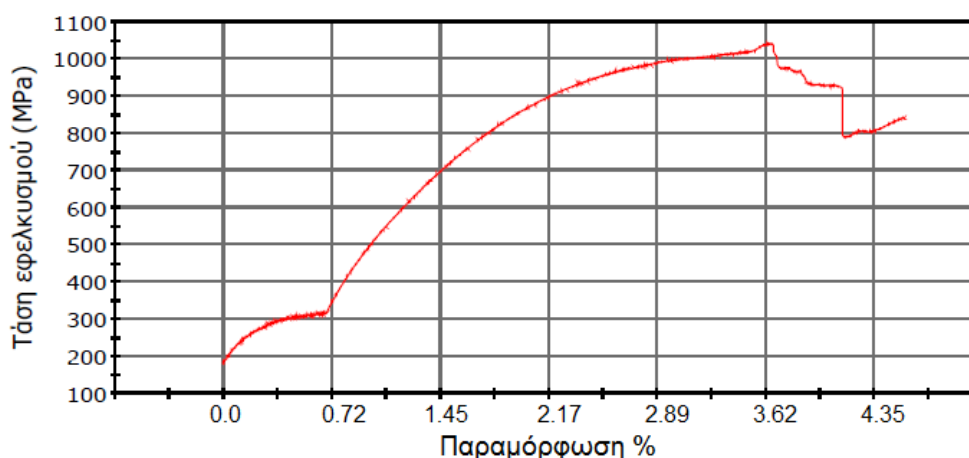


Σχήμα 7.15: Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης δοκιμίου (FIBERGLASS4).

Το τέταρτο δοκίμιο υαλονήματος είναι και το που δεν εμφανίζει κάποια αστοχία κατασκευαστική ή διαδικαστική κατά την διεξαγωγή του πειράματος και τα αποτελέσματα του λαμβάνονται ως ορθά. Η συμπεριφορά είναι ψευδοελαστική, η μέγιστη παραμόρφωση που λαμβάνει το δοκίμιο κατά τη φόρτιση είναι 2.2% και η αντοχή σε εφελκυσμό στα 330.37 (MPa). Σύμφωνα με τον (Πίνακα 5.3) και την (Εικόνα 7.11) αστόχησε σε μορφή τύπου (AGM).

Πίνακας 7.15: Αποτελέσματα πειράματος

Μέγιστο φορτίο (kN)	19.82
Τεχνητό όριο διαρροής (0.2 %) (MPa)	329.87
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	330.37
Δυσθραυστότητα (J)	35.86
Παραμόρφωση στο μέγιστο φορτίο (%)	2.32
Παραμόρφωση στη θραύση (%)	2.35
Επιμήκυνση στη θραύση (mm)	3.24
Χρόνος έως τη θραύση (sec)	95.90

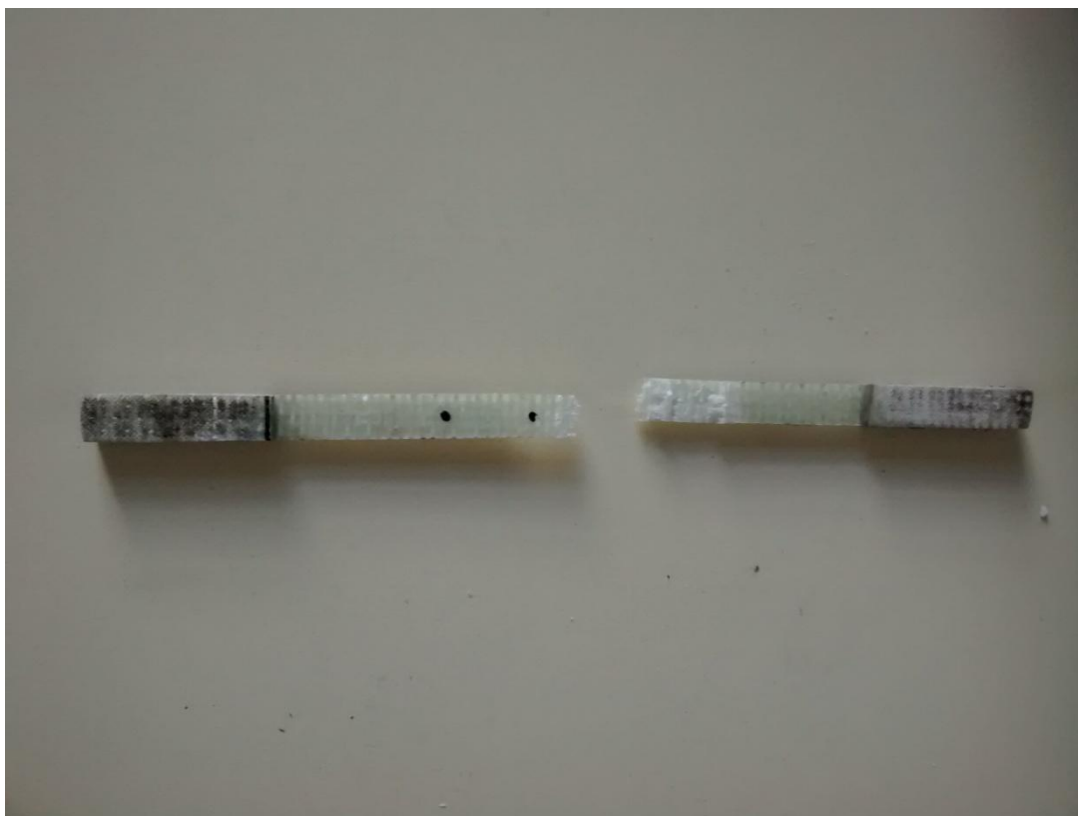


Σχήμα 7.16: Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης δοκιμίου (FIBERGLASS5).

Το πέμπτο δοκίμιο κατά την αρχή της φόρτισης του εμφανίζει ολίσθηση στη κάτω αρπάγη, αυξάνοντας τη πίεση στις αρπάγες σταματάει η ολίσθηση και συνεχίζει η φόρτιση έως τη θραύση στα 805.07 (MPa). Τιμή αρκετά υψηλότερη από των υπόλοιπων δοκιμίων. Το οποίο μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι τα προηγούμενα τέσσερα δοκίμια δεν είχαν πλήρη διαβροχή των ινών τους από το εποξικό σύστημα λόγω της πλέξης τους, ακόμα ο προσανατολισμός των ινών στο στημόνι του υφάσματος στο σύνθετο δεν είναι πλήρης, καθώς οι ίνες αυτές περνάνε εναλλάξ πάνω και κάτω από τα διαδοχικά νήματα του υφαιδιού που συναντούν. Τέλος η τιμή της επιμήκυνσης περιέχει λάθος αφού υπήρξε ολίσθηση κατά την διεξαγωγή του πειράματος.

Πίνακας 7.16: Αποτελέσματα πειράματος

Μέγιστο φορτίο (kN)	10.41
Τεχνητό όριο διαρροής (0.2 %) (MPa)	294.46
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	805.07
Δυσθραυστότητα (J)	44.02
Παραμόρφωση στο μέγιστο φορτίο (%)	5.04
Παραμόρφωση στη θραύση (%)	6.27
Επιμήκυνση στη θραύση (mm)	6.27
Πραγματική τάση σε Αντοχή εφελκυσμού (MPa)	852.37
Χρόνος σε Αντοχή εφελκυσμού (sec)	865.95



Εικόνα 7.13: Δοκίμιο υαλονήματος, έχει αστοχήσει στο μέσο του μήκους του.



Εικόνα 7.14: Δοκίμιο υαλονήματος, αστοχία στα επιθέματα μέσα στην αρπάγη.

7.6 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Ακολουθεί πίνακας με τη μέση τιμή των πειραματικών μας μετρήσεων και σύγκριση των αποτελεσμάτων. (Πίνακας 7.17)

Πίνακας 7.17: Πειραματικά αποτελέσματα

ΥΛΙΚΟ	CARBON FIBER	KEVLAR	FIBERGLASS
Μέγιστο φορτίο (kN)	7.86	8.08	12.53
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	527	276	265
Δυσθραυστότητα (J)	8	17	38
Επεξεργασία	Εύκολη	Δύσκολη	Καλή
Χρήση	Υψηλή μηχανική αντοχή	Κρουστικά φορτία	Κατασκευές μεγάλης γεωμετρίας

Τα δοκίμια ανθρακονήματος (4 στρώσεις ενίσχυσης) παρατηρούμε ότι έχουν διπλάσια αντοχή σε εφελκυσμό από τα δοκίμια αραμιδίου (3 στρώσεις ενίσχυσης) καθώς και από τα δοκίμια υαλονήματος (3 στρώσεις ενίσχυσης και πάχος 4 mm). Έτσι καταλήγουμε ότι η χρήση σύνθετου υλικού από ενίσχυση

ανθρακοϋφάσματος και μήτρα εποξικού συστήματος είναι κατάλληλη για εφαρμογές με υψηλή μηχανική αντοχή και χαμηλό βάρος. Το αραμίδιο παρατηρούμε ότι έχει διπλάσια δυσθραυστότητα από το ανθρακόνημα και η αντοχή του σε εφελκυσμό είναι μειωμένη. Η χρήση του για απορρόφηση κρουστικών φορτίων αποτελεί μονόδρομο. Τέλος το υαλόνημα λόγω της 3D πλέξης του χρειάζεται μεγάλες κατασκευές ώστε να αναδείξει τις πολύ καλές μηχανικές του ιδιότητες, το οποίο και διαπιστώσαμε κατά τις αστοχίες των δοκιμών.

7.7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στα πλαίσια της παρούσας πτυχιακής ήρθαμε σε επαφή με τον κόσμο των σύνθετων υλικών πέρα από τη θεωρία. Η διαδικασία κατασκευής των δοκιμών από ανθρακόνημα, αραμίδιο και υαλόνημα μας έδωσε τη δυνατότητα να γνωρίσουμε από κοντά αυτά τα εξωτικά υλικά, τις μεθόδους παρασκευής τους, τη συμπεριφορά τους, καθώς και τις ιδιαιτερότητες τους.

Η υφή, η ευαισθησία των υφασμάτων στην πλέξη τους και η προσοχή που χρειάζονται κατά τη διαδικασία κατασκευής των δοκιμών, απαίτησαν χρόνο και υπομονή. Μπορούμε να πούμε ότι η κατασκευή τους είναι πιο πολύ τέχνη παρά επιστήμη. Η κοπή με το ψαλίδι του υφάσματος καθώς και η δημιουργία περιβάλλοντος κενού απαιτεί αρκετή εμπειρία και εξοικείωση με τις διαδικασίες. Η επεξεργασία και το φινίρισμα των δοκιμών λόγω της χειρονακτικής διαδικασίας που απαιτείται ήταν αρκετά εξαντλητικό και η χρήση ειδικών μηχανημάτων κοπής και λείανσης θα είναι μια καλή προσθήκη στον εξοπλισμό του Μηχανολογικού Εργαστηρίου.

Το πείραμα του εφελκυσμού στη μηχανή INSTRON 8802 του εργαστηρίου Αντοχής Υλικών ήταν το τελικό στάδιο της πτυχιακής εργασίας όπου και λάβαμε αποτελέσματα μηχανικών ιδιοτήτων των δοκιμών. Οι αδυναμίες του κάθε υλικού από τη φύση του αλλά και κατασκευαστικές έδωσαν πληθώρα αποτελεσμάτων. Μπορούμε να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι η διαφορετικές παρτίδες δοκιμών με διαφορά στο περιβάλλον κατασκευής τους (θερμοκρασία και κυρίως υγρασία) όσο και ο άνθρωπος, κατασκευαστής αποτελεί καταλυτικό παράγοντα για το αποτέλεσμα. Η επιλογή 3D υαλονήματος αποδείχτηκε, ότι φέρει πολλές αστοχίες λόγω δομής αλλά και ατυχίας καθώς δεν υπολογίσαμε σωστά την ολίσθηση στις αρπάγες και την θλίψη των επιθεμάτων. Η χρήση του σε κατασκευές μεγαλύτερης γεωμετρίας θα αξιοποιούσε τις μηχανικές του ιδιότητες, ένα υαλοϋφασμα απλούστερης πλέξης θα καθιστούσε το πείραμα και τη σύγκριση με το ανθρακόνημα και το αραμίδιο ορθή και εφικτή. Οι μηχανικές ιδιότητες του ανθρακονήματος για 4 στρώσεις υφάσματος και σε συνδυασμό με το αργό εποξικό σύστημα [δοκίμιο πάχους 1 (mm)] είναι ικανοποιητικές. Το αραμίδιο ένα υλικό καθαρά κατασκευασμένο για απορρόφηση κρουστικών φορτίων έδωσε χαμηλότερες μηχανικές ιδιότητες σε εφελκυσμό σε σχέση με το ανθρακόνημα. Τέλος το μειωμένο βάρος που προσφέρουν σε συνδυασμό με τις μηχανικές τους ιδιότητες τα καθιστούν μονόδρομο στην επιλογή σε σχέση με τα μέταλλα.

Η όλη διαδικασία κατασκευής και πειράματος μας προσέφερε την γνώση για τη παραγωγή των σύνθετων υλικών, ο πειραματισμός και η τελική επιλογή μεθόδων αποτέλεσε αναπόσπαστο κομμάτι κάθε βήματος για την αποφυγή

της αποτυχίας, καθώς και η αλληλεπίδραση και συνεργασία με τα άτομα του περιβάλλοντος χώρου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ^(*)

1. D. Hull and T.W. Clyne. *An Introduction to Composite Materials*. Cambridge University Press, 2003.
2. Toray's Strategy for Carbon Fiber Composite Materials. April 11, 2008 Toray Industries, Inc. Senior Vice President Masayoshi Kamiura.
3. NDT of Aerospace Composites by John D. Register, R-CON NDT Inc.
4. EXPERIMENTAL METHODOLOGY OF STUDY OF DAMAGE INITIATION AND DEVELOPMENT IN TEXTILE COMPOSITES S.V. Lomov, F. Baudry, D.S. Ivanov, T.C. Truong, I. Verpoest, M.Vettory*, H. Xie.
5. W.D. Callister. *Επιστήμη και Τεχνολογία Υλικών*. Εκδ. Τζιόλα, 2004.
6. Κ. Παναγιώτου. *Επιστήμη και Τεχνολογία Πολυμερών*. Πήγασος 2000, 2000.
7. *An Introduction to Composite Materials*. Cambridge University Press, 2003.
8. Παπαδόπουλος Α. Χρήστος. Μεταπτυχιακή Διατριβή Ειδίκευσης, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2009.
9. Παπαδόπουλος Α. Χρήστος. Μεταπτυχιακή Διατριβή Ειδίκευσης, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2009.
10. Brian N. Cox and Flanagan. Handbook of analytical methods for Textile composites, NASA Contractor Report 4750, 1997.
11. ΕΜΠ Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών. Σημειώσεις για το μάθημα: Εφαρμογές προηγμένων υλικών.
12. Κ. Παπανικολάου. Επιστήμη και τεχνολογία σύνθετων υλικών, 2003 Κλειδάριθμος, 2008.
13. G.F Nino, H.E.N. Bersee, and Beukers. Design and production of composite structure.
14. J.J. Xiong, R.A. Shenoi, and X. Cheng. A modified micromechanical curved beam analytical model to predict the tension modulus of 2D plain weave fabric composites.
15. N. K. Naik and V. K. Ganesh. An analytical method for plain weave fabric composites. *Compositew* 26:281-289, 1995
16. <http://www.fibermaxcomposites.com/shop/index.php?language=gr>
17. <http://www.fibermaxcomposites.com/shop/kevlaramid-fabrics-c-22.html>
18. <http://www.fibermaxcomposites.com/shop/glass-fabrics-c-24.html>
19. <http://www.fibermaxcomposites.com/shop/combinations-c-30.html>
20. <http://www.fibermaxcomposites.com/shop/consumables-c-29.html>
21. <http://www.speedhunters.com/>
22. <http://en.wikipedia.org/wiki/Fiberglass>
23. <http://en.wikipedia.org/wiki/Kevlar>
24. http://en.wikipedia.org/wiki/Kevlar#mediaviewer/File:Kevlar_chemical_synthesis.png

^(*) Οι παραπάνω καταχωρήσεις αφορούν τα εξής:

1. Ελληνικό Βιβλίο, 2. Ξενόγλωσσο Βιβλίο, 3. Δημοσίευση σε περιοδικό, 4. Δημοσίευση σε πρακτικά συνεδρίου, 5. Δημοσίευση στο διαδίκτυο.

25. [http://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_\(fiber\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_(fiber))
26. [http://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_\(fiber\)#mediaviewer/File:PAN_stabilization.PNG](http://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_(fiber)#mediaviewer/File:PAN_stabilization.PNG)
27. https://www.materials.uoc.gr/el/undergrad/courses/ETY343/notes/slides_1.pdf
28. <http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A0%CE%BF%CE%BB%CF%85%CE%BC%CE%B5%CF%81%CE%AD%CF%82>
29. <http://en.wikipedia.org/wiki/Hexamethylphosphoramide>
30. http://en.wikipedia.org/wiki/Bulletproof_vest
31. <http://en.wikipedia.org/wiki/Aramid>
32. <http://www.nafidubai.com/grp-domes.html>
33. http://www.tapplastics.com/product/fiberglass/fiberglass_fabrics/s_2_glass_4533/87
34. http://www.glassinchina.com/product/productDisplay_325891.html
35. <http://www.instron.com/en/products/testing-systems/dynamic-and-fatigue-systems/8800-cruciform/8802tt-axial-torsion>
36. <http://www.koenigsegg.com/models/one1/>
37. <http://www.carbonfiberglass.com/see-how-pagani-builds-their-carbon-fiber-supercars/>
38. http://www.sqlgroup.com/cms/_common/images/innovation/carbon-immobility/04_sql_acf/gallery/Passenger-compartment-bwm-i3.jpg
39. <http://www.brembo.com/en/car/originalequipment/products/Pages/Carbon%20ceramic%20discs.aspx>
40. <http://www.astm.org/search/fullsite-search.html?query=d3039&>
41. <http://www.tradeindia.com/fp1119499/High-Modulus-Carbon-Fiber-Fishing-Rod.html>
42. http://cdn.fibreglast.com/images/vacuumbagging_diagram_WEB.jpg
43. https://www.google.gr/search?q=carbon+fiber+production&espv=2&biw=1366&bih=667&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ei=pT26VObuLYiCPZS4gfgN&ved=0CAYQ_AUoAQ#tbn=isch&q=pressure+bag+molding
44. http://autospeed.com.au/cms/title_Complete-Guide-to-Composites-Part-4/A_108696/article.html.
45. 3D Fiber Reinforced Polymer Composites L. Tong, A.P. Mouritz and M.K. Bannister Elsevier
46. Carbon Fiber Composites Deborah D. L. Chung Butterworth-Heinemann
47. CARBON FIBERS and their Composites Peter Morgan Taylor and Francis.