



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ**

**ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΕΣ ΚΑΤΑΠΟΝΙΣΕΙΣ
ΛΕΠΤΟΤΟΙΧΩΝ ΣΩΛΗΝΩΣΕΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ
ΔΙΑΤΟΜΩΝ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΜΕ ΙΝΕΣ
ΑΝΘΡΑΚΑ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
Φουφρής Έκτωρ**

**Επίβλεψη:
Καθηγητής Δ. Μανωλάκος**

**ΑΘΗΝΑ
ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2011**

Στον πατέρα μου Αλέξανδρο

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Από τη θέση αυτή θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή και Διευθυντή του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών Δ.Ε. Μανωλάκο, η βοήθεια του οποίου συνέβαλε στο να έρθει εις πέρας η παρούσα διπλωματική εργασία. Ιδιαίτερες ευχαριστίες στον υποψήφιο Διδάκτορα Κιτσέλη Αλέξανδρο και στον Κωνσταντίνο Κερασιώτη για την πολύτιμη βοήθειά τους. Ένα μεγάλο ευχαριστώ ανήκει στη μητέρα μου και στα αδέρφια μου για την ψυχολογική συμπαράσταση που μου προσέφεραν όλα αυτά τα χρόνια. Τέλος, θερμές ευχαριστίες στους συμφοιτητές μου Τζογάνη Αθηνά, Τομαρά Δημήτριο και Τσέκα Ανδρέα, καθώς και στους φίλους μου, που με βοήθησαν με τον τρόπο τους να τα καταφέρω.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1.1
1.1	Εισαγωγή στα σύνθετα υλικά.....	1.1
1.1.1	Ισοτροπικά, Ανισοτροπικά και Ορθοτροπικά υλικά.....	1.5
1.1.2	Διαστρωματώσεις (laminates).....	1.7
1.1.3	Σύνθετα υλικά – Μεταλλικά υλικά	1.9
1.1.4	Πλεονεκτήματα – μειονεκτήματα σύνθετων υλικών.....	1.12
1.1.5	Εφαρμογές.....	1.21
1.2	Ίνες άνθρακα	1.28
1.2.1	Τι είναι οι ίνες άνθρακα.....	1.28
1.2.2	Πως κατασκευάζονται οι ίνες άνθρακα.....	1.30
1.2.3	Ιστορική αναδρομή.....	1.32
1.2.4	Το μέλλον	1.36
1.3	Η αξονική κατάρρευση λεπτότοιχων σωληνώσεων CFRP.....	1.39
1.3.1	Μέθοδοι κατάρρευσης σύνθετων υλικών	1.39
1.3.2	Χαρακτηριστικά ενεργειακής απορρόφησης	1.41
2	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	2.1
2.1	Κατασκευή λεπτότοιχων Σωληνώσεων	2.1
2.1.1	Προετοιμασία καλουπιών.....	2.1
2.1.2	Διαδικασία κατασκευής σωληνώσεων.....	2.2
2.2	Περιγραφή πειραματικού εξοπλισμού.....	2.13
2.3	Πειραματικές δοκιμές και μετρήσεις	2.15
2.3.1	Δοκίμιο 1.....	2.15
2.3.2	Δοκίμιο 2.....	2.21
2.3.3	Δοκίμιο 3.....	2.27
2.3.4	Δοκίμιο 4.....	2.32
2.3.5	Δοκίμιο 5.....	2.38
2.3.6	Δοκίμιο 6.....	2.44
2.4	Μικρογραφική ανάλυση.....	2.49
2.4.1	Διαδικασία και προετοιμασία των δοκιμίων.....	2.49
2.4.2	Παρατήρηση σε μικροσκόπιο.....	2.55
2.4.3	Συγκεντρωτικά αποτελέσματα	2.61

2.5	Παρατηρήσεις και συμπεράσματα.....	2.62
2.5.1	Παρατηρήσεις σχετικά με τον μικρομηχανισμό κατάρρευσης.....	2.62
3	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	3.1
3.1	Ελληνική και ξενόγλωσση βιβλιογραφία	3.1
4	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	4.1
4.1	Κώδικας FORTRAN.....	4.1

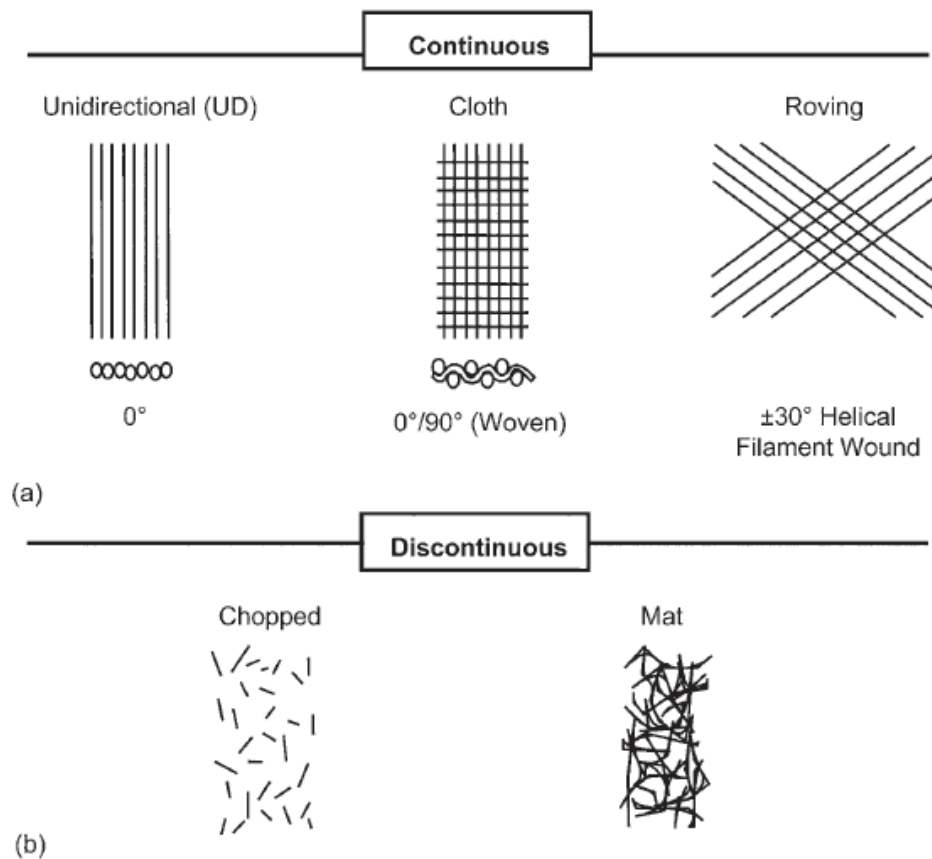
1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Εισαγωγή στα σύνθετα υλικά

Ένα σύνθετο υλικό μπορεί να οριστεί ως ένας συνδυασμός δύο ή περισσότερων υλικών με αποτέλεσμα το σύνθετο υλικό να έχει καλύτερες ιδιότητες από ότι τα συστατικά υλικά του μεμονωμένα. Σε αντίθεση με τα μεταλλικά κράματα, στα σύνθετα υλικά κάθε υλικό διατηρεί τις μηχανικές, τις φυσικές και τις χημικές του ιδιότητες. Τα δύο συστατικά μέρη είναι ο ενισχυτής και η μήτρα. Τα κύρια πλεονεκτήματα των σύνθετων υλικών είναι η υψηλή αντοχή τους και η σκληρότητά τους σε σχέση με την μικρή πυκνότητα που αυτά έχουν. Η διαδικασία ενίσχυσης παρέχει αντοχή και σκληρότητα. Στις περισσότερες περιπτώσεις το ενισχυτικό υλικό είναι ανθεκτικότερο, με περισσότερη αντοχή και σκληρότητα από τη μήτρα. Το ενισχυτικό υλικό είναι κυρίως ίνες ή σωματίδια. Τα σωματίδια έχουν περίπου ίδιες διαστάσεις σε όλες τις διευθύνσεις. Μπορεί να είναι σφαιρικά ή κάποια άλλη συνηθισμένη ή μη γεωμετρία. Τα σωματίδια τείνουν να είναι πιο αδύναμα και λιγότερο σκληρά από ότι οι ίνες αλλά συνήθως είναι πολύ πιο οικονομικά.

Μια ίνα έχει μήκος που είναι πολύ μεγαλύτερο από την διάμετρό της. Ο λόγος του μήκους προς τη διάμετρο είναι γνωστός ως λόγος αναλογίας (aspect ratio) και μπορεί να διαφέρει σημαντικά. Οι συνεχείς ίνες έχουν μεγάλο λόγο αναλογίας ενώ οι ασυνεχείς ίνες έχουν μικρό λόγο αναλογίας. Στα σύνθετα υλικά με συνεχείς ίνες, οι ίνες επιλέγουν προσανατολισμό, ενώ στα σύνθετα υλικά με ασυνεχείς ίνες, οι ίνες γενικά έχουν τυχαίο προσανατολισμό. Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνονται παραδείγματα συνεχών και ασυνεχών ινών στα οποία βλέπουμε τις μονοδιευθυντικές ίνες (unidirectional), το πλεκτό ύφασμα (woven cloth) και την ελικοειδή περιτύλιξη (helical winding) καθώς και παραδείγματα ασυνεχούς ενίσχυσης που περιλαμβάνουν τις κομμένες ίνες (chopped fibers) την τυχαία διάταξη (random mat).



Εικόνα 1.1-1 Τυπικές διατάξεις ενίσχυσης

Τα σύνθετα υλικά από συνεχείς ίνες συνήθως αποτελούνται από διαστρωματώσεις (laminates) στις οποίες οι στρώσεις προσανατολίζονται σε διευθύνσεις για να αποκτήσουν τις επιθυμητές ιδιότητες αντοχής και σκληρότητας με τον όγκο των ινών να φτάνει το 60 με 70 τοις εκατό. Οι ίνες παράγουν σύνθετα υλικά υψηλής αντοχής λόγω της μικρής τους διαμέτρου· εμπεριέχουν αρκετά λιγότερες ατέλειες (κυρίως επιφανειακές ατέλειες) σε σύγκριση με τα υλικά που παράγονται μαζικώς. Σα γενικός κανόνας ισχύει ότι όσο μικρότερη είναι η διάμετρος της ίνας, τόσο αυξάνεται η αντοχή της, πράγμα το οποίο, όμως, συμβάλλει και στην αύξηση του κόστους. Επιπροσθέτως, οι υψηλής αντοχής και μικρής διαμέτρου ίνες παρουσιάζουν μεγαλύτερη ευελιξία και είναι πιο ευπροσάρμοστες σε διαδικασίες κατασκευής όπως ύφανση ή κατασκευή εκτός ακτίνας. Τυπικές ίνες περιλαμβάνουν το γυαλί, τα αραμίδια και ο άνθρακας και μπορεί να είναι συνεχείς ή ασυνεχείς.

Το συνεχές υλικό είναι η μήτρα, που μπορεί να είναι πολυμερές, μεταλλικό ή κεραμικό υλικό. Τα πολυμερή έχουν χαμηλή αντοχή και σκληρότητα, ενώ τα μεταλλικά υλικά

παρουσιάζουν ενδιάμεση αντοχή και δυσκαμψία, αλλά υψηλή ολκιμότητα¹. Αντίθετα, τα κεραμικά υλικά παρουσιάζουν αυξημένη αντοχή και δυσκαμψία, είναι όμως ψαθυρά². Η μήτρα είναι υπεύθυνη για αρκετές κρίσιμες λειτουργίες, συμπεριλαμβανομένων των:

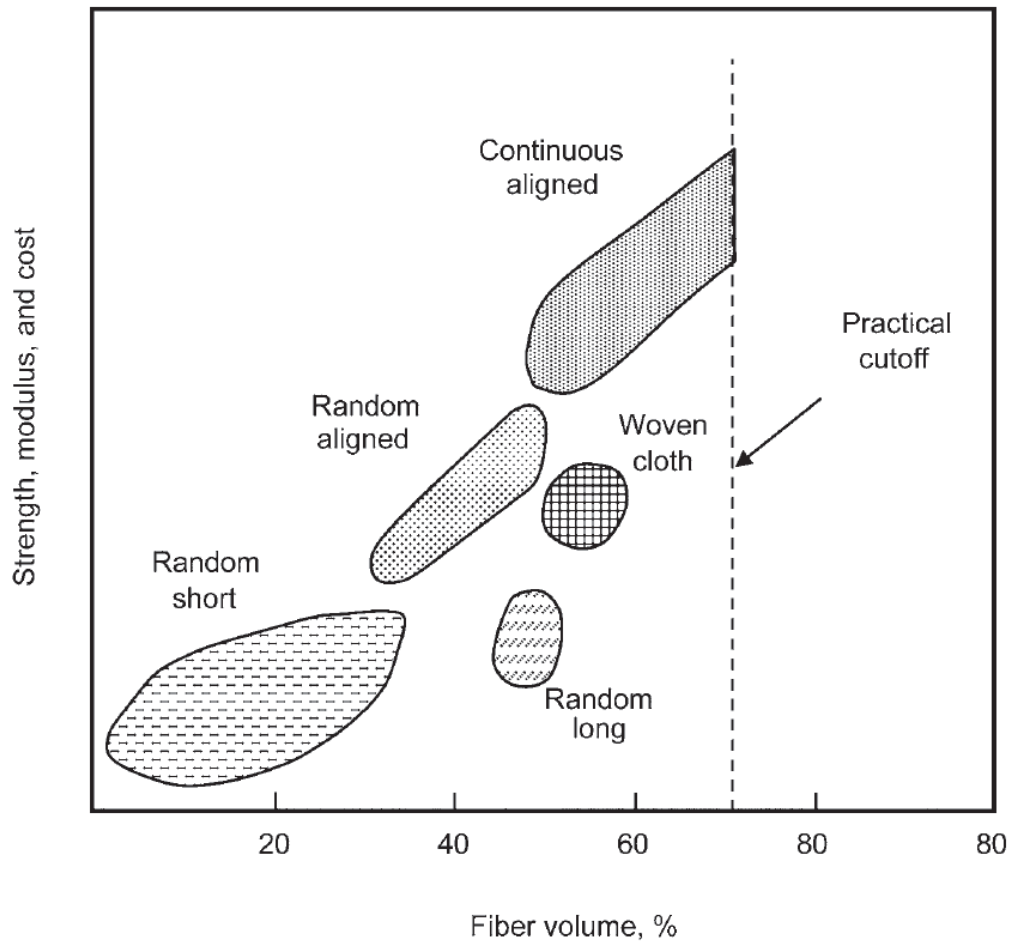
- Διατήρηση των ινών στο σωστό προσανατολισμό
- Διατήρηση των ινών σε ασφαλή απόσταση μεταξύ τους
- Προστασία των ινών από φθορά

Στα σύνθετα υλικά με μήτρα από πολυμερές ή από μεταλλικό υλικό, στα οποία δημιουργούνται ισχυροί δεσμοί μεταξύ των ινών και της μήτρας, η μήτρα προσδίδει τάσεις στις ίνες μέσω διάτμησης στις διεπιφάνειες. Στα σύνθετα υλικά με μήτρα από κεραμικό υλικό σκοπός είναι η αύξηση της σκληρότητας και όχι της αντοχής ή της δυσκαμψίας.

Το είδος και η ποσότητα του υλικού ενίσχυσης καθορίζουν και τις τελικές ιδιότητες του σύνθετου υλικού. Στην εικόνα 1.1-2 παρατηρούμε ότι η μέγιστη αντοχή και το μέγιστο μέτρο ελαστικότητας προκύπτει από σύνθετα υλικά που εμπεριέχουν συνεχείς ίνες.

¹ Ιδιότητα ορισμένων υλικών, κυρίως μεταλλικών, που επιτρέπει την κατασκευή λεπτών συρμάτων. Οφείλεται στην υπερνίκηση των δυνάμεων συνοχής που αναπτύσσονται μεταξύ των μορίων του υλικού. Σώματα στα οποία η ιδιότητα αυτή εκδηλώνεται σε έντονο βαθμό, ώστε να κατασκευάζονται πολύ λεπτά σύρματα, είναι ο χρυσός, ο λευκόχρυσος, ο άργυρος, ο χαλκός, ο κασσίτερος, ο ψευδάργυρος, καθώς και κράματά τους. Στην ιδιότητα ακόμα αυτή στηρίζεται και η κατασκευή όχι μόνο λεπτών συρμάτων, αλλά και πολύ λεπτών μεταλλικών φύλλων.

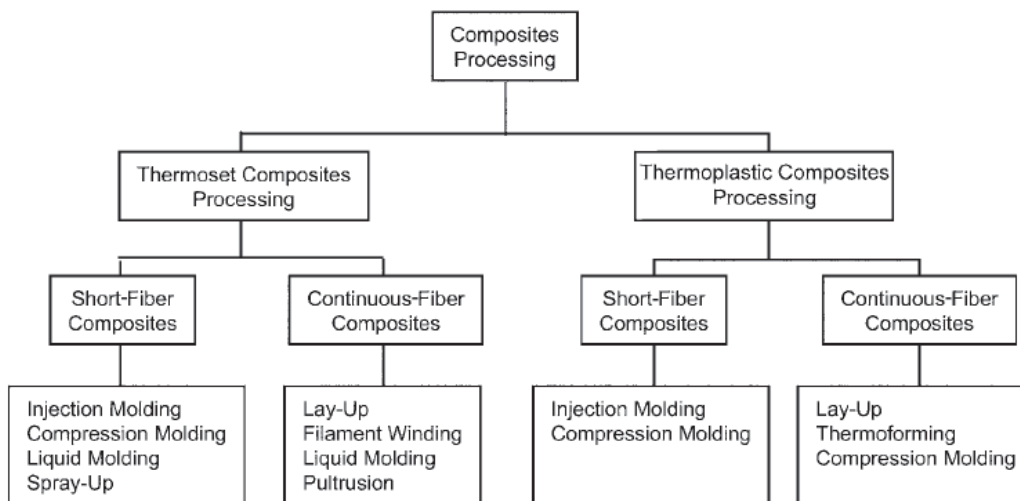
² Ένα ψαθυρό υλικό (π.χ. κιμωλία) ή μια ψαθυρή κατασκευή αστοχούν απότομα (δηλαδή χωρίς προειδοποίηση της επικείμενης αστοχίας) μόλις αναλάβουν το μέγιστο φορτίο τους.



Εικόνα 1.1-2 Επιρροή του ενισχυτικού υλικού - είδος και ποσότητα - στην απόδοση του σύνθετου υλικού

Στο ίδιο διάγραμμα παρατηρούμε ότι υπάρχει ένα ανώτατο όριο στον επιτρεπόμενο όγκο του υλικού ενίσχυσης προς παραγωγή ενός σύνθετου υλικού, το οποίο οριοθετείται στο 70%. Σε υψηλότερα ποσοστά, υπάρχει πολύ λίγο υλικό μήτρας για να συγκρατήσει τις ίνες αποτελεσματικά. Η θεωρητική αντοχή των ασυνεχών ινών μπορεί να φθάσει αυτή των συνεχών ινών, αν ο λόγος αναλογίας τους είναι αρκετά μεγάλος και δεδομένης της ευθυγράμμισής τους, αλλά είναι πολύ δύσκολο στην πράξη να διατηρηθεί καλή ευθυγράμμιση με ασυνεχείς ίνες. Τα σύνθετα υλικά με ασυνεχείς ίνες χαρακτηρίζονται κυρίως από τυχαίο προσανατολισμό, γεγονός το οποίο μειώνει δραματικά την αντοχή και την ελαστικότητά τους. Παρόλ' αυτά, το κόστος τους είναι σημαντικά κατώτερο του αντίστοιχου των συνθετικών υλικών με συνεχείς ίνες. Συνεπώς, τα σύνθετα υλικά με συνεχείς ίνες χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπου απαιτείται μεγαλύτερη αντοχή και δυσκαμψία – αλλά με μεγαλύτερο κόστος -, ενώ τα σύνθετα υλικά με ασυνεχείς ίνες χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές όπου πρωταρχικός παράγοντας είναι το κόστος, με την αντοχή και τη δυσκαμψία να έχουν δευτερεύουσα σημασία.

Η διαδικασία της κατεργασίας επηρεάζεται και από το ενισχυτικό υλικό και από τη μήτρα. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται οι πορείες κατεργασίας για σύνθετα υλικά με μήτρα από πολυμερές.



Παρατηρώντας το παραπάνω διάγραμμα βλέπουμε δύο τύπους μήτρας από πολυμερές:

- Θερμοσκληρητικές
- Θερμοπλαστικές

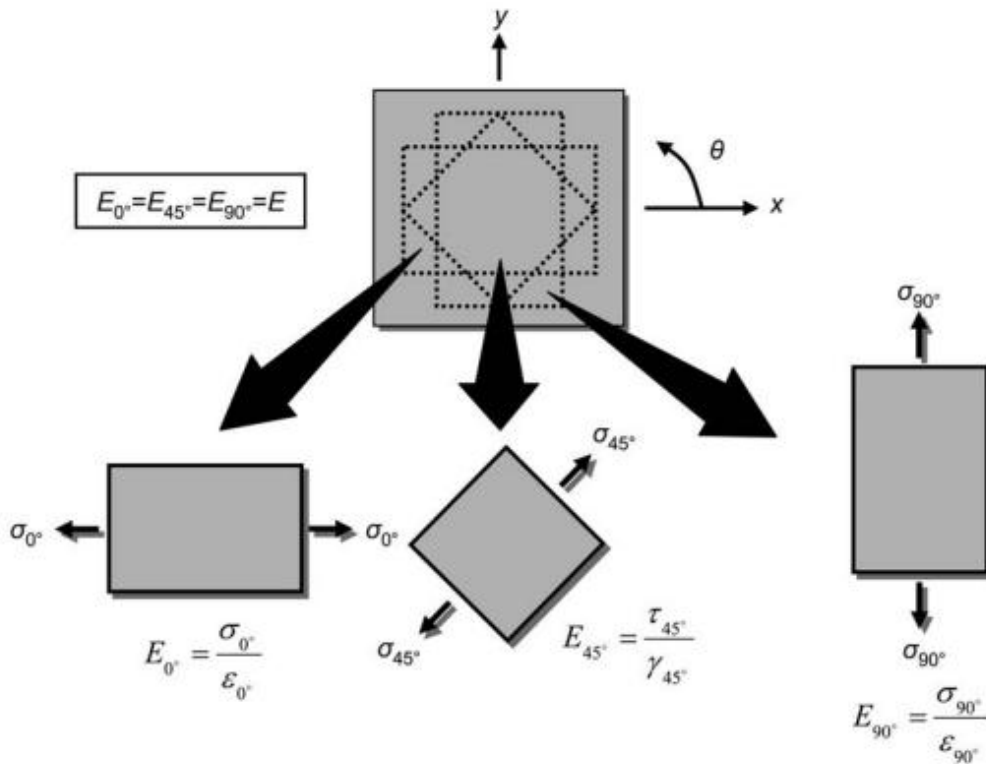
Μία θερμοσκληρητική μήτρα λειτουργεί ως εξής: ξεκινά ως μία ρητίνη χαμηλού ιξώδους που αντιδρά και γίνεται συμπαγής κατά τη διαδικασία της κατεργασίας, σχηματίζοντας με αυτόν τον τρόπο ένα στερεό. Η θερμοπλαστική, από την άλλη μεριά, είναι μία ρητίνη υψηλού ιξώδους, η οποία δημιουργείται θερμαίνοντάς σε θερμοκρασία άνω της θερμοκρασίας τήξης. Λόγω του ότι μία θερμοσκληρητική ρητίνη παίρνει μορφή και γίνεται συμπαγής κατά τη διαδικασία της κατεργασίας, δεν μπορεί να κατεργαστεί εκ νέου με θέρμανση. Αντίθετα, μία θερμοπλαστική ρητίνη μπορεί να θερμανθεί εκ νέου πάνω από το σημείο τήξης του για περαιτέρω κατεργασία. Υπάρχουν κατεργασίες και για τις δύο κατηγορίες ρητινών που είναι περισσότερο πρακτικές και εφαρμόσιμες σε ασυνεχείς ίνες και άλλες που εφαρμόζονται σε συνεχείς. Γενικά, λόγω του γεγονότος ότι οι μήτρες από μεταλλικό και από κεραμικό υλικό απαιτούν πολύ ψηλές θερμοκρασίες και μερικές φορές υψηλές πιέσεις για να κατεργαστούν, είναι κατά κύριο λόγο πιο ακριβές από τις μήτρες από πολυμερή υλικά. Παρόλ' αυτά, παρουσιάζουν αρκετά μεγαλύτερη θερμική σταθερότητα, το οποίο είναι και απαιτούμενο, αν όχι μόνο επιθυμητό, σε εφαρμογές όπου το σύνθετο υλικό εκτίθεται σε υψηλές θερμοκρασίες.

1.1.1 Ισοτροπικά, Ανισοτροπικά και Ορθοτροπικά υλικά.

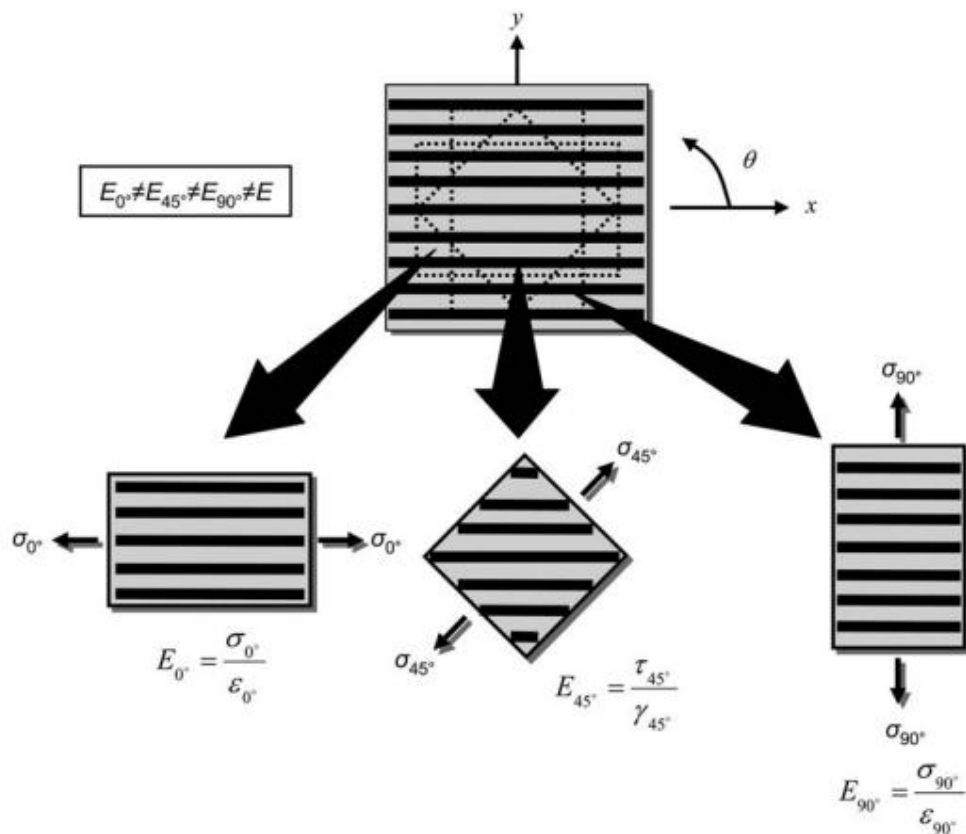
Τα υλικά μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως ισοτροπικά και ανισοτροπικά. Τα ισοτροπικά υλικά έχουν τις ίδιες ιδιότητες σε όλες τις κατευθύνσεις και τα κάθετα φορτία παράγουν μόνο ορθές τάσεις. Εν συγκρίσει, τα ανισοτροπικά υλικά έχουν

διαφορετικές ιδιότητες σε όλες τις κατευθύνσεις σε ένα σημείο στο στέλεχος. Δεν υπάρχουν υλικά επίπεδα συμμετρίας, και τα κάθετα φορτία δημιουργούν ορθές και διατμητικές τάσεις. Ένα υλικό είναι ισοτροπικό εάν οι ιδιότητες είναι ανεξάρτητες των διευθύνσεων μέσα στο υλικό.

Για παράδειγμα, αν λάβουμε υπ' όψιν το στοιχείο ενός ισοτροπικού υλικού που φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 1.1.1-1). Αν το υλικό φορτιστεί στην διεύθυνση των 0° , 45° , και 90° το μέτρο ελαστικότητας (E) είναι το ίδιο σε κάθε κατεύθυνση ($E_{0^\circ} = E_{45^\circ} = E_{90^\circ}$). Ωστόσο αν αυτό υλικό είναι ανισοτροπικό, όπως για παράδειγμα το κόντρα πλακέ της Εικόνας 1.1.1-2, οι ιδιότητές του διαφέρουν σε κάθε κατεύθυνση μέσα στο υλικό. Σε αυτό το παράδειγμα το μέτρο ελαστικότητας διαφέρει σε κάθε κατεύθυνση ($E_{0^\circ} \neq E_{45^\circ} \neq E_{90^\circ}$). Παρόλο που στο παράδειγμα χρησιμοποιείται μόνο το μέτρο ελαστικότητας, την ίδια συμπεριφορά μπορούμε να διακρίνουμε και σε άλλες ιδιότητες του υλικού, όπως τη μέγιστη αντοχή και στο συντελεστή θερμικής διασταλτικότητας.



Εικόνα 1.1.1-1 Στοιχείο ισοτροπικού υλικού υπό φόρτιση



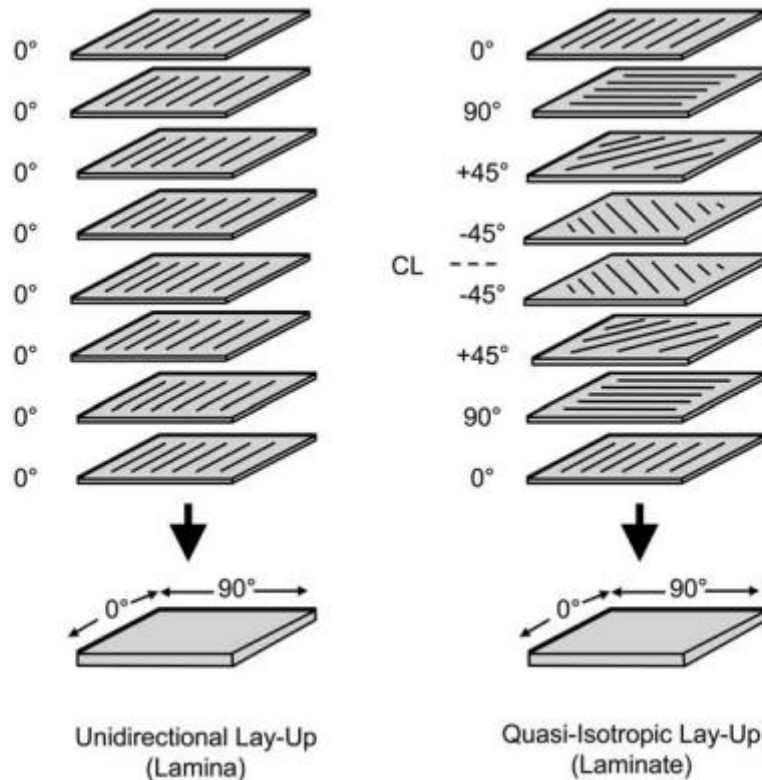
Εικόνα 1.1.1-2. Στοιχείο ανισοτροπικού υλικού υπό φόρτιση

Τα υλικά που παράγονται μαζικά, όπως τα μέταλλα και τα πολυμερή, θεωρούνται ως ιστροπικά υλικά, ενώ τα σύνθετα υλικά θεωρούνται ως ανισοτροπικά. Ωστόσο ακόμα και τα μαζικώς παραγόμενα υλικά όπως τα μέταλλα, μπορούν να γίνουν ανισοτροπικά, για παράδειγμα αν δουλεύονται σε συνθήκες ψύχους για να παράξουμε ευθυγραμμισμένους κόκκους σε συγκεκριμένη κατεύθυνση.

Τα σύνθετα υλικά είναι μια υποκατηγορία των ανισοτροπικών υλικών που ταξινομούνται ως ορθοτροπικά υλικά. Τα ορθοτροπικά υλικά έχουν ιδιότητες που διαφέρουν στις τρεις αμοιβαίες κατακόρυφες κατευθύνσεις. Έχουν τρεις αμοιβαίους κάθετους άξονες συμμετρίας, και ένα φορτίο που εφαρμόζεται παράλληλα στους άξονες αυτούς παράγει μόνο ορθές τάσεις. Ωστόσο τα φορτία που δεν εφαρμόζονται παράλληλα σε αυτούς τους άξονες, παράγουν τόσο ορθές όσο και διατμητικές τάσεις. Συνεπώς οι μηχανικές ιδιότητες των ορθοτροπικών υλικών είναι συναρτήσει του προσανατολισμού.

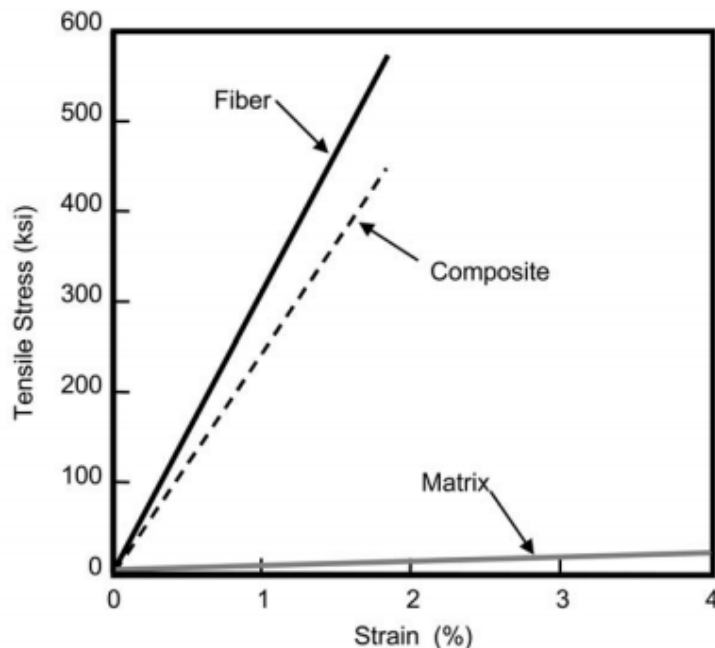
1.1.2 Διαστρωματώσεις (laminates).

Όταν υπάρχει ένα μόνο φύλλο ή ένα lay-up στο οποίο όλα τα στρώματα ή φύλλα στοιβάζονται στον ίδιο προσανατολισμό, το lay-up ονομάζεται έλασμα. Όταν τα φύλλα είναι στοιβαγμένα σε διάφορες γωνίες τότε το lay-up ονομάζεται διαστρωμάτωση. Τα σύνθετα υλικά από συνεχείς ίνες είναι υλικά που αποτελούνται από διαστρωμάτωση (Εικόνα 1.1.2-1) στις οποίες οι ξεχωριστές στρώσεις προσανατολίζονται σε διευθύνσεις που ενισχύουν τη δύναμη στην πρωταρχική διεύθυνση του φορτίου.



Εικόνα Error! Use the Home tab to apply Επικεφαλίδα 3 to the text that you want to appear here.-1. Διάταξη στρώσεων

Οι μονο-διευθυντικές 0° στρώσεις είναι εξαιρετικά δυνατές και άκαμπτες στην διεύθυνση των 0°. Ωστόσο, είναι πολύ αδύναμες στην διεύθυνση των 90° γιατί το φορτίο πρέπει να παραληφθεί από την πολύ πιο αδύναμη μήτρα. Ενώ μία ίνα με υψηλή αντοχή μπορεί να έχει τάση εφελκυσμού ως 500 ksi (3500MPa) ή και περισσότερο, μια τυπική μήτρα έχει τάση εφελκυσμού μόνο 5 με 10 ksi (35 ως 70 MPa). (Εικόνα 4)



Εικόνα 1.1.2-1. Σύγκριση των ιδιοτήτων εφελκυσμού των ινών, της μήτρας και των σύνθετων υλικών

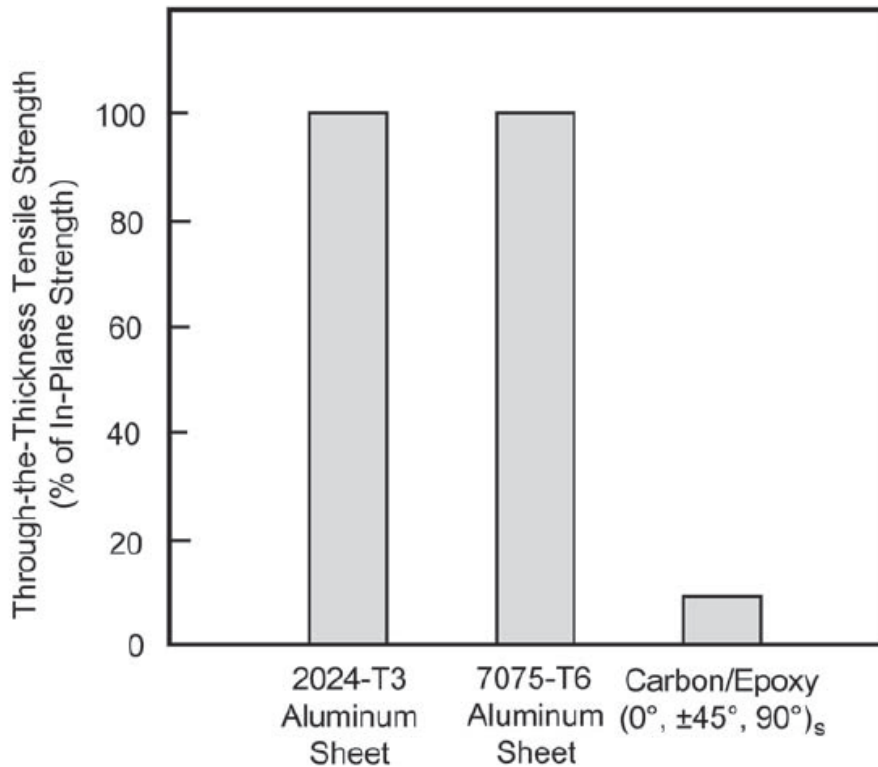
1.1.3 Σύνθετα υλικά – Μεταλλικά υλικά

Έχει ήδη αναφερθεί ότι τα φυσικά χαρακτηριστικά των σύνθετων υλικών και των μεταλλικών υλικών είναι ουσιαδώς διαφορετικά. Στον παρακάτω πίνακα συγκρίνονται ορισμένες ιδιότητες των δύο αυτών κατηγοριών υλικών.

Condition	Comparative behavior relative to metals
Load-strain relationship	More linear strain to failure
Notch sensitivity	
Static	Greater sensitivity
Fatigue	Less sensitivity
Transverse properties	Weaker
Mechanical property variability	Higher
Fatigue strength	Higher
Sensitivity to hydrothermal environment	Greater
Sensitivity to corrosion	Much less
Damage growth mechanism	In-plane delamination instead of through thickness cracks

Εξαιτίας του ότι τα σύνθετα υλικά είναι ανισοτροπικά, η δυσκαμψία τους είναι μεταβλητή καθ' ύψος και κατά διεύθυνση, ανάλογα με τον προσανατολισμό των ινών ενίσχυσης. Ιδιότητες οι οποίες δεν επωφελούνται από την ενίσχυση αυτή (όλα τα σύνθετα υλικά με μήτρα πολυμερούς), έχουν συγκριτικά με τα άλλα μικρότερη αντοχή

και δυσκαμψία – όπως για παράδειγμα η αντοχή σε εφελκυσμό στην εγκάρσια διεύθυνση όπου φορτίζεται η σχετικά αδύναμη μήτρα σε σχέση με τις υψηλής αντοχής ίνες. Στην παρακάτω εικόνα 1.1.3-1 φαίνεται η χαμηλή αντοχή κατά την εγκάρσια διεύθυνση μίας τυπικής σύνθετης μεμβράνης σε σχέση με το αλουμίνιο.

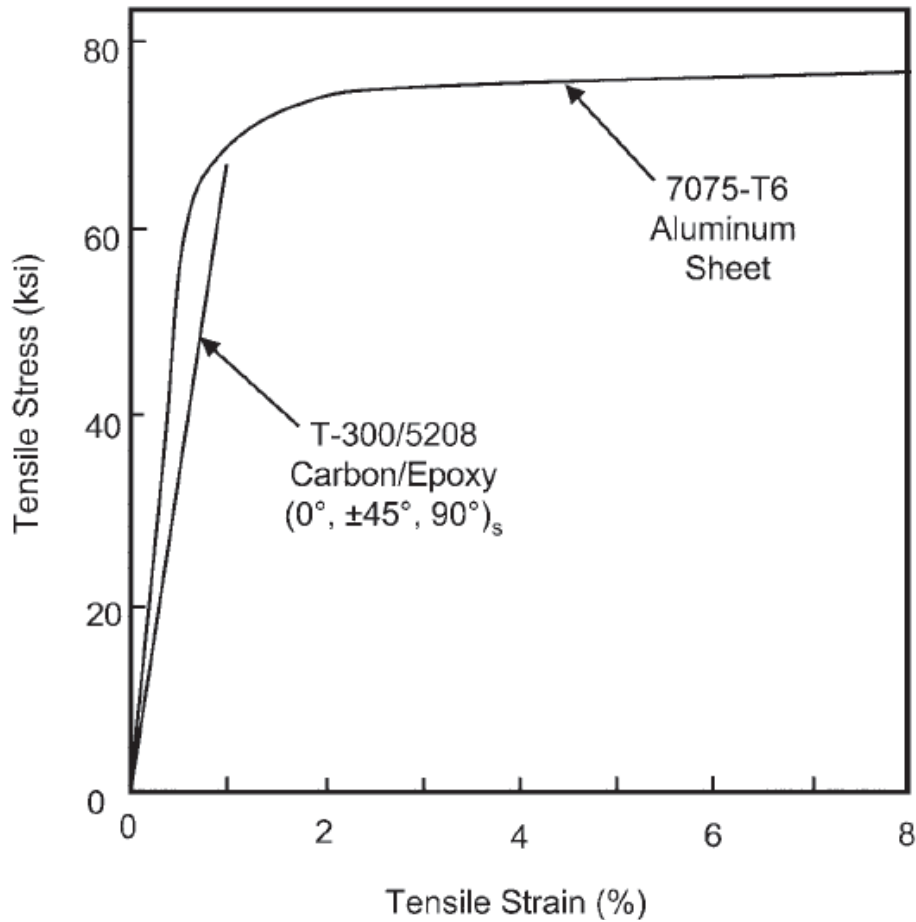


Εικόνα 1.1.3-1 Σύγκριση της αντοχής σε εφελκυσμό ενός σύνθετου υλικού με φύλλο κράματος αλουμινίου

Τα μέταλλα έχουν γενικά μεγάλη ολκιμότητα, συνεχίζοντας να επιμηκύνονται ή να συμπιέζονται σημαντικά όταν φτάνουν ένα συγκεκριμένο φορτίο, χωρίς να θραύονται. Υπάρχουν δύο σημαντικά πλεονεκτήματα στην ολκιμότητα αυτή:

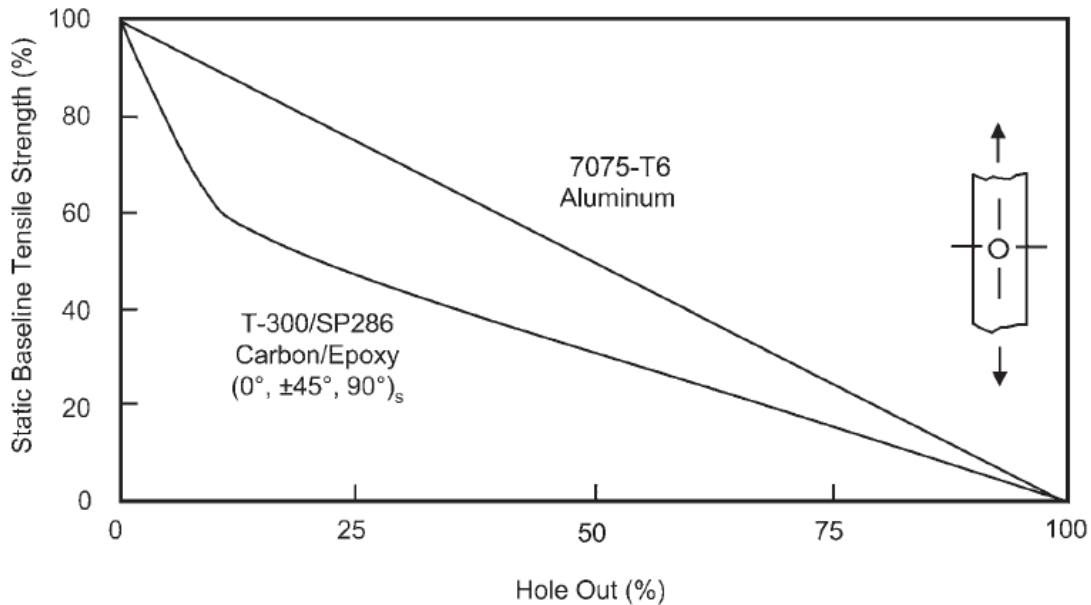
- Παροχή ανακούφισης των τοπικών φορτίσεων, διαμερίζοντας το επιπλέον φορτίο σε γειτονικά υλικά ή σε γειτονικές δομές. Παρόλ' αυτά τα όλκιμα μέταλλα έχουν μεγάλη ικανότητα παροχής ανακούφισης από τη συγκέντρωση τάσεων σε περίπτωση στατικής φόρτισης.
- Παροχή μεγάλης ικανότητας απορρόφησης ενέργειας – ορίζεται ως η περιοχή κάτω από την καμπύλη στο διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης.

Ως αποτέλεσμα, μία μεταλλική δομή κυρίως παραμορφώνεται αλλά δεν σπάει. Αντίθετα, τα σύνθετα υλικά είναι σχετικά ψαθυρά. Στην παρακάτω εικόνα συγκρίνεται η αντοχή σε εφελκυσμό δύο υλικών σε διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης.



Εικόνα 1.1.3-2 Σύγκριση των τυπικών καμπυλών τάσεων-παραμορφώσεων για ένα σύνθετο υλικό και ενός φύλλου αλουμινίου

Η ψαθυρότητα του σύνθετου υλικού αντικατοπτρίζεται στη μειωμένη ικανότητά του να αντέχει μία ενδεχόμενη συγκέντρωση τάσεων, όπως φαίνεται και στην επόμενη εικόνα.



Εικόνα 1.1.3-3 Σε σύγκριση με το φύλλο κράματος αλουμινίου, ένα σύνθετο υλικό έχει χαμηλή ανοχή της συγκέντρωσης τάσης λόγω του εύθραστου του χαρακτήρα

Γενικά, το χαρακτηριστικό των ψαθυρών σύνθετων υλικών είναι η μειωμένη ικανότητά τους να αντιστέκονται σε φθορές χωρίς εκτεταμένη εσωτερική διαρροή στη μήτρα.

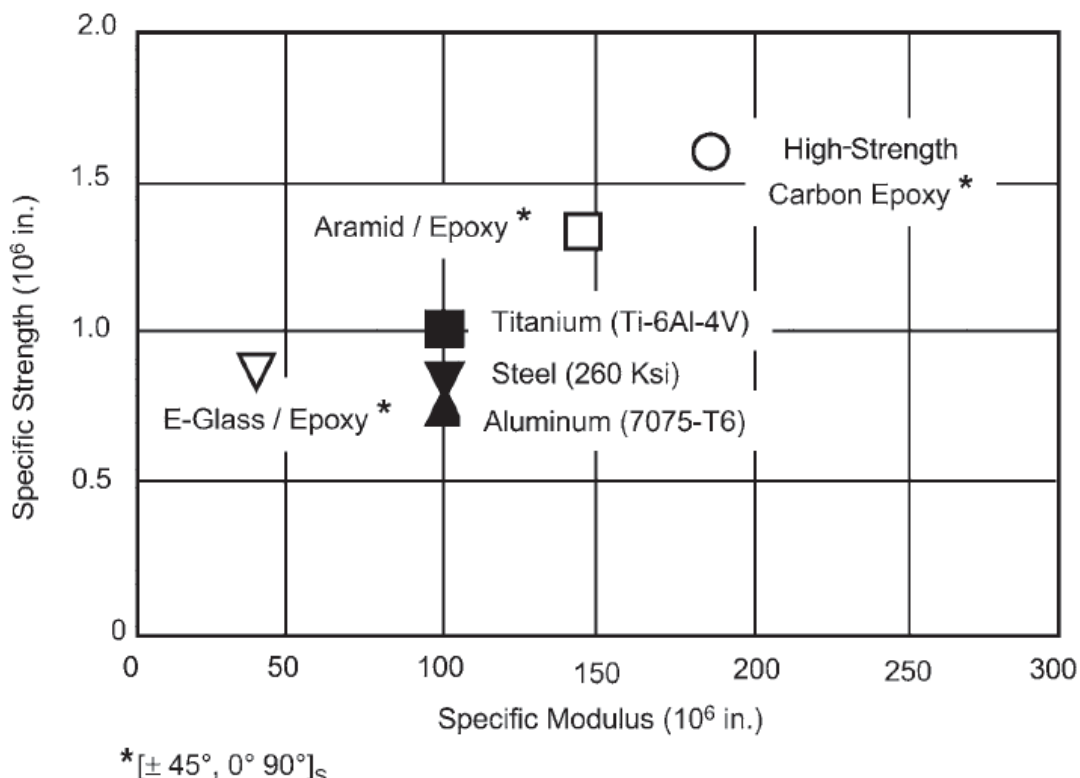
Η απόκριση των φθαρμένων σύνθετων υλικών σε κυκλική φόρτιση είναι επίσης σημαντικά διαφορετική από αυτή των μετάλλων. Η αντοχή των σύνθετων υλικών σε κυκλική φόρτιση είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή των μετάλλων, σε σύγκριση με τη χαμηλή τους αντοχή σε στατική φόρτιση όταν έχουν φθορές ή ελαττώματα. Επίσης, η αντοχή σε κόπωση των σύνθετων υλικών είναι πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με τη στατική ή την εναπομένουσα αντοχή. Οι απαιτήσεις σε στατική ή σε εναπομένουσα αντοχή είναι τυπικά πολύ μεγαλύτερες από την απίτηση αντοχής σε κόπωση. Παρόλ' αυτά, δεδομένου ότι το κατώτατο όριο αντοχής σε κόπωση των σύνθετων υλικών είναι ένα σχετικά υψηλό ποσοστό της στατικής τους αντοχής, χαρακτηρίζονται στην πράξη ως μη κρίσιμα όσον αφορά στην κόπωση. Αντίθετα, σε μεταλλικές δομές, η κόπωση αποτελεί ένα σημαντικό σχεδιαστικό παράγοντα.

1.1.4 Πλεονεκτήματα – μειονεκτήματα σύνθετων υλικών

Τα πλεονεκτήματα των σύνθετων υλικών είναι πολλά, συμπεριλαμβανομένων των:

- Μικρότερο βάρος
- Βελτίωση της αντοχής και της δυσκαμψίας τους
- Βελτιωμένη ζωή κόπωσης
- Αντίσταση σε φθορά
- Μειωμένο κόστος λόγω μείωσης των επιμέρους μερών

Η ειδική αντοχή³ και το ειδικό μέτρο ελαστικότητας⁴ των ινών υψηλής αντοχής – κυρίως του άνθρακα – είναι υψηλότερα από τα αντίστοιχα άλλων συγκρίσιμων μεταλλικών κραμάτων που χρησιμοποιούνται στην αεροναυπηγική – βλ. Εικόνα 1.1.4-1.

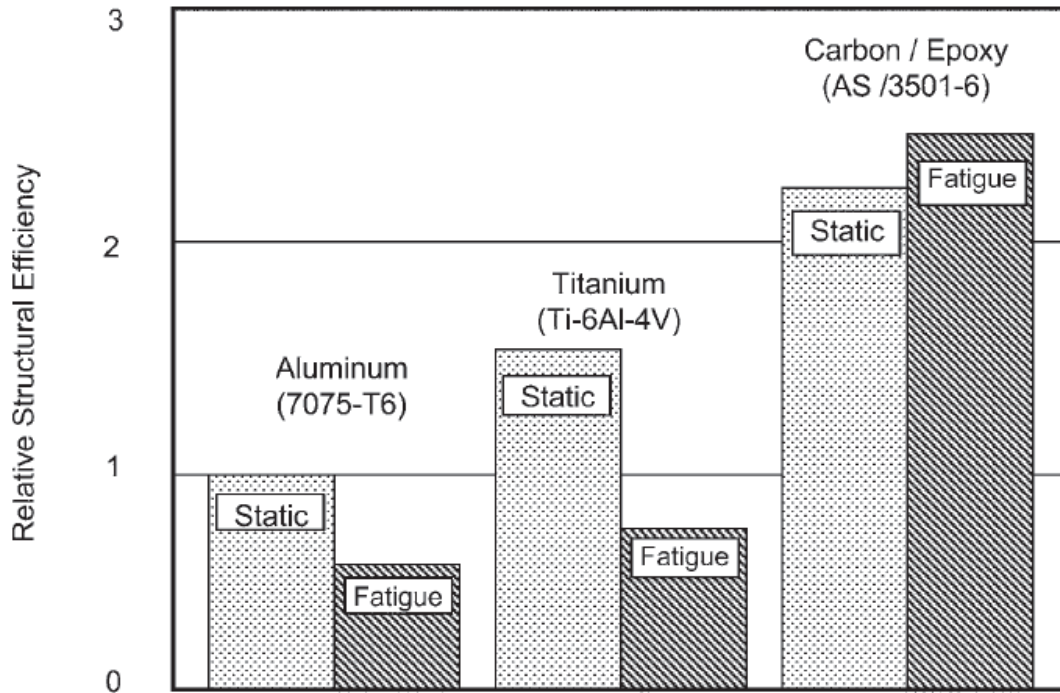


Εικόνα 1.1.4-1 Σύγκριση της ειδικής αντοχής ή του μέτρου υψηλής αντοχής σύνθετων υλικών και ορισμένων κραμάτων αεροναυπηγικής

Αυτό μεταφράζεται σε μείωση του βάρους, μεγαλύτερο ωφέλιμο φορτίο, μεγαλύτερο εύρος, καθώς και εξοικονόμηση καυσίμου. Στην παρακάτω εικόνα συγκρίνεται η δομική αποτελεσματικότητα τριών υλικών.

³ Ορίζεται ως ο λόγος της αντοχής προς την πυκνότητα.

⁴ Ορίζεται ως ο λόγος του μέτρου ελαστικότητας προς την πυκνότητα.



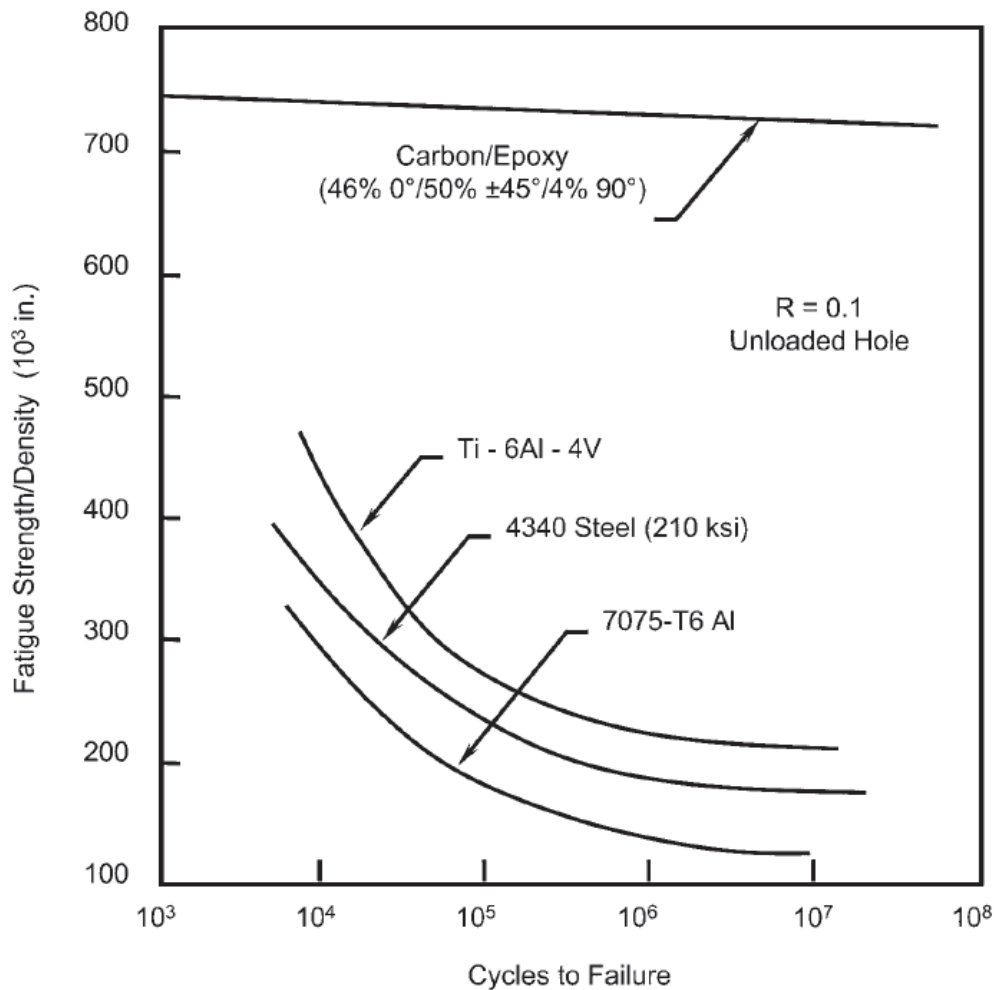
Εικόνα 1.1.4-2 Σύγκριση δομικής αποτελεσματικότητας τριών υλικών

Ο επικεφαλής μηχανικός του τομέα αεροναυπηγικής του Αμερικανικού Στρατού έχει δηλώσει: “Μου αρέσουν τα σύνθετα υλικά γιατί δεν διαβρώνονται και δεν κουράζονται⁵”. Η φθορά των κραμάτων αλουμινίου αποτελεί εισάγει ένα σημαντικό παράγοντα κόστους και ένα συνεχές ζήτημα συντήρησης τόσο για τα εμπορικά όσο και για τα στρατιωτικά αεροσκάφη. Η αντοχή σε φθορά των σύνθετων υλικών μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα αυξημένη εξοικονόμηση χρημάτων. Τα σύνθετα υλικά με ίνες άνθρακα προκαλούν γαλβανική διάβρωση⁶ του αλουμινίου, σε περίπτωση που οι ίνες τοποθετηθούν σε άμεση επαφή με τη μεταλλική επιφάνεια. Το πρόβλημα αυτό μπορεί εύκολα να επιλυθεί με συγκόλληση μίας μεμβράνης από ίνες γυαλιού – ηλεκτρικά μονωμένης – σε όλες τις διεπιφάνειες του αλουμινίου.

Στην επόμενη εικόνα (1.1.4-3) συγκρίνεται η αντοχή σε κόπωση των σύνθετων υλικών και των μετάλλων υψηλής αντοχής.

⁵ ‘I like composites because they don’t rot [corrode] and they don’t get tired [fatigue]’.

⁶ Πρόκειται για μία ηλεκτροχημική διεργασία κατά την οποία, όταν δύο μέταλλα βρίσκονται σε ηλεκτρική επαφή και εισάγονται σε έναν ηλεκτρολύτη, διαβρώνεται μόνο το ένα μέταλλο.



Εικόνα 1.1.4-3 Ιδιότητες κόπωσης των αεροδιαστημικών υλικών

Δεδομένων συγκεκριμένων και εύλογων τιθέντων ορίων παραμόρφωσης κατά τη σχεδίαση, η κόπωση των ινών άνθρακα δεν θα πρέπει να αποτελεί πρόβλημα.

Το κόστος συναρμολόγησης υπολογίζεται περίπου στο 50% του κόστους της ατράκτου.

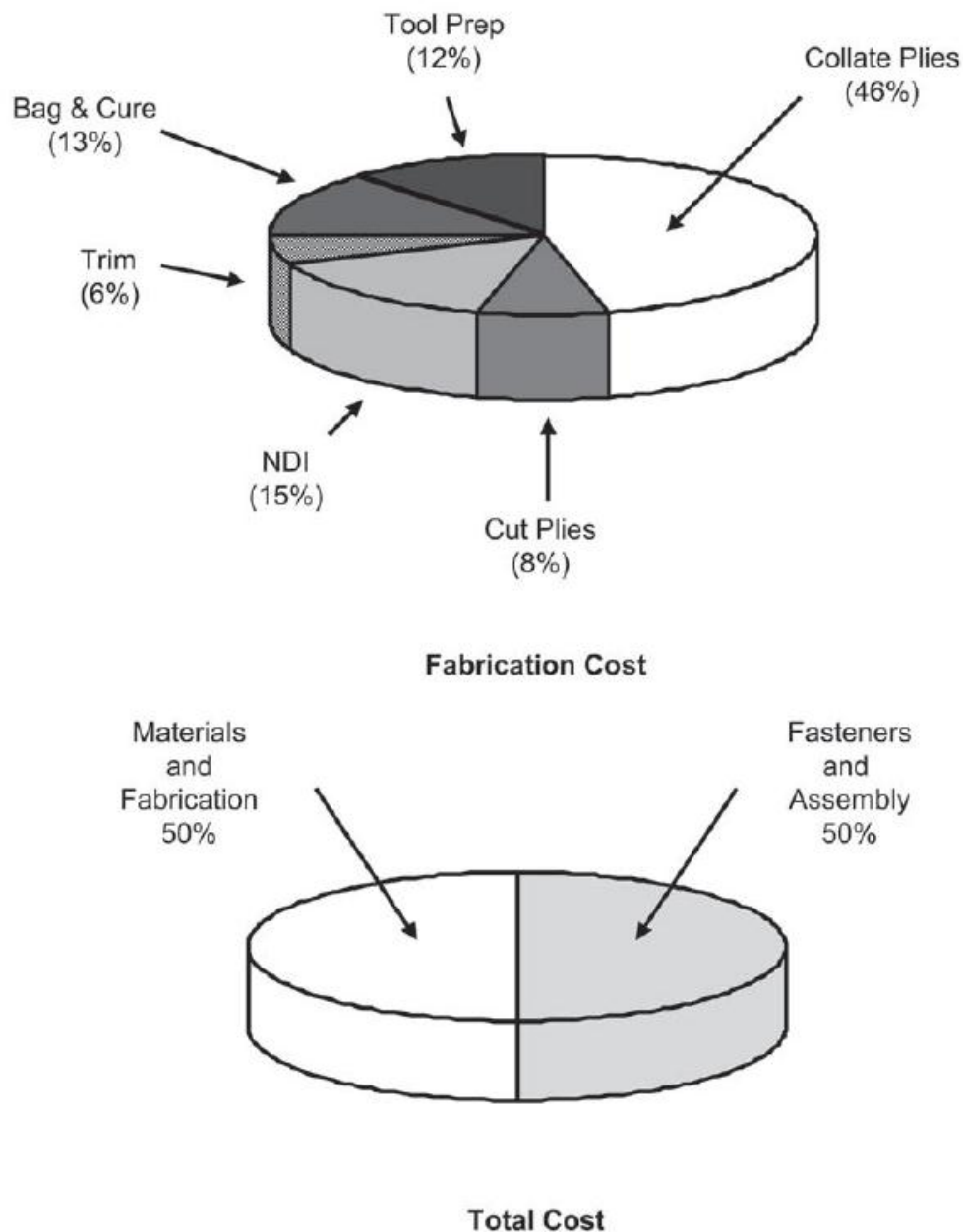
Τα σύνθετα υλικά παρέχουν τη δυνατότητα μείωσης των εργασιών συναρμολόγησης καθώς και του αριθμού των απαιτούμενων συνδετικών παρελκομένων.

Τα μειονετήματα των σύνθετων υλικών συνοψίζονται παρακάτω:

- Υψηλό κόστος πρώτων υλών
- Υψηλό κόστος κατασκευής και συναρμολόγησης
- Δυσμενείς επιπτώσεις θερμοκρασίας και υγρασίας
- Αδυναμία σε διευθύνσεις εκτός επιπέδου, όπου η μήτρα φέρει το κύριο φορτίο
- Ευαισθησία σε καταπονήσεις από κρούση και αποκόλληση στρώσεων
- Μεγαλύτερη δυσκολία επισκευής σε σχέση με τις μεταλλικές δομές.

Το μεγαλύτερο κόστος στην κατασκευή ενός τεμαχίου σύνθετου υλικού είναι το κόστος διαστρωμάτησης των στρώσεων. Το κόστος αυτό μπορεί να φθάσει το 40 με 60% του

κόστους κατασκευής, ανάλογα με την πολυπλοκότητα του τεμαχίου, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα (1.1.4-4).



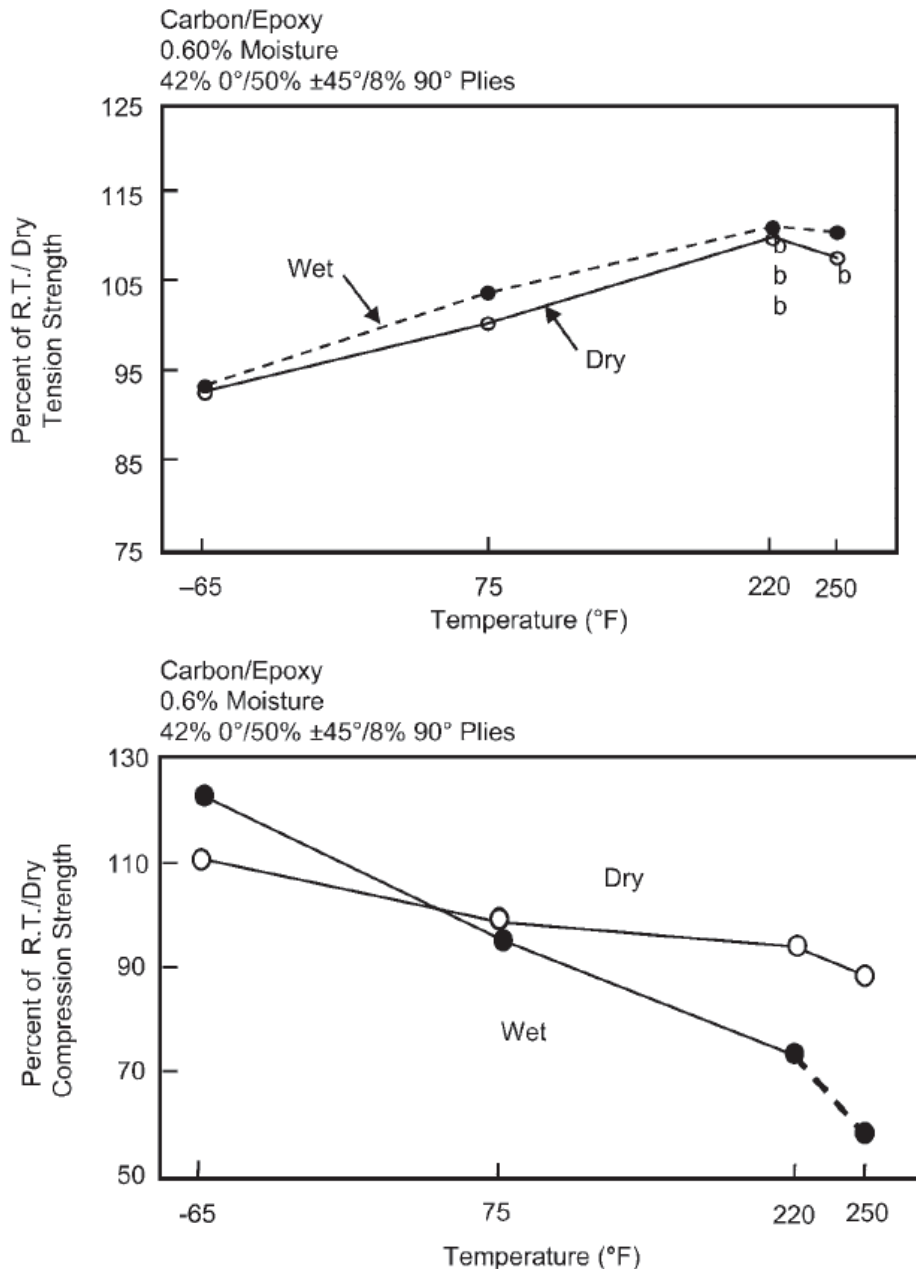
Εικόνα 1.1.4-4 Παράγοντες κόστους για σύνθετα lay-up. NDI, επιθεώρηση Nondestructive

Για λόγους πληρότητας θα τονίσουμε την υπεροχή των σύνθετων υλικών έναντι άλλων μετάλλων όσον αφορά στην ικανότητα μείωσης του κόστους συναρμολόγησης και των απαιτούμενων συνδέσμων.

Η θερμοκρασία είναι ένα μέγεθος το οποίο μπορεί να επηρεάσει τις μηχανικές ιδιότητες του σύνθετου υλικού. Γενικά, με την αύξηση της θερμοκρασίας, οι μηχανικές ιδιότητες που καθορίζονται από τη μήτρα μειώνονται. Από την άλλη μεριά, οι μηχανικές ιδιότητες που καθορίζονται από τις ίνες επηρεάζονται από ψυχρές θερμοκρασίες, αλλά η επίδραση

δεν είναι τόσο έντονη όσο η αντίστοιχη των ιδιοτήτων που καθορίζονται από τη μήτρα όταν αυτή εκτεθεί σε υψηλές θερμοκρασίες. Οι παράμετροι σχεδίασης για σύνθετο υλικό άνθρακα – εποξειδικό (carbon/epoxy) είναι, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα (1.1.4-5):

- Ψυχρός – ξηρός εφελκυσμός (cold – dry tension)
- Θερμή – υγρή συμπίεση (hot – wet compression)

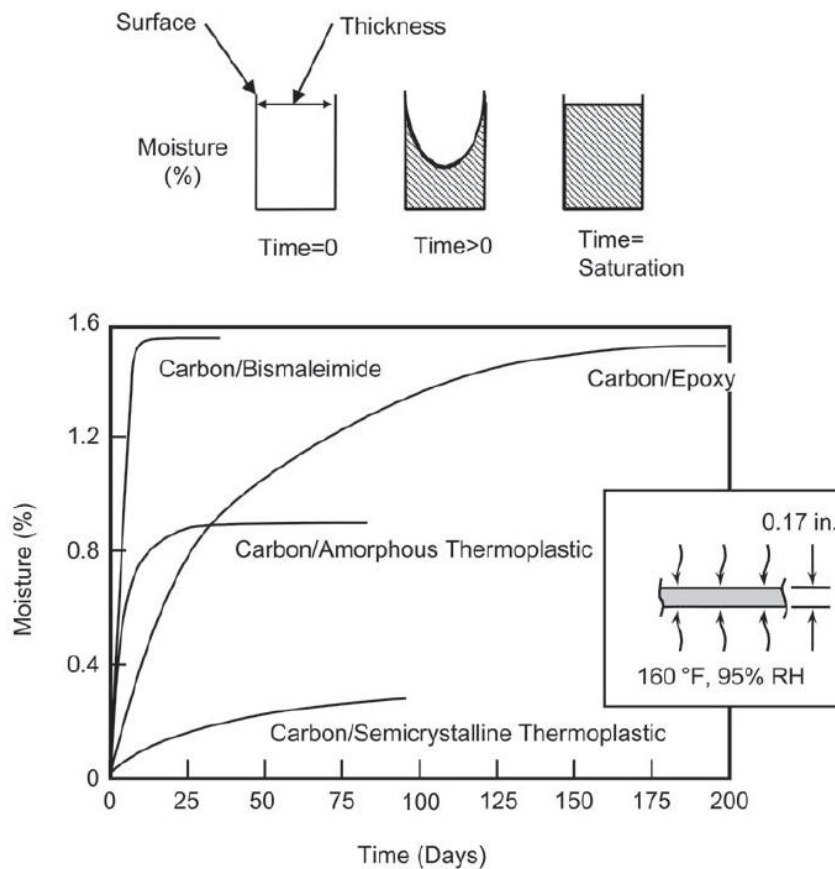


Εικόνα 1.1.4-5 Επίδραση της θερμοκρασίας και της υγρασίας στην αντοχή του άνθρακα / εποξειδικών. R.T., θερμοκρασία δωματίου

Ένας σημαντικός παράγοντας σχεδιασμού στην επιλογή ρητίνης για τη μήτρα όσον αφορά σε εφαρμογές όπου εφαρμόζονται υψηλές θερμοκρασίες είναι η θερμοκρασία

μετάβασης σε γυαλί T_g – glass transition temperature. Η θερμοκρασία αυτή ενός πολυμερούς υλικού είναι η θερμοκρασία στην οποία το υλικό μετατρέπεται από άκαμπτο, υαλώδες στερεό σε ένα πιο μαλακό, ημιάκαμπτο υλικό. Έτσι, τίθεται ένα άνω όριο στη θερμοκρασία για το σύνθετο υλικό, καθώς και για το υλικό κόλλησης. Το όριο αυτό ορίζει τη θερμοκρασία πάνω από την οποία το υλικό θα έχει αρκετά μειωμένες μηχανικές ιδιότητες. Τα περισσότερα πολυμερή απορροφούν θερμοκρασία, η οποία ‘συμπιέζει’ τη θερμοκρασία T_g , η πραγματική θερμοκρασία – θερμοκρασία στην οποία βάλλεται το υλικό – θα πρέπει να είναι περίπου 50°F (30°C) χαμηλότερη από τη θερμοκρασία κορεσμού.

Το ποσό της απορροφούμενης υγρασίας εξαρτάται από υλικό της μήτρας και από τη σχετική υγρασία.



Εικόνα 1.1.4-6 Η απορρόφηση της υγρασίας για τα σύνθετα πολυμερικής μήτρας. RH, σχετική υγρασία

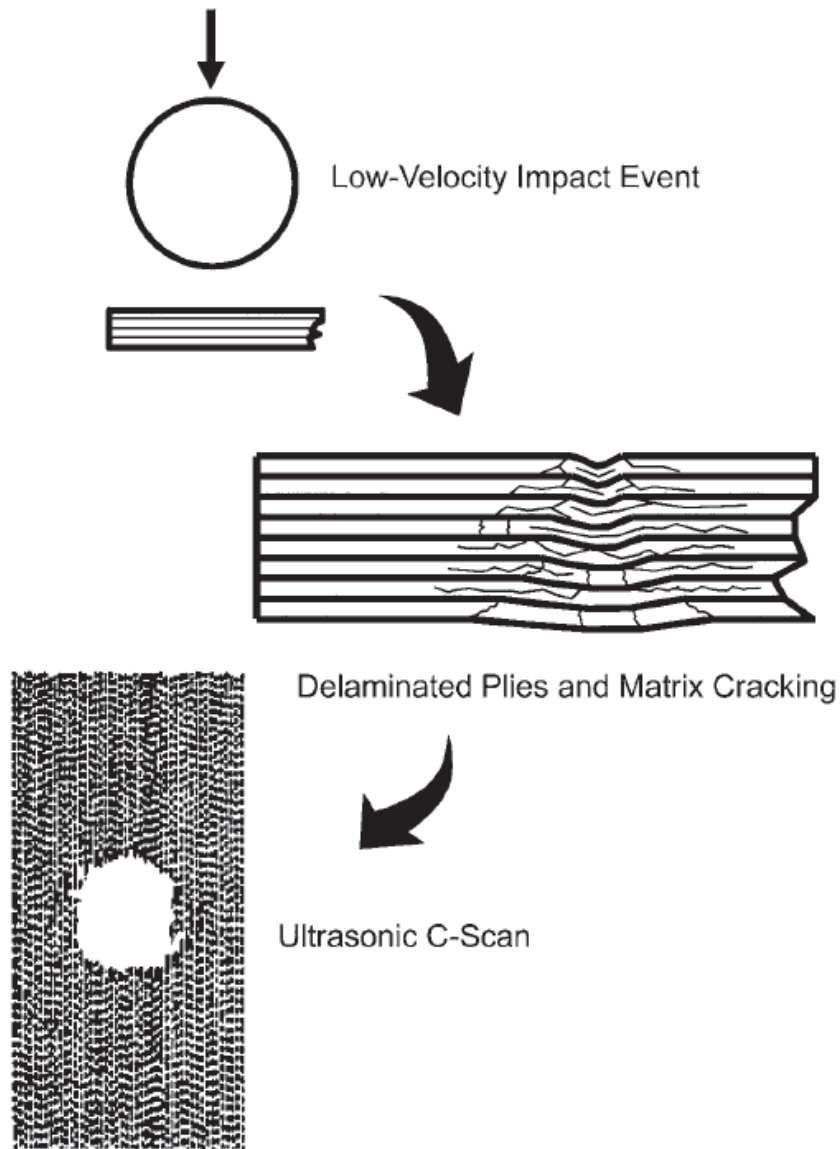
Γενικά, οι υψηλές θερμοκρασίες αυξάνουν το ρυθμό απορρόφησης της υγρασίας. Η απορροφούμενη υγρασία μειώνει τις μηχανικές ιδιότητες της μήτρας και προκαλεί διόγκωση της μήτρας, η οποία την ανακουφίζει από εσωτερικές θερμικές τάσεις λόγω των υψηλών θερμοκρασιών ωρίμανσης. Οι τάσεις αυτές μπορεί να είναι αρκετά μεγάλες, ενώ τα μεγάλα πλαίσια που είναι πακτωμένα στις άκρες μπορεί να υποβληθούν σε λυγισμό λόγω των τάσεων διόγκωσης. Κατά τη διάρκεια των κύκλων ψύξης – απόψυξης

(freeze – thaw cycles), η απορροφούμενη υγρασία εξαπλώνεται κατά την ψύξη, γεγονός το οποίο μπορεί:

1. Να οδηγήσει στη δημιουργία ρωγμών στη μήτρα
2. Να οδηγήσει στη δημιουργία ατμού κατά τις επικείμενες υπερακοντίσεις της θερμοκρασίας – thermal spikes. Όταν η πίεση του ατμού ξεπεράσει την αντοχή σε εφελκυσμό – κατά το επίπεδο του σύνθετου υλικού – του υλικού, η διαστρωμάτωση θα αρχίσει να υπόκειται σε διαστρωματική αποκόλληση – delamination.

Τα σύνθετα υλικά είναι ευαίσθητα στη διαστρωματική αποκόλληση τόσο κατά τη διαδικασία παραγωγής και συναρμολόγησης, όσο και εν λειτουργία.

- Κατά την παραγωγή, εξωτερικά υλικά όπως τα προ-εμποτίσματα του χαρτιού υποστήριξης είναι πιθανό να παραμείνουν στη διαστρωμάτωση από απροσεξία.
- Κατά τη συναρμολόγηση, τυχών λάθος χειρισμός ή εσφαλμένα τοποθετημένοι σύνδεσμοι μπορεί να προκαλέσουν διαστρωματική αποκόλληση.
- Εν λειτουργία, καταπονήσεις από πρόσκρουση εργαλείων με χαμηλή ταχύτητα, είναι δυνατό να προκαλέσουν ζημιά. Παρόλο που εν πρώτοις η ζημιά μπορεί να εμφανιστεί σαν ένα σημάδι στην επιφάνεια, μπορεί να προχωρήσει στο εσωτερικό των διαστρωματώσεων, δημιουργώντας, έτσι, ένα σύνθετο δίκτυο ρωγμών και αποκολλήσεων (βλ. Εικόνα 1.1.4-7).



Εικόνα 1.1.4-7 Αποκολλήσεις στρώσεων και ρηγμάτωση της μήτρας στην πολυμερική μήτρα που οφείλεται σε βλάβη

Ανάλογα με το μέγεθος της αποκόλλησης, είναι δυνατό να μειωθεί η στατική αντοχή, καθώς και η αντοχή σε κόπωση, ή ακόμη και την αντοχή σε λυγισμό. Αντίθετα, αν είναι μεγάλη, μπορεί να αυξηθεί περαιτέρω κάτω από μία πιθανή φόρτιση κόπωσης.

Γενικά, η ανοχή στις ενδεχόμενες καταπονήσεις είναι μία ιδιότητα της ρητίνης. Η επιλογή μίας σκληρής ρητίνης μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την αντίδραση σε καταπόνηση σε μία πρόσκρουση.

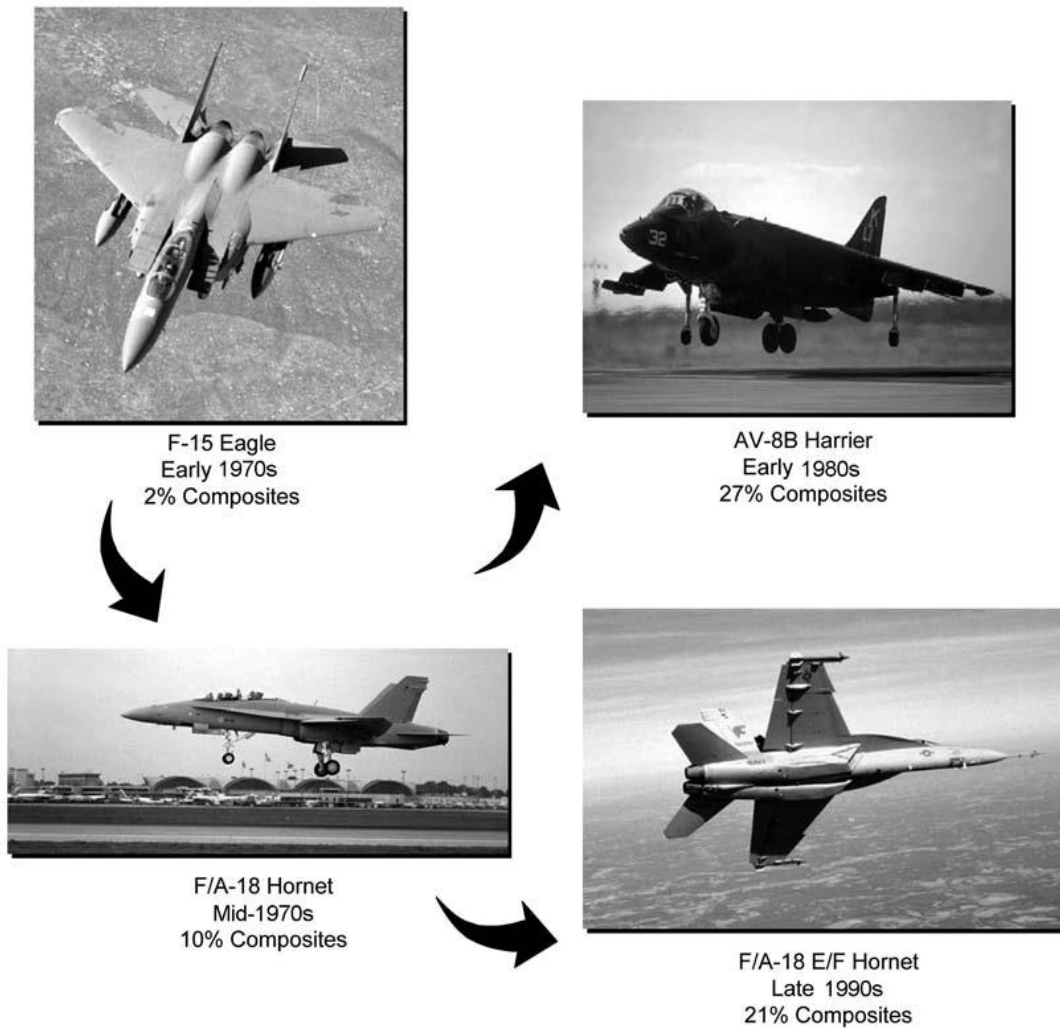
Επιπροσθέτως, το γυαλί S-2⁷ και οι ίνες αραμιδίου είναι εξαιρετικά σκληρές και ανεκτικές στις καταπονήσεις. Κατά τη διαδικασία της σχεδίασης, είναι σημαντικό να αναγνωρίζεται και να λαμβάνεται υπόψη η πιθανότητα διαστρωματικής αποκόλλησης, καθώς επίσης να υιοθετείται ένα συντηρητικό σχέδιο τάσεων, ώστε μία ενδεχόμενη ζημιά να μπορεί εύκολα να επισκευαστεί.

1.1.5 Εφαρμογές.

Τα σύνθετα υλικά βρίσκουν εφαρμογή σε ευρύ φάσμα, όπως στην αεροναυπηγική, στις μεταφορές, στις κατασκευές, στην ναυτιλία, στον αθλητισμό και πιο πρόσφατα στα έργα υποδομών. Γενικά τα πιο αποδοτικά αλλά και πιο ακριβά σύνθετα υλικά από συνεχείς ίνες άνθρακα, χρησιμοποιούνται εκεί όπου χρειάζεται μεγάλη αντοχή και σκληρότητα και ταυτόχρονα μικρό βάρος και τα πιο οικονομικά σύνθετα υλικά από ίνες υάλου, χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπου οι απαιτήσεις σε βάρος δεν είναι σημαντικές. Στα μαχητικά αεροσκάφη, που το μικρό βάρος παίζει σημαντικό ρόλο στην απόδοσή του, τα σύνθετα υλικά αντιστοιχούν συνήθως στο 20 με 40 τοις εκατό του συνολικού τους βάρους (Εικόνα 1.1.5-1)

⁷ Οι ίνες από γυαλί S-2 έχουν τις παρακάτω ιδιότητες:

Fiber type	Tensile strength (Mpa)	Compressive strength (Mpa)	Density (g/cm ³)	Thermal expansion (μm/m C)	Softening T (C)	Price (\$/kg)
S-2 glass	4890	1600	2.46	2.9	1056	~20



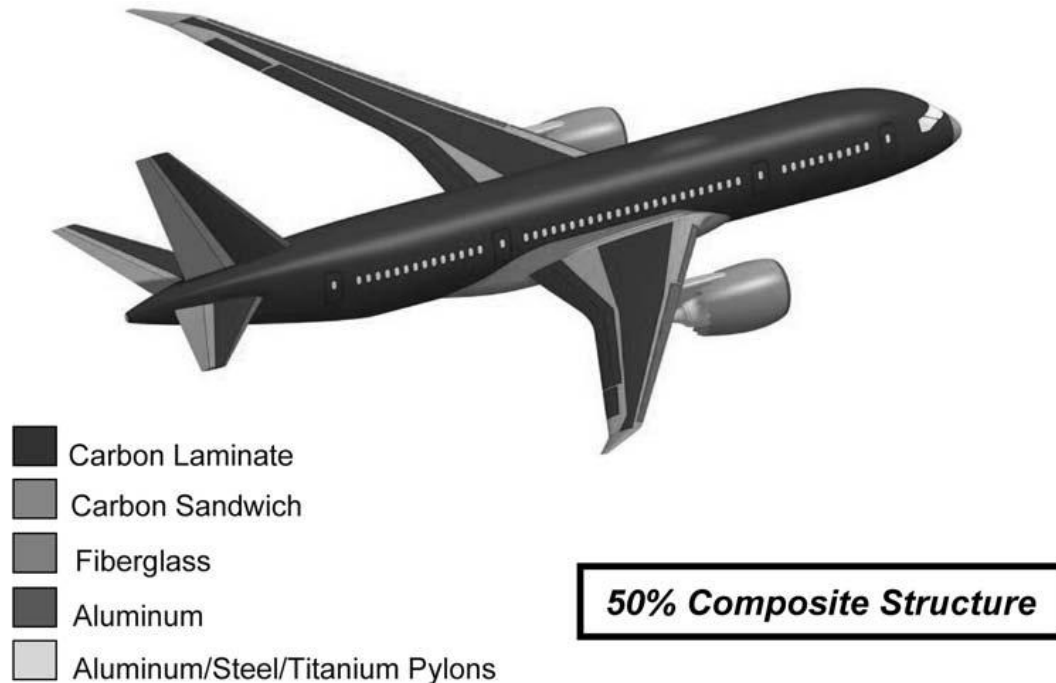
Εικόνα 1.1.5-1. Τυπικές εφαρμογές σε μαχητικά αεροσκάφη. Πηγή Εταιρία Boeing.

Για δεκαετίες, τα ελικόπτερα έχουν ενσωματώσει την τεχνολογία των σύνθετων υλικών από ίνες υάλου στις έλικες για βελτιωμένη αντίσταση στην κόπωση και τα τελευταία χρόνια οι σκελετοί των ελικοπτέρων αποτελούνται κατά ένα μεγάλο μέρος από ανθρακονήματα.

Η εφαρμογή των σύνθετων υλικών στην πολεμική βιομηχανία που ήταν η πρώτη που χρησιμοποίησε υψηλής απόδοσης σύνθετα υλικά από συνεχείς ίνες άνθρακα, οδήγησε στην ανάπτυξη αυτής της τεχνολογίας και τώρα αυτή η τεχνολογία χρησιμοποιείται σε κάθε είδους βιομηχανία. Τόσο τα μικρά όσο και τα μεγάλα πολιτικά αεροσκάφη βασίζονται στην τεχνολογία των σύνθετων υλικών για να μειώσουν το βάρος τους ώστε να υπάρχει καλύτερη απόδοση στα καύσιμα, με πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα το Boeing 787 (Εικόνα 1.1.5-2) όπου τα ανθρακονήματα στον σκελετό του αποτελούν το 50 τοις εκατό των συνολικών υλικών. Όλα τα μελλοντικά αεροσκάφη της Airbus και της Boeing θα αποτελούνται από ένα μεγάλο ποσοστό από υψηλής απόδοσης σύνθετα υλικά με συνεχείς ίνες άνθρακα.

Τα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται επίσης σε όλα τα οχήματα και σε δορυφόρους όπου η αντοχή και η σκληρότητα παίζουν σημαντικό ρόλο.

Η εξοικονόμηση βάρους λόγω χρησιμοποίησης των σύνθετων υλικών στη αεροναυπηγική γενικά κυμαίνεται από 15 ως 25 τοις εκατό.

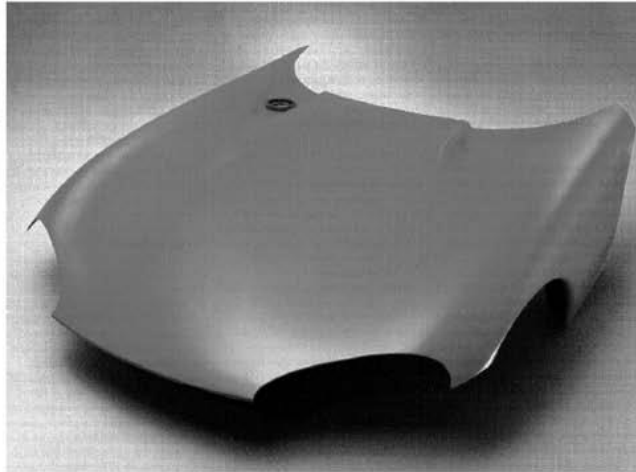


Εικόνα 1.1.5-2 Boeing 787. Πηγή Εταιρία Boeing.

Οι μεγάλες αυτοκινητοβιομηχανίες στρέφονται συνεχώς στα σύνθετα υλικά για να επιτύχουν τις επιθυμητές επιδόσεις και να εξοικονομήσουν καύσιμα. (Εικόνα 1.1.5-3) Το κόστος είναι ένας σημαντικός παράγοντας για τα εμπορικές μεταφορές, με τα σύνθετα υλικά να προσφέρουν χαμηλό βάρος που συνεπάγεται σε εξοικονόμηση καυσίμου άρα και κόστους, και λιγότερα κόστη συντήρησης. Στη Formula 1, αντίθετα, όπου το κόστος δεν είναι και τόσο σημαντικός παράγοντας, το μεγαλύτερο μέρος του σκελετού, συμπεριλαμβανομένου του καλύμματος του κινητήρα, είναι κατασκευασμένο από ανθρακονήματα.



Composites are used in both trucks and cars to reduce weight and increase fuel efficiency.



Recreational vehicles have long used fiberglass composites, mostly for its durability and weight savings over metal.



Εικόνα 1.1.5-3 Εφαρμογές στην αυτοκινητοβιομηχανία

Η διάβρωση είναι ένας μεγάλος πονοκέφαλος για την βιομηχανία κάθε είδους σκαφών. Τα σύνθετα υλικά, βοηθούν ώστε να περιοριστεί αυτό το πρόβλημα, κυρίως γιατί δεν διαβρώνονται όπως τα μέταλλα ή πολύ περισσότερο το ξύλο. Όλα τα είδη σκαφών, από μικρές αλιευτικές βάρκες ως μεγάλα πολυτελή σκάφη, χρησιμοποιούν ίνες υάλου και πολυεστέρες. Τα κατάρτια συνήθως κατασκευάζονται από ανθρακονήματα. (Εικόνα 1.1.5-4)



Rigid and flexible oil
gas tubulars



Maintenance and corrosion in either fresh or salt water can be major headaches and expenses. Composites help minimize those problems.



More recently, composites are being used for major components in naval ships.



Racing sailboat hulls and equipment

Εικόνα 1.1.5-4 Εφαρμογές στην ναυτιλία.

Η χρήση των σύνθετων υλικών για τη βελτίωση των υποδομών των δρόμων και των γεφυρών, είναι μια σχετικά νέα εφαρμογή. Πολλοί δρόμοι και γέφυρες ανά τον κόσμο έχουν διαβρωθεί σε μεγάλο βαθμό με αποτέλεσμα να χρειάζονται συνεχείς επισκευές ή ακόμα και αντικατάσταση. Στις Ηνωμένες Πολιτείες μόνο, υπολογίζεται ότι περισσότερες από 250.000 κατασκευές, όπως κάποιες γέφυρες, χρειάζονται επισκευή ή

αντικατάσταση. Τα σύνθετα υλικά προσφέρουν πολύ μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, με λιγότερη συντήρηση λόγω της αντοχής τους στην διάβρωση.



Many of the world's roads and bridges are badly corroded and in need of constant maintenance or replacement.

Composites offer much longer life with less maintenance due to their corrosion resistance.



Repair, upgrading, and retrofit of bridges, buildings, and parking decks

Εικόνα 1.1.5-5 Εφαρμογή στις υποδομές.

Η Αιολική ενέργεια είναι μία από τις ταχύτερα αναπτυσσόμενες πηγές ενέργειας. Τα πτερύγια σε για μεγάλες ανεμογεννήτριες είναι φυσιολογικά φτιαγμένα από σύνθετα υλικά για να βελτιώσουν την απόδοση στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτά τα πτερύγια μπορεί να έχουν μήκος μέχρι και 37 μέτρα και βάρος πάνω από 5.200 κιλά. Το 2007, περίπου 50.000 πτερύγια παραδόθηκαν για 17.000 ανεμογεννήτριες



Composites are being used for wind turbine blades to improve energy generation efficiency and reduce corrosion problems.

Εικόνα 1.1.5-6 Εφαρμογή στις ανεμογεννήτριες.

Τα σύνθετα υλικά, βρίσκουν εκτεταμένη εφαρμογή και στον αθλητισμό. Οι επαγγελματικές ρακέτες αντισφαίρισης, κατασκευάζονται από σύνθετα υλικά εδώ και αρκετά χρόνια, όπως και πολλά μπαστούνια του γκολφ. Επίσης πολλές ιστιοσανίδες είναι κατασκευασμένες από σύνθετα υλικά, για να αντέχουν στην διάβρωση, να είναι

ελαφρύτερες και ανθεκτικότερες. Ένα άλλο παράδειγμα για την χρήση σύνθετων υλικών στον αθλητισμό είναι οι σανίδες του snowboard για να επιτευχθεί μεγαλύτερη σκληρότητα.



Composites improve the performance of sports equipment.

Εικόνα 1.1.5-7 Εφαρμογές στον αθλητικό εξοπλισμό.

1.2 Ίνες άνθρακα

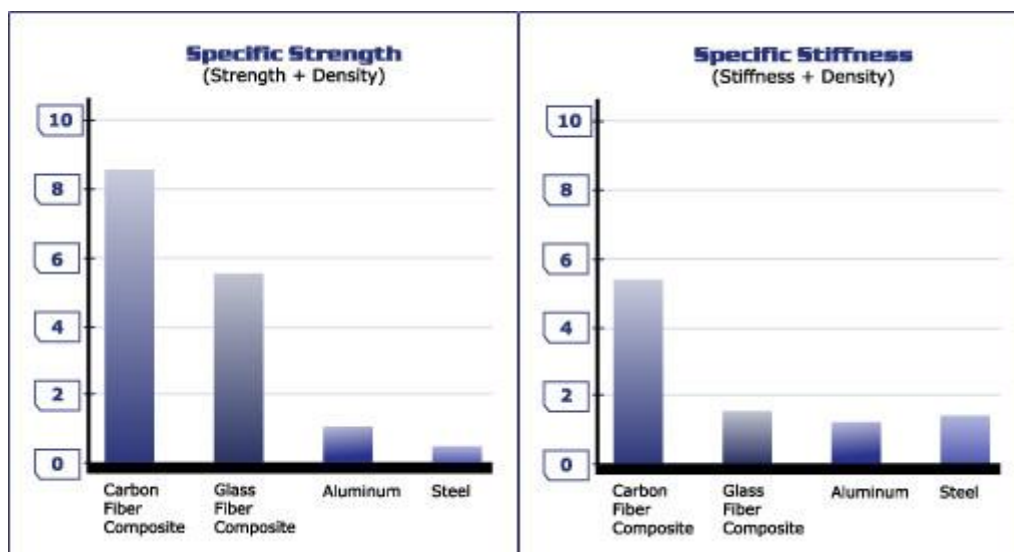
1.2.1 Τι είναι οι ίνες άνθρακα

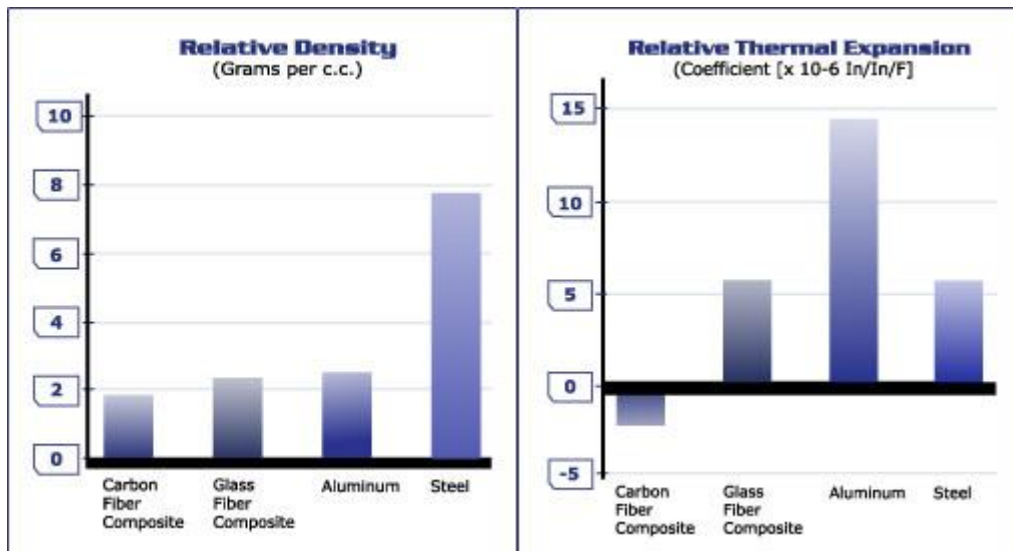
Μία ίνα άνθρακα είναι μία μακριά, λεπτή τρίχα υλικού διαμέτρου περίπου 0.0002-0.0004 in (0.005-0.010mm), που αποτελείται κυρίως από άτομα άνθρακα. Τα άτομα άνθρακα ενώνονται μεταξύ τους με δεσμούς και σχηματίζουν μικροσκοπικούς κρυστάλλους, οι οποίοι είναι ευθυγραμμισμένοι παράλληλα προς τον κύριο άξονα της ίνας – κατά μήκος της. Η ευθυγράμμιση αυτή προσδίδει στην ίνα εξαιρετική αντοχή σε σχέση με το μέγεθός της. Αρκετές χιλιάδες ίνες άνθρακα στρίβουν σε μία πλεξούδα και μαζί σχηματίζουν ένα νήμα, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί αυτούσιο, ή να υφανθεί σε ένα ύφασμα. Τα νήματα ή τα υφάσματα αυτά συνδυάζονται με εποξειδικά ή τοποθετούνται σε εκμαγεία προκειμένου να σχηματίσουν συγκεκριμένα σύνθετα υλικά. Τα σύνθετα υλικά από ίνες άνθρακα χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπου απαιτείται μικρό βάρος και υψηλή αντοχή, μερικές από τις οποίες είναι:

- Εξαρτήματα αεροσκαφών και διαστημόπλοιων
- Κυρίως σώμα – σασί – αγωνιστικών αυτοκινήτων
- Μπαστούνια του γκολφ
- Σκελετός ποδηλάτων
- Καλάμια ψαρέματος
- Ελατήρια αυτοκινήτων
- Κατάρτια ιστιοφόρων

Οι ίνες άνθρακα κατηγοριοποιούνται σύμφωνα με το μέτρο ελαστικότητάς τους. Οι ίνες με χαμηλό μέτρο ελαστικότητας, έχουν μέτρο ελαστικότητας χαμηλότερο των 240 GPa. Άλλες κατηγοριοποιήσεις περιλαμβάνουν ίνες άνθρακα που χαρακτηρίζονται από κανονικό μέτρο ελαστικότητας, από ενδιάμεσο, από υψηλό και από πολύ υψηλό. Οι τελευταίες χαρακτηρίζονται από μέτρο ελαστικότητας που κυμαίνεται από 500 – 1000 GPa. Για λόγους πληρότητας αναφέρουμε ενδεικτικά ότι το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα είναι περίπου 200 GPa. Έτσι, οι σκληρότερες ίνες άνθρακα είναι 10 φορές σκληρότερες από το χάλυβα και 8 φορές σκληρότερες από το αλουμίνιο, καθώς και ελαφρύτερες και από τα δύο προαναφερθέντα υλικά (5 και 1,5 φορά αντίστοιχα). Επιπροσθέτως, οι ιδιότητές τους όσον αφορά στην κόπωση είναι ανώτερες όλων των γνωστών μεταλλικών δομών, ενώ είναι από τα πιο ανθεκτικά υλικά σε φθορά όταν συνδυάζονται με κατάλληλες ρητίνες.

Παρακάτω παρουσιάζουμε συγκριτικούς πίνακες με τα χαρακτηριστικά 4 υλικών: των ινών άνθρακα, των ινών γυαλιού, του αλουμινίου και του χάλυβα.





1.2.2 Πως κατασκευάζονται οι ίνες άνθρακα

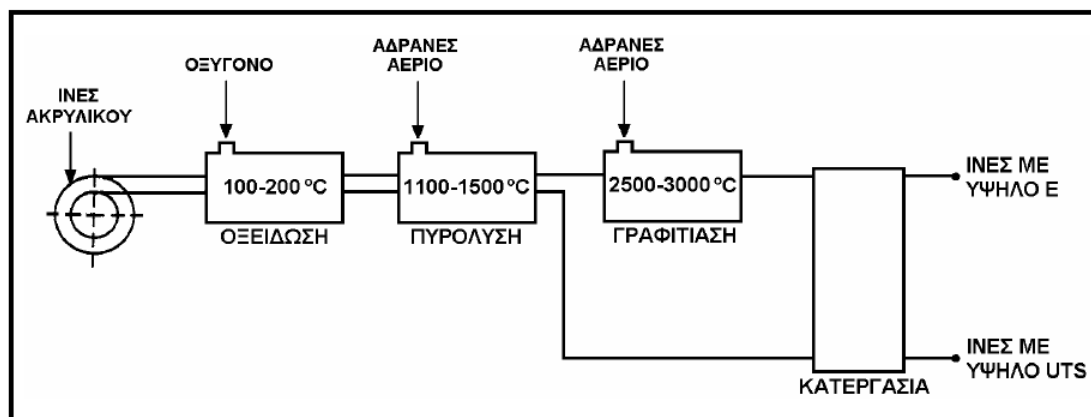
Η πρώτη ύλη που χρησιμοποιείται για να κατασκευαστούν οι ίνες άνθρακα ονομάζεται πρόδρομο⁸ πολυμερές. Περίπου το 90% της παραγωγής των ινών άνθρακα χρησιμοποιούν ως πρώτη ύλη το polyacrylonitrile (PAN). Το υπόλοιπο 10% της παραγωγής κατασκευάζονται από ίνες τεχνητής μέταξας (rayon) ή πίσσα (pitch). Όλα αυτά τα υλικά είναι οργανικά πολυμερή, που χαρακτηρίζονται από μακριές σειρές μορίων που συνδέονται μαζί με άτομα άνθρακα. Η ακριβής σύνθεση του κάθε προδρόμου διαφέρει από εταιρία σε εταιρία και γενικά θεωρείται εμπορικό μυστικό.

Κατά τη διάρκεια της παραγωγής, μια ποικιλία από αέρια και υγρά χρησιμοποιούνται. Κάποια από αυτά τα υλικά είναι σχεδιασμένα να αντιδρούν με τις ίνες άνθρακα και να επιτυγχάνουν συγκεκριμένα αποτελέσματα. Άλλα υλικά είναι σχεδιασμένα ώστε να μην αντιδρούν ή να αποτρέπουν κάποιες αντιδράσεις με τις ίνες άνθρακα. Όπως και με τους προδρόμους, η σύνθεση πολλών υλικών από αυτών είναι εμπορικό μυστικό.

Η διαδικασία παραγωγής των ινών άνθρακα είναι εν μέρει χημική και εν μέρει μηχανολογική. Ο πρόδρομος, σχεδιάζεται σε μακριές αλυσίδες ή ίνες και ύστερα θερμαίνεται σε πολύ μεγάλη θερμοκρασία χωρίς να έρχεται σε επαφή με το οξυγόνο. Χωρίς το οξυγόνο η ίνα δεν μπορεί να καεί. Η υψηλή θερμοκρασία έχει σαν αποτέλεσμα τα άτομα στην ίνα να κινούνται με περισσότερη ταχύτητα βιαιώς, έως ότου όλα τα άτομα που δεν είναι άνθρακας να αποβάλλονται. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται ανθρακοποίηση (carbonization).

⁸ Στη χημεία, ένας πρόδρομος είναι μια ένωση που συμμετέχει στην χημική αντίδραση που παράγει μια άλλη ένωση. Όταν αναφερόμαστε στις ίνες άνθρακα το πρόδρομο υλικό είναι ένα υφαντουργικό προϊόν από το οποίο κατασκευάζονται τα ανθρακονήματα. Ένα τέτοιο προϊόν είναι το πολυακρυλονιτρίλιο (PAN)

Παρακάτω είναι μια τυπική διαδικασία παραγωγής ινών άνθρακα από πολυακρυλονιτρίλιο (PAN).



Εικόνα 1.2.2-1 Παραγωγή ενισχυτικών ινών άνθρακα

- Οξείδωση των ινών PAN στον αέρα και σε χαμηλή θερμοκρασία ($100-200^{\circ}\text{C}$), με ταυτόχρονη εφαρμογή τάσης, η οποία είναι απαραίτητη για την ευθυγράμμιση των αλυσίδων του πολυμερούς.
- Πυρόλυση, υπό τάση, σε ουδέτερη ή αναγωγική ατμόσφαιρα και σε θερμοκρασία $1100-1500^{\circ}\text{C}$. Οι παραγόμενες ίνες στο στάδιο αυτό χαρακτηρίζονται ως ίνες άνθρακα υψηλής αντοχής και η αντοχή τους φτάνει τα 3000 MPa.
- Η θέρμανση σε ουδέτερη ή αναγωγική ατμόσφαιρα συνεχίζεται σε υψηλές θερμοκρασίες ($2500-3000^{\circ}\text{C}$), οπότε πραγματοποιείται γραφίτιωση, με ταυτόχρονη ανακρυστάλλωση, που οδηγεί σε ισχυρό προσανατολισμό των κρυσταλλιτών. Οι παραγόμενες ίνες σε αυτό το στάδιο χαρακτηρίζονται ως ίνες άνθρακα υψηλού μέτρου ελαστικότητας και έχουν μέτρο ελαστικότητας περίπου 400GPa, η δε διάμετρος τους είναι περίπου 10 μm .

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά ινών άνθρακα που έχουν παραχθεί σε δύο στάδια (οξείδωση και πυρόλυση) και σε τρία στάδια (οξείδωση, πυρόλυση, θέρμανση σε υψηλή θερμοκρασία αντίστοιχα).

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΙΝΕΣ ΥΨΗΛΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ	ΙΝΕΣ ΥΨΗΛΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ
Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	180-230	350-420
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	2500-3400	1900-2300
% περιεκτικότητα άνθρακα	95-98	99
Πυκνότητα (g/cm ³)	1,8	1,9
Μέγιστη θερμοκρασία γρήσης (°C)	2000	2500

Εικόνα 1.2.2-2 Χαρακτηριστικές ιδιότητες ινών άνθρακα

1.2.3 Ιστορική αναδρομή

Οι ίνες άνθρακα υπάρχουν από το 1879. Ο Τόμας Έντισον χρησιμοποιούσε ίνες άνθρακα ως νήματα για τους πρώτους λαμπτήρες. Παρόλα αυτά, αυτές οι ίνες υστερούσαν κατά πολύ της αντοχής των ινών άνθρακα που γνωρίζουμε σήμερα. Οι ίνες άνθρακα που χρησιμοποιούσε ο Έντισον ήταν κατασκευασμένες από υλικά βασισμένα στην κυτταρίνη όπως το βαμβάκι και το μπαμπού, σε αντίθεση με τα σημερινά που χρησιμοποιούν σαν πρώτη ύλη υλικά με βάση το πετρέλαιο. Η ανθρακοποίηση επιτυγχάνονταν με το ψήσιμο του μπαμπού σε υψηλή θερμοκρασία και σε ελεγχόμενη ατμόσφαιρα. Αυτή η μέθοδος, γνωστή ως πυρόλυση χρησιμοποιείται μέχρι και σήμερα.

Το 1958, ο Δρ Ρότζερ Μπέικον δημιούργησε υψηλής απόδοσης ίνες άνθρακα στο Τεχνικό Κέντρο Union Carbide Parma (τώρα GrafTech International Holdings Inc), που βρίσκεται έξω από το Κλήβελαντ, στο Οχάιο. Οι ίνες αυτές κατασκευάζονταν με θέρμανση rayon μέχρι να ανθρακοποιηθούν. Η διαδικασία αυτή αποδείχθηκε αναποτελεσματική, διότι προέκυπταν ίνες που περιείχαν μόνο 20% άνθρακα και είχαν χαμηλή αντοχή και σκληρότητα. Στις αρχές της δεκαετίας του 1960, αναπτύχθηκε μια διαδικασία από τον Dr. Akio Shindo στο Εθνικό Ινστιτούτο Βιομηχανικής Επιστήμης και Τεχνολογίας της Ιαπωνίας, που χρησιμοποιούσε πολυακρυλονιτρίλιο (PAN) ως πρώτη ύλη. Από το υλικό αυτό είχε παραχθεί μια ίνα άνθρακα που περιέχει περίπου 55% άνθρακα και είχε πολύ καλύτερες ιδιότητες.

Το υψηλό δυναμικό αντοχής των ινών άνθρακα έγινε αντιληπτό το 1963 σε μια διαδικασία που αναπτύχθηκε από την Ίδρυμα Βασιλικής Αεροπορίας (Royal Aircraft Establishment) στο Farnborough, Hampshire της Βρετανίας. Η διαδικασία είχε κατοχυρωθεί με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας από το Υπουργείο Άμυνας του Ηνωμένου Βασιλείου και στη συνέχεια είχε παραχωρηθεί με άδεια από την εταιρία Εθνικής Αναπτυξιακής Έρευνας του Ηνωμένου Βασιλείου (The National Research Development Corporation) σε τρεις βρετανικές εταιρείες: Rolls-Royce, (που ήδη κατασκεύαζε ανθρακονήματα), στη Morganite και στη Courtaulds. Αυτές οι εταιρίες

ήταν σε θέση να πραγματοποιήσουν βιομηχανική παραγωγή ινών άνθρακα μέσα σε λίγα χρόνια, και η Rolls-Royce εκμεταλλεύτηκε τις ιδιότητες του νέου υλικού για την διείσδυσή της στην αμερικανική αγορά με τον RB-211 αεροπορικό κινητήρα.

Ακόμη και τότε, όμως, υπήρξε δημόσια ανησυχία για την ικανότητα της βρετανικής βιομηχανίας να κάνει το καλύτερο δυνατό με αυτό το υλικό. Το 1969 η Βουλή των Κοινοτήτων στο Ηνωμένο Βασίλειο σύστησε μια εξεταστική επιτροπή για τις ίνες άνθρακα με προφητικό ερώτημα: 'Πως η χώρα θα αποκομίσει τα μέγιστα οφέλη χωρίς ακόμα μια ανακάλυψη να εκμεταλευθεί πιο επιτυχημένα στο εξωτερικό'. Τελικά αυτή η ανησυχία δικαιώθηκε. Ένας προς ένας οι κάτοχοι αδειών αποχώρησαν από την παραγωγή ινών άνθρακα. Το ενδιαφέρον της Rolls-Royce ήταν για σύγχρονους αεροπορικούς κινητήρες. Η Rolls-Royce ξεκινά λοιπόν δική της διαδικασία παραγωγής για να μπορέσει να ηγηθεί στη χρήση των ινών άνθρακα. Η εγχώρια παραγωγή θα σταματούσε όταν ένα αξιόπιστο εμπορικό προϊόν θα γινόταν διαθέσιμο. Η Rolls-Royce χρησιμοποίησε βεβαιωμένα τις ίνες άνθρακα στα πτερύγια συμπίεστων των αεροπορικών κινητήρων με αποτέλεσμα να αποδειχθούν επιρρεπείς στις καταστροφές από προσκρούσεις πτηνών. Αυτό που στην αρχή φαινόταν ένας Βρετανικός τεχνολογικός θρίαμβος το 1968 γρήγορα έγινε μια καταστροφή καθώς ο αμφιλεγόμενος σχεδιασμός του αεροπορικού κινητήρα της Rolls-Royce ήταν σε κίνδυνο. Τελικά τα προβλήματα της Rolls-Royce μεγάλωσαν τόσο που η Βρετανική κυβέρνηση το 1971 και το εργοστάσιο για την παραγωγή ινών άνθρακα πωλήθηκε και δημιουργήθηκε η "Bristol Composites"

Δεδομένης της περιορισμένης αγοράς για ένα πολύ ακριβό προϊόν μεταβλητής ποιότητας, η εταιρία Morganite αποφάσισε επίσης ότι η παραγωγή ινών άνθρακα ήταν μικρής σημασίας σε βασικές δραστηριότητές, αφήνοντας την Courtaulds ως τη μόνη μεγάλη κατασκευάστρια εταιρία του Ηνωμένου Βασιλείου.

Η εταιρεία εξακολούθησε να παραγει ανθρακονήματα, με την ανάπτυξη της σε δύο κύριες αγορές: της αεροδιαστημικής και των αθλητικών ειδών. Η ταχύτητα της παραγωγής και η ποιότητα του προϊόντος ήταν βελτιωμένη.

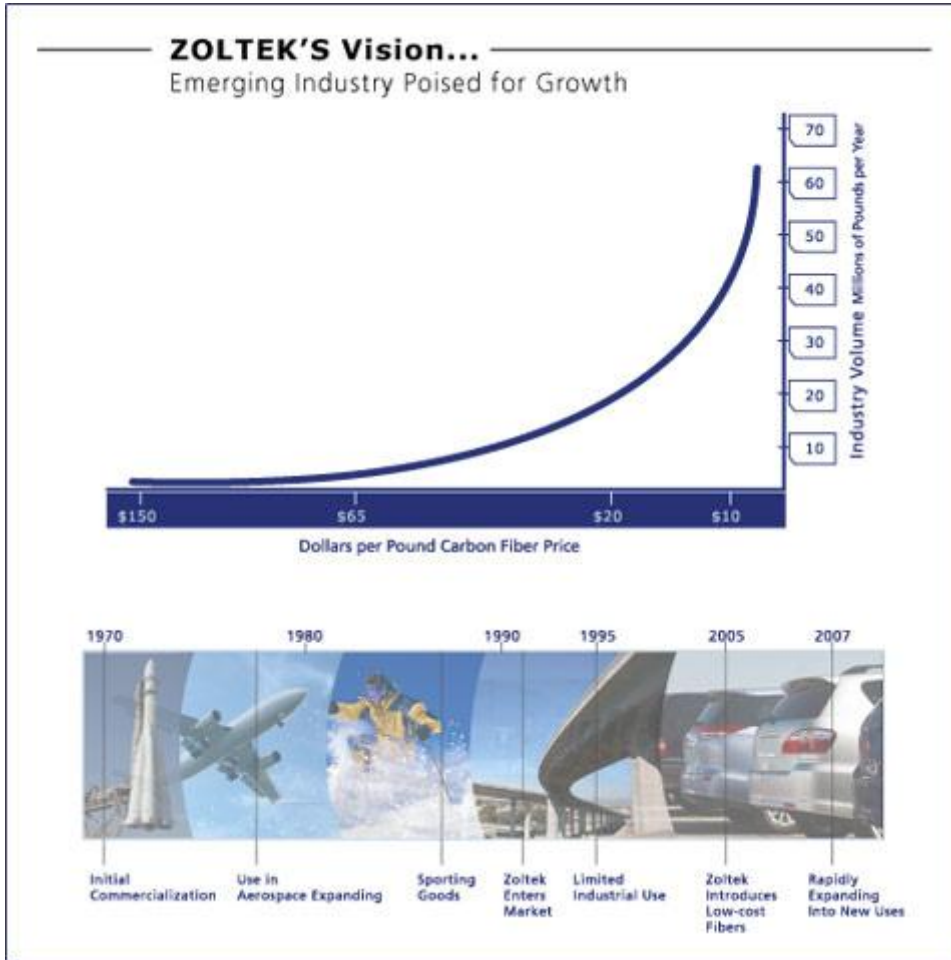
Συνεχίζοντας τη συνεργασία με το προσωπικό της εταιρίας Farnborough αποδείχθηκε χρήσιμη για την επιδίωξη υψηλότερης ποιότητας, αλλά, κατά ειρωνεία της τύχης, το μεγάλο πλεονέκτημα που είχε η Courtaulds ως κατασκευαστής του προδρόμου "Courtelle"(100% premium acrylic), τώρα έγινε μια αδυναμία. Το χαμηλό κόστος και η άμεση διαθεσιμότητα ήταν πιθανά πλεονεκτήματα, αλλά, η βασισμένη στο νερό ανόργανη διαδικασία παραγωγής του Courtelle το κατέστησε ευπαθές, σε αντίθεση με τις οργανικές διαδικασίες που χρησιμοποιούσαν άλλοι παραγωγή ινών άνθρακα.

Ωστόσο, κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1980 η Courtaulds συνέχισε να αποτελεί σημαντικό προμηθευτή ινών άνθρακα για τον αθλητισμό, με την Mitsubishi κύριο πελάτη της. Αλλά μια κίνηση για την επέκταση της εταιρίας, συμπεριλαμβανομένης της ανέγερσης παραγωγικής μονάδας στην Καλιφόρνια, αποδείχθηκε καταστροφική. Η επένδυση δεν παρήγαγε την αναμενόμενη απόδοση, κάτι το οποίο οδήγησε στην απόφαση να αποχωρήσει από την παραγωγή ινών άνθρακα. Η Courtaulds σταμάτησε την παραγωγή ινών άνθρακα, το 1991.

Από το 1970 γίνονταν έρευνες για την εύρεση εναλλακτικών πρώτων υλών, που οδήγησαν στην εισαγωγή στο εμπόριο των ινών άνθρακα, οι οποίοι προήλθαν από την πίσσα πετρελαίου κατά την επεξεργασία του. Οι ίνες αυτές περιείχαν περίπου 85% άνθρακα και παρουσίαζαν εξαιρετική αντοχή σε κάμψη. Δυστυχώς, είχαν περιορισμένη αντοχή σε θλίψη και δεν έγιναν ευρέως αποδεκτές.

Σήμερα, οι ίνες άνθρακα αποτελούν ένα σημαντικό μέρος πολλών προϊόντων, ενώ νέες εφαρμογές αναπτύσσονται κάθε χρόνο. Οι ΗΠΑ, η Ιαπωνία και η Δυτική Ευρώπη είναι οι κύριοι παραγωγοί ινών άνθρακα.

Παρακάτω φαίνεται ένα διάγραμμα στο οποίο αποτυπώνεται η πρόοδος των ινών άνθρακα ανά δεκαετία.



1.2.4 Το μέλλον

Το μέλλον των ινών άνθρακα φαίνεται να είναι ανθηρό, με πολλές δυνατότητες σε διάφορες βιομηχανίες. Ανάμεσα σε αυτές αναφέρουμε:

- Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας – ανεμογεννήτριες, κυψέλες καυσίμου.
- Αποδοτικά αυτοκίνητα με μειωμένο καύσιμο – σήμερα χρησιμοποιείται σε μικρής κλίμακας παραγωγή.
- Κατασκευές και Υποδομές – ελαφρύ σκυρόδεμα, προστασία από σεισμούς. Ένα παράδειγμα φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.
- Εξόρυξη πετρελαίου – εξέδρες γεώτρησης, σωλήνες, τρυπάνια.

Γέφυρες από γυαλί και πλαστικό

Οι γέφυρες του μέλλοντος θα χτίζονται από πλαστικό ενισχυμένο με ίνες γυαλιού και άνθρακα, λύση εφικτή χάρη στη νέα τεχνολογία

Γέμιση με αμμοχάλικο
Σύνθετο υλικό επίστρωσης

Οι άκρες των σωλήνων μπαίνουν στο σκυρόδεμα

Σωλήνας
Πυρήνας από σκυρόδεμα

Τόξα από ίνες γυαλιού και άνθρακα

Τσιμεντένια βάση

Πλαϊνός τοίχος

Σειρά από σωλήνες

Τα τόξα της γέφυρας περιέχουν σωλήνες από ίνες γυαλιού και άνθρακα στο εξωτερικό τους μέρος και σκυρόδεμα στο εσωτερικό. Η οροφή της γέφυρας καλύπτεται από τσιμέντο, χώμα, αμμοχάλικο και άσφαλτο

Φάσεις κατασκευής

Έγχυση ρητίνης
Συμπίεστος αέρας

Οροφή
Βάση

Γέμιση από σκυρόδεμα

Οι σωλήνες διογκώνονται, αποκτούν κυλινδρικό σχήμα και γεμίζονται με ρητίνη για να μη διπλώνουν

Οι κούφιοι κι ελαφριοί σωλήνες τοποθετούνται εύκολα χωρίς γεραμούς ή άλλο εξοπλισμό

Όταν μπουν στη θέση τους, οι σωλήνες γεμίζονται με τσιμέντο που διαστέλλεται ελαφρώς

Η οροφή της γέφυρας καλύπτεται από άλλα υλικά και το οδόστρωμα

ΠΗΓΗ: «The New York Times»

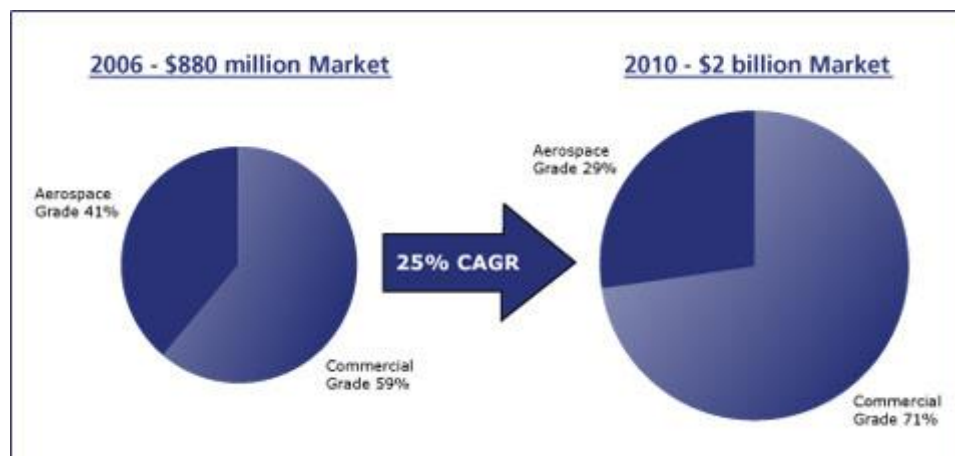
TA NEA

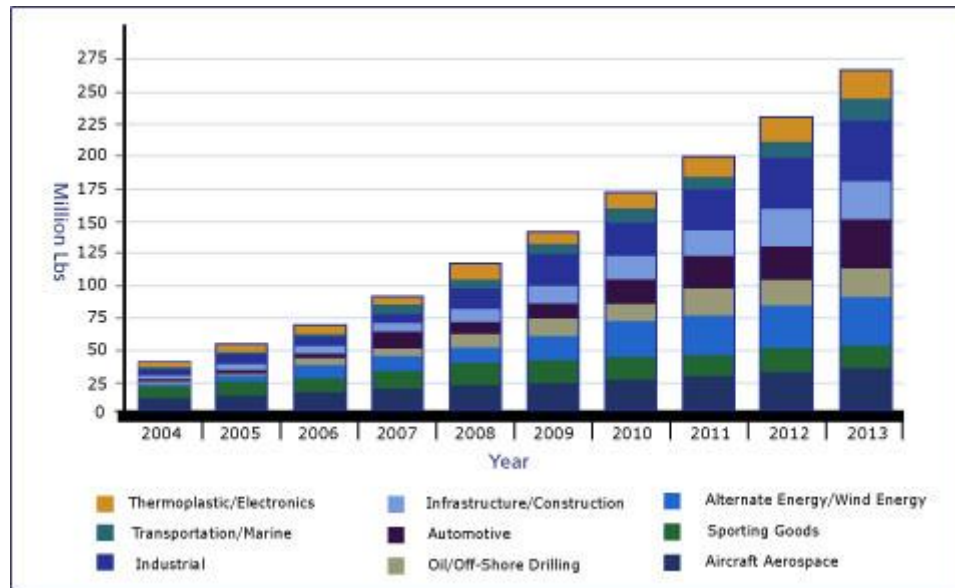
Προκειμένου να εκμεταλλευτούν πλήρως οι ιδιότητες των ινών άνθρακα και να εισαχθούν στους παραπάνω κλάδους της βιομηχανίας, οι κατασκευαστές των ινών άνθρακα θα πρέπει να κινηθούν ευνοϊκά προς την εμπορευματοποίηση τους. Οι ιδανικές συνθήκες που θα επέτρεπαν στη βιομηχανία των ινών άνθρακα να φθάσει στο έπακρο των δυνατοτήτων της θα επιτευχθούν αν οι κατασκευαστές άνθρακα:

1. Στοχεύσουν σε νέες εφαρμογές
2. Αναπτύξουν νέες και φθηνότερες τεχνολογίες
3. Επανεπενδύσουν τα κέρδη τους, έχοντας στο μυαλό μακροπρόθεσμους στόχους
4. Αναγνωρίσουν και εστιάσουν στη νοοτροπία της αγοράς
5. Κατανοήσουν πλήρως το κόστος του προμηθευτή και τη μελλοντική στρατηγική
6. Μειώσουν το κόστος
7. Συνεργαστούν ώστε οι αδύναμοι να βοηθήσουν τους δυνατότερους
8. Βοηθήσουν στην υποστήριξη και στην ανάπτυξη της αγοράς
9. Κατανοήσουν πως οι κύριοι ανταγωνιστές των ινών άνθρακα είναι άλλα υλικά και όχι άλλοι κατασκευαστές ινών άνθρακα.

Αν οι κατασκευαστές των ινών άνθρακα εστιάσουν στα παραπάνω, τα κέρδη – τόσο οικονομικά όσο και τεχνολογικά – θα είναι τεράστια.

Παρακάτω φαίνεται η ανάπτυξη της βιομηχανίας των ινών άνθρακα:





1.3 Η αξονική κατάρρευση λεπτότοιχων σωληνώσεων CFRP

1.3.1 Μέθοδοι κατάρρευσης σύνθετων υλικών

Η χρήση των ενισχυμένων σύνθετων υλικών με ίνες άνθρακα, λόγω των βελτιωμένων ιδιοτήτων, επιφέρει πολλά λειτουργικά και οικονομικά οφέλη. Η συμπεριφορά των σύνθετων υλικών σε κρούση (crashworthiness), μόνο πρόσφατα έχει ερευνηθεί και επομένως η αντοχή τους σε θλίψη αποτελεί ένα αντικείμενο περαιτέρω λεπτομερούς έρευνας.

Οι προηγούμενες έρευνες που σχετίζονται με την αξονική συμπίεση λεπτότοιχων σύνθετων δομών υπό μορφή κυλινδρικών, τετραγωνικών και ελλειπτικών σωλήνων, έδειξαν ότι η παραμόρφωση αυτών των σωλήνων είναι διαφορετική από παρόμοιες δομές κατασκευασμένες από συμβατικά υλικά.

Η εκτενής ανάπτυξη μικρορωγμών, στις δομές από σύνθετα υλικά, μπορεί να ελεγχθεί εύκολα ανάλογα με τις ιδιότητες των ινών και των ρητίνων, καθώς επίσης και με τον προσανατολισμό των ινών. Οι τρόποι κατάρρευσης συνεπώς εξαρτώνται από τη γεωμετρία, τα υλικά, και τις παραμέτρους του πειράματος.

Από την ευρεία πειραματική επεξεργασία των σύνθετων σωλήνων ενισχυμένων με ίνες, παρατηρήθηκαν οι ακόλουθοι κύριοι τρόποι αστοχίας κατά τη διάρκεια της αξονικής συμπίεσής τους:

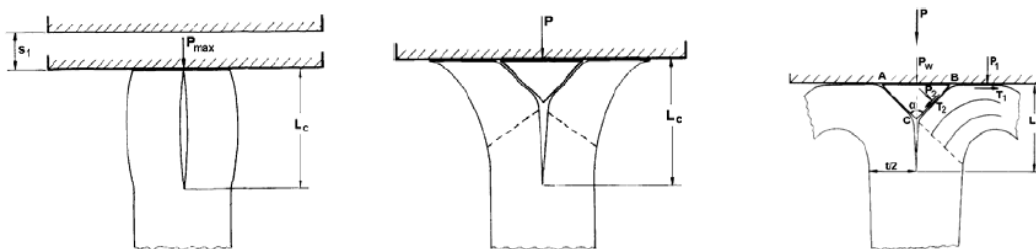
- Προοδευτική συντριβή με μικρορωγμές του σύνθετου υλικού που συνδέεται με μεγάλα ποσά ενέργειας σύνθλιψης (τρόπος 1).
- Ψαθυρό σπάσιμο της δομής με συνέπεια την καταστροφική αστοχία με χαμηλή ενεργειακή απορρόφηση (τρόπος 2α και 2β ανάλογα με τη μορφή των ρωγμών)
- Προοδευτικό δίπλωμα παρόμοιο με τη συμπεριφορά συντριβής λεπτότοιχου μεταλλικού και πλαστικού σωλήνα, που παρουσιάζει μέτρια ικανότητα ενεργειακής απορρόφησης (τρόπος 3)

Παρακάτω αναλύονται εκτενώς οι τρόποι κατάρρευσης.

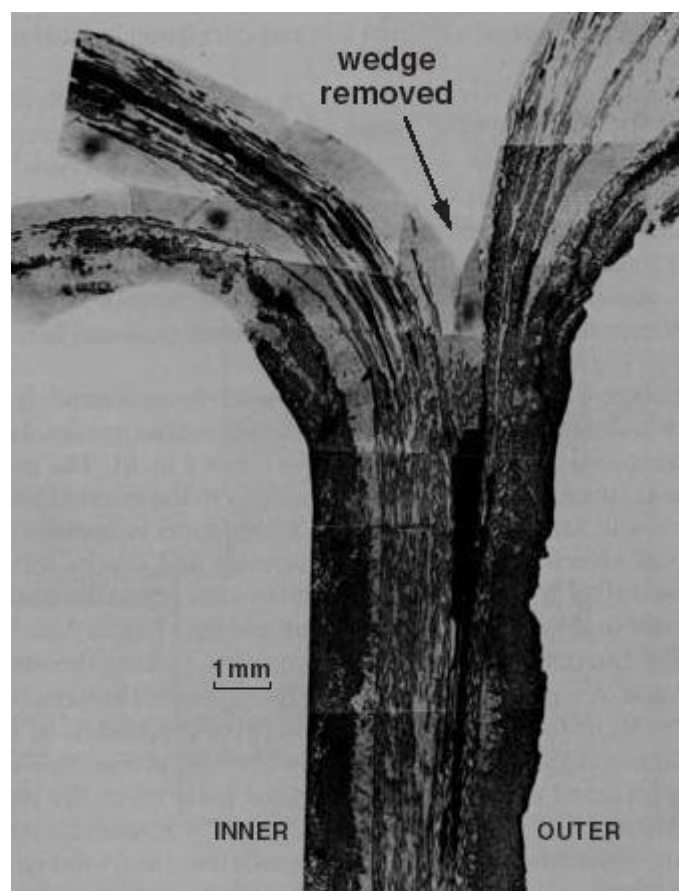
- Τρόπος κατάρρευσης 1

Χαρακτηρίζεται κυρίως από την σταδιακή και την σταθερή κατάρρευση του δοκιμίου καθώς και το συνεχή θρυμματισμό του υλικού στην ζώνη παραμόρφωσης του. Σε αυτόν τον τρόπο κατάρρευσης παρατηρούμε τρεις διαφορετικές μορφές. Πρέπει να τονιστεί ότι μόνο αυτός ο τρόπος δίνει την δυνατότητα στην κατασκευή να απορροφήσει σημαντικά ποσά ενέργειας κατά τη διαδικασία του μηχανισμού κατάρρευσης. Η ενέργεια αυτή διαχέεται στους επιμέρους μηχανισμούς αστοχίας του υλικού.

1. Η πρώτη μορφή κατάρρευσης η οποία λόγω ομοιότητας αναφέρεται και σαν μορφή αστοχίας «μανιτάρι» (mushrooming failure) (βλέπε εικόνες 1.3.1-1 και 1.3.1-2), χαρακτηρίζεται κυρίως από σταδιακή κατάρρευση του κελύφους μέσω του σχηματισμού συνεχών μετώπων τα οποία εκτείνονται εσωτερικά και εσωτερικά και με την ανάπτυξη αξονικών διαρηγματώσεων στο εξωτερικό μέτωπο.



Εικόνα 1.3.1-1 Σταδιακή κατάρρευση υπό μορφή μανιταριού



Εικόνα 1.3.1-2 mashrooming failure

2. Η δεύτερη μορφή κατάρρευσης χαρακτηρίζεται από προοδευτική στροφή του διαρρέοντος θρυμματιζόμενου υλικού προς τα μέσα. Η στροφή αυτή, εξελίσσεται σε όλη την περιφέρεια και καθ' όλο το πάχος του τοιχώματος. Σε αυτή τη μορφή δεν εμφανίζονται αξονικές διαρηγματώσεις.
3. Η τρίτη μορφή κατάρρευσης από ολική στροφή του παραμορφωθέντος υλικού προς τα έξω. Βασικό χαρακτηριστικό της μορφής αυτής αποτελούν οι αξονικές διαρηγματώσεις. Η ζώνη παραμόρφωσης εκτείνεται στη βάση του κελύφους.

- Τρόπος κατάρρευσης 2α

Αυτός ο τρόπος κατάρρευσης χαρακτηρίζεται από εκτεταμένη ψαθυρή θραύση που οδηγεί σε καταστροφική αστοχία του κελύφους.

- Τρόπος κατάρρευσης 2β

Στο τρόπο αυτό, εμφανίζεται περιφερειακή θραύση περίπου στο μέσο του κελύφους η οποία προκαλεί τον διαχωρισμό του σε ακανόνιστα σχήματα.

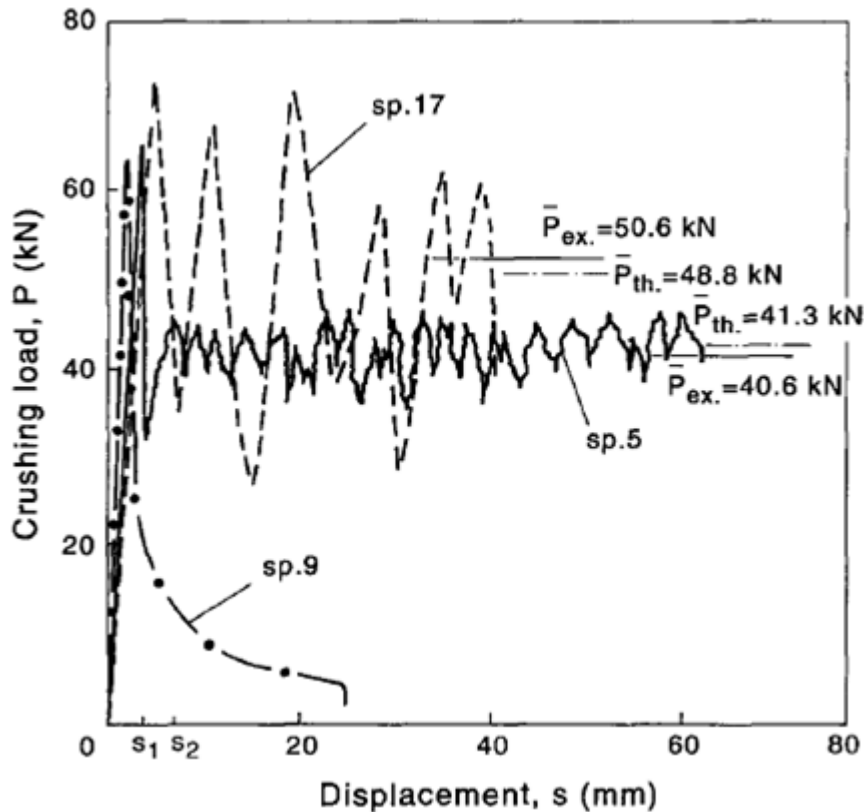
- Τρόπος κατάρρευσης 3

Ο τρόπος κατάρρευσης 3 χαρακτηρίζεται από την εμφάνιση σχεδόν με την έναρξη της φόρτισης γραμμών θραύσεως. Πρόκειται για καθαρά καταστροφικής μορφής κατάρρευση των κελύφων.

1.3.2 Χαρακτηριστικά ενεργειακής απορρόφησης.

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται χαρακτηριστικές καμπύλες φορτίων – μετατοπίσεων για κάθε τρόπο κατάρρευσης. Το κέλυφος, αρχικά, συμπεριφέρεται ελαστικά και το φορτίο ανεβαίνει με σταθερό ρυθμό σε μια τιμή κορύφωσης η οποία εξαρτάται από τη γεωμετρία του κελύφους και τα χαρακτηριστικά του εκάστοτε υλικού και ύστερα μειώνεται απότομα. Στην φάση αυτή σχηματίζεται μια κεντρική ρωγμή στην άκρη του κελύφους παρακείμενα στην περιοχή φόρτισης. Πρέπει να σημειωθεί ότι ο σχηματισμός επιπρόσθετων διαμηκών ενδοστρωματικών ρωγμών, εκατέρωθεν της κεντρικής ρωγμής, μπορεί να οφείλεται σε κάμψη εξαιτίας μη παραλληλότητας μεταξύ του δοκιμίου και των πλακών της πρέσας. Λόγω της πλαστικής παραμόρφωσης του

κελύφους σχηματίζεται μια διόγκωση του άνω άκρου του που εφάπτεται στην περιοχή φόρτισης.



Εικόνα 1.3.2-1 Τυπική μορφή διαγράμματος φορτίου-μετατόπισης

Σε δοκιμή αξονικής φόρτισης η απορροφημένη ενέργεια από το δοκίμιο που έχει καταρρεύσει κατά τη διαδικασία της θλίψης υπολογίζεται μετρώντας την περιοχή κάτω από τη καμπύλη φορτίου-μετατόπισης. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι κυλινδρικοί σωλήνες παρουσιάζουν εν γένει παρουσιάζουν υψηλότερη ειδική ενέργεια απορρόφησης από τους τετραγωνικούς. Καθώς η παραμόρφωση προχωρά μετά την εμφάνιση του μέγιστου φορτίου και την απότομη πτώση του φορτίου που επακολουθεί, η μορφή της καμπύλης φορτίου-μετατόπισης εξαρτάται από τον τρόπο κατάρρευσης και τις συνθήκες φόρτισης. Για λεπτότοιχα κελύφη από σύνθετα υλικά η συμπεριφορά θραύσης του κελύφους φαίνεται να επηρεάζει την σταθερότητα της φόρτισης, όπως και το μέγεθος του φορτίου θραύσης και την απορρόφηση ενέργειας κατά την διάρκεια της δοκιμής. Η περιοχή μετά την θραύση χαρακτηρίζεται από πριονωτές διακυμάνσεις οφειλόμενες στην απορρόφηση ενέργειας από αλληλουχία μικρορωγμών (microcracking sequence), που χαρακτηρίζουν κάθε περίπτωση κατάρρευσης.

Μετά από την αύξηση του φορτίου με σταθερό ρυθμό και την απότομη πτώση του, ακολουθεί η δεύτερη φάση (post-crushing regime). Το φορτίο μεγαλώνει ξανά με αυξανόμενη απόκλιση και αρχίζει να ταλαντώνεται γύρω από ένα μέσο φορτίο θλίψης. Ο σχηματισμός της πρώτης κορυφής και πτώσης του φορτίου μπορεί να σχετίζεται με τον σχηματισμό δύο ίσων δεσμών στρώσεων που έχουν καμφθεί προς τα μέσα και προς τα

έξω, εξαιτίας της καμπτικής φθοράς που επέρχεται μετά από την απότομη πτώση του φορτίου σε απόσταση από την επιφάνεια επαφής ίση με το πάχος του τοιχώματος.

2

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Σκοπός του πειραματικού μέρους είναι να μελετηθεί η συμπεριφορά των λεπτότοιχων σωληνώσεων, κυκλικής, τετραγωνικής και ελλειπτικής διατομής, στην αξονική στατική θλίψη και τα χαρακτηριστικά της κατάρρευσής τους.

2.1 Κατασκευή λεπτότοιχων σωληνώσεων

Σε αυτήν την παράγραφο θα γίνει περιγραφή της διαδικασίας που ακολουθήθηκε για την κατασκευή των λεπτότοιχων σωληνώσεων.

2.1.1 Προετοιμασία καλουπιών

Για τη δημιουργία των σωληνώσεων χρησιμοποιήθηκαν τρία καλούπια, ένα κυκλικής διατομής, ένα τετραγωνικής διατομής και ένα ελλειπτικής διατομής.

- Καλούπι κυκλικής διατομής

Το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένο το τεμάχιο είναι το αλουμίνιο. Το αρχικό τεμάχιο, διαμέτρου 65mm, κατεργάστηκε σε τόρνο ώστε να φτάσει στην επιθυμητή διάμετρο των 60,7mm. Το μήκος του τεμαχίου ήταν 300mm. Παρακάτω φαίνεται το σχέδιο του τεμαχίου με τις διαστάσεις του:

- Καλούπι τετραγωνικής διατομής

Το τεμάχιο αυτό είναι επίσης κατασκευασμένο από αλουμίνιο. Το τεμάχιο κατεργάστηκε στη φρέζα ώστε να διαμορφωθούν στις ακμές του καμπυλώσεις ακτίνας 5,5mm. Το μήκος του τεμαχίου είναι 300mm. Παρακάτω φαίνεται το σχέδιο του τεμαχίου με τις διαστάσεις του.

- Καλούπι ελλειπτικής διατομής

Για τα δοκίμια ελλειπτικής διατομής δεν χρησιμοποιήθηκε καλούπι, καθώς τα δοκίμια αυτά ελήφθησαν έτοιμα από προηγούμενη έρευνα.

Τα τεμάχια, προτού χρησιμοποιηθούν σαν καλούπια για τις σωληνώσεις, έπρεπε να καθαριστούν καλά ώστε να μην απορροφηθεί σκόνη από τη ρητίνη με αποτέλεσμα να έχουμε τις επιθυμητές ιδιότητες στο τελικό αποτέλεσμα. Αυτή η διαδικασία πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας το καθαριστικό "more cleaner". Το επόμενο στάδιο είναι το κλείσιμο των πόρων. Για να πραγματοποιηθεί αυτό χρησιμοποιήθηκε το σκεύασμα "more sealer". Τα τεμάχια επαλειφθήκαν μονοδιευθυντικά με το ειδικό αυτό υγρό 3 φορές με απόσταση 15 λεπτών μεταξύ των περασμάτων. Μετά το πέρας αυτής της διαδικασίας, τα τεμάχια επαλειφθήκαν με αποκολλητικό υγρό, το 227CCE, 3 φορές με 20 λεπτά απόσταση μεταξύ των περασμάτων. Στη συνέχεια, μπήκαν στο φούρνο για ψήσιμο για 20 λεπτά στους 130 βαθμούς Κελσίου. Τέλος, αφέθηκαν να αποψυχθούν με το ρυθμό απόψυξης του φούρνου.

2.1.2 Διαδικασία κατασκευής σωληνώσεων

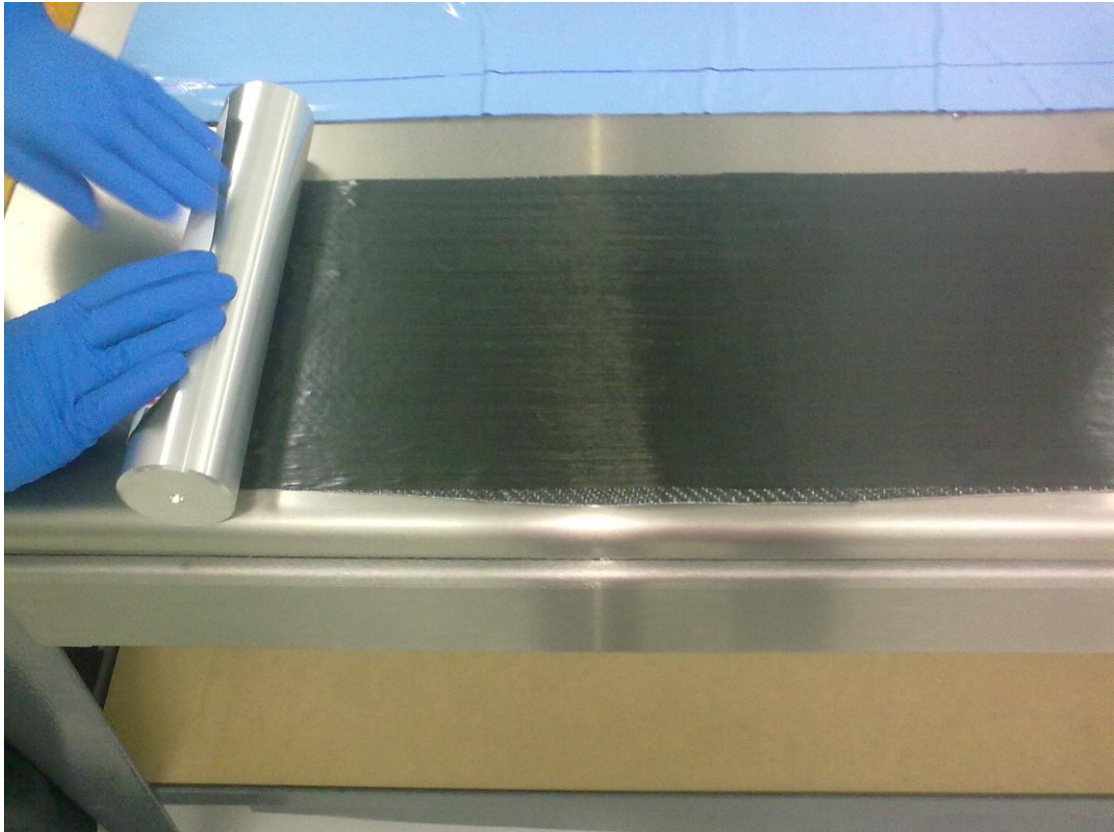
Το σύνθετο υλικό που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των σωληνώσεων αποτελείται από ίνες carbon E722/HS08000/PK1 (Toray T300 equivalent), 205 g/m², plain, 45% resin weight και carbon E722/UHS130/PK01 (Toray T700 equivalent), 130 g/m², UD, 35% resin weight.

Η ακριβής διαστρωμάτωση φαίνεται στον ακόλουθο πίνακα

α/α	Είδος πλέξης	Κατεύθυνση(°)	Πάχος (mm)
1	Πλεκτή plain	+/- 45	0,2
2	Unidirectional	+/- 90	0,1
3	Unidirectional	+/- 90	0,1

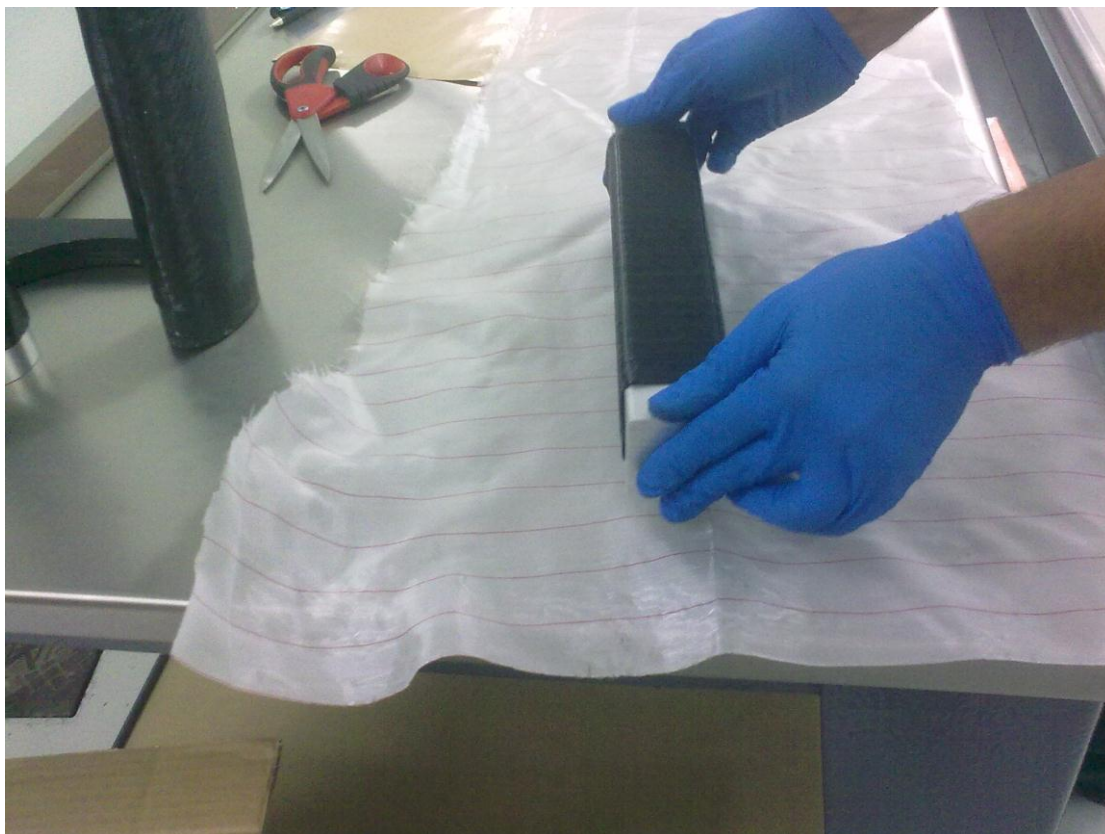
Τα τεμάχια κατασκευάστηκαν με την μέθοδο Vacuum Bagging.

Αφού τα καλούπια είχαν προετοιμαστεί όπως έχει αναφερθεί παραπάνω, τυλίχθηκαν γύρω από αυτά οι στρώσεις ινών άνθρακα (βλ. εικόνα 2.1.2-1)



Εικόνα 2.1.2-1 Διαδικασία κατασκευής σωλήνων

Στη συνέχεια τυλίχθηκαν με ειδικό ύφασμα ώστε να απορροφηθεί η περίσσεια ρητίνη και ύστερα τοποθετήθηκαν σε αεροστεγώς κλεισμένη σακούλα που κλείνει με ειδική μαστίχα. Στη σακούλα αυτή προσαρμόστηκε ένας σωλήνας που συνδέει το σύστημα με αντλία κενού⁹.(βλ. εικόνες 2.1.2-2 και 2.1.2-3).



Εικόνα 2.1.2-2 Τύλιγμα με την κουβέρτα

⁹ Όταν η αντλία κενού ξεκινήσει την λειτουργία της, ο αέρας που υπάρχει μέσα στη σακούλα, τις στρώσεις ρητίνης και υφάσματος οδηγείται έξω από το σύστημα. Η σακούλα πιέζει τις στρώσεις υφάσματος ινών άνθρακα με αποτέλεσμα το τελικό προϊόν συνήθως να έχει καλύτερο ποσοστό περιεκτικότητας κατά βάρος σε άνθρακα και λιγότερες ατέλειες (φυσαλίδες).



Εικόνα 2.1.2-3 Τοποθέτηση σε αεροστεγή σακούλα

Στον φούρνο τα τεμάχια ψήθηκαν σε θερμοκρασία 90° C για 3 ώρες. Παρακάτω φαίνονται τα όργανα ελέγχου του φούρνου, καθώς και ο πίνακας με τις θερμοκρασίες εντός φούρνου, την πίεση μέσα στην σακούλα και τις ατμοσφαιρικές συνθήκες. Οι θερμοκρασίες εντός φούρνου και η πίεση σακούλας λαμβάνονταν ανά ένα λεπτό ενώ οι συνθήκες περιβάλλοντος ανά πέντε λεπτά.



Εικόνα 2.1.2-4 Κέντρο ελέγχου φούρνου και μετρητικά όργανα.

Θερμοκρασίες		φούρνου (οC)		πίεση εντός σακούλας (bar)	Συνθήκες περιβάλλοντος		
αισθητήρας 1	αισθητήρας 2	αισθητήρας 3	αισθητήρας 4		θερμοκρασία (οC)	Σχετ. Υγρασία	Ατμ. Πίεση (hPa)
24,3	24,2	23,4	23	0,98	23,7	63	1000
24,6	24,5	24,3	24	0,98			
25,1	24,8	24,8	25	0,98			
25,4	25	25,2	25	0,98			
25,7	25,2	25,5	26	0,98			
26	25,4	25,8	26	0,98	24	61	1000,1
27	26	27	27	0,98			
28,8	27,3	29,1	29	0,98			
30,6	28,6	31,2	31	0,98			
32,4	29,9	33	33	0,98			
34,2	31,1	34,9	35	0,98	24,1	61	1000
36,4	32,8	37,6	38	0,98			
38,4	34,1	39,2	39	0,98			
40,3	35,4	41,5	42	0,98			
42,3	36,9	43,2	43	0,98			
44,2	38,2	45,2	45	0,98	24,2	59	1000
46,5	39,8	47,6	48	0,98			
48	40,8	48,9	49	0,98			
50,4	42,5	51,4	52	0,98			
52,2	44	53,3	54	0,98			
54,3	45,5	55,3	56	0,98	24,2	58	999,8
57,3	47,7	58,4	59	0,98			
58,6	48,5	59,6	60	0,98			
61,1	50,3	62,3	62	0,98			
63,4	52	64,6	65	0,97			
65,7	53,7	67	67	0,97	24,3	57	999,8
67,6	55,1	68,9	69	0,97			
69,2	56,3	70,4	71	0,965			
70,6	57,4	72	72	0,965			
72,7	59	74,3	75	0,96			
74,9	60,5	76,3	76	0,96	24,3	55	999,7
77	62,1	78,4	79	0,96			
78,7	63,4	80,1	80	0,96			
81	65,1	82,3	83	0,96			
83,3	66,9	84,8	85	0,96			
85,2	68,5	87	87	0,96	24,3	55	1000
86,8	69,7	88	88	0,96			
87,1	70,2	88	88	0,96			
87,2	70,4	88,1	88	0,96			
87,5	70,8	88,4	89	0,96			
87,8	71,2	88,6	89	0,96	24,4	55	1000
88	71,7	88,8	89	0,96			
88,1	72	88,8	89	0,96			
88,4	72,4	89	89	0,96			
88,5	72,7	89	89	0,96			
88,6	73	89,1	89	0,96	24,4	53	1000,1
88,8	73,4	89,3	89	0,96			
88,9	73,8	89,4	90	0,96			
89	74	89,5	90	0,96			
89,1	74,4	89,6	90	0,96			
89,2	74,6	89,6	90	0,96	24,4	53	1000,2

89,3	74,9	89,8	90	0,96			
89,5	75,3	89,8	90	0,965			
89,5	75,5	89,9	90	0,965			
89,6	75,9	90	90	0,965			
89,6	76,1	90	90	0,965	24,5	52	1000,2
89,7	76,3	90	90	0,965			
89,7	76,5	90	90	0,965			
89,7	76,7	90	90	0,965			
89,8	77,1	90,1	90	0,97			
89,8	72,4	90	90	0,97	24,5	52	1000,3
89,7	77,6	90	90	0,97			
89,8	77,8	90	90	0,97			
89,8	77,9	90	90	0,97			
89,8	78,1	90	90	0,97			
89,8	78,3	90	90	0,97	24,5	52	1000,6
89,8	78,5	89,9	90	0,97			
89,8	78,6	89,9	90	0,98			
89,7	78,8	89,8	90	0,98			
89,8	79	89,9	90	0,98			
89,8	79,2	89,9	90	0,98	24,5	51	1000,5
89,7	79,5	89,9	90	0,98			
89,8	79,6	89,8	90	0,98			
89,7	79,8	89,8	90	0,98			
89,8	80	89,8	90	0,98			
89,8	80,1	89,8	90	0,98	24,5	51	1000,6
89,8	80,2	89,9	90	0,98			
89,8	80,4	89,9	90	0,98			
89,7	80,5	89,8	90	0,98			
89,7	80,7	89,8	90	0,98			
89,8	80,9	89,9	90	0,98	24,5	51	1000,6
89,8	81	89,8	90	0,98			
89,8	81,2	89,9	90	0,98			
89,8	81,4	89,8	90	0,98			
89,8	81,5	89,9	90	0,98			
89,8	81,6	89,9	90	0,98	24,5	51	1000,6
89,8	81,7	89,8	90	0,98			
89,8	81,8	89,8	90	0,98			
89,8	82	89,8	90	0,98			
89,8	82,1	89,8	90	0,98			
89,8	82,3	89,8	90	0,98	24,6	52	1000,8
89,8	82,4	89,8	90	0,98			
89,8	82,6	89,9	90	0,98			
89,8	82,7	89,8	90	0,98			
89,8	82,8	89,8	90	0,98			
89,8	82,9	89,8	90	0,98	24,5	52	1000,9
89,8	83,1	89,8	90	0,98			
89,8	83,1	89,8	90	0,98			
89,8	83,3	89,9	90	0,98			
89,8	84,4	89,8	90	0,98			
89,8	83,6	89,8	90	0,98	24,5	53	1000,8
89,9	83,7	89,9	90	0,98			
89,9	83,7	89,9	90	0,98			
89,8	83,8	89,8	90	0,98			
89,8	83,9	89,9	90	0,98			
89,9	84	89,8	90	0,98	24,5	53	1000,8
89,9	84,1	89,8	90	0,98			

89,9	84,2	89,9	90	0,98			
89,9	84,3	89,9	90	0,98			
89,8	84,4	89,8	90	0,98			
89,9	84,5	89,8	90	0,98	24,5	53	1001,3
89,8	84,6	89,8	90	0,98			
89,9	84,7	89,8	90	0,98			
89,8	84,8	89,8	90	0,98			
89,9	84,9	89,8	90	0,98			
89,8	85	89,8	90	0,98	24,5	53	1001,2
89,8	85	89,8	90	0,98			
89,8	85,1	89,8	90	0,98			
89,8	85,2	89,9	90	0,98			
89,8	85,3	89,8	90	0,98			
89,8	85,3	89,8	90	0,98	24,5	54	1001,4
89,8	85,4	89,8	90	0,98			
89,8	85,5	89,9	90	0,98			
89,9	85,6	89,9	90	0,98			
89,9	85,7	89,9	90	0,98			
89,9	85,8	89,8	90	0,98	24,5	54	1001,3
89,8	85,8	89,8	90	0,98			
89,9	85,9	89,8	90	0,98			
89,8	86	89,8	90	0,98			
89,9	86,1	89,7	90	0,98			
89,8	86,2	89,8	90	0,98	24,5	54	1001,4
89,8	86,2	89,8	90	0,98			
89,8	86,3	89,7	90	0,98			
89,9	86,4	89,8	90	0,98			
89,9	86,5	89,8	90	0,98			
89,9	86,6	89,8	90	0,98	24,5	54	1001,5
89,9	86,6	89,8	90	0,98			
89,9	86,7	89,8	90	0,98			
89,9	86,7	89,8	90	0,98			
89,8	86,8	89,8	90	0,98			
89,8	86,9	89,7	90	0,98	24,5	54	1001,4
89,9	86,9	89,8	90	0,98			
89,9	87	89,7	90	0,98			
89,8	87,1	89,8	90	0,98			
89,8	87,1	89,8	90	0,98			
89,9	87,2	89,7	90	0,98	24,5	54	1001,6
89,9	87,2	89,7	90	0,98			
89,9	87,3	89,7	90	0,98			
89,9	87,4	89,8	90	0,98			
89,9	87,5	89,8	90	0,98			
89,9	87,5	89,7	90	0,98	24,5	54	1001,6
89,9	87,6	89,8	90	0,98			
89,9	87,7	89,8	90	0,98			
89,9	87,7	89,8	90	0,98			
89,9	87,8	89,8	90	0,98			
89,9	87,8	89,8	90	0,98	24,6	54	1001,7
89,9	87,9	89,8	90	0,98			
89,9	88	89,8	90	0,98			
89,9	88	89,8	90	0,98			
90	88,2	89,8	90	0,98			
90	88,2	89,8	90	0,98	24,6	54	1001,6
89,9	88,2	89,8	90	0,98			
90	88,2	89,8	90	0,98			

90	88,3	89,9	90	0,98			
90	88,3	89,8	90	0,98			
89,9	88,4	89,8	90	0,98	24,6	54	1001,6
89,9	88,5	89,8	90	0,98			
89,9	88,5	89,8	90	0,98			
89,9	88,5	89,8	90	0,98			
89,9	88,6	89,8	90	0,98			
90	88,6	89,8	90	0,98	24,6	54	1001,6
89,9	88,7	89,8	90	0,98			
89,9	88,7	89,8	90	0,98			
89,9	88,7	89,8	90	0,98			
89,9	88,8	89,8	90	0,98			
89,9	88,8	89,8	90	0,98	24,6	55	1001,7
89,9	88,9	89,8	90	0,98			
89,9	88,9	89,8	90	0,98			
89,9	88,9	89,8	90	0,98			
89,9	89	89,8	90	0,98	24,6	54	1001,6
89,9	89	89,8	90	0,98			
89,9	89,1	89,8	90	0,98			
89,9	89,1	89,8	90	0,98			
89,9	89,1	89,8	90	0,98			
89,9	89,2	89,8	90	0,98	24,6	55	1001,7
89,9	89,2	89,8	90	0,98			
89,9	89,2	89,8	90	0,98			
89,9	89,2	89,8	90	0,98			
89,9	89,2	89,7	90	0,98			
89,9	89,2	89,8	90	0,98	24,6	55	1001,6
89,9	89,3	89,8	90	0,98			
89,9	89,3	89,8	90	0,98			
89,9	89,3	89,7	90	0,98			
89,9	89,3	89,8	90	0,98			
89,9	89,3	89,8	90	0,98	24,6	55	1001,6
89,9	89,3	89,8	90	0,98			
90	89,4	89,8	90	0,98			
89,9	89,4	89,8	90	0,98			
89,9	89,4	89,8	90	0,98			
89,9	89,4	89,8	90	0,98	24,6	55	1001,6
89,9	89,4	89,7	90	0,98			
89,9	89,4	89,8	90	0,98			
89,9	89,4	89,7	90	0,98			
89,9	89,4	89,7	90	0,98			
89,9	89,5	89,8	90	0,98	24,6	55	1001,6
89,9	89,5	89,7	90	0,98			
89,9	89,5	89,7	90	0,98			
89,9	89,5	89,8	90	0,98			
90	89,5	89,8	90	0,98			
90	89,5	89,8	90	0,98	24,7	55	1001,6
89,9	89,5	89,8	90	0,98			
89,9	89,5	89,8	90	0,98			
89,9	89,5	89,8	90	0,98			
89,9	89,5	89,8	90	0,98			
89,9	89,5	89,8	90	0,98	24,7	55	1001,5
89,9	89,5	89,8	90	0,99			
89,9	89,5	89,7	90	0,99			
89,9	89,5	89,8	90	0,99			
89,9	89,5	89,8	90	0,99			

90	89,6	89,8	90	0,99	24,7	55	1001,6
90	89,6	89,8	90	0,99			
90	89,6	89,8	90	0,98			
90	89,6	89,8	90	0,98			
89,9	89,5	89,8	90	0,98			
89,9	89,5	89,8	90	0,98	24,7	55	1001,5
89,9	89,5	89,8	90	0,98			
89,9	89,5	89,8	90	0,98			
89,9	89,5	89,8	90	0,98			
89,9	89,5	89,8	90	0,98			
89,9	89,5	89,8	90	0,98	24,7	55	1001,6
89,9	89,5	89,8	90	0,98			
89,9	89,5	89,8	90	0,98			
89,9	89,5	89,8	90	0,98			
89,9	89,5	89,8	90	0,98			
89,9	89,6	89,8	90	0,98	24,7	54	1001,7
89,9	89,6	89,8	90	0,98			
89,9	89,6	89,8	90	0,98			
90	89,6	89,8	90	0,98			
90	89,6	89,8	90	0,98			
90	89,6	89,8	90	0,98	24,7	54	1001,8
90	89,6	89,8	90	0,98			
90	89,6	89,8	90	0,98			
90	89,6	89,8	90	0,98			
90	89,6	89,8	90	0,98			
90	89,5	89,8	90	0,98	24,7	54	1001,8
89,3	89,2	89,1	89	0,98			
89,2	89,1	88,9	89	0,98			
88,9	88,9	88,5	89	0,98			
88,3	88,5	87,9	88	0,98			
87,7	88,2	87,3	87	0,98	24,7	54	1001,7
87,1	87,8	86,3	87	0,98			
86,4	87,4	86	86	0,98			
86	87,1	85,6	86	0,98			
85,6	86,9	85,2	85	0,98			
85	86,5	84,7	85	0,98	24,7	54	1001,7
84,6	86,2	84,1	84	0,98			
84,2	85,9	83,8	84	0,98			
83,8	85,6	83,3	83	0,98			
83,3	85,3	82,9	83	0,98			
83	85,1	82,7	83	0,98	24,7	54	1001,7
82,6	84,9	82,2	82	0,98			
82,2	84,6	81,9	82	0,98			
81,9	84,3	81,5	82	0,98			
81,5	84	81,1	81	0,98			
81,2	83,8	80,7	81	0,98	24,7	54	1001,7
80,7	83,5	80,4	80	0,98			
80,4	83,2	79,9	80	0,98			
80,1	83	79,6	80	0,98			
79,7	82,6	79,3	79	0,98			
79,4	82,4	78,9	79	0,98	24,7	53	1001,6
79,1	82,1	78,6	79	0,98			
78,8	81,9	78,3	78	0,98			
78,4	81,6	78	78	0,98			
78,1	81,4	77,7	78	0,98			
77,8	81,1	77,4	78	0,98	24,7	53	1001,8

2.12

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

77,5	80,9	77,1	77	0,98			
77,3	80,7	76,9	77	0,98			
77	80,4	76,6	77	0,98			
76,7	80,2	76,3	76	0,98			
76,4	80	76	76	0,98	24,7	53	1001,7
76	79,7	75,7	76	0,98			
75,7	79,3	75,3	75	0,98			
75,4	79	75	75	0,98			
74,9	79,3	74,6	75	0,98			
74,8	79,7	74,3	75	0,98	24,7	53	1001,6
74,7	79,6	74,2	74	0,98			
74,7	79,7	74,2	74	0,98			
74,5	79,9	74	74	0,98			
74,3	80	73,7	74	0,98			
74,1	80	73,5	74	0,98	24,7	53	1001,6
74	79,9	73,2	73	0,98			
73,8	79,9	73	73	0,98			
73,6	79,8	72,7	73	0,98			
73,3	79,7	72,3	72	0,98			
73,1	79,4	72	72	0,98	24,7	53	1001,6
72,8	79,3	71,7	72	0,98			
72,5	79,1	71,3	71	0,98			
72,3	79	71,1	71	0,98			
72,1	78,8	70,8	71	0,98			
71,8	78,7	70,5	71	0,98	24,7	54	1001,4
71,6	78,5	70,2	70	0,98			
71,4	78,3	70	70	0,98			
71,1	78,1	69,6	70	0,98			
70,9	78	69,4	69	0,98			
70,6	77,7	69,1	69	0,98	24,7	54	1001,5
70,3	77,6	68,8	69	0,98			
70	77,4	68,6	68	0,98			
69,7	77,2	68,4	68	0,98			
69,5	77	68	68	0,98			
69,3	76,8	67,8	68	0,98	24,7	54	1001,6
69,1	76,7	67,5	67	0,98			
68,8	76,5	67,3	67	0,98			
68,6	76,3	67,1	67	0,98			
68,4	76,1	66,8	67	0,98			
68,1	75,9	66,5	66	0,98	24,7	53	1001,5
67,9	75,7	66,2	66	0,98			
67,6	75,4	66	66	0,98			
67,3	75,3	65,7	66	0,98			
67,1	75,1	65,5	65	0,98			
66,9	74,9	65,3	65	0,98	24,7	53	1001,5
66,7	74,8	65,1	65	0,98			
66,3	74,5	64,7	65	0,98			
66,1	74,4	64,5	64	0,98			
65,9	74,2	64,3	64	0,98			
65,7	74	64,1	64	0,98	24,7	53	1001,5
62,1	72,1	58,4	58	0,98			
57,1	69,5	53,4	53	0,98			
52,7	67,4	48,8	48	0,98			
49,1	65,4	44,9	45	0,98			
46,1	64,4	42,9	43	0,98	24,7	53	1001,5
43,6	63,4	40,8	41	0,98			

41,6	62,4	39,2	39	0,98			
40,4	61,9	38	38	0,98			
39,1	61	36,7	37	0,98			
37,4	60	35,2	35	0,98	24,7	53	1001,7

2.2 Περιγραφή πειραματικού εξοπλισμού

Για την αξονική στατική καταπόνηση των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε η πρέσα δοκιμίων INSTRON 4482 του εργαστηρίου (βλέπε εικόνα 2.1.2-1). Η μηχανική πρέσα αυτή έχει ονομαστικό φορτίο 10kN.



Εικόνα 2.1.2-1 Μηχανική πρέσα INSTRON 4482

Τα βασικά μέρη της πρέσας είναι τα ακόλουθα:

- Το πλαίσιο μορφής με το τραπέζι στερέωσης του δοκιμίου και το μηχανισμό κίνησης,
- Ο μηχανισμός κινητής κεφαλής,
- Ο πίνακας ελέγχου, ο οποίος είναι εξοπλισμένος με θύρα επικοινωνίας συμβατή με το πρωτόκολλο IEEE, συνδεδεμένης με ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Τα βασικά λειτουργικά χαρακτηριστικά της πρέσας είναι τα ακόλουθα:

- Ονομαστικό φορτίο 10kN
- Μέγιστη ταχύτητα κινητής κεφαλής 500mm/min
- Ταχύτητα επιστροφής στην αρχική θέση της κινητής κεφαλής 600mm/min
- Μέγιστη ταχύτητα κινητής κεφαλής σε μέγιστο φορτίο 250mm/min
- Μέγιστο αναπτυσσόμενο φορτίο στην μέγιστη ταχύτητα 75kN
- Ευαισθησία κεφαλής πρέσας 2mV/V



Εικόνα 2.1.2-2 πλάκες μηχανικής πρέσας

2.3 Πειραματικές δοκιμές και μετρήσεις

Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν στη πειραματική διαδικασία περιλαμβάνουν δύο δοκίμια κυκλικής διατομής, δύο δοκίμια τετραγωνικής διατομής και τέλος δύο δοκίμια ελλειπτικής διατομής. Παρακάτω γίνεται μια πιο αναλυτική περιγραφή του κάθε δοκιμίου και παραθέτονται τα πειραματικά αποτελέσματα.

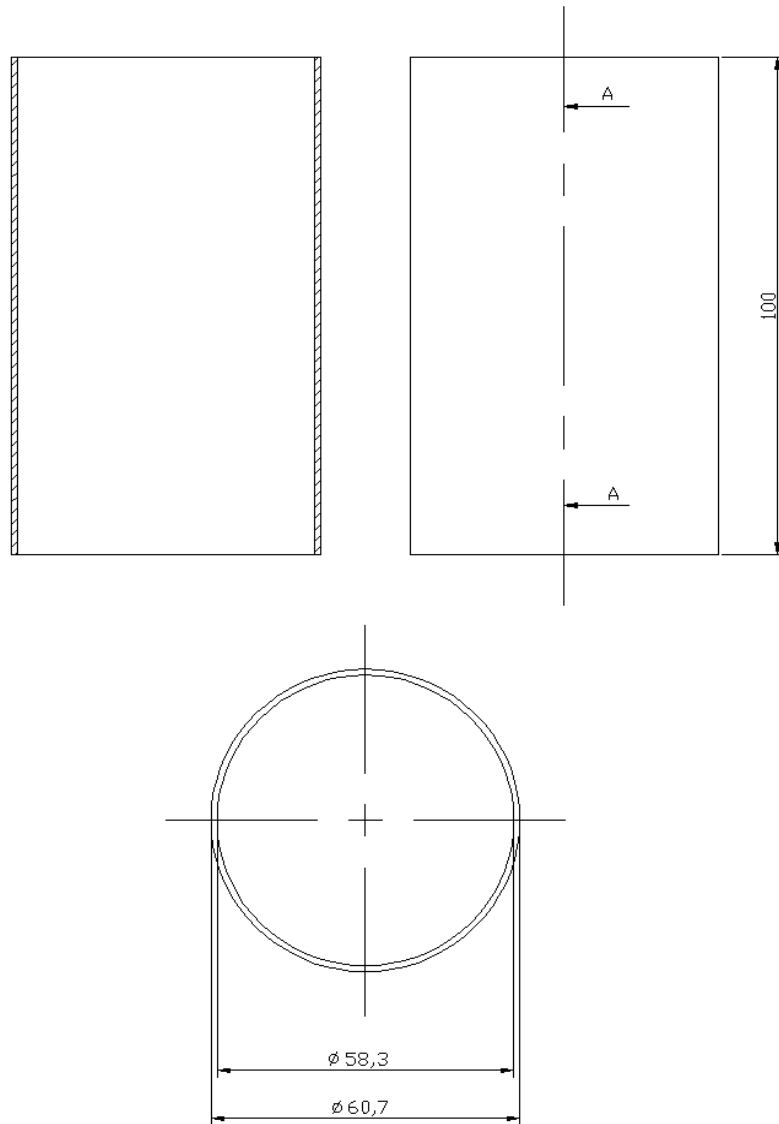
2.3.1 Δοκίμιο 1

Το δοκίμιο υπ' αριθμόν 1 είναι ένας σύνθετος λεπτότοιχος κυλινδρικός σωλήνας. παρακάτω φαίνεται ένα σχέδιο του αρχικού δοκιμίου πριν το πείραμα, με τις διαστάσεις του. Αμέσως μετά παρουσιάζονται διαδοχικές φωτογραφίες από την πορεία της κατάρρευσης οι οποίες λήφθηκαν σε διάφορες φάσεις της διαδικασίας. Ακόμα παρουσιάζεται το διάγραμμα δύναμης- μετατόπισης όπως λήφθηκε από τον ηλεκτρονικό υπολογιστή -μέσω ειδικού προγράμματος- που είναι συνδεδεμένος με την μηχανική πρέσα.

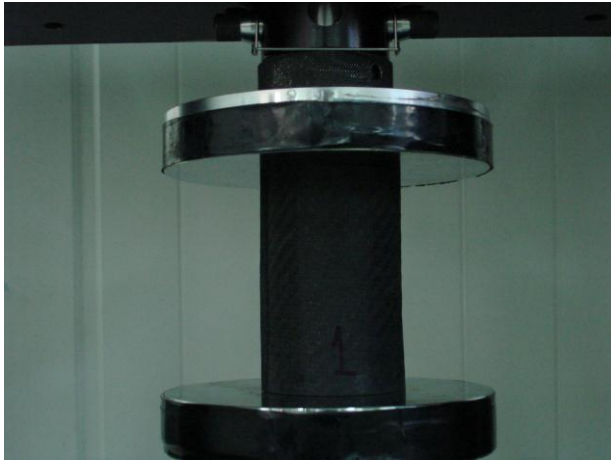
Οι συνθήκες περιβάλλοντος κατά την εκτέλεση του πειράματος ήταν:

Θερμοκρασία: 18° C

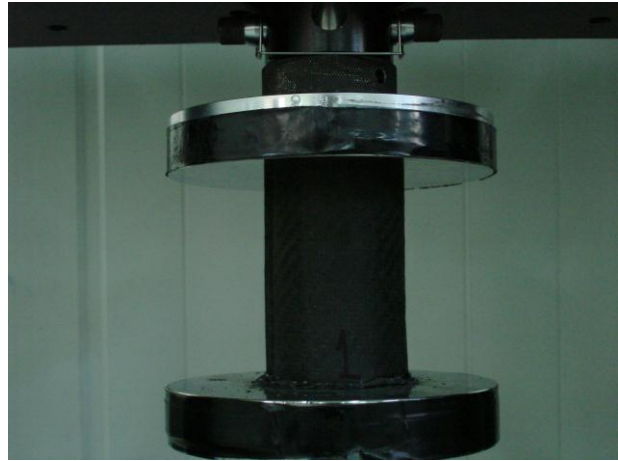
Σχετική υγρασία: 50%



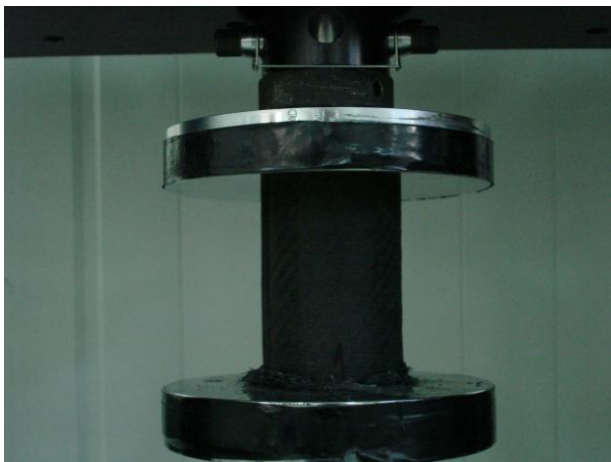
t=0s



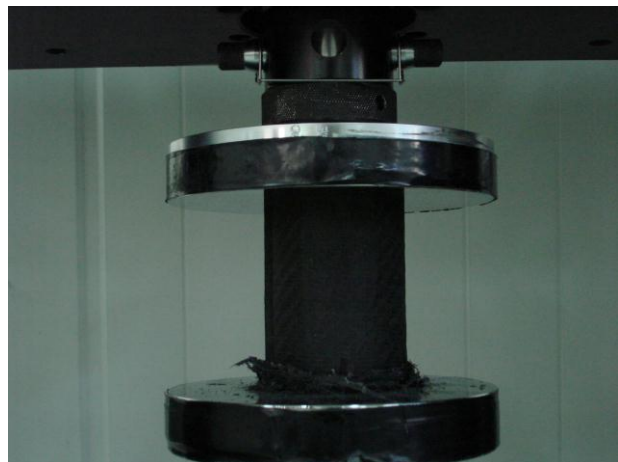
t=15s



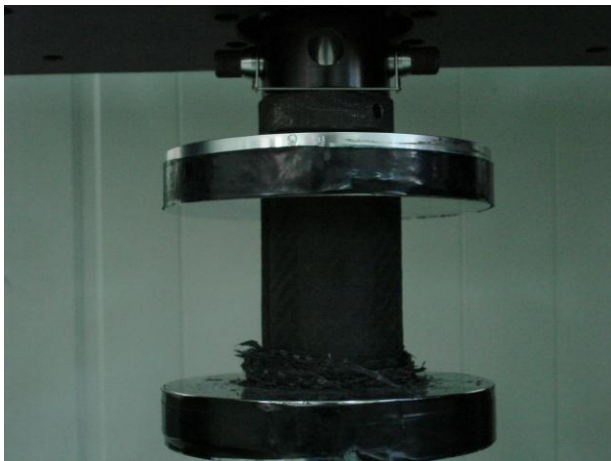
t=30s



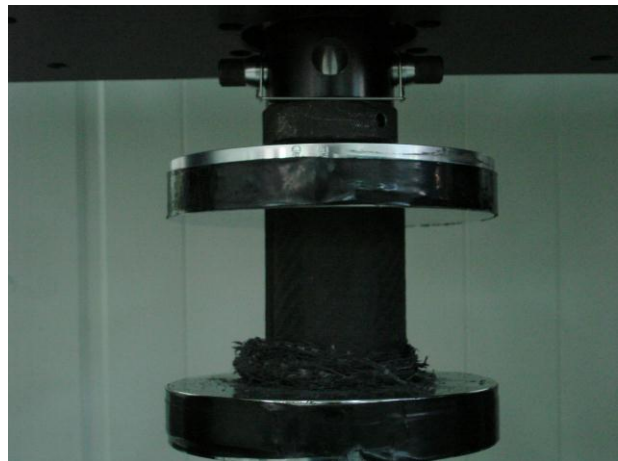
t=45s



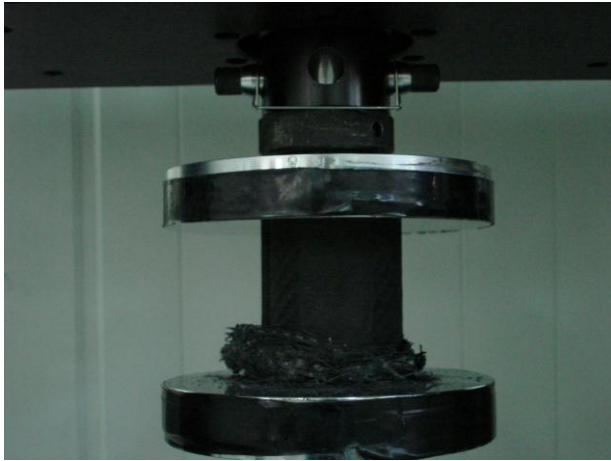
t=60s



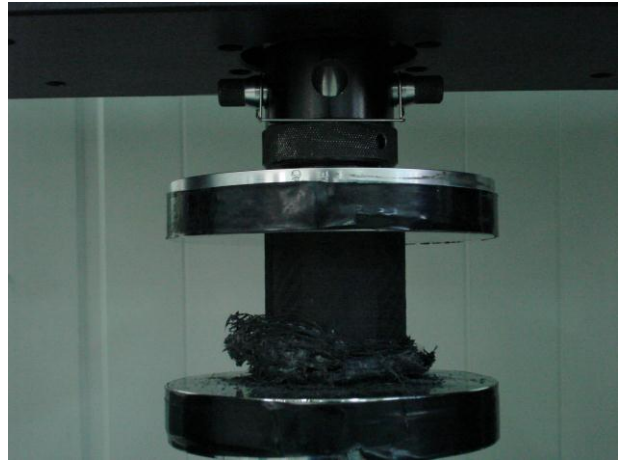
t=75s



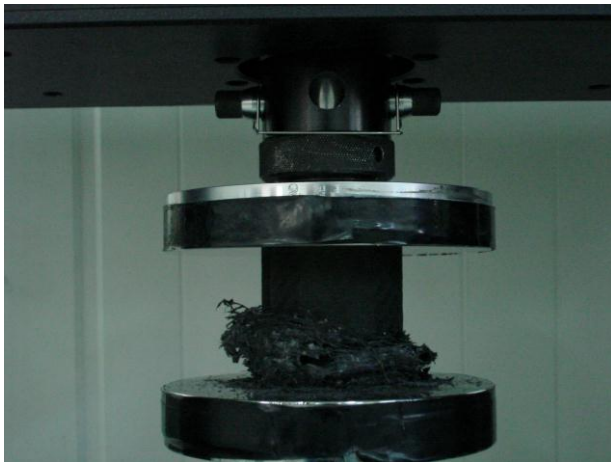
t=90s



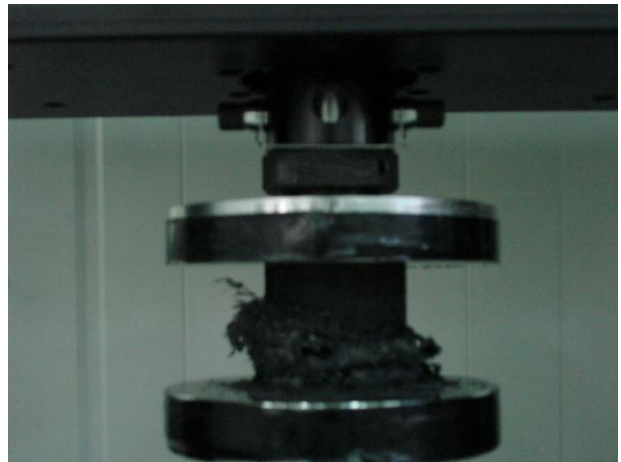
t=105s



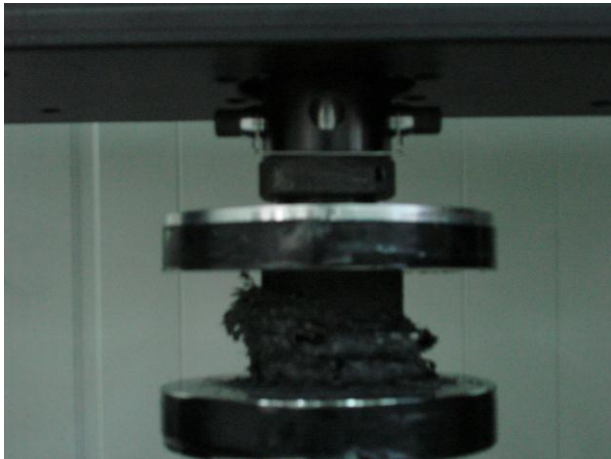
t=120s



t=135s



t=150s



Στη συνέχεια παρατίθενται φωτογραφίες του δοκιμίου 1 μετά την καταστροφική καταπόνηση (η σχεδιασμένη κλίμακα είναι 5cm).

Κάτοψη κάτω πλευράς



Κάτοψη άνω πλευράς



Πλάγια όψη 1

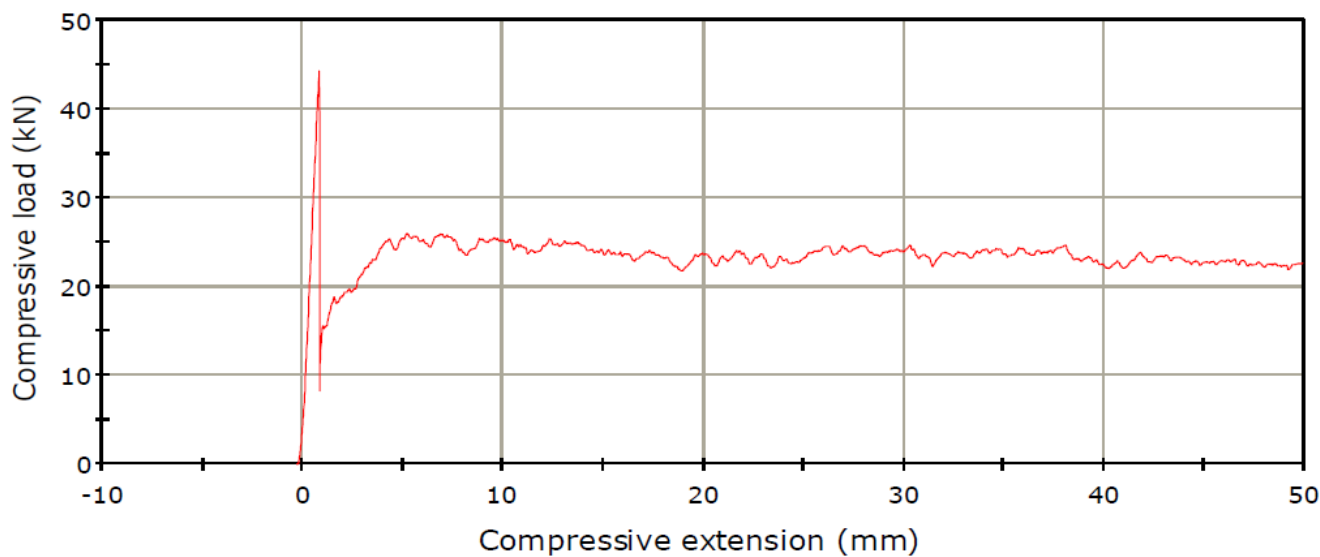


Πλάγια όψη 2



Γενική όψη





Εικόνα 2.3.1-1 διάγραμμα φορτίου μετατόπισης (δοκίμιο 1)

Σχολιασμός διαδικασίας κατάρρευσης.

- Στην πρώτη φάση της συμπίεσης παρατηρείται μια ραγδαία, σχεδόν γραμμική, αύξηση του φορτίου με μέγιστη τιμή 44,268kN για μετατόπιση περίπου 0,85mm. Εφόσον το δοκίμιο είναι ακέραιο προβάλλει την μέγιστή του αντίδραση στην θλιπτική δύναμη που του εφαρμόζεται.
- Κατόπιν εμφανίζεται τοπικό ελάχιστο και ξεκινά η προοδευτική κατάρρευση του δοκιμίου. Το φορτίο ομαλοποιείται γύρω από την τιμή των 25kN.
- Οι σρώσεις του υλικού αποκολλήθηκαν με τις μισές να υπέστησαν κάμψη προς τα έξω και οι υπόλοιπες προς τα μέσα.

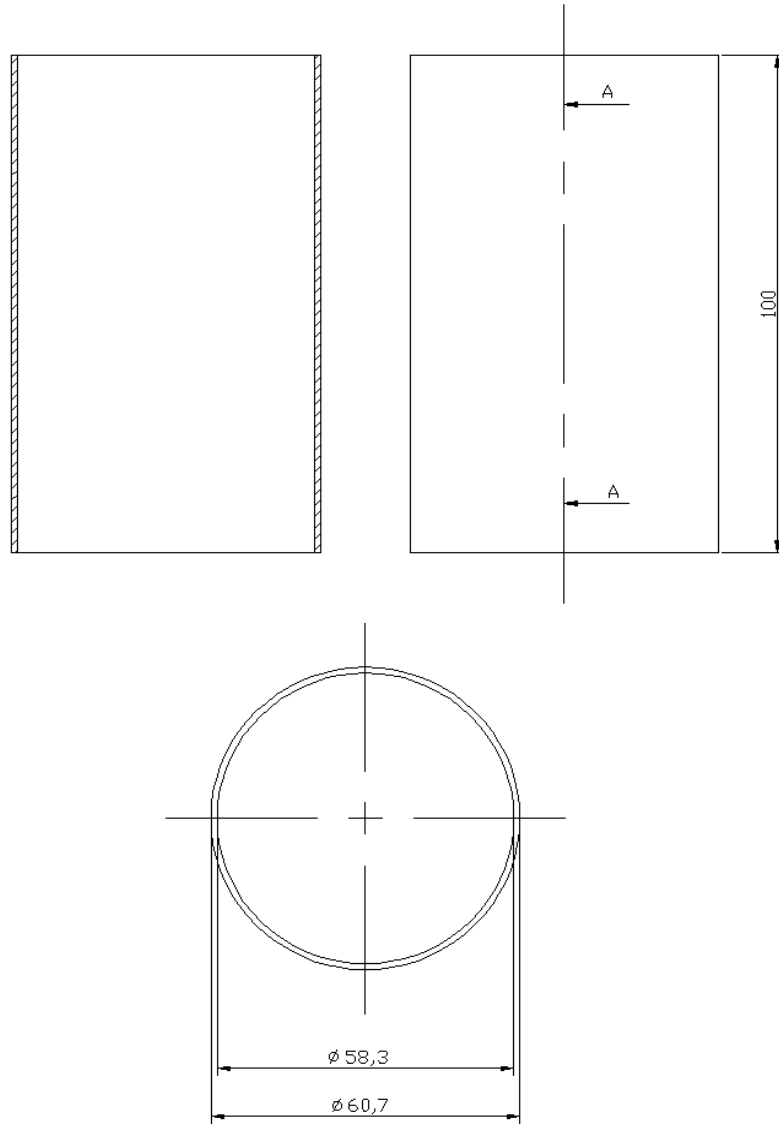
2.3.2 Δοκίμιο 2

Το δοκίμιο υπ' αριθμόν 2 είναι ένας σύνθετος λεπτότοιχος κυλινδρικός σωλήνας. παρακάτω φαίνεται ένα σχέδιο του αρχικού δοκιμίου πριν το πείραμα, με τις διαστάσεις του. Αμέσως μετά παρουσιάζονται διαδοχικές φωτογραφίες από την πορεία της κατάρρευσης οι οποίες λήφθηκαν σε διάφορες φάσεις της διαδικασίας. Ακόμα παρουσιάζεται το διάγραμμα δύναμης- μετατόπισης όπως λήφθηκε από τον ηλεκτρονικό υπολογιστή -μέσω ειδικού προγράμματος- που είναι συνδεδεμένος με την μηχανική πρέσα.

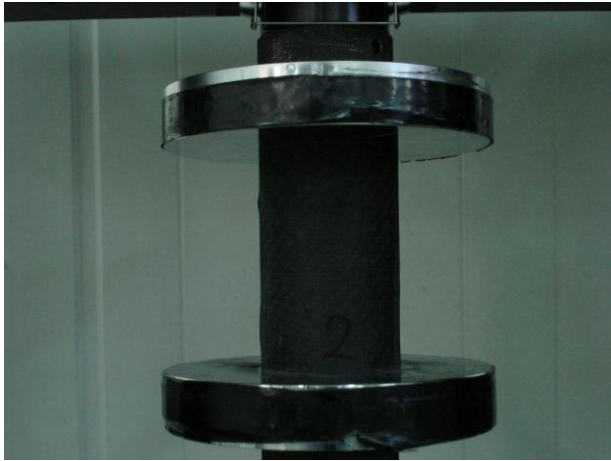
Οι συνθήκες περιβάλλοντος κατά την εκτέλεση του πειράματος ήταν:

Θερμοκρασία: 18° C

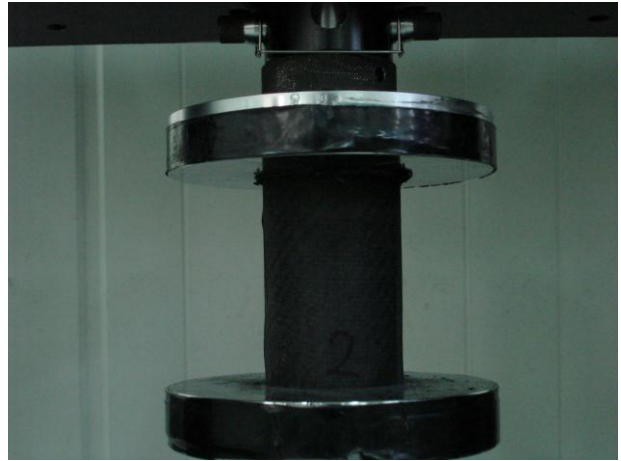
Σχετική υγρασία: 50%



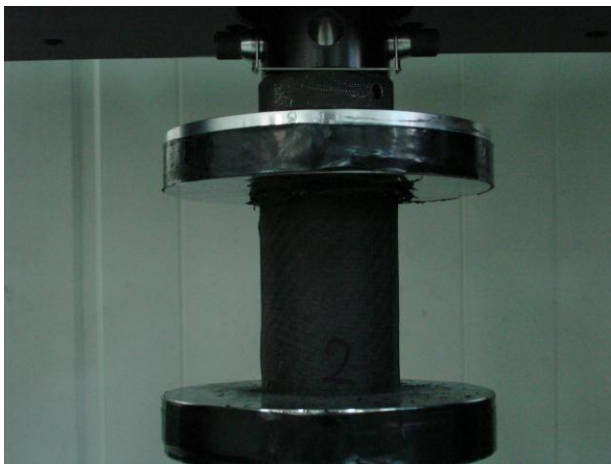
t=0s



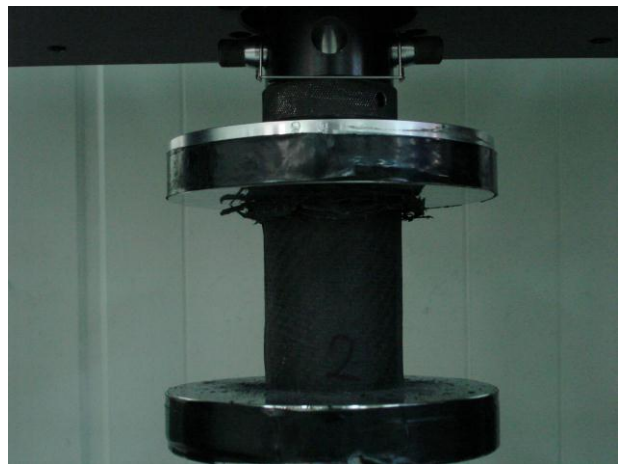
t=15s



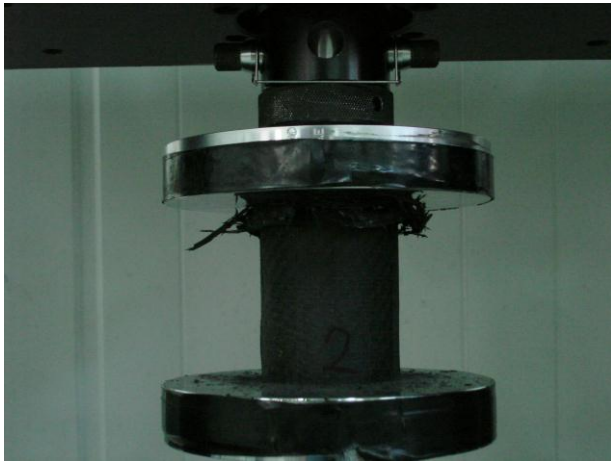
t=30s



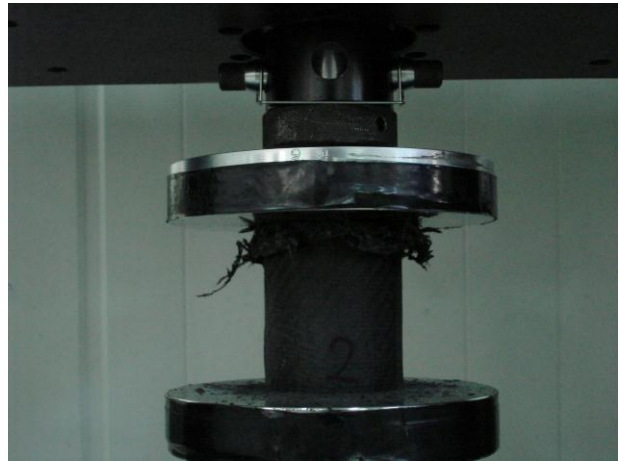
t=45s



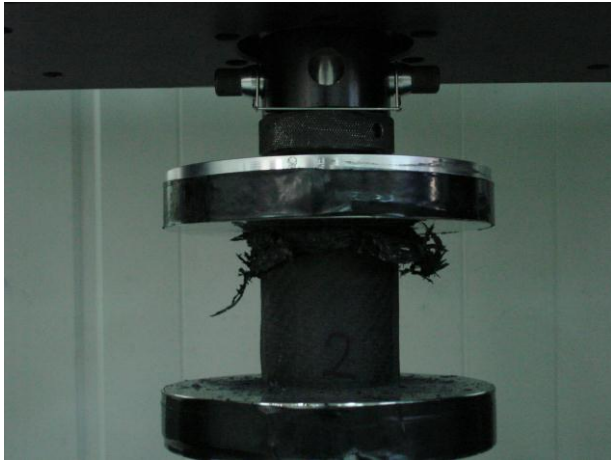
t=60s



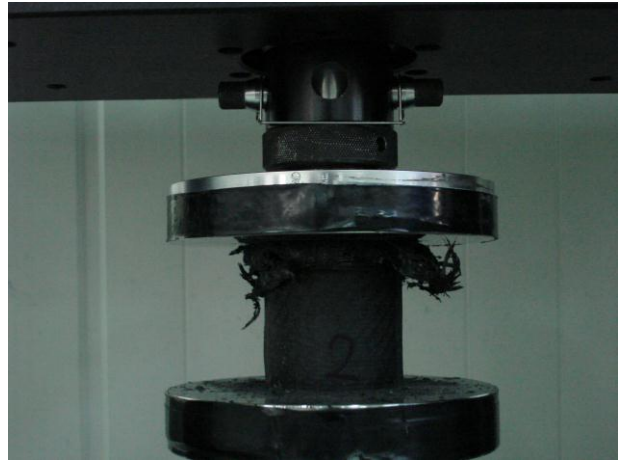
t=75s



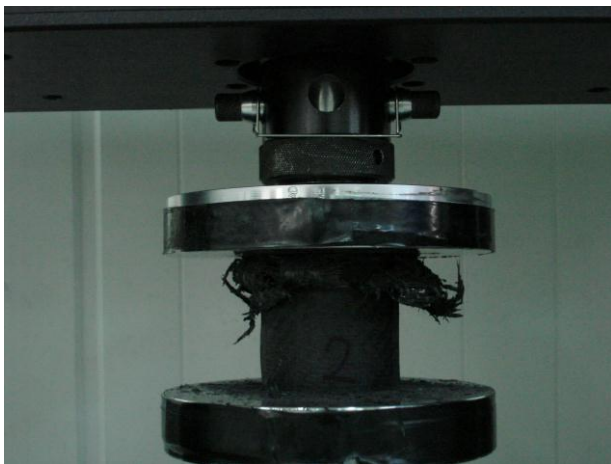
t=90s



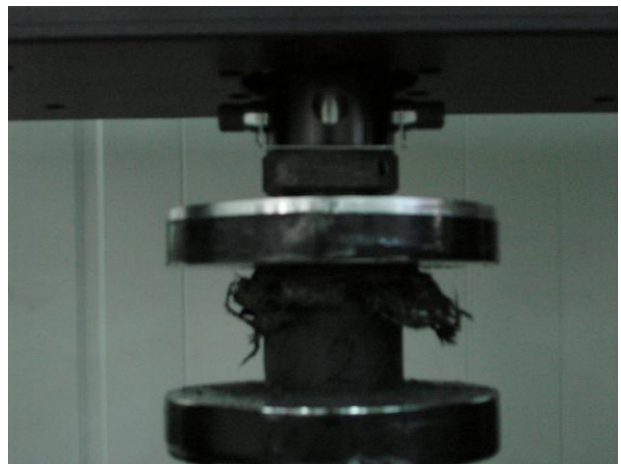
t=105s



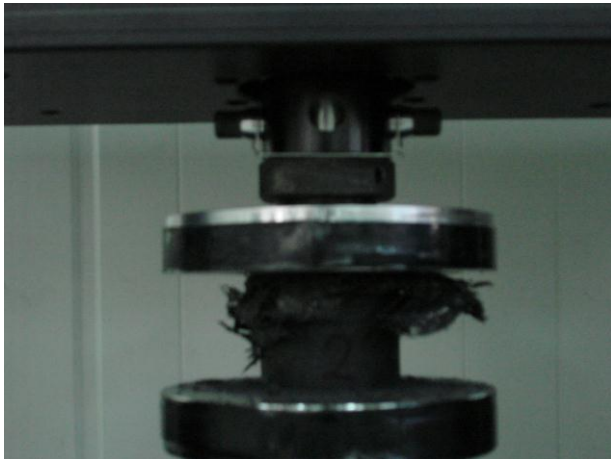
t=120s



t=135s



t=150s



Στη συνέχεια παρατίθενται φωτογραφίες του δοκιμίου 2 μετά την καταστροφική καταπόνηση (η σχεδιασμένη κλίμακα είναι 5cm).

Κάτοψη κάτω πλευράς



Κάτοψη άνω πλευράς

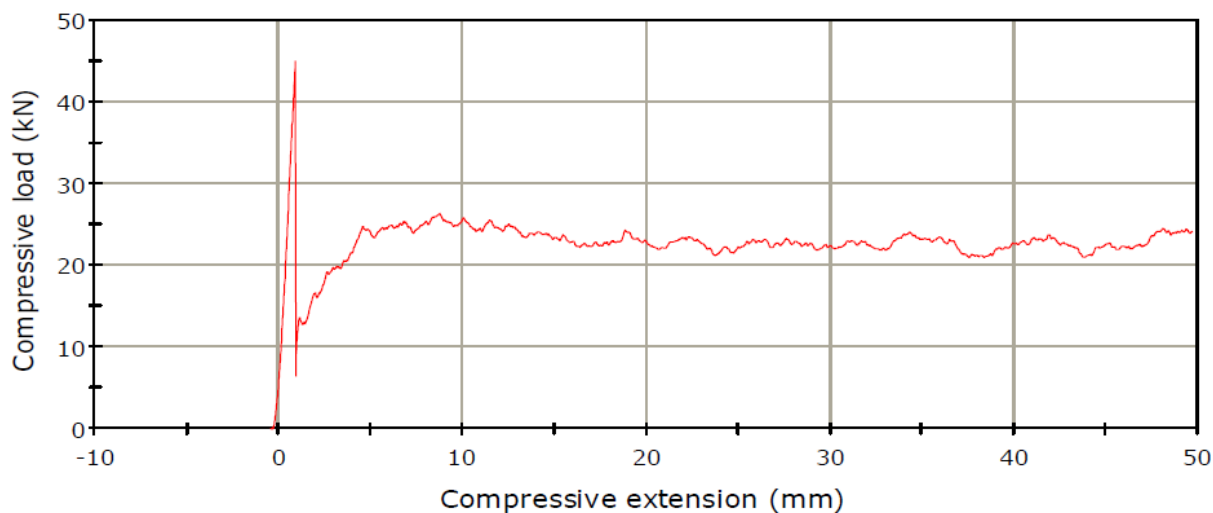


Πλάγια όψη



Γενική όψη





Εικόνα 2.3.2-1 διάγραμμα φορτίου μετατόπισης (δοκίμιο 2)

Σχολιασμός διαδικασίας κατάρρευσης.

- Στην πρώτη φάση της συμπίεσης παρατηρείται μια ραγδαία, σχεδόν γραμμική, αύξηση του φορτίου με μέγιστη τιμή 44,992kN για μετατόπιση περίπου 0,92mm. Εφόσον το δοκίμιο είναι ακέραιο προβάλλει την μέγιστή του αντίδραση στην θλιπτική δύναμη που του εφαρμόζεται.
- Κατόπιν εμφανίζεται τοπικό ελάχιστο και ξεκινά η προοδευτική κατάρρευση του δοκιμίου. Το φορτίο ομαλοποιείται γύρω από την τιμή των 22kN.
- Οι στρώσεις του υλικού αποκολλήθηκαν με τις μισές να υπέστησαν κάμψη προς τα έξω και οι υπόλοιπες προς τα μέσα.

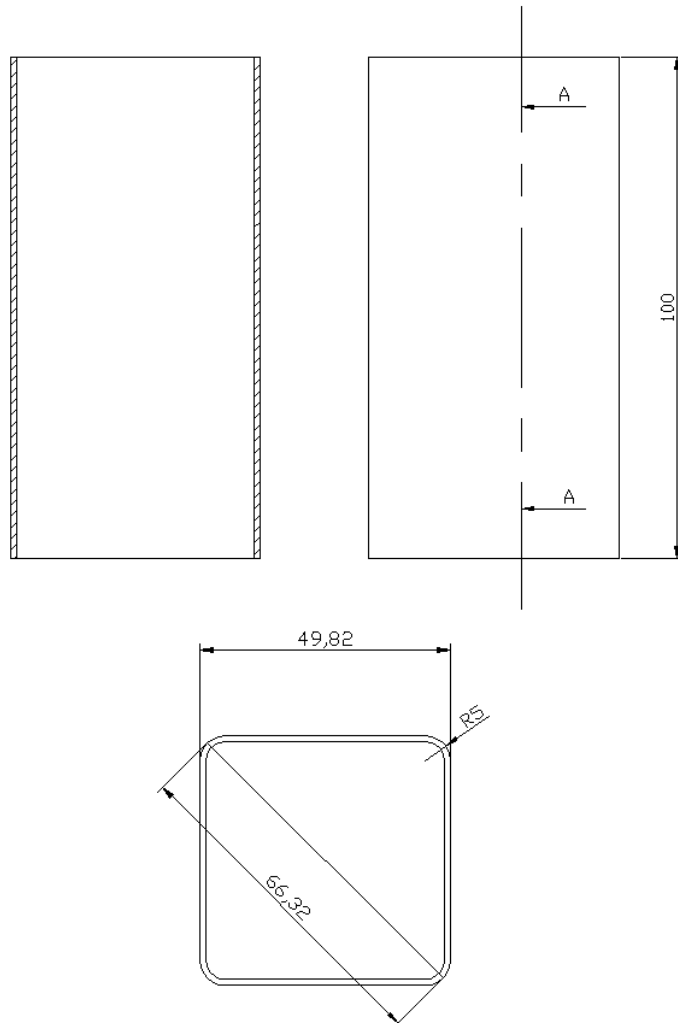
2.3.3 Δοκίμιο 3

Το δοκίμιο υπ' αριθμόν 3 είναι ένας σύνθετος λεπτότοιχος τετραγωνικός σωλήνας. παρακάτω φαίνεται ένα σχέδιο του αρχικού δοκιμίου πριν το πείραμα, με τις διαστάσεις του. Αμέσως μετά παρουσιάζονται διαδοχικές φωτογραφίες από την πορεία της κατάρρευσης οι οποίες λήφθηκαν σε διάφορες φάσεις της διαδικασίας. Ακόμα παρουσιάζεται το διάγραμμα δύναμης- μετατόπισης όπως λήφθηκε από τον ηλεκτρονικό υπολογιστή -μέσω ειδικού προγράμματος- που είναι συνδεδεμένος με την μηχανική πρέσα.

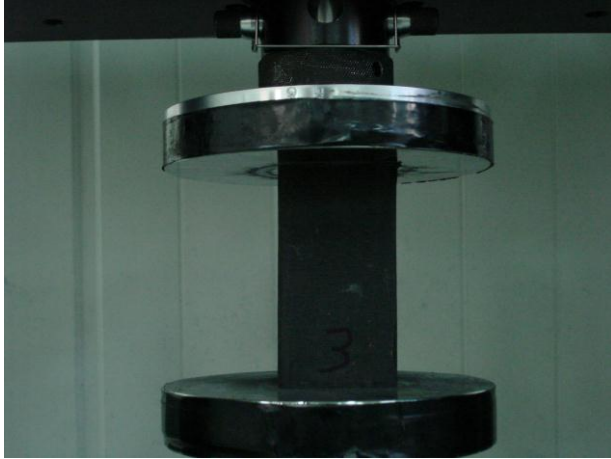
Οι συνθήκες περιβάλλοντος κατά την εκτέλεση του πειράματος ήταν:

Θερμοκρασία: 18° C

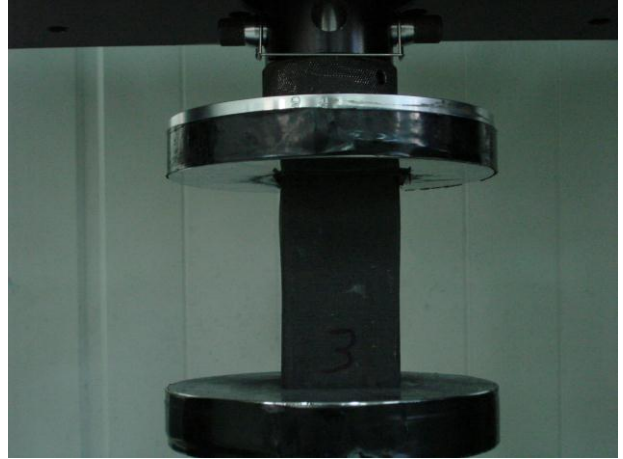
Σχετική υγρασία: 50%



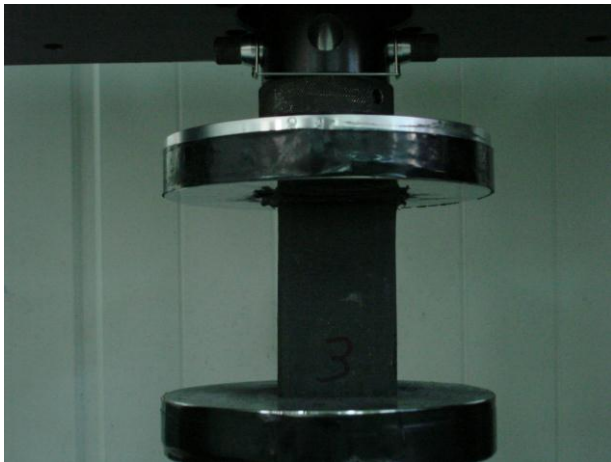
t=0s



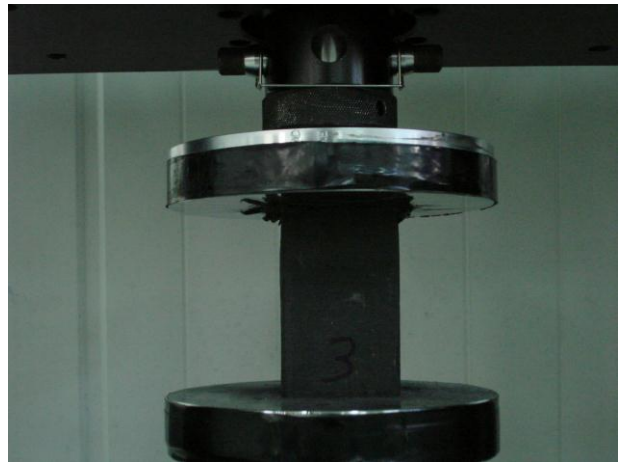
t=15s



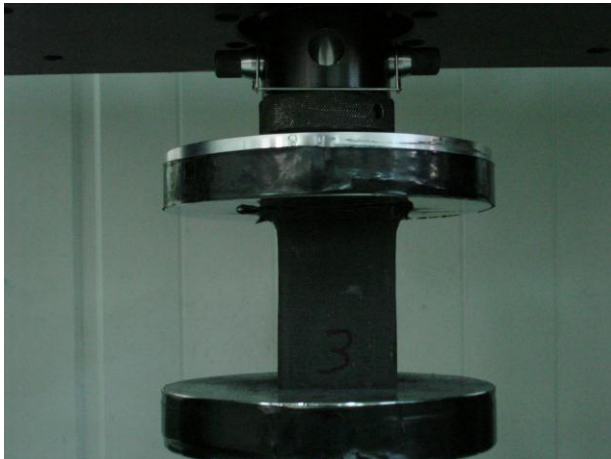
t=30s



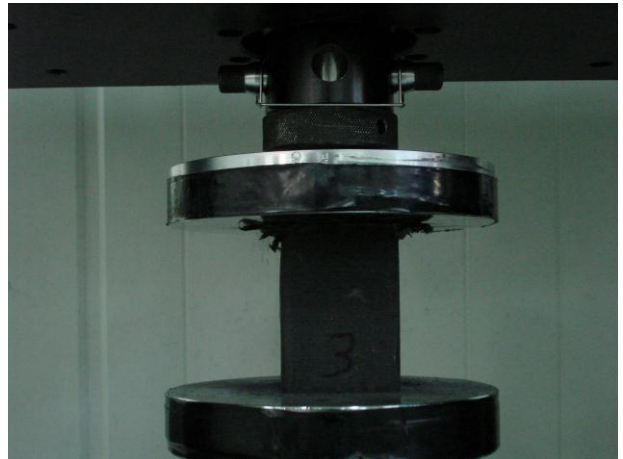
t=45s



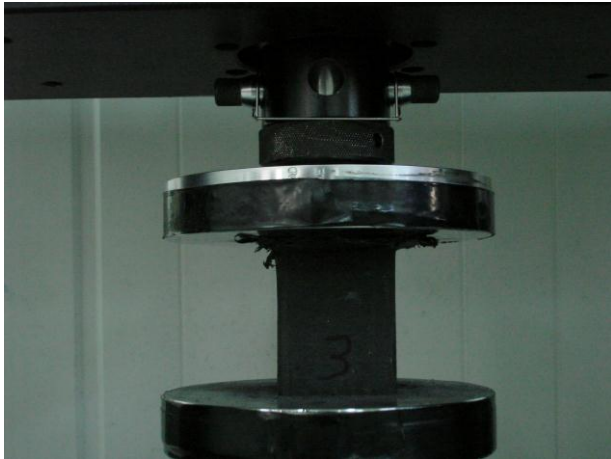
t=60s



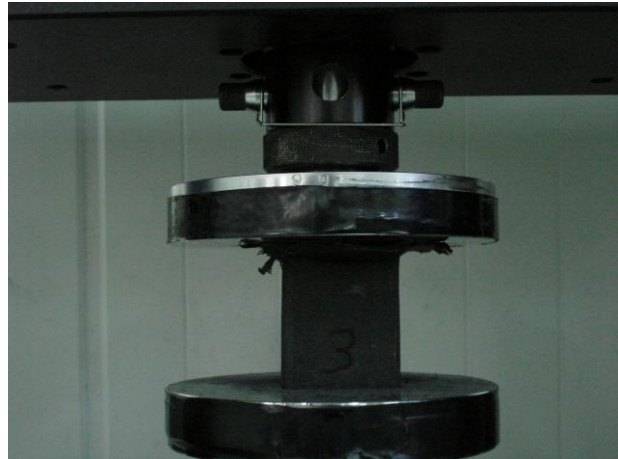
t=75s



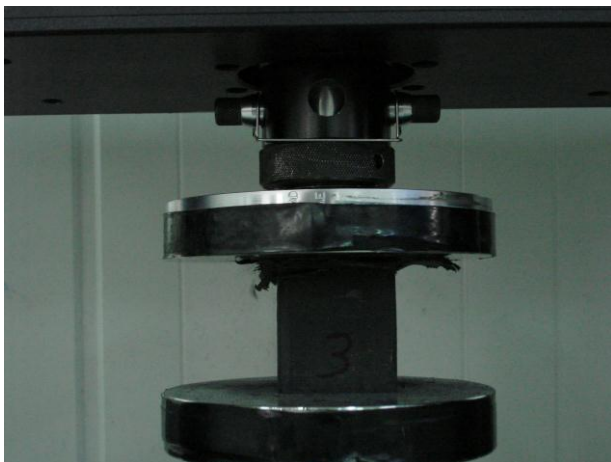
t=90s



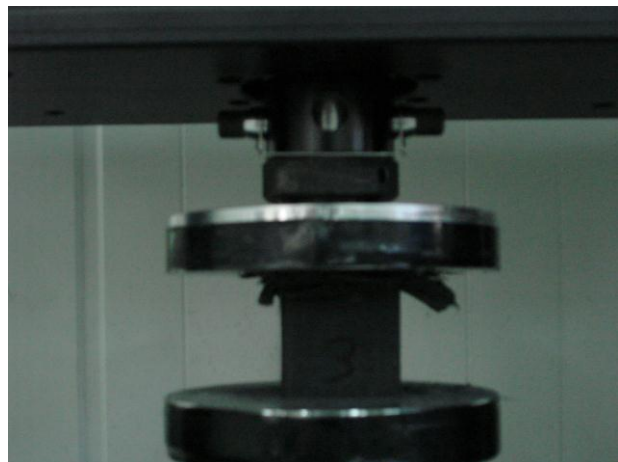
t=105s



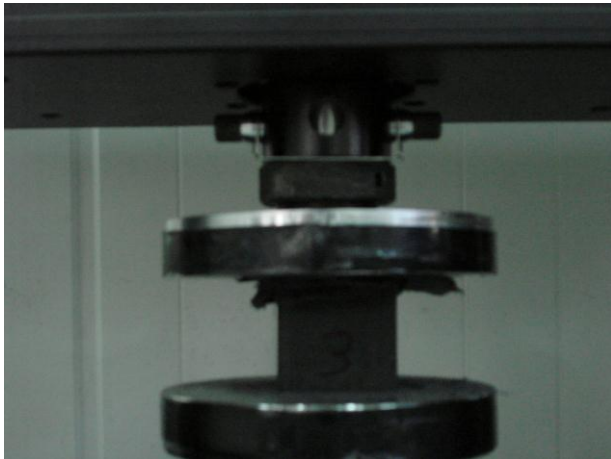
t=120s



t=135s



t=150s

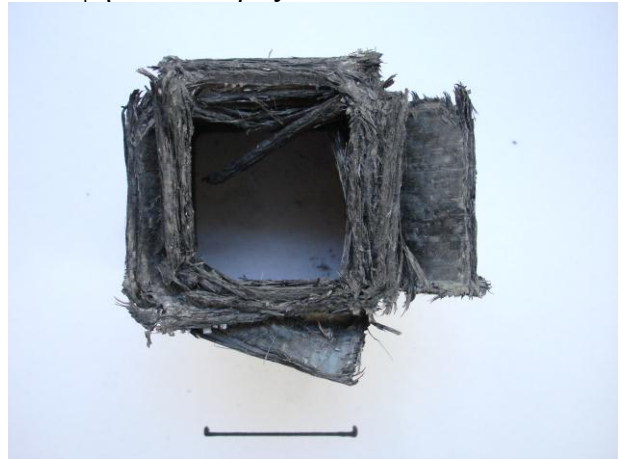


Στη συνέχεια παρατίθενται φωτογραφίες του δοκιμίου 3 μετά την καταστροφική καταπόνηση (η σχεδιασμένη κλίμακα είναι 5cm).

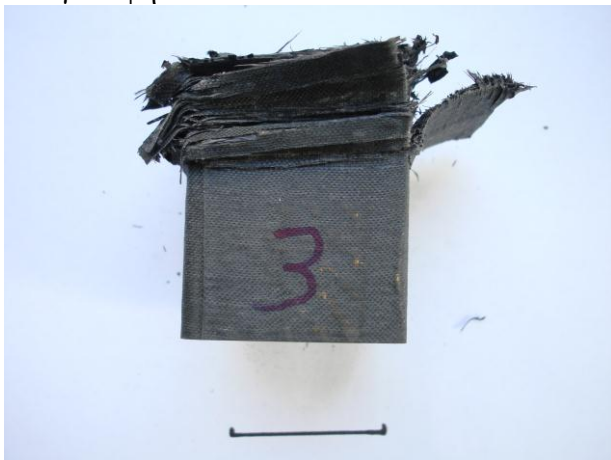
Κάτοψη κάτω πλευράς



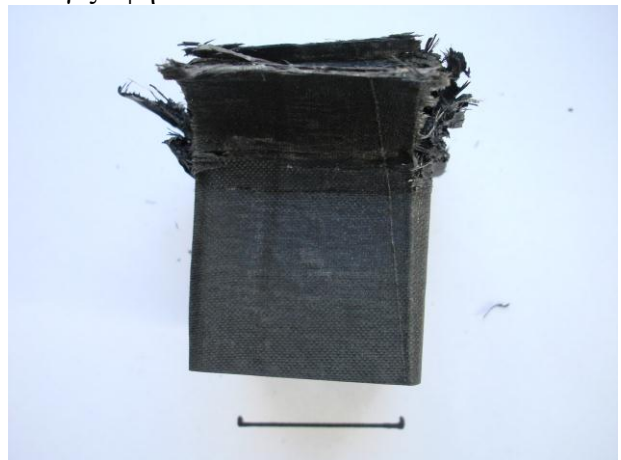
Κάτοψη άνω πλευράς



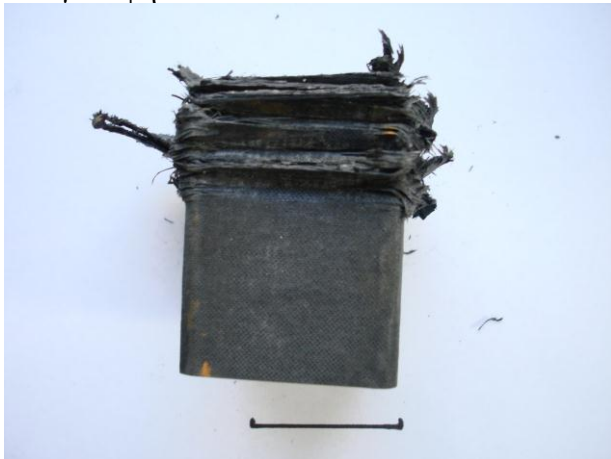
Πλάγια όψη 1



Πλάγια όψη 2



Πλάγια όψη 3

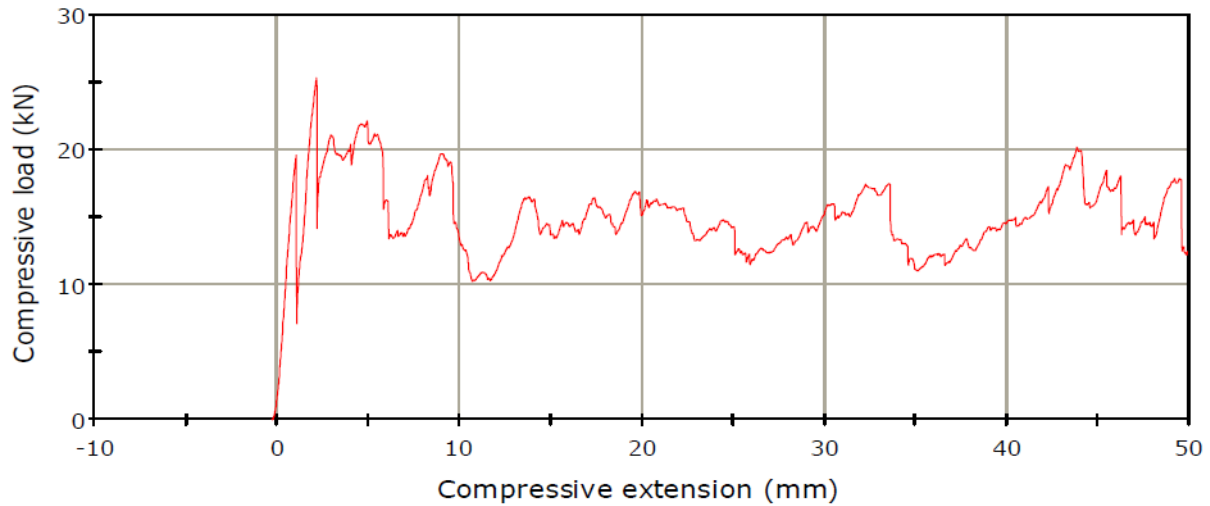


Πλάγια όψη 4



Γενική όψη





Εικόνα 2.3.3-1 διάγραμμα φορτίου μετατόπισης (δοκίμιο 3)

Σχολιασμός διαδικασίας κατάρρευσης.

- Στην πρώτη φάση της συμπίεσης παρατηρείται μια ραγδαία, σχεδόν γραμμική, αύξηση του φορτίου με τοπική μέγιστη τιμή 19,597kN για μετατόπιση περίπου 1,07mm.
- Κατόπιν εμφανίζεται τοπικό ελάχιστο
- Έπειτα παρατηρούμε αύξηση ξανά του φορτίου φτάνοντας τη μέγιστη τιμή του 25,355kN για μετατόπιση 2,15mm
- Στη συνέχεια ξεκινά η προοδευτική κατάρρευση του δοκιμίου. Σε αντίθεση με τα δοκίμια κυκλικής διατομής, εδώ παρατηρούμε αυξομειώσεις στο φορτίο με την εμφάνιση τοπικών μεγίστων και ελαχίστων καθ'
- Ο τρόπος κατάρρευσης του δοκιμίου είναι η προοδευτική δίπλωση
- Το δοκίμιο δεν απορρόφησε πολύ ενέργεια

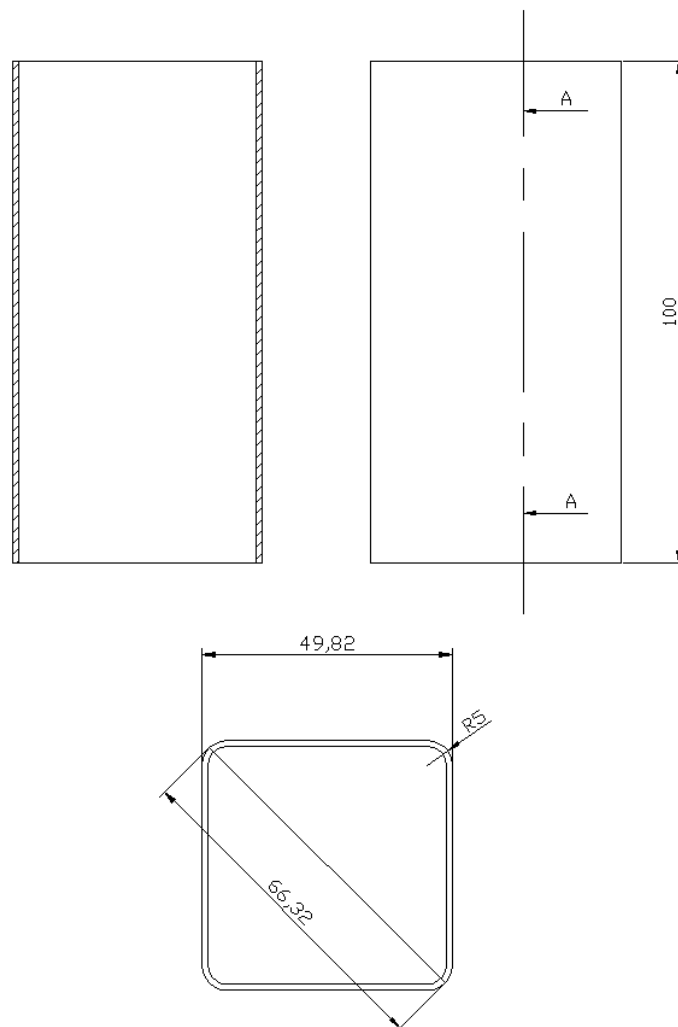
2.3.4 Δοκίμιο 4

Το δοκίμιο υπ' αριθμόν 4 είναι ένας σύνθετος λεπτότοιχος τετραγωνικός σωλήνας. παρακάτω φαίνεται ένα σχέδιο του αρχικού δοκιμίου πριν το πείραμα, με τις διαστάσεις του. Αμέσως μετά παρουσιάζονται διαδοχικές φωτογραφίες από την πορεία της κατάρρευσης οι οποίες λήφθηκαν σε διάφορες φάσεις της διαδικασίας. Ακόμα παρουσιάζεται το διάγραμμα δύναμης- μετατόπισης όπως λήφθηκε από τον ηλεκτρονικό υπολογιστή -μέσω ειδικού προγράμματος- που είναι συνδεδεμένος με την μηχανική πρέσα.

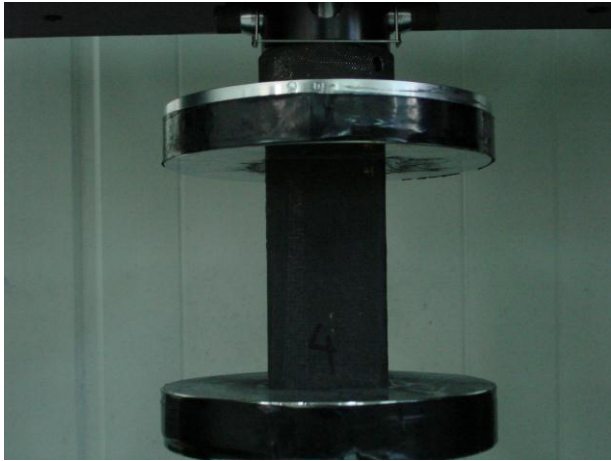
Οι συνθήκες περιβάλλοντος κατά την εκτέλεση του πειράματος ήταν:

Θερμοκρασία: 18° C

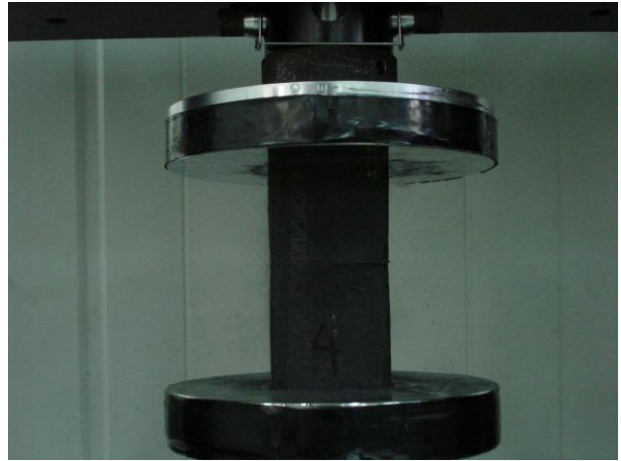
Σχετική υγρασία: 50%



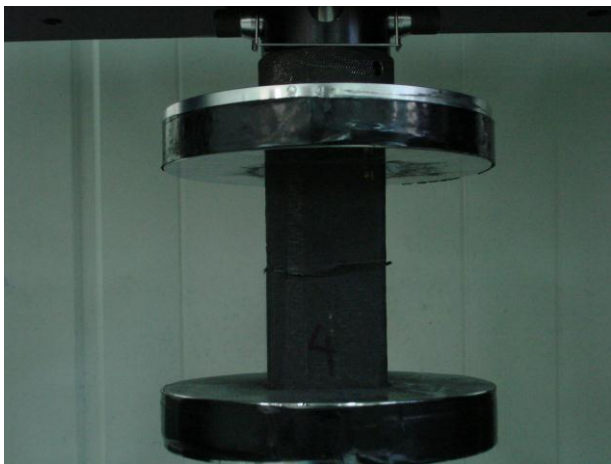
t=0s



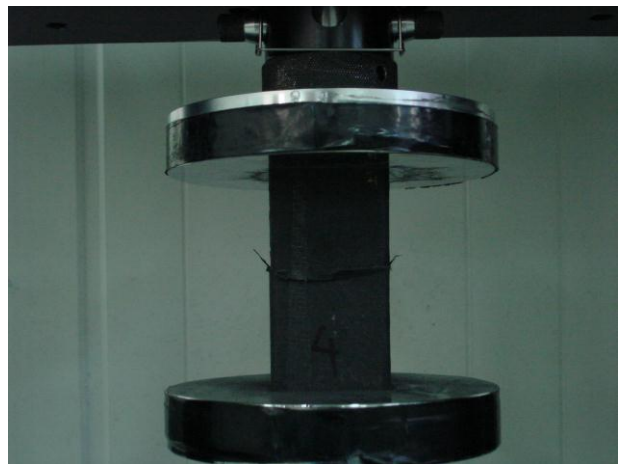
t=3,8s



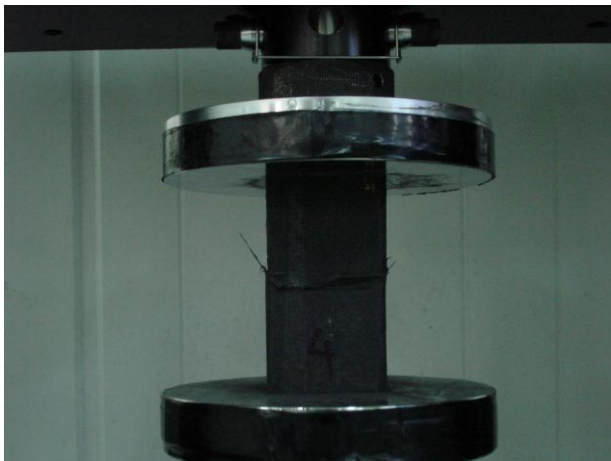
t=6s



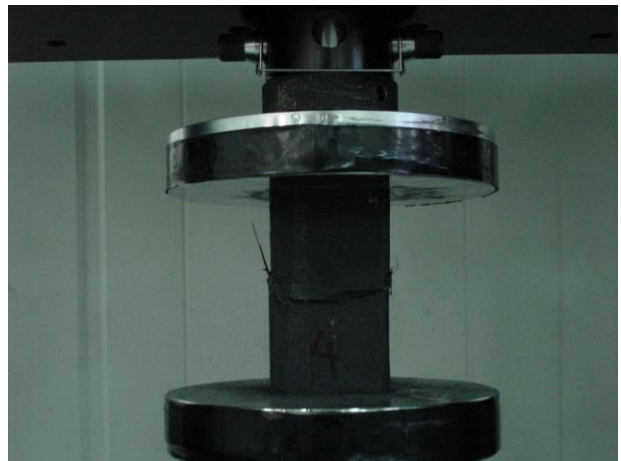
t=10s



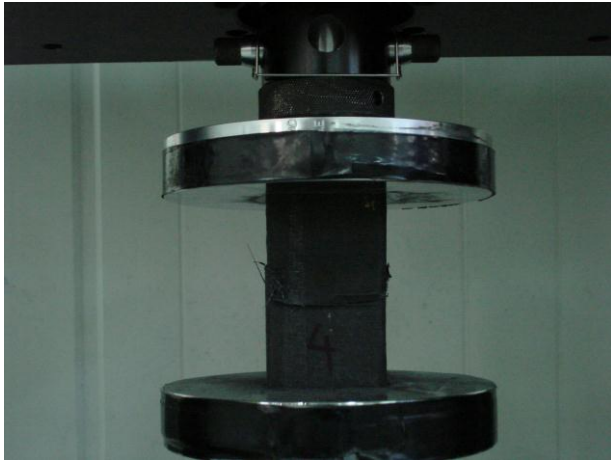
t=15s



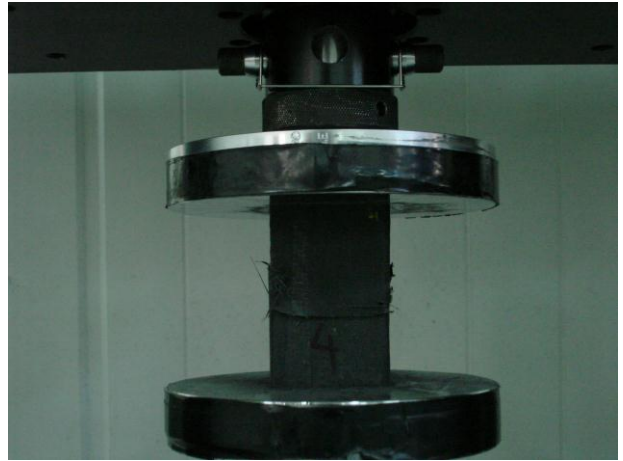
t=30s



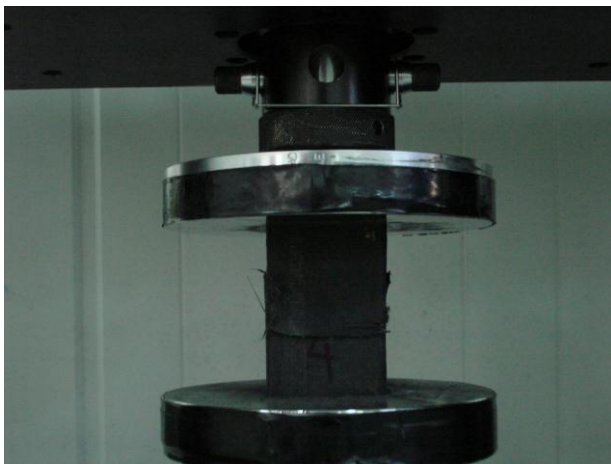
t=45s



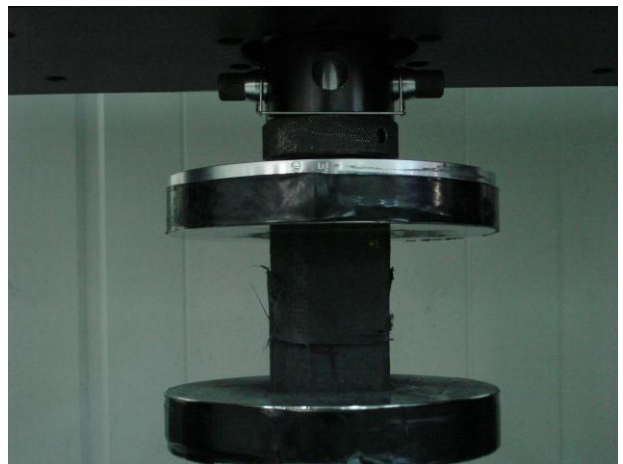
t=60s



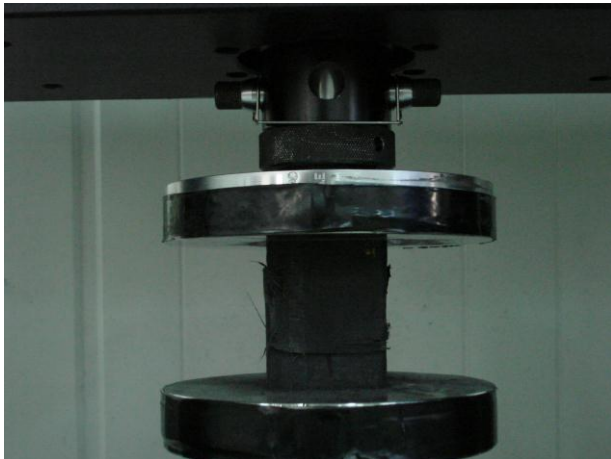
t=75s



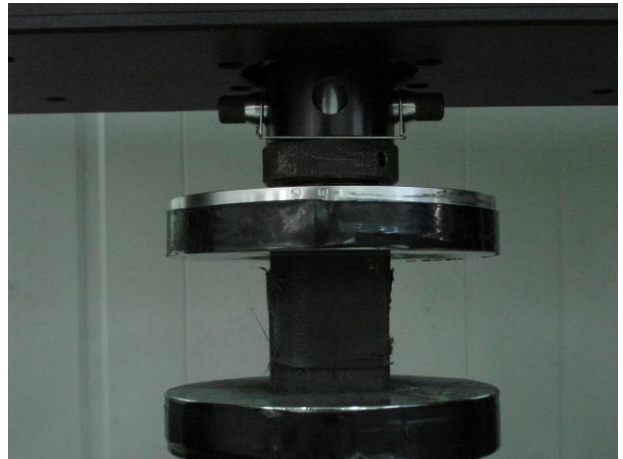
t=90s



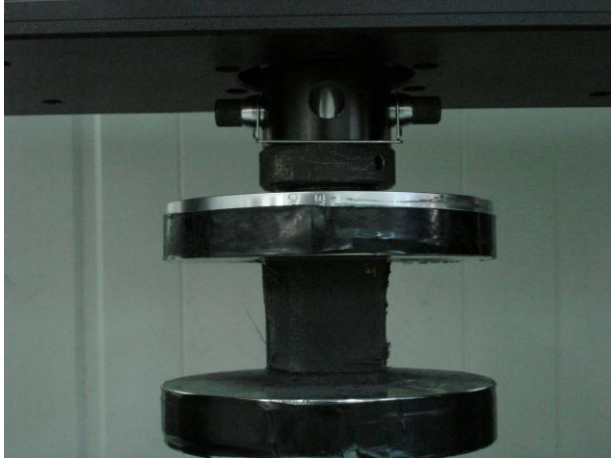
t=105s



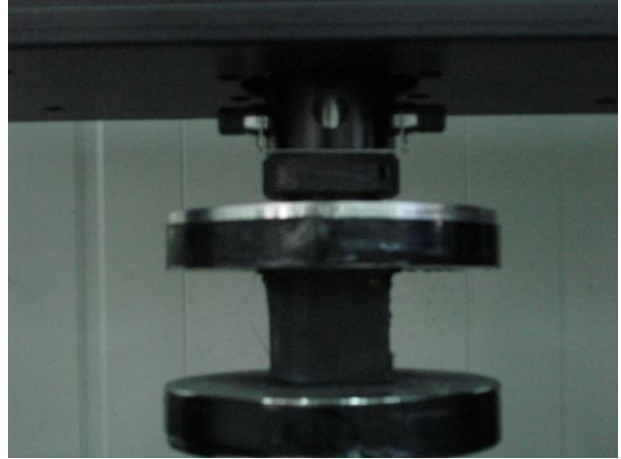
t=120s



t=135s



t=150s



Στη συνέχεια παρατίθενται φωτογραφίες του δοκιμίου 4 μετά την καταστροφική καταπόνηση (η σχεδιασμένη κλίμακα είναι 5cm).

Κάτοψη κάτω πλευράς



Κάτοψη άνω πλευράς

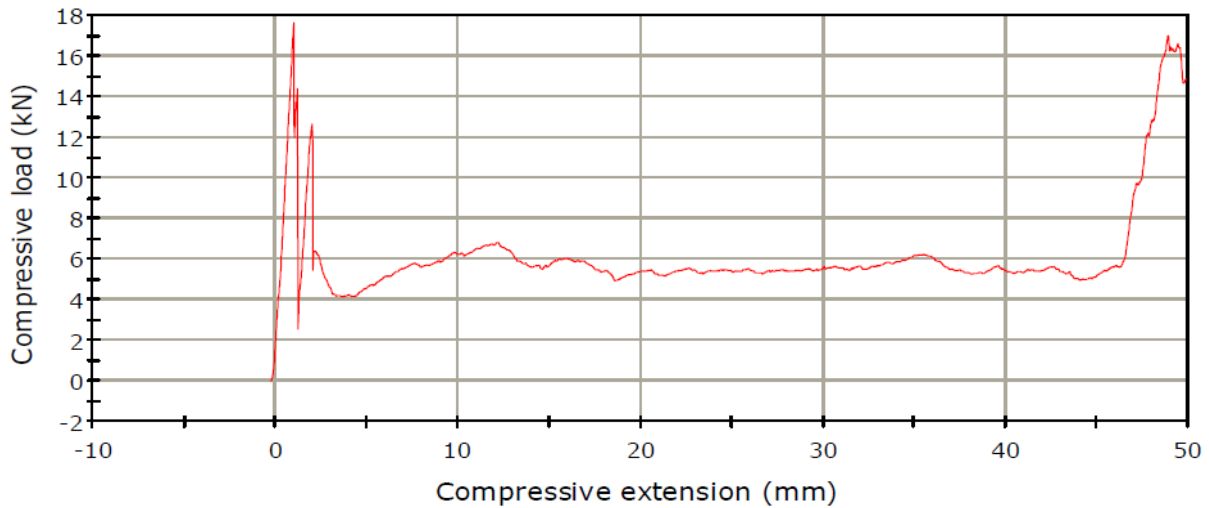


Πλάγια όψη



Γενική όψη





Εικόνα 2.3.4-1 διάγραμμα φορτίου μετατόπισης (δοκίμιο 4)

Σχολιασμός διαδικασίας κατάρρευσης.

- Στην πρώτη φάση της συμπίεσης παρατηρείται μια ταχεία, σχεδόν γραμμική, αύξηση του φορτίου με μέγιστη τιμή 17,626kN για μετατόπιση περίπου 1,02mm. Αυτό είναι αναμενόμενο διότι το δοκίμιο είναι ακέραιο και ανθίσταται στη δύναμη της πρέσας.
- Έπειτα από 1,25mm αξονικής παραμόρφωσης εμφανίζεται περιφερειακή ρωγμή στο δοκίμιο στο μέσο του ύψους του.
- Το κάτω τμήμα του δοκιμίου εισχωρεί στο άνω με αποτέλεσμα να δημιουργείται αξονική αντίσταση λόγω της τριβής και το φορτίο να διατηρείται στα 5,5kN περίπου.
- Το άνω τμήμα του δοκιμίου στη συνέχεια συναντά την κάτω πλάκα της πρέσας και έτσι παρατηρείται μια ραγδαία αύξηση του φορτίου μέχρι την τιμή των 17,009kN.

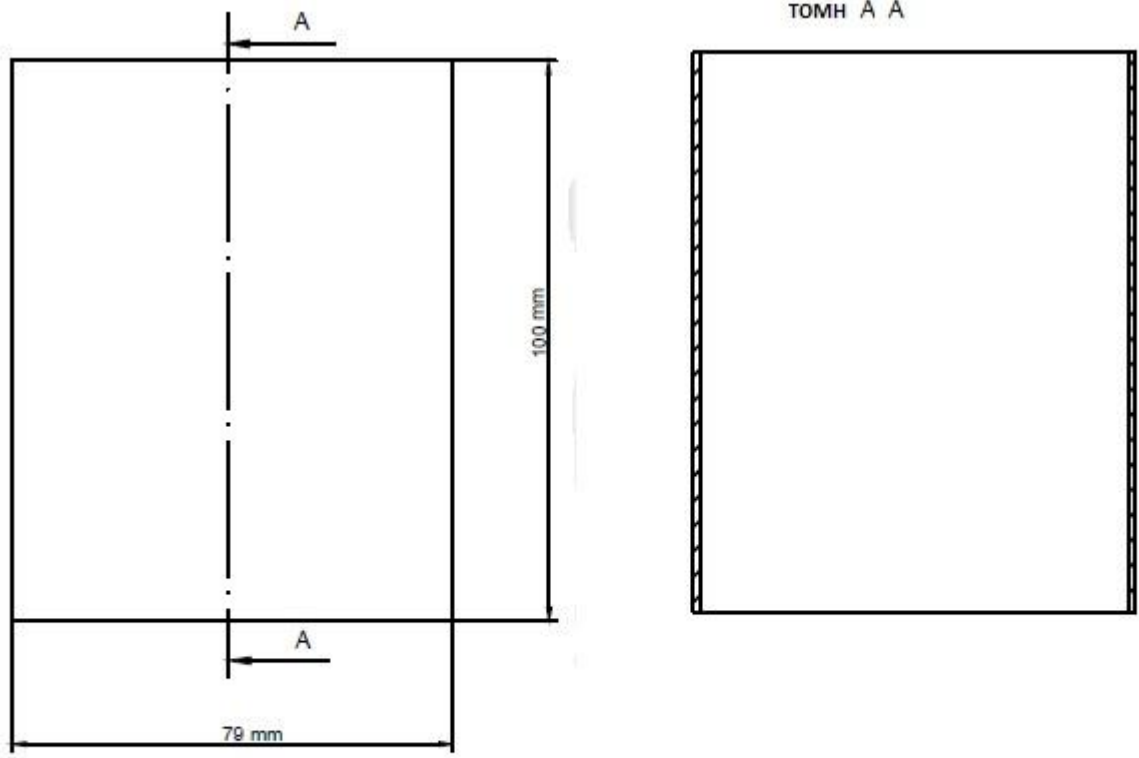
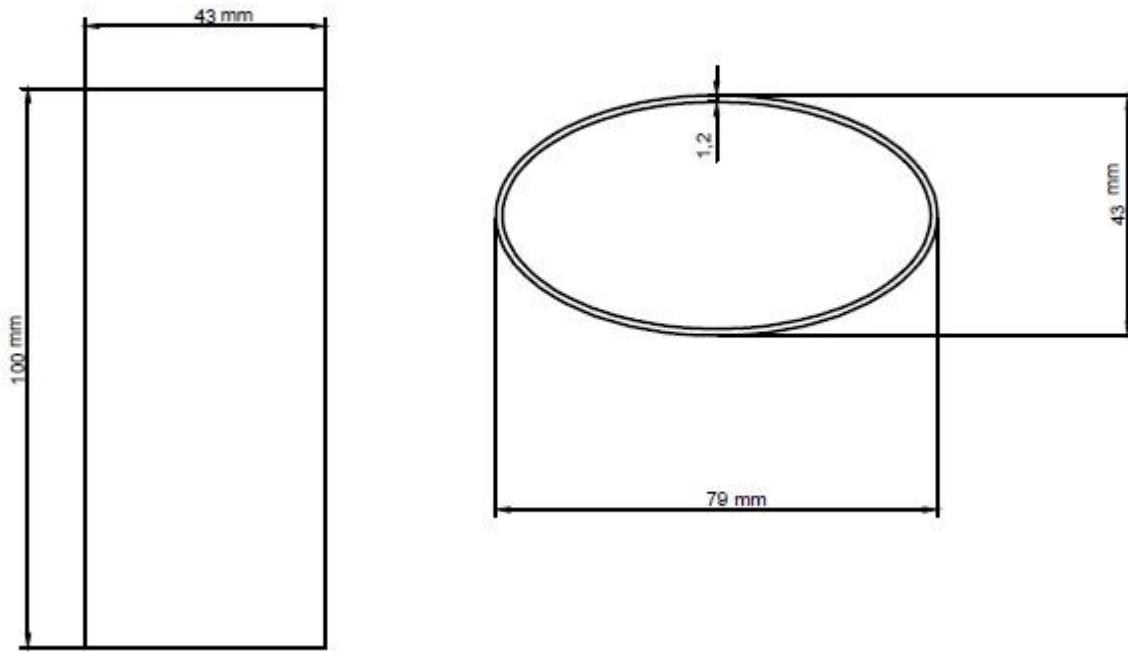
2.3.5 Δοκίμιο 5

Το δοκίμιο υπ' αριθμόν 5 είναι ένας σύνθετος λεπτότοιχος ελλειπτικός σωλήνας., παρακάτω φαίνεται ένα σχέδιο του αρχικού δοκιμίου πριν το πείραμα, με τις διαστάσεις του. Αμέσως μετά παρουσιάζονται διαδοχικές φωτογραφίες από την πορεία της κατάρρευσης οι οποίες λήφθηκαν σε διάφορες φάσεις της διαδικασίας. Ακόμα παρουσιάζεται το διάγραμμα δύναμης- μετατόπισης όπως λήφθηκε από τον ηλεκτρονικό υπολογιστή -μέσω ειδικού προγράμματος- που είναι συνδεδεμένος με την μηχανική πρέσα.

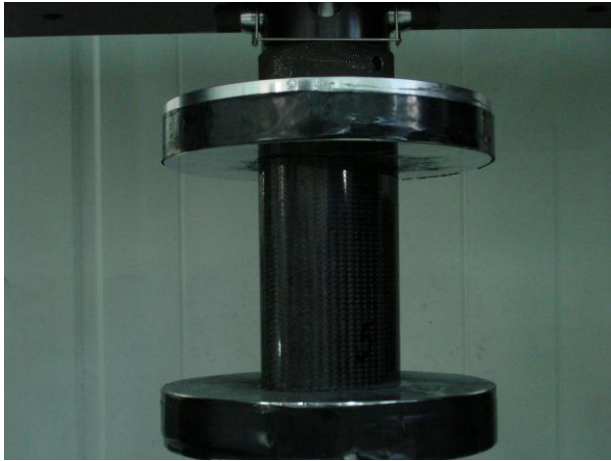
Οι συνθήκες περιβάλλοντος κατά την εκτέλεση του πειράματος ήταν:

Θερμοκρασία: 18° C

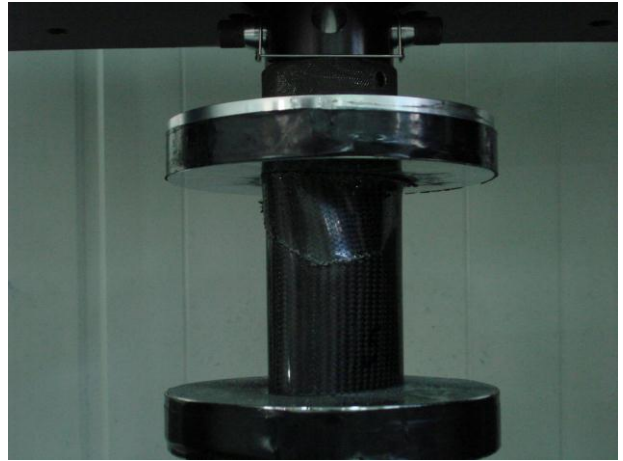
Σχετική υγρασία: 50%



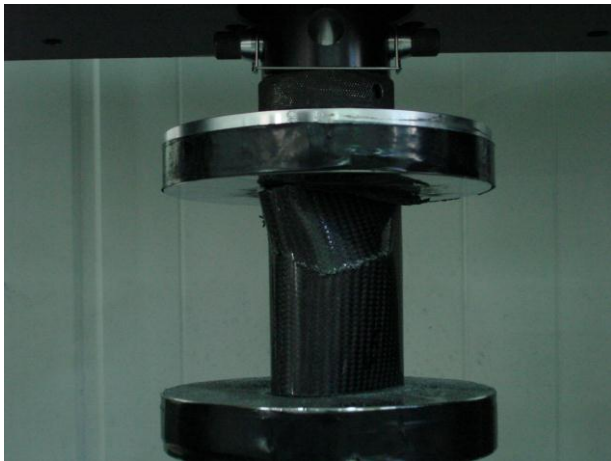
t=0s



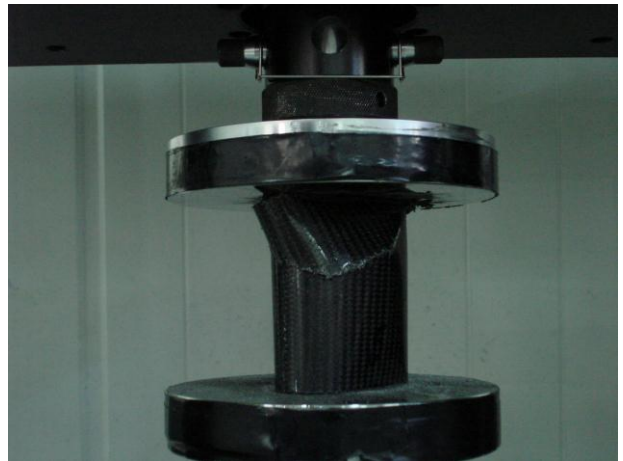
t=15s



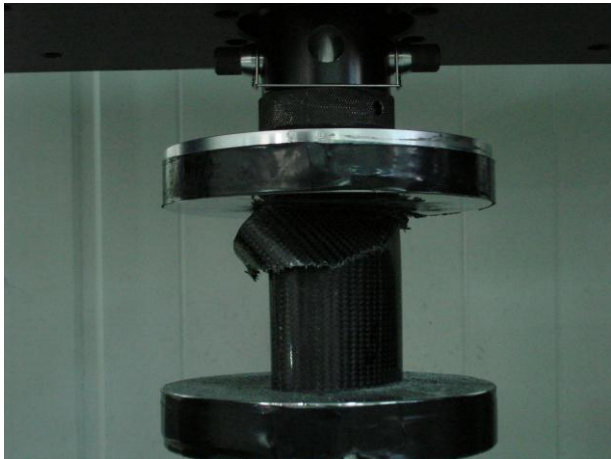
t=30s



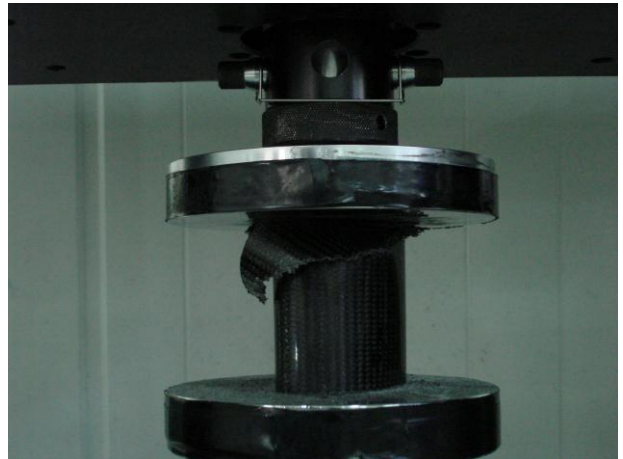
t=45s



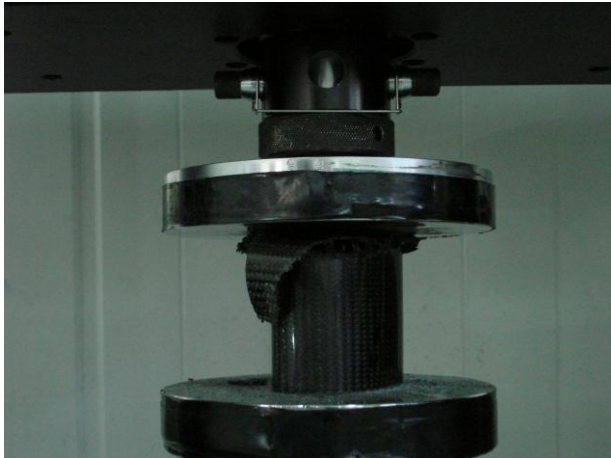
t=60s



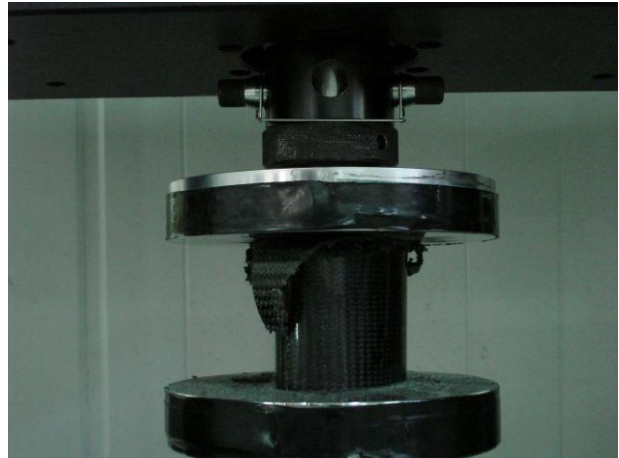
t=75s



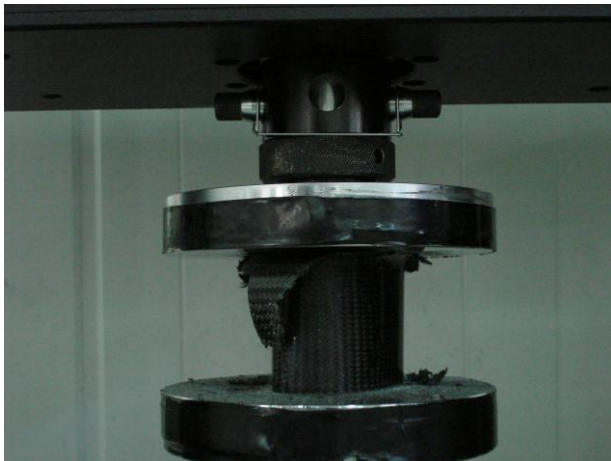
t=90s



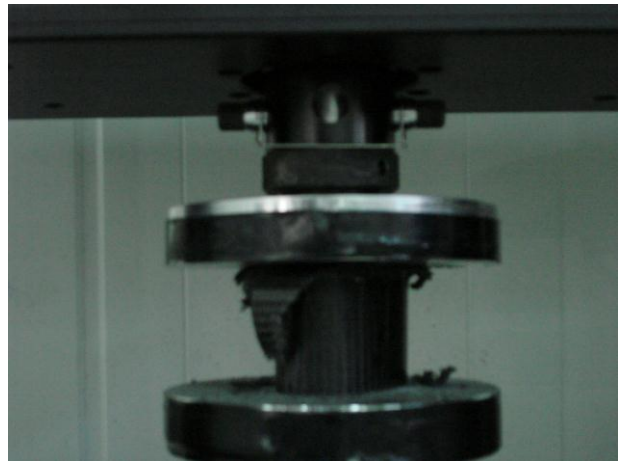
t=105s



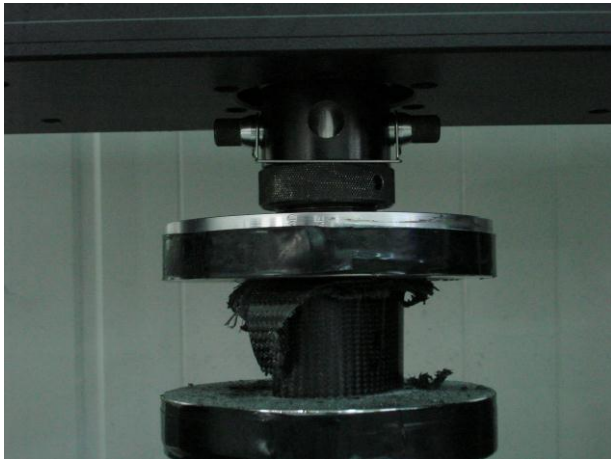
t=120s



t=135s



t=150s



Στη συνέχεια παρατίθενται φωτογραφίες του δοκιμίου 5 μετά την καταστροφική καταπόνηση (η σχεδιασμένη κλίμακα είναι 5cm).

Κάτοψη κάτω πλευράς



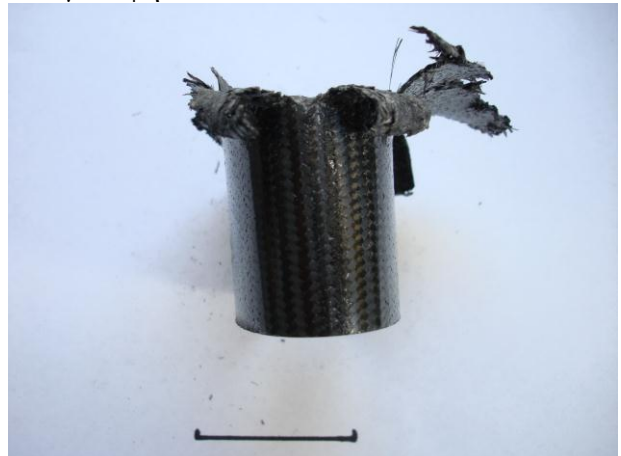
Κάτοψη άνω πλευράς



Πλάγια όψη 1



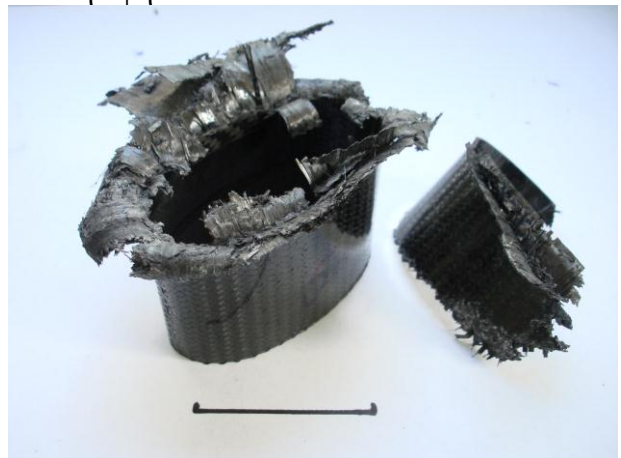
Πλάγια όψη 2

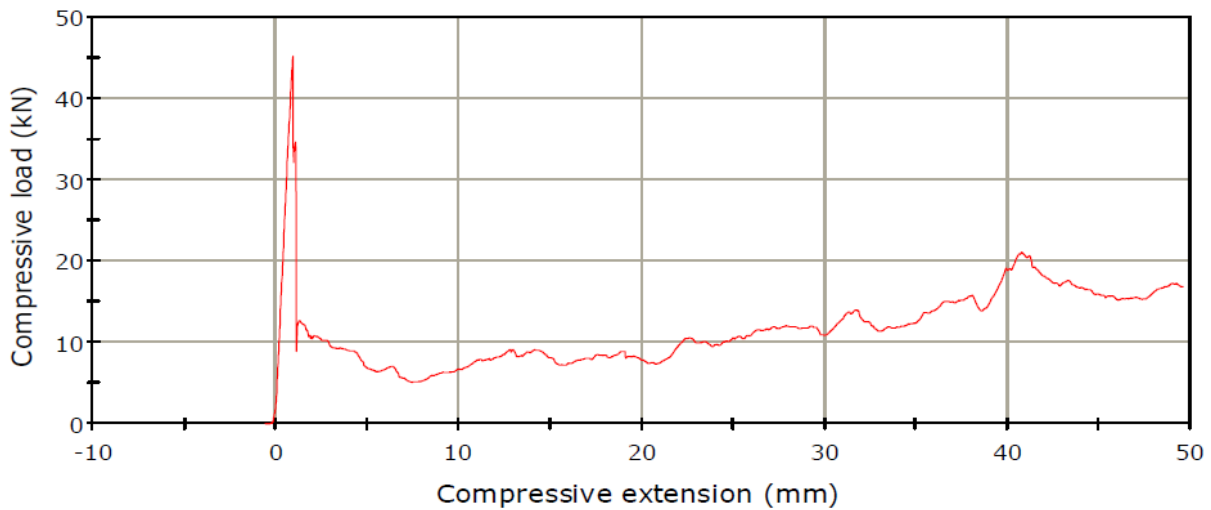


Πλάγια όψη 3



Γενική όψη





Εικόνα 2.3.5-1 διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης (δοκίμιο 5)

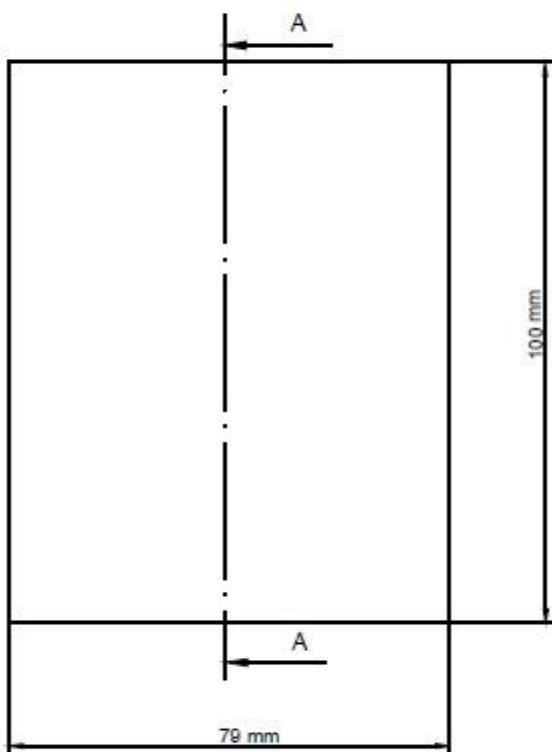
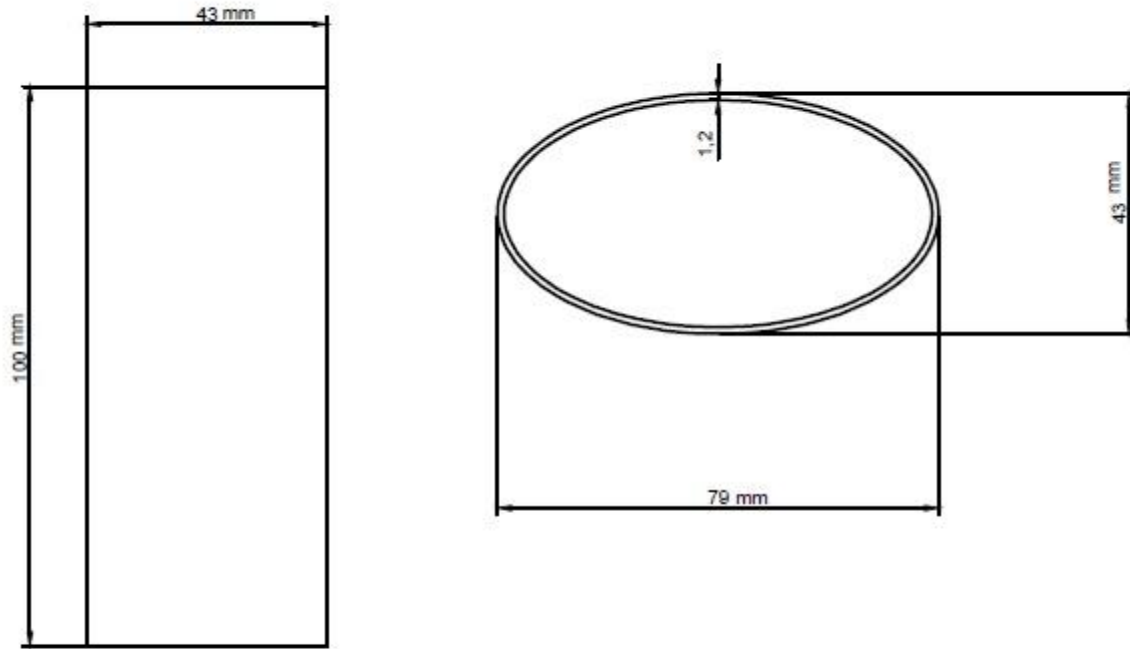
Σχολιασμός διαδικασίας κατάρρευσης.

- Στην πρώτη φάση της συμπίεσης παρατηρείται μια ταχεία, σχεδόν γραμμική, αύξηση του φορτίου με μέγιστη τιμή 45,220kN για μετατόπιση περίπου 0,94mm. Αυτό είναι αναμενόμενο διότι το δοκίμιο είναι ακέραιο και ανθίσταται στη δύναμη της πρέσας.
- Έπειτα επήλθε ρωγμή στη μισή περίμετρο του δοκιμίου λίγο πάνω από το μέσο του ύψους του.
- Παρατηρήθηκε αποκόλληση στο σημείο που παρατηρήθηκε η ρωγμή.
- Οι στρώσεις του υλικού αποκολλήθηκαν και υπέστησαν κάμψη προς τα έξω.

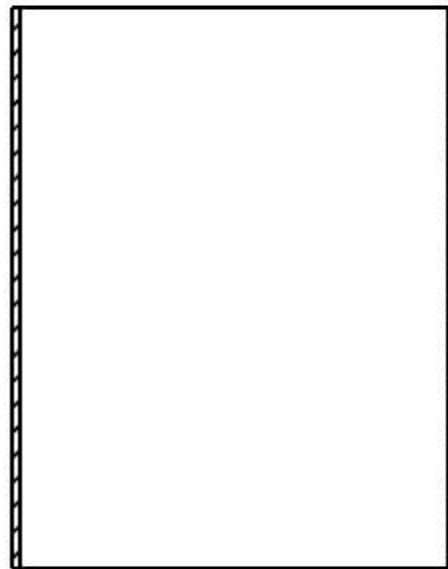
2.3.6 Δοκίμιο 6

Το δοκίμιο υπ' αριθμόν 6¹⁰ είναι ένας σύνθετος λεπτότοιχος ελλειπτικός σωλήνας. Παρακάτω φαίνεται ένα σχέδιο του αρχικού δοκιμίου πριν το πείραμα, με τις διαστάσεις του. Αμέσως μετά παρουσιάζονται το διάγραμμα δύναμης- μετατόπισης και διάφορες όψεις του δοκιμίου (η σχεδιασμένη κλίμακα είναι 5cm).

¹⁰ Η πειραματική διαδικασία πάνω σε αυτό το δοκίμιο έγινε σε προηγούμενη έρευνα και εδώ παρουσιάζονται τα αποτελέσματα όπως λήφθηκαν από την έρευνα εκείνη.



ΤΟΜΗ Α Α



Κάτοψη κάτω πλευράς



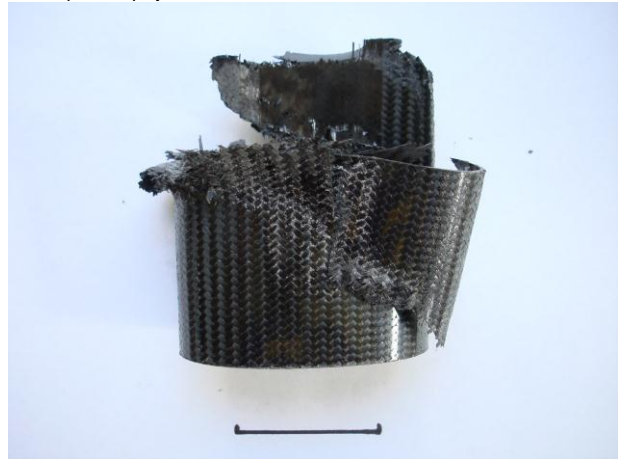
Κάτοψη άνω πλευράς



Πλάγια όψη 1

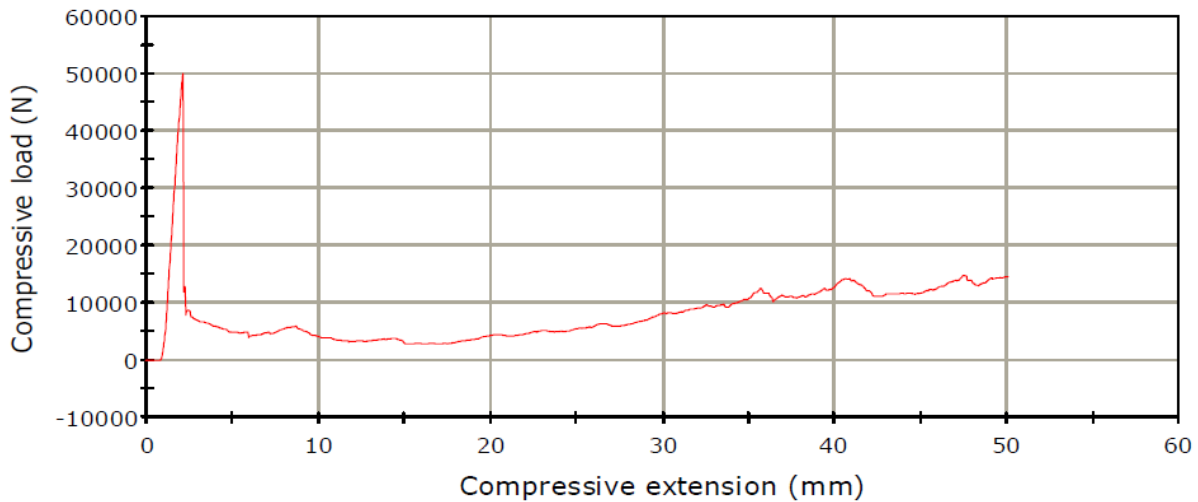


Πλάγια όψη 2



Γενική όψη





Εικόνα 2.3.6-1 διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης (δοκίμιο 6)

Σχολιασμός διαδικασίας κατάρρευσης.

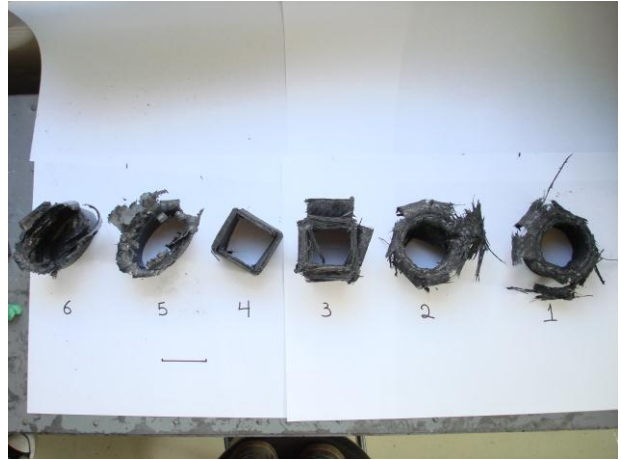
- Στην πρώτη φάση της συμπίεσης παρατηρείται μια ταχεία, σχεδόν γραμμική, αύξηση του φορτίου με μέγιστη τιμή 50kN για μετατόπιση περίπου 1,02 mm. Αυτό είναι αναμενόμενο διότι το δοκίμιο είναι ακέραιο και ανθίσταται στη δύναμη της πρέσας.
- Έπειτα εμφανίζονται δύο ρωγμές περιφερειακά του δοκιμίου στο μέσο του ύψους του περίπου.
- Παρατηρήθηκε αποκόλληση στο σημείο που παρατηρήθηκαν οι ρωγμές.
- Οι στρώσεις του υλικού αποκολλήθηκαν και υπέστησαν κάμψη προς τα έξω.
- Ύστερα παρατηρούμε ότι το φορτίο σταθεροποιείται γύρω από τα 5kN.

Παρακάτω φαίνονται διάφορες όψεις όλων των δοκιμίων μαζί:

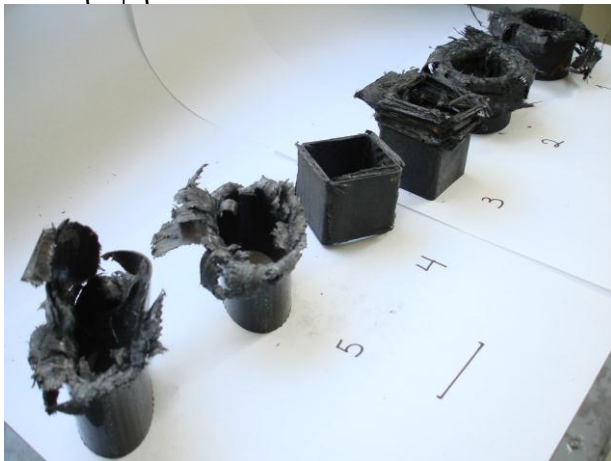
Πρόοψη



Κάτοψη



Γενική όψη

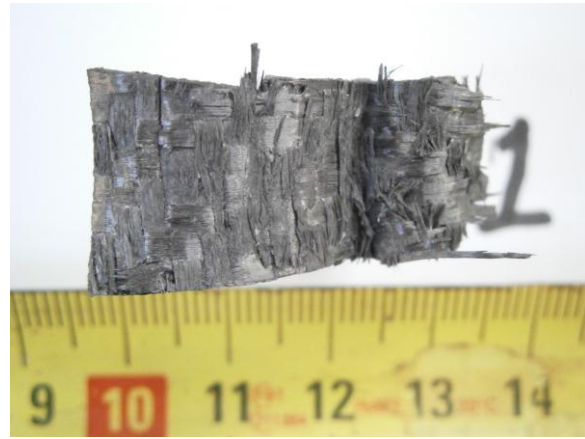


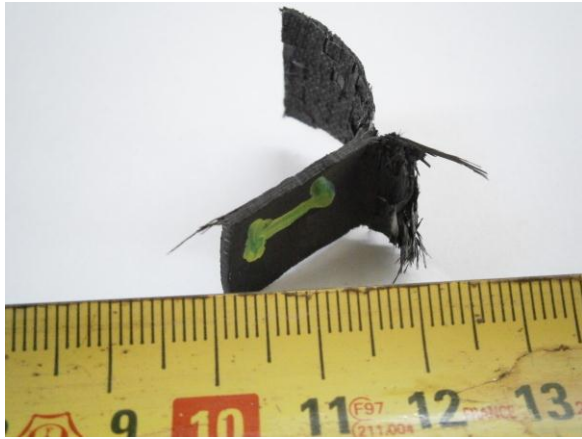
2.4 Μικρογραφική ανάλυση

2.4.1 Διαδικασία και προετοιμασία των δοκιμών

Τα δοκίμια που ελήφθησαν από την παραπάνω διαδικασία, κόπηκαν σε διάφορες τομές όπως φαίνεται στις παρακάτω φωτογραφίες.

Δοκίμιο 1





Δοκίμιο 2



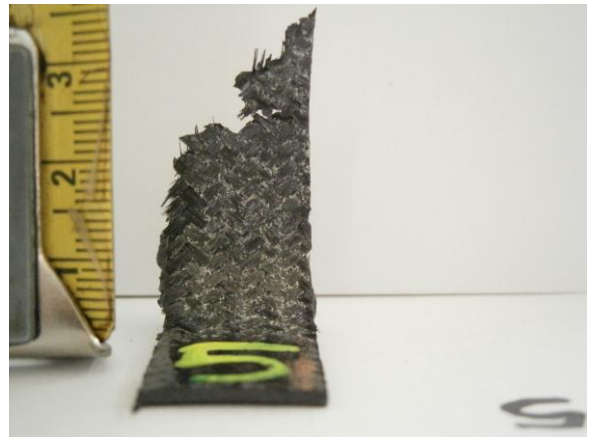


Δοκίμιο 3

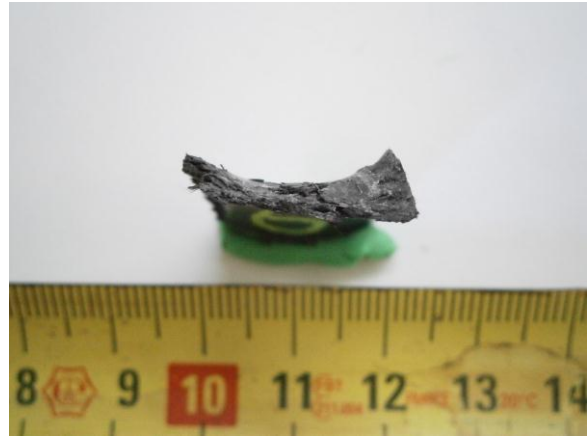


Το δοκίμιο 4 δεν κρίθηκε σκόπιμο να μελετηθεί μικρογραφικά λόγω του τρόπου κατάρρευσης

Δοκίμιο 5



Δοκίμιο 6



Στην συνέχεια τοποθετήθηκαν σε καλούπια, όπου και σταθεροποιήθηκαν με τη βοήθεια ρητίνης ψυχρού πολυμερισμού. Εν συνεχεία κόπηκαν σε τόρνο κατά 1mm ώστε να αποβάλλουμε τα σημεία στα οποία έχει εισχωρήσει η ρητίνη ψυχρού πολυμερισμού. Ακολούθησε η λείανση των δοκιμίων που έγινε σε 4 στάδια, σε ειδική μηχανή λείανσης (εικόνα 2.4.1-1) τύπου STRUERS (DAP-V, Pendemin-2) με την βοήθεια σειράς από γυαλόχαρτα (500, 800, 1200 και 2400). Με τον τρόπο αυτό καθίσταται δυνατό να παρατηρήσουμε στο μικροσκόπιο (εικόνα 2.4.1-2) τις ατέλειες που προέκυψαν μετά την κατάρρευση κάθε δοκιμίου.



Εικόνα 2.4.1-1 Λειαντική μηχανή



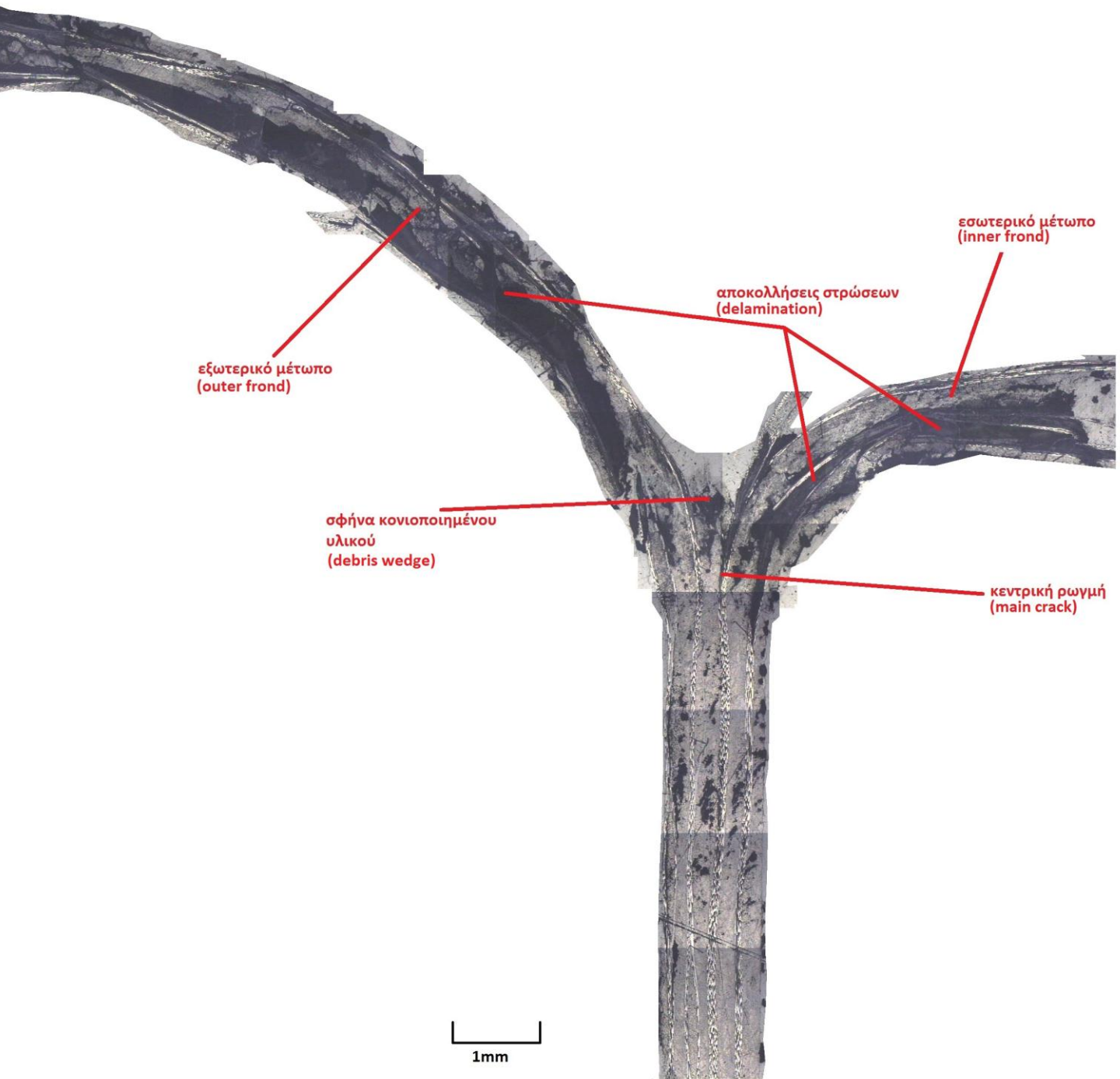
Εικόνα 2.4.1-2 Μικροσκόπιο

2.4.2 Παρατήρηση σε μικροσκόπιο

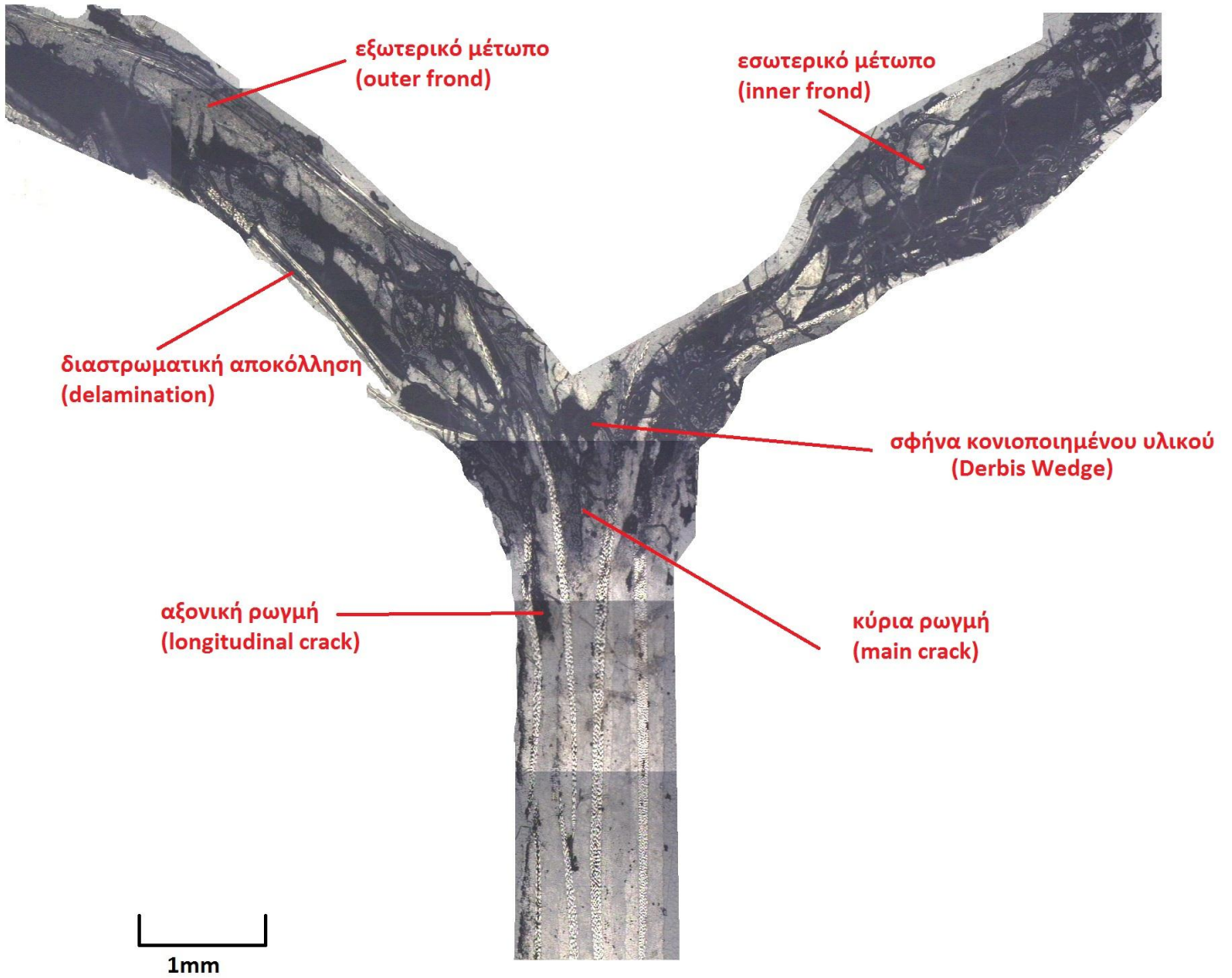
Στη συνέχεια παρατίθενται οι εικόνες που προέκυψαν από το μικροσκόπιο¹¹ για κάθε δοκίμιο, με επισήμανση των ατελειών που παρατηρήθηκαν.

¹¹ Χρησιμοποιήθηκε μεγέθυνση x5.

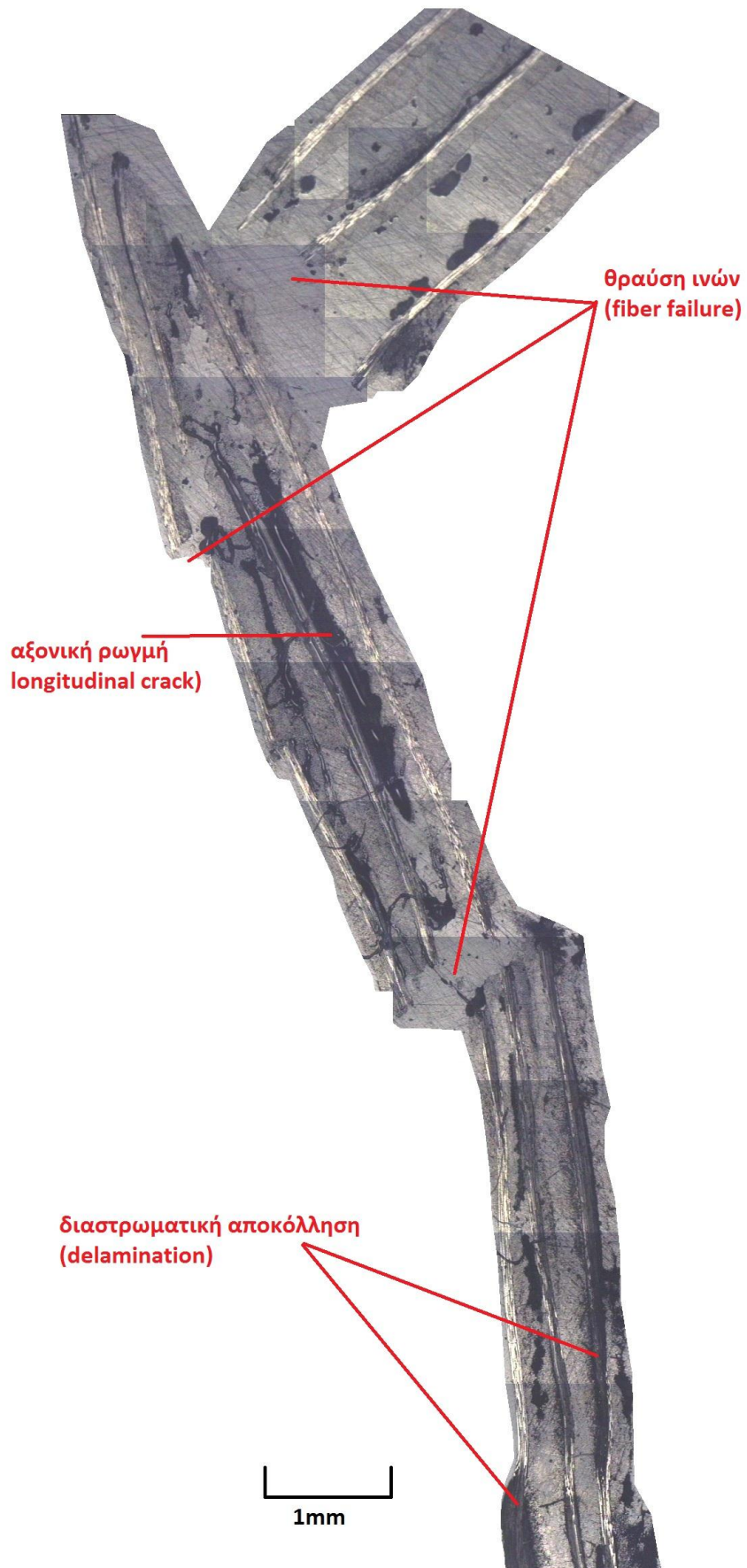
ΔΟΚΙΜΙΟ 1



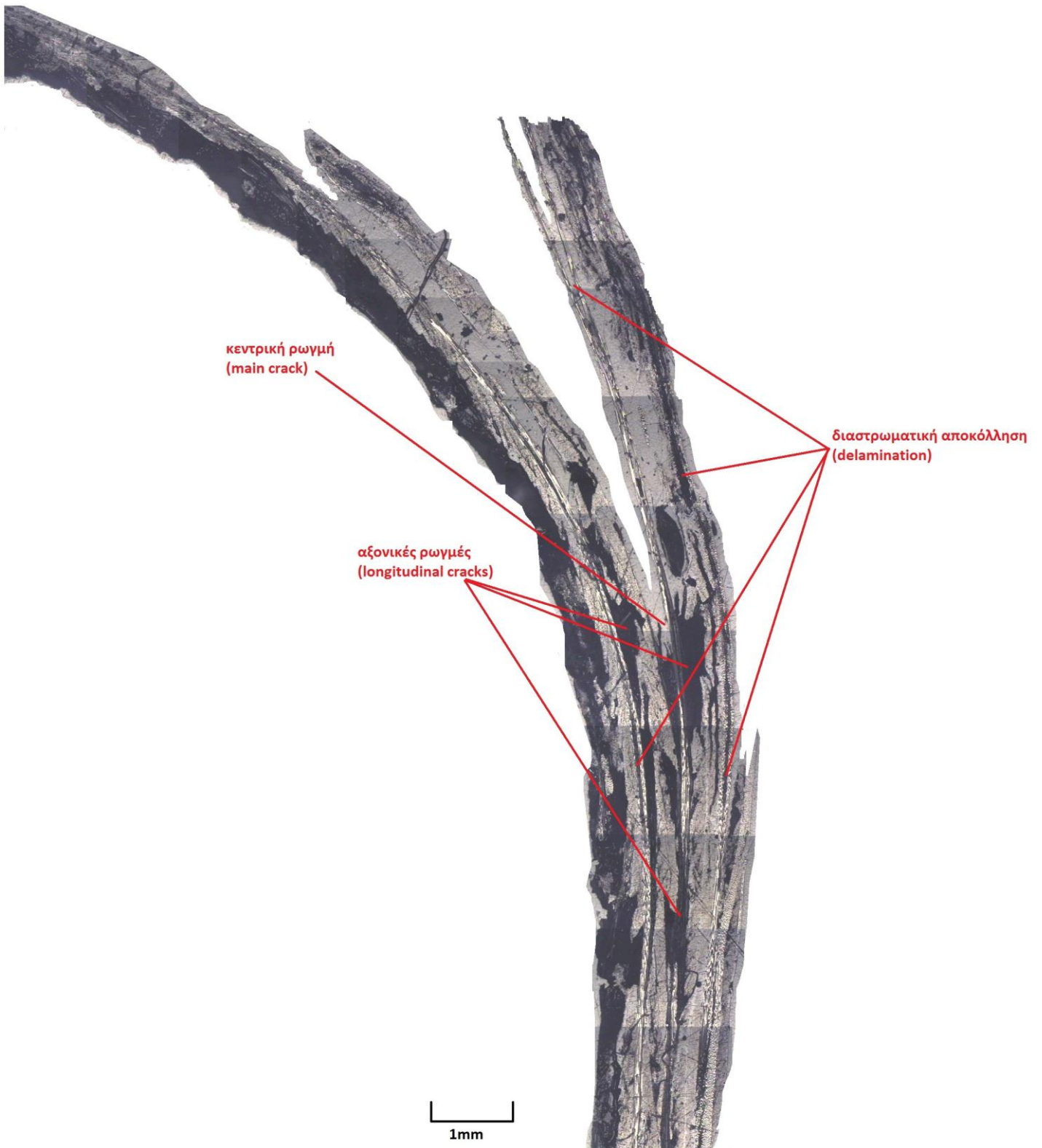
ΔΟΚΙΜΙΟ 2



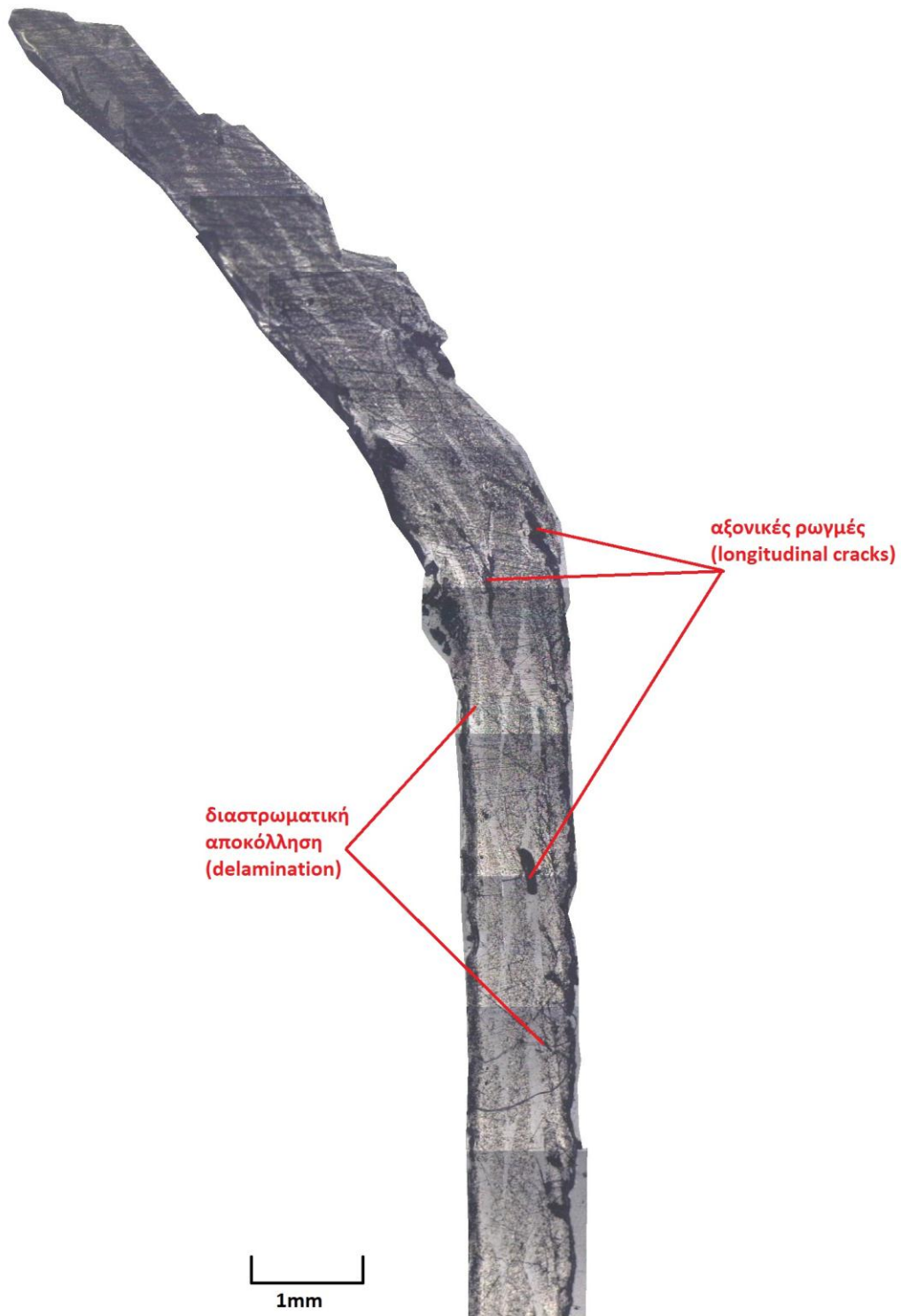
ΔΟΚΙΜΙΟ 3



ΔΟΚΙΜΙΟ 5



ΔΟΚΙΜΙΟ 6



2.4.3 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

Παρακάτω ακολουθεί ο συγκεντρωτικός πίνακας των δοκιμών με φθίνουσα σειρά βάσει του μέγιστου φορτίου που παρουσιάστηκε σε κάθε περίπτωση.

α/α δοκιμίου	Μέγιστο φορτίο (kN)
6	50
5	45,220
2	44,992
1	44,268
3	19,597
4	17,626

Υπολογίστηκε από τις τιμές των διαγραμμάτων η απορροφούμενη ενέργεια, η οποία υπολογίζεται ως το εμβαδό κάτω από τη καμπύλη φορτίου-μετατόπισης χρησιμοποιώντας τον κανόνα του τραπεζίου με χρήση προγράμματος σε FORTRAN¹².

Παρατίθεται ο πίνακας των αποτελεσμάτων.

α/α δοκιμίου	Απορροφούμενη ενέργεια (N*mm)
1	1168476,99
2	1132072,82
3	752019,801
5	581636,173
4	308315,303

¹² Το πρόγραμμα επισυνάπτεται στο παράρτημα 1

2.5 Παρατηρήσεις και συμπεράσματα

2.5.1 Παρατηρήσεις σχετικά με τον μικρομηχανισμό κατάρρευσης

Μετά από διεξοδική παρατήρηση των δειγμάτων που ελήφθησαν από τα δοκίμια ύστερα από την καταστροφική τους καταπόνηση, καταλήξαμε στις ακόλουθες επισημάνσεις.

- Από τις διαδοχικές φωτογραφίες κατά τη διάρκεια της δοκιμής και από τα προκύπτοντα διαγράμματα, γίνεται εμφανές ότι τα δοκίμια με κυλινδρική διατομή αντέχουν σχεδόν το ίδιο φορτίο με τα ελλειπτικής διατομής, αλλά απορροφούν μεγαλύτερο ποσό ενέργειας σε σχέση με τα δοκίμια τετραγωνικής και ελλειπτικής διατομής. Στα δοκίμια αυτά δημιουργείται μια δακτυλιοειδής σφήνα από κονιοποιημένο υλικό (θραυσμένες ίνες άνθρακα αναμεμιγμένες με ρητίνη), η οποία πιέζει αξονικά προς τα κάτω. Στο άκρο της σφήνας αυτής δημιουργείται κεντρική ρωγμή περίπου στο μέσο του τοιχώματος του σωλήνα. Με την περαιτέρω διεύδυση της σφήνας, παρατηρούμε αποκόλληση των στρώσεων, δημιουργώντας, έτσι, δύο μέτωπα: το εσωτερικό (inner frond) και το εξωτερικό (outer frond), τα οποία είναι σχεδόν ισοπαχή. Έτσι, παρατηρούμε μια ευκρινή ζώνη παραμόρφωσης, η οποία μετατοπίζεται κατά την αξονική κατεύθυνση προς το μέσο τους. Δημιουργούνται αξονικά μέτωπα που εξαπλώνονται προς τα έξω και προς τα μέσα υπό τη μορφή αστοχίας «μανιταριού». Τα δύο μέτωπα αντιστέκονται στο εφαρμοζόμενο φορτίο έως μια κρίσιμη τιμή του και τελικά κάμπτονται και αναδιπλώνονται προς τα κάτω. Αυτό το φαινόμενο συνοδεύεται από εκτενείς αποκολλήσεις στρώσεων και από θραύση ινών αξονικά και εγκάρσια.
- Αντίθετα, τα τετραγωνικά δοκίμια, παρουσιάζουν διαφορετικό τρόπο κατάρρευσης. Πιο συγκεκριμένα, στο δοκίμιο 3 παρατηρούμε κατάρρευση με προοδευτική δίπλωση, ενώ στο δοκίμιο 4 εμφανίζεται περιφερειακή θραύση περίπου στο μέσο του κελύφους, η οποία προκαλεί το διαχωρισμό του και την εισαγωγή του κάτω τμήματος στο άνω, με αποτέλεσμα να έχουμε μεγάλη σχετικά αντίσταση τριβής εξαιτίας της ολίσθησης μεταξύ των τμημάτων. Σε αυτά τα δοκίμια παρατηρείται χαμηλότερη απορρόφηση ενέργειας.
- Στα δοκίμια ελλειπτικής διατομής παρατηρείται περιφερειακή θραύση σε διάφορα σημεία, η οποία προκαλεί διαχωρισμό του δοκιμίου σε ακανόνιστα μέρη.

3

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

3.1 Ελληνική και ξενόγλωσση βιβλιογραφία

- A.G. Mamalis, D. E. Manolakos, M. B. Ioannidis, D. P. Papapostolou: “Crashworthy characteristics of axially thin-walled square CFRP composite tubes experimental”, *Composite Structures* 63 (2004), p.p. 347-360.
- A.G. Mamalis, M. Robinson, D.E. Manolakos, G.A. Demosthenous. M.B. Ioannidis & J. Carruthers: “ Crashworthy capability of composite material structures”
- A.G Mamalis, D.E. Manolakos, G.A. Demosthenous & M.A. Ioannidis: “Analysis of Failure Mechanisms Observed in Axial Collapse of Thin-Walled Circular Fibreglass Composite Tubes”
- A.G. Mamalis, D. E. Manolakos, M. B. Ioannidis, D. P. Papapostolou: “On the response of thin-walled CFRP composites tubular components subjected to static and dynamic axial compressive loading experimental” , *Composite Structures* 69 (2005), p.p. 407-420.
- A.G. Mamalis, D. E. Manolakos, M. B. Ioannidis, D. P. Papapostolou: “The static and dynamic axial collapse of CFRP square tubes, finite element modeling”, *Composite Structures* 74 (2006), p.p. 213-225.
- A.G. Mamalis, D. E. Manolakos, M. B. Ioannidis, D.G. Chronopoulos, P.K. Kostazos: “On the crashworthiness of composite rectangular thin-walled tubes internally reinforced with aluminium or polymeric foams experimental and numerical simulation”, *Composite Structures* 89 (2009), p.p. 416-423.
- Todd Johnson “The Evolution of Lightweight Composite Materials” About.com Guide
- F.C. Campbell: “Manufacturing Processes for Advanced Composites”, Elsevier 2004, p.p.3-103, 400-437.

- Chang F.K. and Chang K.Y.: “A Progressive Damage Model for Laminated Composites Containing Stress Concentrations”, *Composite Materials* 21 (1987), p.p. 834-855.
- Tsai S.W. and Wu E.M.: “A General Theory of Strength for Anisotropic Materials”, *Composite Materials* 5 (1971), p.p. 58-80.
- Chen W.H. and Lee Y.J.: “Failure Process and Pin-bearing Strength of Laminated Composites at Elevated Temperatures”, *Reinforced Plastics and Composites* 11 (1992), p.p. 743-771.
- Jiancheng Huang, Xinwei Wang: “Numerical and Experimental Investigations on the Axial Crushing Response of Composite Tubes”, *Composite Structures* 91 (2009), p.p. 222-228.
- Tobias G. Wouters: “Leading-edge Composite Material Research”, Nova Science Publishers 2008, p.p. 25-72.
- Daniel Gay, Suong V. Hoa, Stephen W. Tsai: “Composite Materials, Design and Applications”, CRC Press 2003, p.p. 14-76, 141-340.
- F. C. Campbell: “Introduction to Composite Materials”, *Structural Composite Materials*, Chapter 1.
- C. S. Lee, W. Hwang, H. C. Park, K. S. Han: “Failure of Carbon/Epoxy Composite Tubes Under Combined Axial and Torsional Loading, Fracture Morphology and Failure Mechanism”, *Composite Science and Technology* 59 (1999), p.p. 1789-1804.
- Chiara Bisagni: “Dynamic buckling of fiber composite shells under impulsive axial compression”, *Thin-Walled Structures* 43 (2005), p.p. 499-514.
- Richard Degenhardt, Alexander Kling, Arne Bethge, Jana Orf, Luise Karger, Rolf Zimmermann, Klaus Rohwer, Adriano Calvi: “Investigations on imperfection sensitivity and deduction of improved knock-down factors for unstiffened CFRP cylindrical shells”, *Composite Structures* 92 (2010), p.p. 1939-1946.

-
- **Stanislaw Ochelski, Pawel Gotowicki: “Experimental assessment of energy absorption capability of carbon-epoxy and glass-epoxy composites”, Composite Structures 87 (2009), pp. 215-224.**
 - **Deborah D. L. Chung: “ Carbon Fiber Composites”, Butterworth – Heinemann 1994, p.p. 65-84, 145-176.**
 - **Peter Morgan: “Carbon Fibers and their Composites”, Taylor and Francis 2005, p.p. 1-59.**
 - **Valery V. Vasiliev, Evgeny V. Morozov: “ Advanced Mechanics of composite materials”, Elsevier 2007, p.p. 9-29, 133-252.**

4

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

4.1 Κώδικας FORTRAN

Ο κώδικας διαβάζει τα αρχεία με τα αποτελέσματα που ελήφθησαν από τον ηλεκτρονικό υπολογιστή που είναι συνδεδεμένος με την μηχανική πρέσα, υπολογίζει το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη φορτίου-μετατόπισης με την μέθοδο τραπεζίου και αποθηκεύει τα αποτελέσματα στο αρχείο “apotelesmata.txt”. Παρακάτω παρουσιάζεται ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε:

```
program ektoras
implicit doubleprecision (a-h,o-z)
dimension aload(1:3008), ext(1:3008)

open(1 , file='load_t1.txt' )
open(2 , file='ext_t1.txt' )
open(3 , file='load_t2.txt' )
open(4 , file='ext_t2.txt' )
open(5 , file='load_cub3.txt')
open(6 , file='ext_cub3.txt' )
open(7 , file='load_cub4.txt')
open(8 , file='ext_cub4.txt' )
open(9 , file='load_ov5.txt' )
open(10, file='ext_ov5.txt' )
open(20, file='apotelesmata.txt')

do j = 1,9,2
do i = 1,3008
read(j,*) aload(i)
read(j+1,*) ext(i)
enddo
call trapezio (aload,ext,total)
write(20,*) total
enddo
stop
end
```

```
subroutine trapezio (aload,ext,total)
implicit doubleprecision (a-h,o-z)
dimension aload(1:3008), ext(1:3008)

total=0.d0
do i = 1,3007
  total=total+ ( aload(i)+aload(i+1) ) * (ext(i+1)-ext(i)) / 2.d0
enddo

! write(*,*) total
return
end
```

