



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

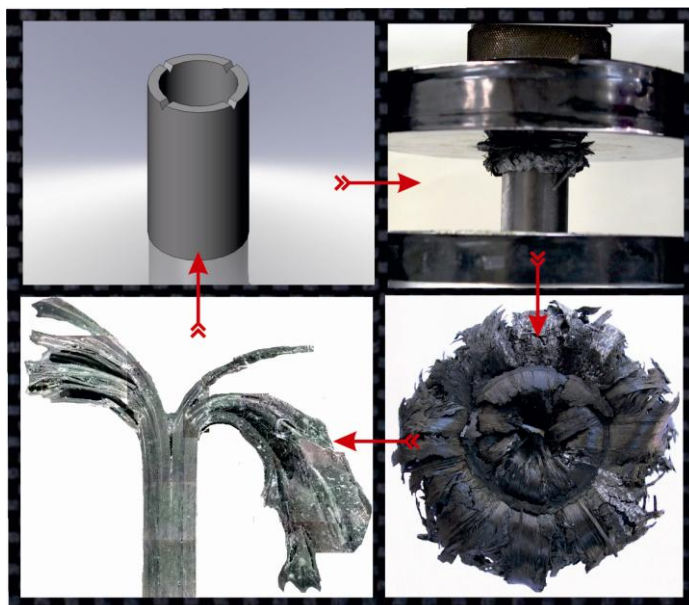
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ Ε. ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μηχανισμοί triggering στην αξονική συμπίεση
κυλινδρικών κελυφών από σύνθετο υλικό ενισχυμένο
με ίνες άνθρακα



ΣΟΦΙΑ Κ. ΗΛΙΑ

ΙΟΥΛΙΟΣ 2010

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΠΡΟΛΟΓΟΣ	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΤΑ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΣΤΙΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ..	6
2.1. Εισαγωγή.....	6
2.2. Ιστορική αναδρομή.....	8
2.3. Είδη σύνθετων υλικών.....	9
2.4. Ινώδη σύνθετα υλικά.....	10
2.4.1. Είδη σύνθετων υλικών ανάλογα με τον προσανατολισμό των ινών.....	11
2.4.2. Ιδιότητες σύνθετων υλικών με ίνες.....	12
2.5. Υλικά ινών σύνθετων υλικών.....	13
2.5.1. Ίνες Υάλου.....	13
2.5.2. Ίνες Άνθρακα.....	13
2.5.3. Ίνες Πολυαραμίδης.....	14
2.5.4. Επίδραση του μεγέθους των ινών στις μηχανικές ιδιότητες.....	16
2.5.5. Επίδραση της πλέξης των ινών στις μηχανικές ιδιότητες.....	16
2.5.6. Διαθέσιμες πλέξεις ινών.....	17
2.6. Μήτρες σύνθετων υλικών.....	19
2.6.1. Είδη μητρών.....	19
2.6.2. Εποξικές ρητίνες.....	20
2.6.2.1. Χημική σύσταση.....	20
2.6.2.2. Ιδιότητες.....	21
2.6.2.3. Μηχανικές ιδιότητες.....	21
2.6.3. Πολυεστερικές ρητίνες.....	22
2.6.4. Βινυλεστερικές ρητίνες.....	23
2.6.5. Shape Memory Polymer.....	23
2.6.6. Απαιτήσεις υλικού από την μήτρα.....	24
2.7. Ιδιότητες σύνθετων υλικών.....	24
2.7.1. Γενικά.....	24
2.7.2. Μακροσκοπική ανάλυση.....	25
2.7.3. Μικροσκοπικά.....	28
2.8. Ικανότητα απορρόφησης ενέργειας στα σύνθετα υλικά.....	30
2.9. Μέθοδοι διαμόρφωσης σύνθετων υλικών.....	30
2.10. Εφαρμογές σύνθετων υλικών.....	36
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΙΝΕΣ ΑΝΘΡΑΚΑ.....	37
3.1. Εισαγωγή.....	37
3.2. Ιστορική αναδρομή.....	38
3.3. Δομή και ιδιότητες.....	39
3.4. Κατασκευή ινών άνθρακα.....	39
3.5. Κατασκευαστές ινών άνθρακα.....	43
3.6. Εφαρμογές ινών άνθρακα.....	43
3.7. Τέλος διάρκειας ζωής και ανακύκλωση.....	45
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – Η ΑΣΤΟΧΙΑ ΣΤΑ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ.....	47
4.1. Εισαγωγή.....	47

4.2. Τρόποι αστοχίας σε θλίψη.....	48
4.3. Τρόποι αστοχίας σε εφελκυσμό.....	49
4.4. Μορφές αστοχίας.....	50
4.5. Κριτήρια αστοχίας.....	52
4.5.1. Κριτήριο Μέγιστης Τάσης.....	53
4.5.2. Κριτήριο Μέγιστης Παραμόρφωσης.....	53
4.5.3. Κριτήριο Tsai – Hill.....	53
4.5.4. Κριτήριο Tsai – Wu.....	54
4.5.5. Κριτήρια Hashin.....	55

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – Η ΑΞΟΝΙΚΗ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ

ΛΕΠΤΟΤΟΙΧΩΝ ΣΩΛΗΝΩΝ.....	61
5.1. Μέθοδοι κατάρρευσης σύνθετων υλικών.....	61
5.2. Χαρακτηριστικά ενεργειακής απορρόφησης.....	64

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....

6.1. Σκοπός των πειραμάτων.....	66
6.2. Χαρακτηρισμός του υλικού.....	66
6.3. Ετοιμασία των δοκιμίων.....	67
6.4. Περιγραφή πειραματικού εξοπλισμού.....	67
6.5. Ρύθμιση της πρέσας.....	71
6.6. Πειραματικές δοκιμές και μετρήσεις.....	72
6.6.1. Δοκίμιο 1 (χωρίς καμία διαμόρφωση).....	72
6.6.2. Δοκίμιο 2 (με 4 περιφερειακές οπές).....	77
6.6.3. Δοκίμιο 3 (με 4 τετράγωνα περιφερειακά του στομίου).....	82
6.6.4. Δοκίμιο 4 (με 4 τρίγωνα περιφερειακά του στομίου).....	87
6.6.5. Δοκίμιο 5 (με 4 ημικύκλια περιφερειακά του στομίου).....	92
6.6.6. Δοκίμιο 6 (με 2 τεταρτοκύκλια περιφερειακά του στομίου).....	97
6.6.7. Δοκίμιο 7 (με κωνικότητα προς το εξωτερικό του στομίου).....	102
6.6.8. Δοκίμιο 8 (με κωνικότητα προς το εσωτερικό του στομίου).....	107
6.6.9. Δοκίμιο 9 (με κωνικότητα προς το εξωτερικό και προς το εσωτερικό του στομίου).....	112
6.7. Μικρογραφική ανάλυση.....	117
6.7.1. Διαδικασία.....	117
6.7.2. Παρατηρήσεις.....	117

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 – ΤΕΛΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....

7.1. Γενικά.....	129
7.2. Επίδραση των ατελειών.....	130
7.3. Μικροσκοπικά.....	131

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 – ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....

132

1. ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Συμβατικά υλικά όπως ο χάλυβας και το αλουμίνιο ήδη χρησιμοποιούνται στην αυτοκινητοβιομηχανία και στις εναέριες κατασκευές. Ωστόσο, οι ευμετάβλητες τιμές των καυσίμων και οι αυστηροί περιβαλλοντικοί κανονισμοί έχουν επιφέρει νέες προτεραιότητες για τις βιομηχανίες των μεταφορών. Ορισμένες από αυτές τις προτεραιότητες περιλαμβάνουν αύξηση της απόδοσης των οχημάτων, δηλαδή μείωση της κατανάλωσης καυσίμου και βλαβερών εκπομπών καθώς και μείωση του βάρους, σε συνδυασμό με βελτίωση της παθητικής ασφάλειας των εξεταζόμενων υλικών. Ενισχυμένα ινώδη πολυμερή χρησιμοποιούνται για να μειώσουν το βάρος στην αυτοκινητοβιομηχανία για πολλά χρόνια. Πρόσφατη ανακοίνωση εστιάστηκε σε θερμοπλαστικά σύνθετα υλικά καθώς έχουν πλεονεκτήματα γρήγορης κατασκευής και ανακύκλωσης. Επιπλέον, μια από τις πιο ραγδαίες εξελίξεις των τελευταίων χρόνων στον κατασκευαστικό κλάδο ήταν η εξέλιξη της χρήση των σύνθετων υλικών (γνωστά ως ενισχυμένα πολυμερή – Fiber Reinforced Polymers) στα τεχνικά έργα. Τα σύνθετα υλικά είναι γνωστά για τις εξαιρετικές τους μηχανικές ιδιότητες, το χαμηλό τους βάρος και την καλή ανθεκτικότητα σε περιβαλλοντικές επιδράσεις. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά είχαν ως αποτέλεσμα την σταδιακή εισαγωγή των σύνθετων υλικών και στα έργα του μηχανικού με κύριο επίπεδο εφαρμογής αυτό των ενισχύσεων. Η χρήση λοιπόν των σύνθετων υλικών καλύπτει μία μεγάλη σειρά εφαρμογών όπως είναι η αυτοκινητοβιομηχανία, η αεροναυπηγική, η ναυσιπλοΐα, τα τεχνικά έργα και ορισμένες βιομηχανίες καταναλωτικών ειδών (π.χ. είδη σπορ).

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με τη συμπεριφορά σύνθετων πολύστρωτων υλικών με ίνες άνθρακα σε συγκεκριμένες συνθήκες φόρτισης (θλίψη). Τα σύνθετα πολύστρωτα υλικά αποτελούνται από στρώσεις ινών που ενώνονται και συγκρατούνται μεταξύ τους από μια μήτρα ρητίνης. Λόγω της μορφής και κατασκευής τους οι φυσικές ιδιότητες και η μηχανική συμπεριφορά τους διαφέρουν από εκείνες των «παραδοσιακών» υλικών που χρησιμοποιούνται σε κατασκευές, όπως ο χάλυβας ή το αλουμίνιο. Τα σύνθετα υλικά προσφέρουν μεγαλύτερη αντοχή και δυσκαμψία σε σχέση με το βάρος τους από ότι τα συνήθη υλικά κατασκευών. Επίσης, πλήθος άλλων ιδιοτήτων όπως η αντοχή σε διάβρωση, κόπωση, θραύση, οι αντιτυρικές ιδιότητές τους, καθώς και η ευκολία διαμόρφωσής τους καθιστούν τα σύνθετα υλικά χρησιμότερα σε πολλές εφαρμογές, μεταξύ άλλων η ναυπηγική και η αεροναυπηγική.

Παρά την γενικά πολύ καλή μηχανική συμπεριφορά τους, ο τρόπος κατασκευής των σύνθετων υλικών έχει ως αποτέλεσμα να εμφανίζουν ατέλειες στη δομή και στη μορφή τους. Οι ατέλειες αυτές είναι συνηθέστερα διαχωρισμός των στρώσεων των ινών, κενά σημεία όπου θα έπρεπε να υπάρχει ρητίνη, ή ατέλειες στη μορφή – μικρότερο ή μεγαλύτερο πάχος από το κανονικό, ατελής ευθυγράμμιση του στοιχείου κ.λ.π. Επιπλέον, τα σύνθετα υλικά είναι ανισοτροπικά, δηλαδή οι μηχανικές τους ιδιότητες δεν είναι ίδιες σε όλες τις κατευθύνσεις. Έτσι, ενώ η συμπεριφορά τους σε εφελκυσμό είναι πολύ καλή, σε θλιπτικά φορτία υποφέρουν περισσότερο, και συχνά οι όποιες ατέλειες μεγεθύνονται και χειροτερεύουν τη συμπεριφορά του υλικού.

Σε αυτήν την εργασία παρουσιάζονται πειραματικές και θεωρητικές έρευνες των προβλημάτων – αστοχιών σύνθετων υλικών από ενισχυμένα με ίνες άνθρακα πολυμερή. Παρατίθενται θεωρητικά μοντέλα ανάλυσης της συμπεριφοράς τους και ακολουθούν συγκρίσεις με πειραματικά αποτελέσματα με σκοπό την κατανόηση των μηχανισμών συμπεριφοράς αυτών των υλικών. Επιπλέον παρουσιάζονται πειράματα σχετικά με τη συμπεριφορά μηχανισμών triggering υπό αξονική συμπίεση.

Για την εκπόνηση της εργασίας μου, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή και Διευθυντή του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών κ. Δημήτρη Μανωλάκο για την εμπιστοσύνη του ώστε να ολοκληρώσω την παρούσα διπλωματική εργασία, τον υποψήφιο Διδάκτορα κ. Αλέξανδρο Κιτσέλη για την καθοδήγηση και τις εύστοχες παρατηρήσεις του, καθώς επίσης και τους τεχνίτες του εργαστηρίου για την εξοικείωσή μου με τα μηχανήματα και την βοήθειά τους στην διεξαγωγή των πειραμάτων.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στην οικογένειά μου Κωνσταντίνο, Κατερίνα, Βάσω και ιδιαίτερα στον Δημήτρη για την ανοχή και την ψυχολογική ενίσχυση που μου προσέφεραν καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας, καθώς και σε όλα τα άτομα που με στήριξαν σε αυτήν την προσπάθειά μου.

2. ΤΑ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΣΤΙΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ

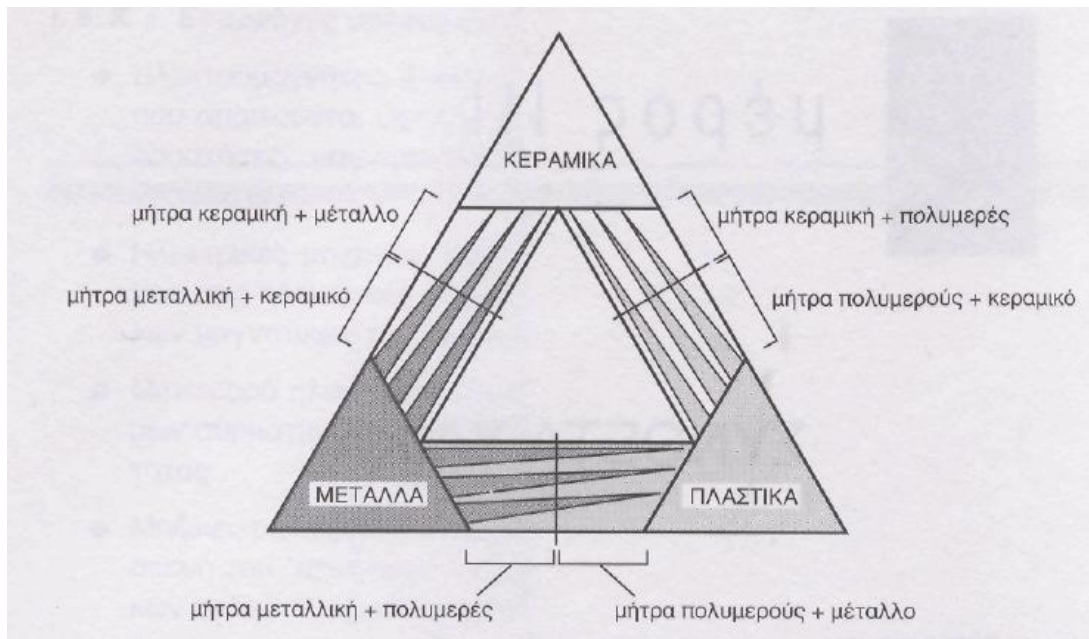
2.1. Εισαγωγή

Η εξέλιξη της επιστήμης των υλικών και της τεχνολογίας των κατεργασιών τους είναι οι βάσεις της επιτυχίας και της προόδου, σε όλους τους κλάδους της βιομηχανίας. Η πρόοδος των διαφόρων βιομηχανικών τεχνικών, απαιτεί μια σωστή γνώση των εκάστοτε χρησιμοποιούμενων υλικών, ώστε να κατανοηθούν οι σχέσεις μεταξύ μικροδομής και ιδιοτήτων τους σε μακροσκοπική κλίμακα.

Συνήθως κατατάσσουμε τα υλικά σε τρεις κατηγορίες:

- σε μέταλλα και κράματα, που στην πλειονότητα τους έχουν βρει μεγάλες βιομηχανικές εφαρμογές,
- σε μη μεταλλικά ανόργανα υλικά, με κυρίως εκπροσώπους τα κεραμικά υλικά και τα τεχνικά γυαλιά, και
- σε οργανικά υλικά, με ιδιαίτερη αναφορά στα πλαστικά.

Η διάκριση ανάμεσά τους γίνεται με βάση τη χημική σύσταση, τη δομή και τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητές τους. Όμως, υπάρχουν υλικά που αποτελούν συνδυασμούς των τριών αυτών των κατηγοριών, και σαφώς έχουν ιδιότητες που δεν μπορούν να τα κατατάξουν σε καμία από τις παραπάνω κατηγορίες.



Σχήμα 2.1.1- Κατάταξη υλικών

Με την ευρύτερη χρήση του όρου, συνδυασμός δύο ή περισσότερων υλικών συνιστά ένα στοιχείο από σύνθετο υλικό. Ειδικότερα, ως σύνθετα αναγνωρίζονται σήμερα εκείνα τα υλικά, των οποίων τα συνιστώσα μέρη έχουν διαφορετικές μηχανικές και φυσικές

ιδιότητες και χαρακτηριστικά, που κανένα από τα συστατικά του δεν μπορεί από μόνο του να πετύχει.

Παραδείγματα υλικών που δεν μπορούν να χαρακτηριστούν ως σύνθετα είναι τα συνήθη μέταλλα, αν και περιέχουν άλλα συστατικά, όπως ανεπιθύμητες ακαθαρσίες ή κραματοποιημένα στοιχεία, καθώς επίσης και τα πλαστικά, τα οποία συνήθως περιέχουν μικρές ποσότητες ειδικών προσθετικών (fillers). Στην περίπτωση των διφασικών μετάλλων, οι συνιστώσες φάσεις έχουν συχνά σχεδόν ίδιες ιδιότητες (π.χ. μέτρο ελαστικότητας) και η μία από αυτές υπάρχει συνήθως σε πολύ μικρές ποσότητες. Έτσι, το μέτρο ελαστικότητας ενός χάλυβα είναι ανεξάρτητο από την περιεκτικότητά του σε άνθρακα και τα μεταλλικά κράματα δεν θεωρούνται γενικά ως σύνθετα υλικά.

Επομένως, για να καταταχθούν συγκεκριμένα υλικά στην κατηγορία των σύνθετων, θα πρέπει να αποτελούν συνδυασμό συστατικών μερών, στα οποία οι ιδιότητες του ενός από τα μέρη αυτά να είναι σημαντικά μεγαλύτερες από του άλλου (≥ 5 φορές), και η περιεκτικότητα κατ' όγκο του ενός να μην είναι πολύ μικρή ($> 10\%$). Επομένως, ως σύνθετα μπορούν να θεωρούνται τα υλικά, τα οποία μακροσκοπικά αποτελούνται από δύο ή περισσότερα χημικά ευδιάκριτα συστατικά μέρη που έχουν μια συγκεκριμένη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ τους.

Τα σύνθετα υλικά είναι κατασκευασμένα από μεμονωμένα υλικά, τα οποία αναφέρονται ως συστατικά υλικά. Υπάρχουν δύο κατηγορίες συστατικών υλικών: η μήτρα και η ενίσχυση. Κατ' ελάχιστο, ένα μέρος από κάθε τύπο είναι απαραίτητο. Το υλικό της μήτρας συνήθως είναι χαμηλής πυκνότητας, περιβάλλει και υποστηρίζει τα υλικά ενίσχυσης με το να διατηρούν τις σχετικές τους θέσεις. Οι ενισχύσεις αποδίδουν τις ιδιαίτερες μηχανικές και φυσικές τους ιδιότητες για να βελτιωθούν οι ιδιότητες της μήτρας. Από αυτήν την συνεργασία παράγονται ιδιότητες υλικού ανύπαρκτες στα μεμονωμένα συστατικά υλικά, καθώς η ευρεία ποικιλία από μήτρες και υλικά ενίσχυσης επιτρέπει τον σχεδιαστή του προϊόντος ή της κατασκευής να επιλέξει τον βέλτιστο συνδυασμό.

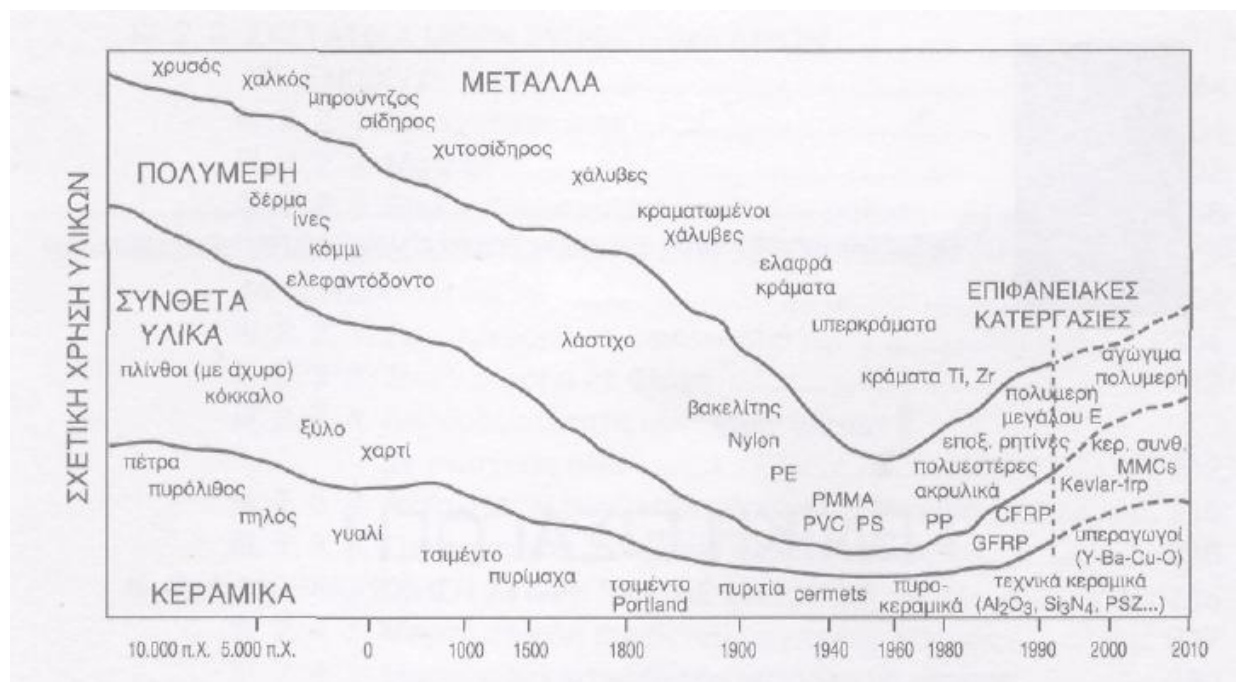
Μηχανολογικά σύνθετα υλικά πρέπει να διαμορφωθούν σε καλούπι. Το υλικό της μήτρας μπορεί να εισαχθεί στις ενισχύσεις είτε πριν είτε μετά από την τοποθέτηση του υλικού ενίσχυσης μέσα στο καλούπι διαμόρφωσης ή πάνω σε επιφάνεια διαμόρφωσης. Στο υλικό της μήτρας συμβαίνει μια διαμόρφωση, ύστερα από την οποία το σχήμα του δοκιμίου έχει ουσιαστικά δοθεί. Εξαρτώμενοι από την φύση του υλικού της μήτρας, η διαμόρφωση μπορεί να επιτευχθεί με πολλούς τρόπους, όπως με χημικό πολυμερισμό ή με στερεοποίηση από τηκόμενη κατάσταση.

Μια ποικιλία από μεθόδους διαμόρφωσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν με βάση τις απαιτήσεις του σχεδιασμού του τελικού προϊόντος. Οι πρωταρχικοί παράγοντες που επιδρούν στο αποτέλεσμα είναι η φύση του επιλεχθέντος υλικού μήτρας, αλλά και του υλικού ενίσχυσης. Ακόμη ένας σημαντικός παράγοντας είναι η συνολική ποσότητα του παραχθέντος υλικού. Μεγάλες ποσότητες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αιτιολογηθούν υψηλά χρηματικά ποσά που ξοδεύονται για γρήγορη και αυτοματοποιημένη κατασκευαστική τεχνολογία. Μικρές ποσότητες παραγωγής διευκολύνονται με χαμηλότερα χρηματικά ποσά επένδυσης, αλλά με υψηλότερο κόστος εργαστηρίου και εργαλείων σε έναν αντίστοιχα αργότερο ρυθμό.

Τα πιο εμπορικά παραγόμενα σύνθετα υλικά αποτελούνται από πολυμερές υλικό μήτρας, το οποίο συχνά ονομάζεται ως διάλυμα ρητίνης. Υπάρχουν πολλά διαφορετικά πολυμερή διαθέσιμα, εξαρτώμενα από τα συστατικά. Επίσης, υπάρχουν μερικές βασικές κατηγορίες, καθεμιά με πολυάριθμες ποικιλίες. Οι πιο συχνά απαντώμενες είναι : οι πολυεστερικές, οι βινυλεστερικές, οι εποξικές, οι φαινολικές, οι πολυαμιδικές, οι πολυπροπυλαινικές, οι PEEK, και άλλες. Τα υλικά ενίσχυσης είναι συνήθως ίνες, αλλά επίσης συχνά ορυκτά. Οι ποικίλες μέθοδοι που περιγράφονται σε επόμενη παράγραφο

έχουν αναπτυχθεί για να μειώσουν την περιεκτικότητα σε ρητίνες του τελικού προϊόντος, ή να αυξήσουν την περιεκτικότητα των ινών. Ως πρακτική αρχή, τα αποτελέσματα παραγωγής ενισχυμένων πλαστικών με την τοποθέτηση ενισχυμένου υλικού στην αρχική διαμόρφωση πριν από τη διαπότιση με ρητίνη, σε ένα προϊόν που περιέχει αρχικά 60% ρητίνη και 40% ίνες, η μέθοδος διαμόρφωσης vacuum infusion δίνει ένα τελικό προϊόν με 40% ρητίνη και 60% ίνες. Η αντοχή του προϊόντος είναι απόλυτα εξαρτώμενη από αυτόν τον λόγο.

2.2. Ιστορική αναδρομή



Σχήμα 2.2.1- Ιστορική εξέλιξη



Σχήμα 2.2.2- Ξύλο με στρώσεις

Τα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνταν από τον άνθρωπο εδώ και χιλιάδες χρόνια. Υλικά ευρισκόμενα στη φύση, όπως το ξύλο, το κόκκαλο, ο πηλός, η πέτρα, είχαν αρχικά ευρύτατη χρήση. Τα πιο πρωτόγονα σύνθετα υλικά που κατασκευάστηκαν από τον άνθρωπο ήταν το άχυρο και η λάσπη, που συνδυάζονταν και αποτελούσαν τούβλα για τις κατασκευές. Οι Αιγύπτιοι, αρκετά νωρίς, αντιλήφθηκαν ότι οι πλάκες από πολύστρωτες βέργες ξύλου ήταν πολύ ανθεκτικότερες στη στρέβλωση από απορρόφηση υγρασίας από

το φυσικό ξύλο καθεαυτό. Γύρω στο 1000π.Χ. στη Μεσοποταμία εφαρμόστηκε το βερνίκωμα των τούβλων και πλακιδίων για περιορισμό της επιφανειακής φθοράς. Επίσης, η ανάμειξη γύψου με ζωικό τρίχωμα ήταν μία πολύ πρακτική μέθοδος ενίσχυσης εύθραυστων υλικών κατασκευής σε αναπτυσσόμενους πολιτισμούς. Η χρήση της σιδηρόβεργας για οπλισμένο σκυρόδεμα της σύγχρονης εποχής δεν είναι παρά η μετεξέλιξη αυτής της τεχνικής. Το πρώτο σύνθετο υλικό βασισμένο σε μήτρα πλαστικού εμφανίστηκε γύρω στο 1920. Αποτελείται από ένα μείγμα ινιδίων ξύλου με φαινολική φορμαλδεΰδη και έγινε γνωστό με το όνομα βακελίτης, από τον Βέλγο επιστήμονα Leo Baekeland.

Η παραγωγή πολυμερών σε παγκόσμιο επίπεδο ξεκίνησε τα μέσα του 20ού αιώνα. Τότε τα κόστη των υλικών και της παραγωγής ήταν χαμηλά, νέες παραγωγικές τεχνολογίες και καινούριες κατηγορίες υλικών συνδυάζονταν για να κάνουν οικονομική την παραγωγή των πολυμερών. Η βιομηχανία τελικά ωρίμασε στα τέλη του 1970, όταν η παγκόσμια παραγωγή πολυμερών παραμέρισε το ατσάλι για το πολυμερές, καθιστώντας τα πολυμερή ως το δημοφιλέστερο υλικό που είναι σήμερα. Τα πλαστικά ενισχυμένα με ίνες ήταν ένα αξιοσημείωτο μέρος αυτής της βιομηχανίας από την αρχή. Υπάρχουν 3 σημαντικές κατηγορίες ινών που χρησιμοποιούνται στα FRP, το γυαλί, ο άνθρακας και το αραμιδίδιο. Η ενίσχυση με υαλονήματα έχει δοκιμαστεί σε στρατιωτικές εφαρμογές στο τέλος του Β' Παγκοσμίου Πολέμου. Η παραγωγή ανθρακονημάτων ξεκινά στα τέλη του 1950 και χρησιμοποιούταν σε εφαρμογές, αν και όχι ευρέως, ενώ στην Βρετανική βιομηχανία ξεκίνησε στις αρχές του 1960. Οι ίνες αραμιδίου παράχθηκαν αρχικά περίπου την ίδια εποχή, σημειώνοντας ότι οι πρώτες εμφανίστηκαν με την εμπορική ονομασία Nomex by Dupont. Σήμερα, καθεμία από αυτές τις ίνες χρησιμοποιείται ευρέως στην βιομηχανία για όποιες εφαρμογές απαιτούν πλαστικά με συγκεκριμένη αντοχή ή ελαστικότητα. Τα υαλονήματα είναι τα πλέον γνωστά σε όλες τις βιομηχανίες, παρόλο που τα σύνθετα υλικά με ανθρακονήματα ή με ίνες άνθρακα και αραμιδίου συναντώνται ευρέως στην αεροδιαστημική, στην αυτοκίνηση και σε αθλητικά είδη.

2.3. Είδη σύνθετων υλικών

Τα σύνθετα υλικά χαρακτηρίζονται από την ύπαρξη τουλάχιστον δύο μακροσκοπικά διακρινόμενων συστατικών, από τα οποία το ένα (συστατικό ενίσχυσης) προσδίδει στο σύνθετο βελτιωμένες μηχανικές, κυρίως, ιδιότητες. Το δεύτερο συστατικό (μήτρα) , είναι χαμηλής πυκνότητας, συνήθως και η συμμετοχή του στο σύνθετο εξασφαλίζει τη μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση των ιδιοτήτων της ενίσχυσης.

Ανάλογα με τη μορφή του συστατικού ενίσχυσης, τα σύνθετα κατατάσσονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες:

1. Σύνθετα υλικά με ενίσχυση ινών (fiber reinforced composites), αποτελούμενα από ίνες εμποτισμένες σε ρητίνη.
2. Σύνθετα υλικά με ενίσχυση σωματιδίων (particulate composites), αποτελούμενα από σωματίδια σφαιρικά, κυβικά, νιφάδες, κλπ. διαφόρων υλικών σε ένα σώμα.
3. Στρωματικά / Πολύστρωτα σύνθετα υλικά (laminar composites) αποτελούμενα από στρώσεις των ενισχυτικών υλικών, με συγκεκριμένο προσανατολισμό, οι οποίες ενώνονται μεταξύ τους με το συνδετικό υλικό.

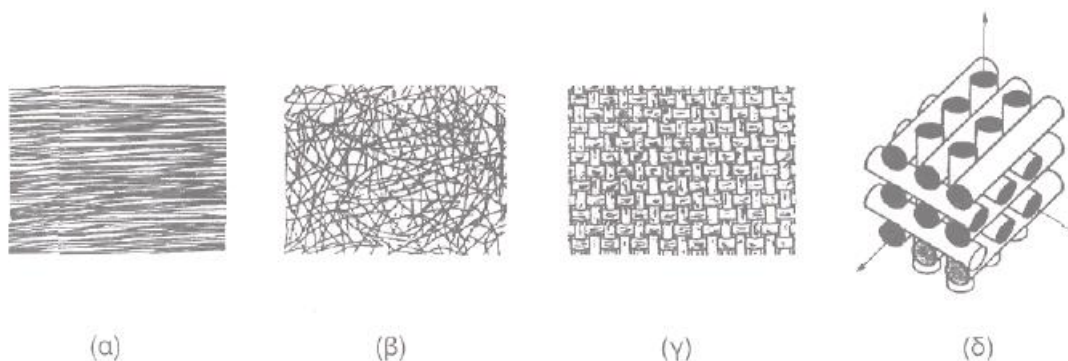
Στην παρούσα εργασία ενδιαφέρουν τα πολύστρωτα υλικά, αφού από αυτά είναι κατασκευασμένα τα εργαστηριακά δοκίμια.

Τα πολύστρωτα σύνθετα υλικά αποτελούνται από στρώσεις του υλικού ενίσχυσης, ενωμένων μεταξύ τους με το συνδετικό υλικό. Οι στρώσεις αποτελούνται συνήθως από νήματα, τα οποία ράβονται, κολλώνται ή πλέκονται μεταξύ τους, δημιουργώντας την εντύπωση «υφάσματος» ή «φύλλου». Πολλά τέτοια «φύλλα» τοποθετούνται το ένα πάνω στο άλλο και ενώνονται με ρητίνη, η οποία μπαίνει ανάμεσα σε κάθε φύλλο για να τα συγκρατεί και να αυξήσει τις ιδιότητες του σύνθετου υλικού.



Σχήμα 2.3.1- Είδη σύνθετων υλικών ανάλογα με τη μορφή

2.4. Ινώδη σύνθετα υλικά



Σχήμα 2.4.1- Μορφές υλικών με ίνες

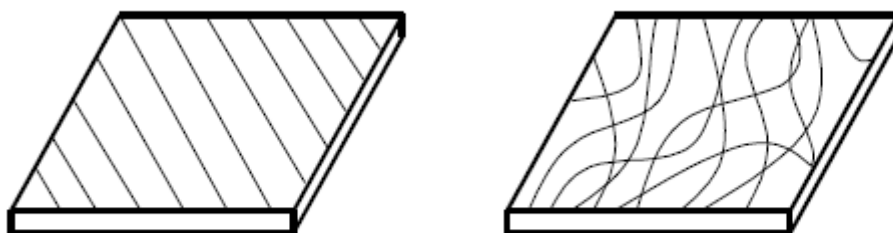
Σε εφαρμογές υψηλών απαιτήσεων πρωτεύοντα ρόλο παίζουν τα σύνθετα υλικά με ενίσχυση ινών. Επειδή οι ίνες φέρουν πάντοτε τα μεγαλύτερα μηχανικά φορτία στο υλικό, οι μηχανικές ιδιότητες και η συμπεριφορά τους κατά τη φόρτιση έχει άμεσες επιπτώσεις στη συμπεριφορά του σύνθετου υλικού. Μέσα στις προδιαγραφές βρίσκεται πάντα η ελαχιστοποίηση του βάρους μαζί με την μεγιστοποίηση της στιβαρότητας της κατασκευής.

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

2.4.1. Είδη σύνθετων υλικών ανάλογα με τον προσανατολισμό των ινών

Βάσει του προσανατολισμού των ινών υπάρχουν δύο γενικές κατηγορίες σύνθετων υλικών ινών:

- Προσανατολισμένα (unidirectional), των οποίων οι ίνες είναι συνεχείς και έχουν όλες την ίδια διεύθυνση (Σχήμα 2.4.2 α).
- Μη προσανατολισμένα (random), των οποίων οι ίνες είναι τυχαία τοποθετημένες στο συνδετικό υλικό (Σχήμα 2.4.2 β).



(α) Προσανατολισμένο σύνθετο υλικό. (β) Μη προσανατολισμένο σύνθετο υλικό.

Σχήμα 2.4.2- Γενικοί τύποι σύνθετων υλικών ινών.

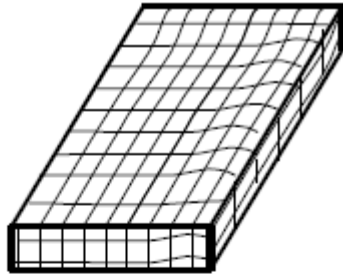
Οι ίνες των σύνθετων υλικών τοποθετούνται με διάφορους τρόπους ανάλογα με τις ανάγκες της κάθε εφαρμογής. Βάσει του τρόπου τοποθέτησης και του συνδυασμού των ινών στο συνδετικό υλικό, τα σύνθετα υλικά ινών κατατάσσονται στις ακόλουθες τέσσερις κατηγορίες:

➤ Πλεκτών ινών (woven fiber), τα οποία αποτελούν συνεχές σώμα χωρίς επιμέρους στρώματα, οπότε και δεν παρουσιάζουν πιθανότητες αποκόλλησης (Σχήμα 2.4.3 α). Η αντοχή τους όμως, είναι μειωμένη εξαιτίας της μεγάλης συγκέντρωσης τάσεων, αλλά και της χρήσης υψηλού ποσοστού ρητίνης.

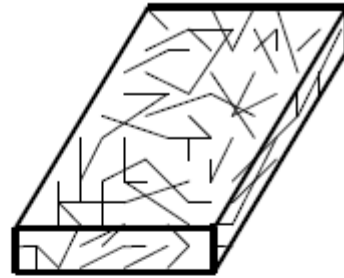
➤ Ασυνεχών ινών (chopped fiber), τα οποία έχουν κοντές ίνες διάσπαρτες μέσα στο συνδετικό υλικό (Σχήμα 2.4.3 β). Οι μηχανικές τους αντοχές είναι κατά κανόνα κατώτερες των αντίστοιχων με συνεχείς ίνες.

➤ Υβριδικά (hybrid), τα οποία αποτελούνται είτε από συνεχείς και ασυνεχείς ίνες (Σχήμα 2.4.3 γ), είτε από περισσότερους του ενός τύπους ινών (π.χ. ύαλο και γραφίτη). Χρησιμοποιούνται όταν το σύνθετο υλικό ινών μόνο του δεν έχει τις επιθυμητές ιδιότητες.

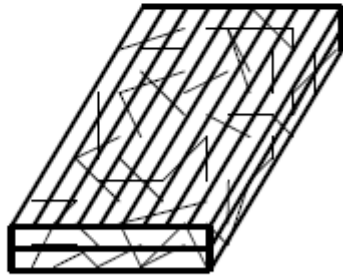
➤ Συνεχών ινών (continuous fiber) όπου στρώματα συνεχών ινών-ρητίνης τοποθετούνται στην επιθυμητή διεύθυνση και συνδέονται αποτελώντας ένα σώμα (Σχήμα 2.4.3 δ). Παρουσιάζουν μεγάλη αντοχή, αλλά η αποκόλληση μεταξύ των στρωμάτων τους είναι περισσότερο πιθανή.



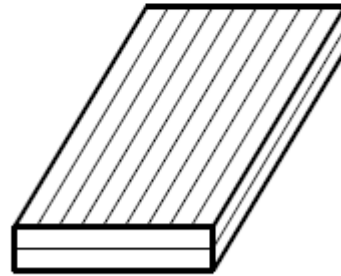
(α) Σύνθετο υλικό πλεκτών ινών.



(β) Σύνθετο υλικό ασυνεχών ινών.



(γ) Υβριδικό σύνθετο υλικό.



(δ) Σύνθετο υλικό συνεχών ινών.

Σχήμα 2.4.3 - Τύποι σύνθετων υλικών

2.4.2. Ιδιότητες σύνθετων υλικών με ίνες

Τα ινώδη υλικά επιτρέπουν την ευθυγράμμιση των νημάτων των θερμοπλαστικών να ταιριάζουν σε ειδικά σχεδιαστικά προγράμματα. Εξειδικεύοντας, ο προσανατολισμός των ινών ενίσχυσης μπορεί να αυξήσει την αντοχή και την ανθεκτικότητα στην αλλαγή του σχήματος του πολυμερούς. Τα πολυμερή με νήματα διαθέτουν σε μεγαλύτερο βαθμό τα χαρακτηριστικά αυτά, όταν οι ίνες είναι παράλληλες με τις δυνάμεις που αναπτύσσονται, ενώ συμβαίνει το αντίθετο όταν οι ίνες είναι κάθετες με τις δυνάμεις. Συνεπώς, αυτή τους η ικανότητα είναι και πλεονέκτημα και περιορισμός, που εξαρτάται από τα παρελκόμενα της χρήσης. Τα αδύναμα σημεία των κάθετων ινών μπορούν να χρησιμοποιηθούν για φυσικές αρθρώσεις και συνδέσεις, αλλά μπορούν ακόμη να προκαλέσουν μια αστοχία υλικού όταν οι επεξεργασίες παραγωγής αποτυγχάνουν να προσανατολίσουν κατάλληλα τις ίνες παράλληλα με τις αναμενόμενες δυνάμεις. Όταν οι δυνάμεις αναπτύσσονται κάθετα με τον προσανατολισμό των ινών, η αντοχή και η ελαστικότητα του πολυμερούς είναι μικρότερες από ότι της μεμονωμένης μήτρας. Στα σύνθετα υλικά κατασκευασμένα από πολυμερή ενισχυμένα με γυαλί, ο προσανατολισμός των ινών μπορεί να είναι 2 ή 3 διαστάσεων πλέξης. Αυτό σημαίνει πως όταν οι δυνάμεις είναι πιθανά κάθετες σε έναν προσανατολισμό, είναι παράλληλες σε άλλον προσανατολισμό. Το συγκεκριμένο γεγονός εξαλείφει τις πιθανότητες εμφάνισης των αδύναμων σημείων στο πολυμερές.

2.5. Υλικά ινών σύνθετων υλικών

Οι τρεις συνηθέστεροι τύποι ινών που χρησιμοποιούνται σε σύνθετα υλικά ινοπλισμένων πολυμερών είναι τα υαλονήματα, τα ανθρακονήματα και οι ίνες πολυαραμιδής.

2.5.1. Ίνες Υάλου

Τα υαλονήματα εμφανίστηκαν για πρώτη φορά στο εμπόριο το 1939. Παράγονται με μηχανικό τρόπο από γυαλί που τήκεται. Το κύριο χαρακτηριστικό του υάλου είναι ότι δεν παρουσιάζει ούτε πλήρως κρυσταλλική δομή αλλά ούτε και ιδιότητες ρευστού. Ανάλογα με το είδος της εφαρμογής για το οποίο αναπτύχθηκαν, υπάρχουν έξι διαφορετικοί τύποι υαλονημάτων. Από αυτούς, οι δύο τύποι που χρησιμοποιούνται για την επισκευή και ενίσχυση κατασκευών είναι ο ύαλος-E και ο ύαλος-S. Αν και, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.5.1, ο ύαλος-S έχει μεγαλύτερη εφελκυστική αντοχή και μέτρο ελαστικότητας από τον ύαλο-E, λόγω του υψηλού του κόστους έχει περιορισμένη εφαρμογή σε σχέση με τον δεύτερο.

Τα υφάσματα υαλονημάτων ξεκίνησαν ως ποικίλοι συνδυασμοί των SiO_2 , Al_2O_3 , B_2O_3 , CaO , ή MgO σε μορφή σκόνης. Αυτά τα μίγματα στην συνέχεια θερμαίνονται σε μια διαδικασία τήξης με θερμοκρασίες γύρω στους $1300\text{ }^\circ\text{C}$, μετά από την οποία ειδικά εργαλεία (dies) χρησιμοποιούνται να εξάγουν ίνες σε διαμέτρους από 9 έως 17 μm . Αυτές οι ίνες λοιπόν περιτυλίγονται σε μεγαλύτερα σπειρώματα και περιστρέφονται πάνω σε ειδικούς κυλίνδρους για μεταφορά και περεταίρω επεξεργασία. Τα υαλονήματα είναι μέχρι στιγμής τα πιο δημοφιλή από τα ενισχυμένα πλαστικά, και συνεπώς απολαμβάνουν μιας ευρείας γκάμας παραγωγικών επεξεργασιών, κάποιες από τις οποίες εφαρμόζονται και στις ίνες αραμιδίου ή άνθρακα.

Είδος υαλονήματος	Εφελκυστική αντοχή (MPa)	Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	Επιμήκυνση θραύσης (%)	Πυκνότητα (gr/cm^3)
Ύαλος – E	2000-3000	70-75	3.0-4.5	2.54
Ύαλος - S	3500-4800	85-90	4.5-5.5	2.48

Πίνακας 2.5.1 - Ιδιότητες υάλου – E και υάλου – S

Οι ίνες υάλου, αν και είναι ανθεκτικές στους περισσότερους διαλύτες, αντιδρούν με ορισμένες αλκαλικές ενώσεις και ισχυρά οξέα. Το γυαλί παρέχει εξαιρετική θερμική και ηλεκτρική μόνωση. Τα φύλλα υάλου έχουν μικρότερη αντοχή σε κόπωση από τα φύλλα άνθρακα ή πολυαραμιδής, αλλά μεγαλύτερη από τα περισσότερα μέταλλα. Όπως και ο άνθρακας, το γυαλί δεν παρουσιάζει ερπυστικές παραμορφώσεις, είναι όμως ευπαθές σε διάβρωση. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι παραπάνω ιδιότητες επηρεάζονται σημαντικά από τις περιβαλλοντικές συνθήκες καθώς και τη μήτρα που επιλέγεται για την παραγωγή του σύνθετου υλικού.

2.5.2. Ίνες Άνθρακα

Οι ίνες άνθρακα διατίθενται στο εμπόριο από τα τέλη της δεκαετίας του 1950. Ο άνθρακας παράγεται από πολυακρυλονιτρίλιο (PAN), πίσσα (υποπροϊόν της διύλισης του πετρελαίου) ή rayon με πυρόλυση σε πολύ υψηλή θερμοκρασία (συνήα έως 3000°C). Μέσω της πυρόλυσης απομακρύνονται από το πολυμερές του άνθρακα διάφορες ενώσεις κυανίου και άτομα υδρογόνου. Τα κρυσταλλικά φύλλα άνθρακα που σχηματίζονται εντείνονται έτσι ώστε να προσανατολιστούν παράλληλα προς τον άξονα της ίνας. Με τον

τρόπο αυτό οι κρύσταλλοι στερεοποιούνται σε μία βέλτιστη διάταξη. Θεωρητικά, οι ίνες άνθρακα είναι δυνατό να αποκτήσουν μηχανικές ιδιότητες που προσεγγίζουν τα 100 GPa εφελκυστικής αντοχής και 1000 GPa μέτρου ελαστικότητας. Πάντως, οι τιμές αυτές κατά κανόνα δεν αναπτύσσονται πλήρως λόγω ατελειών που παρουσιάζονται στη κρυσταλλική δομή. Μέσω περεταίρω επεξεργασιών γραφίτοποίησης ή εφελκυσμού, η αντοχή και η ελαστικότητα των ινών μπορούν να αυξηθούν. Οι ίνες άνθρακα κατασκευάζονται σε διαμέτρους ανάλογες με εκείνες των υαλονημάτων, δηλαδή στο εύρος 9 – 17 μm . Αυτές οι ίνες περιτυλίγονται σε μεγαλύτερα σπειρώματα για μεταφορά και περεταίρω παραγωγικές επεξεργασίες. Οι περεταίρω παραγωγικές επεξεργασίες περιλαμβάνουν την πλέξη ή την ύφανση σε υφάσματα άνθρακα.

Οι ίνες άνθρακα που διατίθενται στο εμπόριο έχουν εφελκυστική αντοχή που κυμαίνεται από 2100 MPa έως 6800 MPa με συνήθη για τις εφαρμογές τιμή της τάξης των 3500 MPa και μέτρο ελαστικότητας από 215 GPa έως 700 GPa. Η επιμήκυνση θραύσης κυμαίνεται από 0.2 έως 2.5%, ανάλογα με το είδος του νήματος και τη μέθοδο κατασκευής. Οι ίνες άνθρακα είναι χημικά αδρανείς στους περισσότερους διαλύτες, είτε αυτοί είναι όξινοι είτε βασικοί, και επιπλέον έχουν μεγάλη αντοχή στις υψηλές θερμοκρασίες. Τα υφάσματα από ανθρακονήματα και εποξική ρητίνη είναι ανθεκτικά σε κόπωση, ερπυσμό και διάβρωση. Λόγω της δράσης του ως ευγενές μέταλλο, ο άνθρακας έχει υψηλή αγωγιμότητα και μπορεί να προκαλέσει γαλβανική διάβρωση των μετάλλων που έρχονται σε επαφή μαζί του. Για το λόγο αυτό πρέπει να αποφεύγεται η απευθείας επαφή του χάλυβα ή του αλουμινίου με τις ίνες άνθρακα. Αξίζει να σημειωθεί ότι το κόστος των ανθρακονημάτων, παρότι παραμένει αρκετά υψηλό σε σχέση με τα άλλα είδη ινών, ωστόσο έχει μειωθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια.

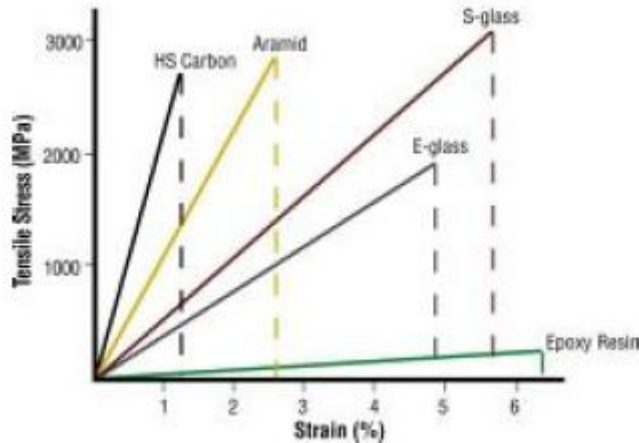
2.5.3. Ίνες Πολυαραμιδής

Οι ίνες αραμιδίου είναι περισσότερο γνωστές ως Kevlar, Nomex και Technora. Η εμπορική ονομασία των πρώτων ινών πολυαραμιδής που κυκλοφόρησαν στην αγορά στις αρχές της δεκαετίας του 1970 είναι Kevlar. Γενικά, τα αραμιδία προέρχονται από την αντίδραση ανάμεσα σε ένα στοιχείο της ομάδας των αμινών και ένα στοιχείο της ομάδας των καρβοξυλικών οξέων. Συχνά, αυτό συμβαίνει όταν ένα αρωματικό πολυαραμιδίο μετατρέπεται από μια υγρή συγκέντρωση θειϊκού οξέος σε μια κρυσταλλική ίνα. Στην συνέχεια, οι ίνες περιστρέφονται σε μεγαλύτερα σπειρώματα για να πλεχθούν σε μεγάλα νήματα ή πλεκτά υφάσματα. Οι ίνες αραμιδίου κατασκευάζονται με ποικίλες μεθόδους, που εξαρτώνται στις ποικίλες ποιότητες για αντοχή και ελαστικότητα, έτσι ώστε το υλικό να μπορεί να δημιουργηθεί κατά παραγγελία, με βάση συγκεκριμένες σχεδιαστικές ανάγκες.

Η χρήση των σύνθετων υλικών από ίνες πολυαραμιδής σε δομικά έργα είναι περιορισμένη σε σχέση με τα υαλονήματα και τα ανθρακονήματα. Κύρια εφαρμογή τους αποτελεί η θωράκιση κατασκευών από κρουστικά φορτία. Λόγω της χημικής δομής του πολυμερούς από το οποίο παράγονται, οι ίνες πολυαραμιδής έχουν μεγάλο μέτρο ελαστικότητας και υψηλή πυκνότητα. Παρόλο που ορισμένες από τις ίνες της κατηγορίας αυτής παρουσιάζουν εφελκυστική αντοχή από 3500 έως 4100 MPa και μέτρο ελαστικότητας της τάξης των 175 GPa, που σε εξαιρετικές περιπτώσεις μπορεί να φτάσει έως τα 210 GPa, η συνήθης τιμή της εφελκυστικής αντοχής είναι 3800 MPa, ενώ το μέτρο ελαστικότητας κυμαίνεται από 70 έως 130 GPa. Η επιμήκυνση θραύσης είναι μεταξύ 2.5 και 5.0%. Επιπλέον, έχουν μεγάλη αντοχή σε κόπωση και τριβή και είναι ανθεκτικές στους διαλύτες, με εξαίρεση τα ισχυρά οξέα και τις βάσεις. Επειδή είναι υδρόφιλες, παρουσιάζουν μερική απώλεια αντοχής σε θερμό περιβάλλον με υψηλό ποσοστό υγρασίας. Η θλιπτική τους αντοχή είναι σημαντικά μικρότερη από την

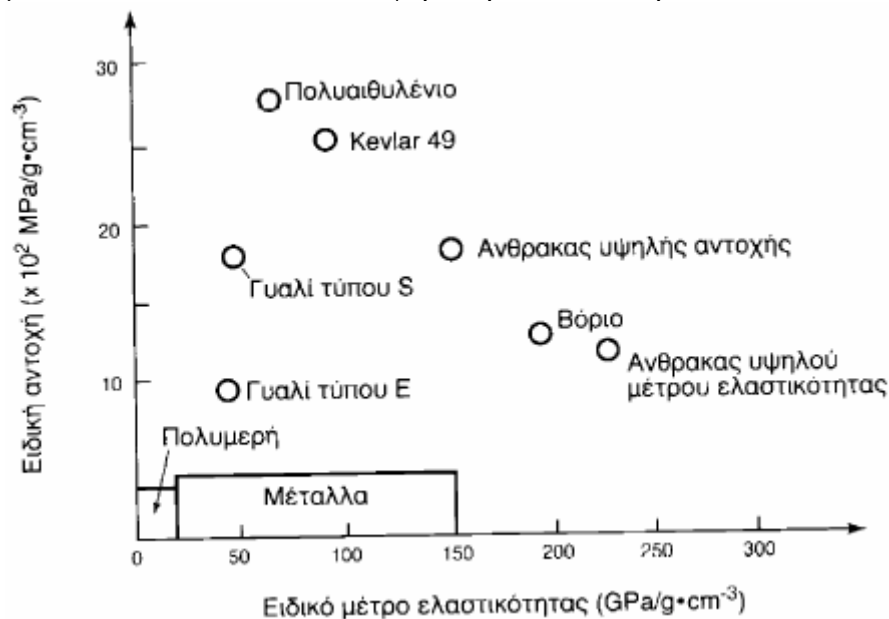
αντίστοιχη εφελκυστική (περίπου το 20%), ενώ ακόμα, υπό δεδομένη τάση, παρουσιάζουν ερπυστικές παραμορφώσεις.

Στο ακόλουθο διάγραμμα εφελκυσμού / παραμόρφωσης είναι εμφανής η μεγάλη αντοχή σε εφελκυσμό που έχουν οι ίνες σε σχέση με την εποξική ρητίνη:



Σχήμα 2.5.1 - Σύγκριση ινών ενίσχυσης, διάγραμμα εφελκυσμού/ παραμόρφωσης

Στο ακόλουθο διάγραμμα, φαίνεται η πλεονάζουσα θέση του άνθρακα, σε σύγκριση με τα υπόλοιπα υλικά, όσον αφορά την ελαστικότητα.



Σχήμα 2.5.2 - Σύγκριση ειδικού μέτρου ελαστικότητας/ ειδικής αντοχής ινών

Εκτός από τις παραπάνω τρεις κύριες κατηγορίες, άλλοι τύποι ινών που χρησιμοποιούνται σε ορισμένες εφαρμογές πολιτικού μηχανικού είναι οι ακόλουθες:

➤ Ίνες γραφίτη: παράγονται όπως και οι ίνες άνθρακα με πυρόλυση. Οι ίνες γραφίτη περιέχουν κατά τουλάχιστον 99% άνθρακα, ενώ το ποσοστό άνθρακα των ανθρακονημάτων είναι λιγότερο από 95%.

➤ Ίνες βορίου: έχουν τη μεγαλύτερη διάμετρο (0.05-0.2 mm) σε σχέση με τις άλλες ίνες. Η αντοχή και η ακαμψία τους είναι μεγαλύτερες από αυτές των ινών γραφίτη.

➤ Ίνες από καρβίδιο του πυριτίου: έχουν υψηλή αντοχή σε οξείδωση και ανθεκτικότητα στις υψηλές θερμοκρασίες.

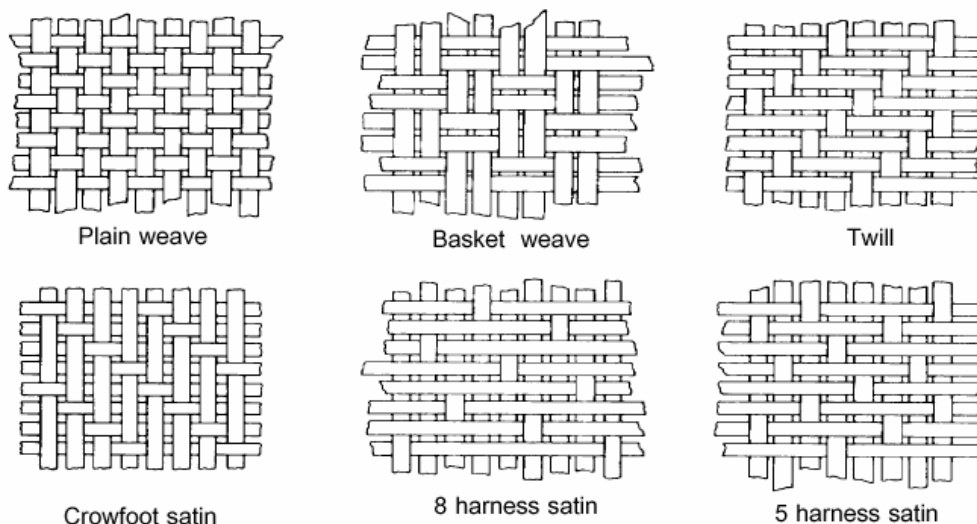
2.5.4. Επίδραση του μεγέθους ινών στις μηχανικές ιδιότητες

Το μέγεθος που έχουν οι ίνες είναι καθοριστικό για τις μηχανικές ιδιότητες του σύνθετου υλικού. Γενικά, οι μικρότερες ίνες έχουν καλύτερη μηχανική αντοχή. Επομένως, όσο λεπτότερο είναι το ύφασμα, τόσο πιο ανθεκτική γίνεται η κατασκευή. Από την άλλη πλευρά, όσο μεγαλώνει το μέγεθος των ινών, τόσο αυξάνει το μέτρο ελαστικότητάς τους, κάτι που έχει ως αποτέλεσμα την μεγαλύτερη δυσκαμψία του τελικού σύνθετου υλικού.

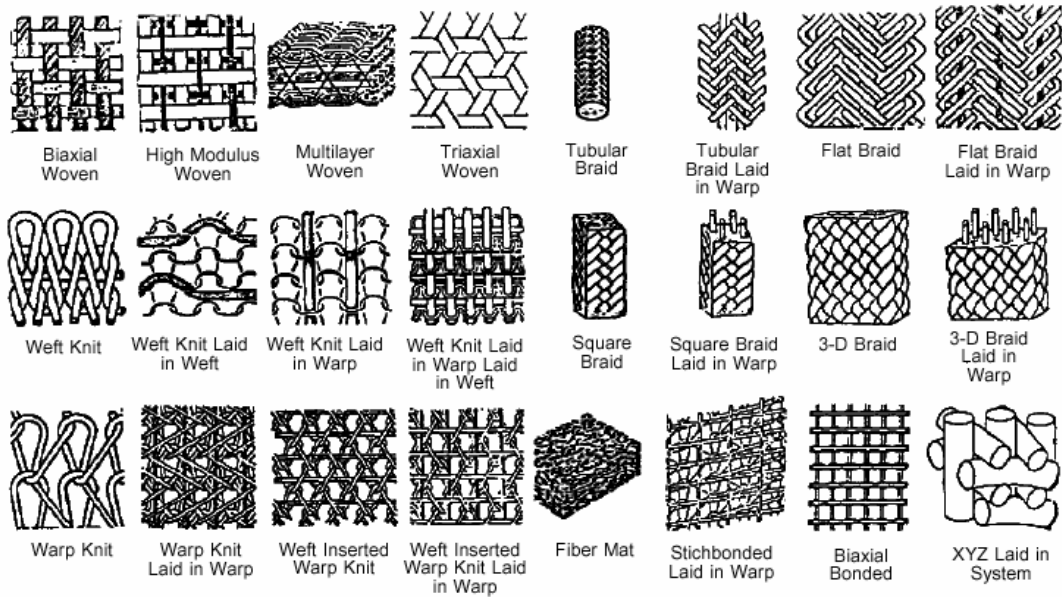
2.5.5. Επίδραση της πλέξης των ινών στις μηχανικές ιδιότητες

Στις εφαρμογές όπου τα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται λόγω των μηχανικών ιδιοτήτων τους οι ίνες στα υφάσματα είναι πάντοτε πλεγμένες (woven roving). Με το πλέξιμο οι ίνες του πλέγματος συγκρατώνται μεταξύ τους με τρόπο μηχανικό και αυτό συνεχίζει να συμβαίνει μετά τον πολυμερισμό, μέσα στην πολυμερική μήτρα. Οι τάσεις μεταφέρονται κυρίως μέσω των ινών και έτσι η αντοχή είναι μεγάλη.

Γενικά, διαφορετικές πλέξεις δίνουν ελαφρώς διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες. Παρακάτω φαίνονται οι διαθέσιμες πλέξεις που υπάρχουν στο εμπόριο, καθώς και οι διαφορετικές αρχιτεκτονικές ινών στο χώρο.



Σχήμα 2.5.3 – Πλέξεις ενισχύσεων σύμφωνα με το ASM Engineered Materials Handbook

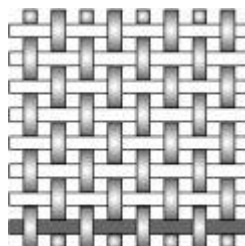


Σχήμα 2.5.4– Διαφορετικές μορφές αρχιτεκτονικών ενίσχυσης

2.5.6. Διαθέσιμες πλέξεις ινών

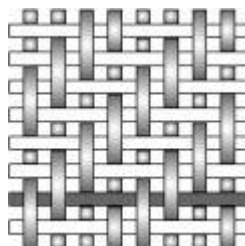
Στα υφάσματα που χρησιμοποιούνται κατά κόρον στη βιομηχανία, υπάρχουν ίνες πλεγμένες μεταξύ τους. Οι ίνες αυτές είναι συνήθως σε γωνίες 0, 22.5, 45 και 90 μοιρών. Ο τρόπος με τον οποίο είναι πλεγμένες επηρεάζει το τελικό αποτέλεσμα στο σύνθετο υλικό, καθώς αλλάζει το μηχανισμό διάδοσης τάσεων μέσα σε αυτό. Στις ακόλουθες εικόνες φαίνονται ακριβώς τα είδη πλέξης.

Plain



Κάθε οριζόντια ίνα περνά εναλλάξ πάνω και κάτω από κάθε κατακόρυφη. Το ύφασμα είναι συμμετρικό, με καλή σταθερότητα και αρκετά καλό πορώδες. Ωστόσο, είναι το πιο δύσκολο να σκεπαστεί από άλλο ύφασμα και η κυματοειδής μορφή που παίρνουν οι ίνες έχει ως αποτέλεσμα τις σχετικά χαμηλές μηχανικές ιδιότητες σε σχέση με άλλα είδη πλέξης.

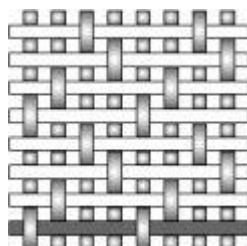
Twill



Μια ή περισσότερες οριζόντιες ίνες περνούν εναλλάξ πάνω και κάτω από δύο ή περισσότερες κατακόρυφες ίνες με επαναληπτικό τρόπο. Αυτό παράγει την οπτική αίσθηση μιας ευθείας ή διαγώνιας σπαστής ράβδωσης. Καλύτερη δυνατότητα εμποτισμού και μικρότερος κυματισμός είναι τα χαρακτηριστικά της πλέξης σε σχέση με την plain. Λόγω της λιγότερο κυματοειδούς μορφής της δίνει ομαλότερη επιφάνεια και ελαφρώς καλύτερες μηχανικές

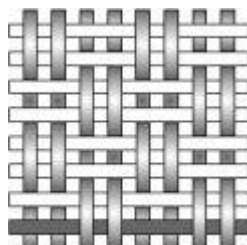
ιδιότητες.

Satin



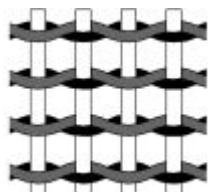
Οι πλέξεις Satin είναι στην πραγματικότητα πλέξεις Twill, τροποποιημένες ώστε να δημιουργούν λιγότερες διασταυρώσεις των οριζόντιων και κατακόρυφων ινών. Τα υφάσματα αυτών των πλέξεων είναι πολύ επίπεδα, εμποτίζονται εύκολα και λόγω της πολύ λιγότερο κυματοειδούς μορφής των ινών έχουν καλύτερες μηχανικές ιδιότητες. Ωστόσο, η χαμηλή σταθερότητα και ασυμμετρία κάνουν τη μία κατεύθυνση του υφάσματος να έχει κυρίως κατακόρυφες ή οριζόντιες ίνες, ενώ η άλλη τις υπόλοιπες. Κατά τη χρήση αυτών των πλέξεων χρειάζεται προσοχή ώστε να μην δημιουργηθούν τάσεις εξαιτίας αυτής της ασυμμετρίας στη μορφή.

Basket



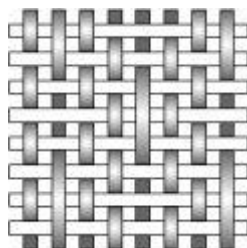
Η πλέξη αυτή είναι αντίστοιχη με την plain, μόνο που δύο ή περισσότερες οριζόντιες ίνες περνούν εναλλάξ πάνω και κάτω από δύο ή περισσότερες κατακόρυφες. Όταν έχουμε δύο και δύο τότε η ύφανση παίρνει το χαρακτηρισμό “basket 2x2”, χωρίς αυτό να την περιορίζει σε συμμετρικούς συνδυασμούς. Υπάρχουν υφάνσεις 8x4, 5x2, κλπ. Σαν ύφανση είναι πιο δυνατή από την plain, αλλά λιγότερο σταθερή.

Leno



Η ύφανση αυτή βελτιώνει τη σταθερότητα των “ανοικτών” υφασμάτων με χαμηλό αριθμό ινών. Είναι μια μορφή plain ύφανσης στην οποία οι διπλές οριζόντιες ίνες πλέκονται γύρω από διαδοχικές κατακόρυφες ώστε να δημιουργήσουν ένα σπειροειδές ζεύγος, “κλειδώνοντας” με αυτόν τον τρόπο κάθε κατακόρυφη ίνα στο ίδιο μέρος. Τα υφάσματα με αυτήν την πλέξη χρησιμοποιούνται πάντοτε με υφάσματα διαφορετικών πλέξεων, επειδή λόγω της μορφής τους δεν μπορούν να δημιουργήσουν ένα αποτελεσματικό σύνθετο προϊόν.

Mock Leno



Είναι μια έκδοση της ύφανσης plain, στην οποία σποραδικές οριζόντιες ίνες, σε ίσα διαστήματα αλλά συνήθως αρκετές ίνες μακριά, αποκλίνουν από το συνηθισμένο πάνω-κάτω κάθε μία ίνα, και το κάνουν κάθε δύο ή περισσότερες. Το ίδιο συμβαίνει με παρόμοια συχνότητα και στην κατακόρυφη διεύθυνση και το τελικό αποτέλεσμα είναι ένα ύφασμα με αυξημένο πάχος, αγριότερη επιφάνεια και πρόσθετο πορώδες.

Ιδιότητα	Plain	Twill	Satin	Basket	Leno	Mock leno
Καλή σταθερότητα	****	***	**	**	*****	***
Χαμηλό πορώδες	***	****	*****	**	*	***
Ομαλότητα	**	***	*****	**	*	**
Ισοροπία	****	****	**	****	**	****
Συμμετρία	*****	***	*	***	*	****
Χαμηλός κυματισμός	**	***	*****	**	**/*****	**

***** = άριστο , **** = καλό, ***= αποδεκτό , ** =κακό, * = πολύ κακό

Πίνακας 2.5.2 – Σύγκριση ιδιοτήτων διαθέσιμων πλέξεων

2.6 Μήτρες Σύνθετων Υλικών

2.6.1. Είδη μητρών

Τα υλικά μήτρας μπορεί να είναι οργανικά, μεταλλικά, ή κεραμικά. Ευρύτερη χρήση και εφαρμογές έχουν τα οργανικά υλικά λόγω των πολύ καλών μηχανικών και φυσικών ιδιοτήτων, της ευκολίας κατασκευής και το χαμηλότερο κόστος.

Οι οργανικές μήτρες διαχωρίζονται στις θερμοπλαστικές και τις θερμοσκληρυνόμενες. Οι θερμοπλαστικές μήτρες δημιουργούνται από πολυμερή όπως το πολυεθυλένιο (PE) και το πολυεστυρένιο (PS) με γραμμικές αλυσίδες. Λόγω του πολύ χαμηλού κόστους τους χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές ευρείας κατανάλωσης με ενισχυτικά υλικά χαμηλού κόστους, έτσι ώστε το τελικό προϊόν να είναι χαμηλής τιμής. Οι θερμοσκληρυνόμενες μήτρες χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές υψηλών απαιτήσεων, όπου χρειάζονται καλύτερες μηχανικές ιδιότητες και θερμοκρασιακή σταθερότητα.

Ρητίνες χρησιμοποιούνται συνήθως ως μήτρες για την παραγωγή σύνθετων υλικών με ίνες. Η ρητίνη αποτελεί τη συνδετική ύλη μεταξύ των ινών και, ταυτόχρονα, συνεισφέρει στην ανθεκτικότητα και στην ηλεκτρική μόνωση του σύνθετου υλικού. Προκειμένου να αναπτυχθεί ισχυρή μηχανική και χημική σύνδεση μεταξύ ινών και ρητίνης, είναι απαραίτητη η ύπαρξη συνάφειας μεταξύ τους. Επιπλέον πρέπει να υπάρχει χημική συμβατότητα έτσι ώστε να μη λάβουν χώρα ανεπιθύμητες αντιδράσεις κατά τη σύνδεσή τους.

Οι ρητίνες από τη φύση τους είναι τουλάχιστον μία τάξη μεγέθους ασθενέστερες από τις ίνες στις οποίες εμποτίζονται. Είναι περισσότερο ευπαθείς στη θερμότητα και στην πυρκαγιά και γενικά εμφανίζουν μεγαλύτερη ευαισθησία στους χημικούς διαλύτες, τα οξέα, τις βάσεις και το νερό σε σχέση με τις ίνες. Όλα τα είδη των ρητινών παρουσιάζουν επίσης σημαντικές ερπυστικές παραμορφώσεις σε σχέση με τα παραδοσιακά δομικά υλικά. Παρόλα αυτά, τα σύνθετα υλικά ενισχυμένων πολυμερών δεν θα μπορούσαν να υπάρξουν χωρίς τις ρητίνες, καθώς αυτές είναι που μεταφέρουν τα φορτία και κατανέμουν τις τάσεις στις ίνες κάθε στρώσης του πολυμερούς. Με τον τρόπο αυτό επιτρέπουν στο ενισχυμένο πολυμερές να συμπεριφέρεται σχεδόν σαν ομοιογενές υλικό.

Η μεγάλη διάρκεια ζωής που χαρακτηρίζει τις μήτρες πολυμερών σχετίζεται με την προοδευτική αλλαγή των φυσικών τους ιδιοτήτων, η οποία λαμβάνει χώρα με την πάροδο του χρόνου και τη φόρτιση. Η ενίσχυση των σύνθετων υλικών μπορεί να έχει εξαιρετικά σημαντική επίδραση στη διάρκεια ζωής της μήτρας πολυμερούς. Η κατάρρευση λόγω ερπυσμού που αποτελεί τυπική μορφή αστοχίας των ενισχυμένων πολυμερών οφείλεται στην πλαστική συμπεριφορά της μήτρας από πολυμερές και όχι στις ίνες.

Οι ρητίνες που χρησιμοποιούνται συνήθως για την παραγωγή σύνθετων υλικών για την επισκευή και ενίσχυση κατασκευών είναι οι εποξικές, οι πολυεστερικές και οι βινυλεστερικές. Οι σημαντικότερες μηχανικές ιδιότητες των τριών αυτών κατηγοριών ρητινών παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.6.1.

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

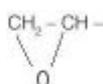
Πίνακας 2.6.1- Ιδιότητες εποξικής, πολυεστερικής και βινυλεστερικής ρητίνης

2.6.2. Εποξικές Ρητίνες

Οι εποξικές ρητίνες θεωρούνται γενικά οι καλύτερες μήτρες για χρήση σε ενισχυμένα πολυμερή λόγω της μεγάλης αντοχής, συγκολλητικής ικανότητας, ανθεκτικότητας σε κόπωση, καθώς και σε χημική διάβρωση, που παρουσιάζουν. Όπως συμβαίνει και με τα άλλα είδη ρητινών, για τις εποξικές οι ιδιότητες ποικίλουν σημαντικά ανάλογα με τη ρητίνη βάσης και τις χημικές ενώσεις που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή τους. Ο συντελεστής ιξώδους των εποξικών ρητινών είναι γενικά μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο συντελεστή τόσο των πολυεστερικών όσο και των βινυλεστερικών ρητινών. Χρειάζονται επίσης περισσότερο χρόνο για να αναπτύξουν πλήρως τις μηχανικές τους ιδιότητες, έχουν πολύ καλή αντίσταση στο νερό και έχουν υψηλότερο κόστος σε σχέση με τις δύο άλλες κατηγορίες ρητινών. Η εποξική ρητίνη είναι σχεδόν πλήρως διαφανής όταν αποπερατώνεται η πυρόλυση (curing). Στην αεροδιαστημική βιομηχανία, η εποξική ρητίνη χρησιμοποιείται ως ένα δομικό υλικό μήτρας ή ως μια δομική κόλλα.

2.6.2.1. Χημική σύσταση

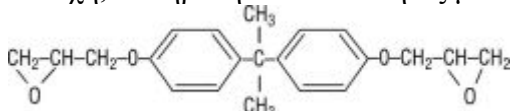
Ο όρος “έποξυ” αναφέρεται στη χημική ομάδα που αποτελείται από ένα άτομο οξυγόνου ενωμένο με δύο άτομα άνθρακα, τα οποία έχουν κάποιο δεσμό μεταξύ τους. Η απλούστερη “έποξυ” είναι ένας δακτύλιος τριών ατόμων γνωστός και ως “άλφα-έποξυ” και η χημική δομή του φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 2.6.1 – Άλφα - έποξυ

Ο σχηματισμός της χημικής αυτής ένωσης γίνεται από μια μοριακή δομή μακριάς αλυσίδας, όμοια με αυτή του βινυλεστέρα με αντιδρώντα τμήματα στις δύο άκρες. Στην

έποξυ όμως, αυτά τα τμήματα ατόμων αποτελούνται από εποξικές ομάδες αντί για εστερικές ομάδες. Η απουσία εστερικών ομάδων σημαίνει ότι η εποξική ρητίνη έχει καλή αντίσταση στο νερό. Το μόριο της εποξικής περιέχει ακόμη δύο βενζολικές ομάδες στο κέντρο του, που του επιτρέπουν να απορροφά καλύτερα τόσο τις μηχανικές όσο και τις θερμικές τάσεις από τις ευθύγραμμες ομάδες και επομένως δίνει στην εποξική πολύ καλή αντοχή, σκληρότητα και ιδιότητες μονωτή θερμότητας.

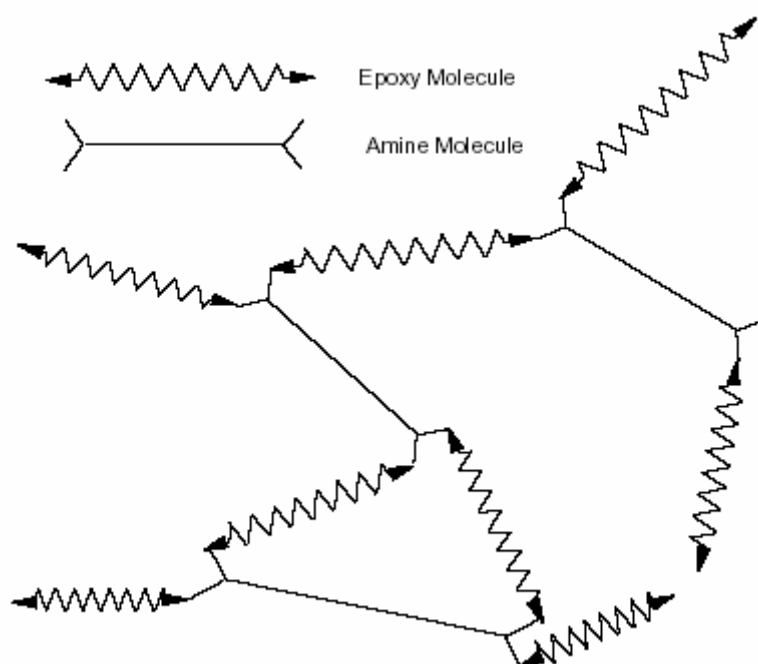


Σχήμα 2.6.2 – Τμήμα εποξικής αλυσίδας

2.6.2.2. Ιδιότητες

Οι εποξικές ρητίνες έχουν πλήθος χρήσιμων ιδιοτήτων:

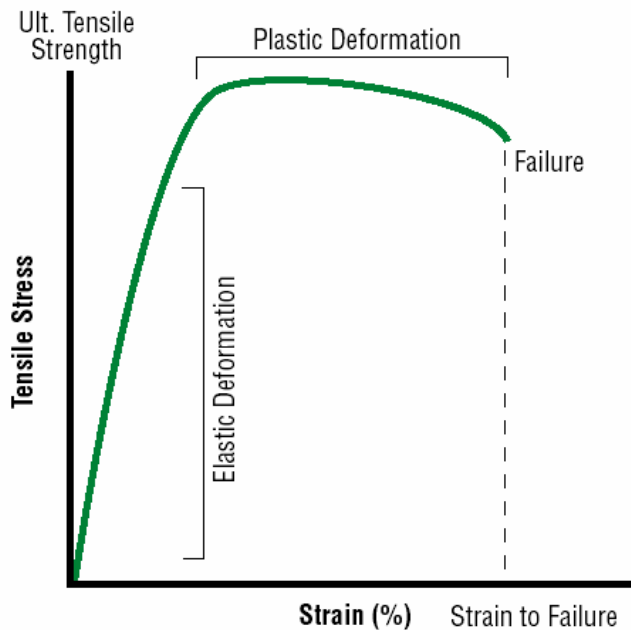
- Έχει χαμηλό ιξώδες.
- Παρουσιάζουν πολύ μικρή συστολή κατά τον πολυμερισμό τους. Έτσι αποφεύγονται πρόσθετες τάσεις μέσα στο υλικό.
- Μεγάλη αντοχή συγκολλήσεων.
- Μεγάλη μηχανική αντοχή.
- Κακή ηλεκτρική αγωγιμότητα (καλοί μονωτές).
- Καλή χημική αντίσταση.



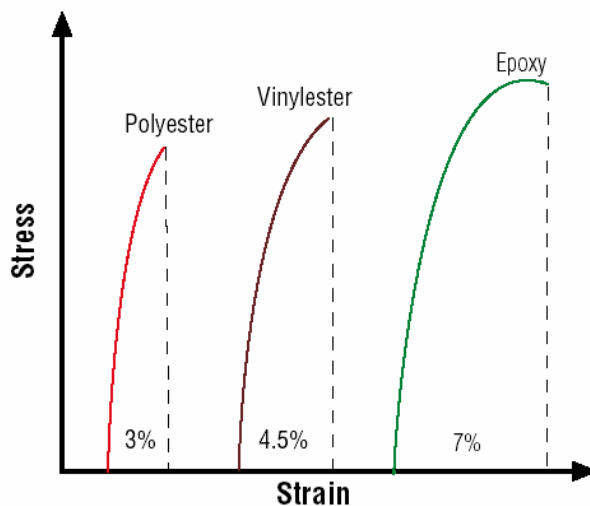
Σχήμα 2.6.3 – Αναπαράσταση τρισδιάστατης μορφής πολυμερισμένης εποξικής ρητίνης

2.6.2.3. Μηχανικές ιδιότητες

Το τυπικό διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης της εποξικής ρητίνης φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα. Η ρητίνη συμπεριφέρεται σαν πολυμερές και έχει χαρακτηριστική πλαστική περιοχή πριν τη θραύση.



Σχήμα 2.6.4– Διάγραμμα τάσης / παραμόρφωσης εποξικής ρητίνης



Σχήμα 2.6.5 – Τυπικό διάγραμμα κόπωσης / τάσης για πολυεστερική , βινυλεστερική και εποξική ρητίνη

2.6.3. Πολυεστερικές Ρητίνες

Η πολυεστερική ρητίνη, τείνει να έχει κιτρινωπή απόχρωση, και είναι κατάλληλη για τα περισσότερα αεροσκάφη. Οι αδυναμίες της είναι το ότι είναι ευαίσθητη στις ακτίνες UV και τείνει να μειώνει τις ιδιότητές της με το πέρασμα του χρόνου, και έτσι συνήθως είναι με επίχρισμα, για να την βοηθήσει να διαφυλαχθεί. Συχνά χρησιμοποιείται στην κατασκευή σανίδων για σερφ και για θαλάσσιες εφαρμογές. Το σκληρυντικό της είναι το MEKP, και αναμειγνύεται σε 14 σταγόνες ανά oz. Το MEKP αποτελείται από μεθυλαιθυλκετονπεροξείδιο, έναν καταλύτη. Όταν το MEKP αναμειγνύεται με τη ρητίνη, η χημική αντίδραση που συμβαίνει προκαλεί θερμότητα για να συσταθεί και να διατηρηθεί ή να σκληρυνθεί η ρητίνη.

Οι ρητίνες αυτές αποτελούν τον κύριο όγκο των πολυμερών που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία παραγωγής σύνθετων υλικών. Πρόκειται για ακόρεστους πολυεστέρες

που παράγονται από την αντίδραση γλυκόλης, είτε με διβασικά οξέα είτε με ανυδρίτες. Λόγω της μεγάλης ποικιλίας των συστατικών τους στοιχείων, οι ιδιότητες των πολυεστερικών ρητινών μπορούν να διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους.

Η χημική αντίδραση με την οποία παράγονται οι πολυεστέρες είναι σημαντικά εξώθερμη. Για το λόγο αυτό απαιτείται μεγάλη προσοχή στη χρήση της ποσότητας της μάζας των αντιδρώντων. Εάν η μάζα είναι μεγάλη το φύλλο πολυεστέρα μπορεί να αναφλεγεί ή να ρηγματωθεί. Αντίθετα εάν η μάζα είναι μικρή η θερμότητα που εκλύεται δεν επαρκεί για την ολοκλήρωση της αντίδρασης.

Οι πολυεστέρες παρουσιάζουν μέτρια ανθεκτικότητα στους διαλύτες και τα οξέα, ενώ είναι ευπαθείς στις βάσεις και στο νερό υψηλής θερμοκρασίας. Είναι γενικά λιγότερο ανθεκτικοί σε κόπωση συγκριτικά με τις εποξικές και τις βινυλεστερικές ρητίνες. Οι πολυεστερικές ρητίνες είναι περίπου 4 φορές χαμηλότερες σε τιμή και σε μηχανικές ιδιότητες από τις εποξικές, γεγονός που τις καθιστά ιδιαίτερα δημοφιλείς σε εφαρμογές μεγάλης παραγωγής κατασκευών με μέτριες μηχανικές ιδιότητες. Ενώ, στις κατασκευές όπου απαιτούνται οι βέλτιστες ιδιότητες του σύνθετου υλικού χρησιμοποιούνται κατά αποκλειστικότητα εποξικές ρητίνες. Η παραμόρφωση θραύσης είναι κατά κανόνα της τάξης του 1%. Ωστόσο, το κυριότερο μειονέκτημα των πολυεστερικών ρητινών για χρήση τους σε κατασκευές που κατοικούνται είναι η δυσάρεστη οσμή λόγω της χημικής τους σύστασης.

2.6.4. Βινυλεστερικές Ρητίνες

Η βινυλεστερική ρητίνη τείνει να έχει μια κοκκινωπή προς πράσινη απόχρωση. Αυτή η ρητίνη έχει χαμηλότερη ρευστότητα από την πολυεστερική ρητίνη, και είναι πιο διαφανής. Επίσης, συχνά κυκλοφορεί η φήμη ότι είναι ανθεκτική στα καύσιμα, αλλά θα λιώσει εάν έλθει σε επαφή με βενζίνη. Ακόμη, είναι πιο ανθεκτική κατά τη διάρκεια του χρόνου, όσον αφορά την μείωση στην μετατροπή της ενέργειας σε μορφές που πολύ δύσκολα μετατρέπονται σε έργο, από τις πολυεστερικές ρητίνες, και είναι πιο ελαστική. Χρησιμοποιεί το ίδιο σκληρυντικό με τις πολυεστερικές ρητίνες (με τον ίδιο λόγο ανάμειξης) και το κόστος είναι συνήθως μεταξύ του κόστους των εποξικών και των πολυεστερικών ρητινών.

Πρόκειται για υβριδικές ρητίνες που παράγονται με αλυσιδωτές αντιδράσεις ενός εποξικού πολυμερούς με ακρυλικές ή μεθακρυλικές ενώσεις. Λόγω της παρουσίας του εποξικού πολυμερούς, οι βινυλεστερικές ρητίνες είναι περισσότερο εύκαμπτες, σκληρότερες, πιο ανθεκτικές σε κόπωση και λιγότερο χημικά ενεργές σε σχέση με τις πολυεστερικές. Οι υδροξυλικές ενώσεις που περιέχονται στο εποξικό πολυμερές σχηματίζουν δεσμούς υδρογόνου με αντίστοιχες ενώσεις στην επιφάνεια των ινών υάλου. Με τον τρόπο αυτό βελτιώνεται σημαντικά η σύνδεση της ρητίνης με τις ίνες, αν και δεν φτάνει στο επίπεδο της συγκολλησιμότητας των εποξικών ρητινών. Αυτό οφείλεται κυρίως στη μεγάλη απώλεια όγκου των βινυλεστερικών ρητινών λόγω συστολής ξηράνσεως. Αντιθέτως, οι βινυλεστερικές ρητίνες δεν έχουν τόσο υψηλή αντοχή και ανθεκτικότητα σε κόπωση όσο οι εποξικές. Λόγω της χημικής τους σύστασης, αντιμετωπίζουν επίσης το ίδιο πρόβλημα δυσσομίας με τις πολυεστερικές ρητίνες.

2.6.5. Shape memory polymer - SMP

Οι ρητίνες που αποτυπώνουν σχήματα (Shape memory polymer - SMP) έχουν ποικίλα ορατά χαρακτηριστικά που εξαρτώνται από τον σχηματισμό τους. Αυτές οι ρητίνες

μπορεί να είναι βασισμένες είτε στην εποξική ρητίνη, οι οποίες μπορεί να χρησιμοποιηθούν στην αυτοκινητοβιομηχανία, είτε στο ακρυλικό, οι οποίες μπορεί να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές πολύ χαμηλών θερμοκρασιών, όπως είναι οι αισθητήρες που ανιχνεύουν εάν τα τρόφιμα έχουν θερμανθεί πάνω από μια συγκεκριμένη μέγιστη θερμοκρασία. Αυτές οι ρητίνες είναι μοναδικές στο γεγονός ότι το σχήμα τους μπορεί να αλλάζει απίστευτα γρήγορα υπό θέρμανση πάνω από την θερμοκρασία μετάπτωσης γυαλιού τους (glass transition temperature - T_g). Όταν θερμαίνονται, γίνονται εύκαμπτες και ελαστικές, επιτρέποντας την εύκολη διάρθρωση. Άπαξ και ψυχθούν, θα συγκρατήσουν το νέο τους σχήμα. Οι ρητίνες θα επιστρέψουν στα αρχικά τους σχήματα μόλις ξαναθερμανθούν πάνω από την θερμοκρασία μετάπτωσης γυαλιού τους (glass transition temperature (T_g)). Το πλεονέκτημα των ρητινών αυτών είναι ότι μπορούν να λάβουν ένα σχήμα και να επανέλθουν με μεγάλη ταχύτητα, χωρίς να χάσουν τις ιδιότητες των υλικών τους.

2.6.6. Απαιτήσεις υλικού από την μήτρα

Η μήτρα θα πρέπει να ικανοποιεί ορισμένες απαιτήσεις, έτσι ώστε να είναι κατάλληλη για την επεξεργασία των FRP και να διασφαλίζει μια επιτυχή ενίσχυση από μόνη της. Πιο συγκεκριμένα, η μήτρα θα πρέπει να είναι ικανή να διαρρέει με τον κατάλληλο τρόπο, και να συνδέεται με τις ίνες μέσα σε έναν ανεκτό χρόνο αποπεράτωσης. Επίσης, είναι προτιμότερο η μήτρα να συνδέεται χημικά με την ενίσχυση των ινών, έτσι ώστε να επιτευχθεί βέλτιστη συγκόλληση. Επιπλέον, θα πρέπει να περιβάλλει πλήρως τις ίνες, για να τις προστατεύσει από εγκοπές και θραύσεις, που θα μπορούσαν να μειώσουν την αντοχή τους, αλλά και να μεταφέρει δυνάμεις στις ίνες. Οι ίνες θα πρέπει να διατηρούνται ξεχωριστά μεταξύ τους, έτσι ώστε εάν συμβεί αστοχία, να περιορισθεί όσο το δυνατόν περισσότερο, αλλά και εάν η αστοχία συμβεί, πρέπει ακόμη η μήτρα να αποκολληθεί από τις ίνες για παρόμοιους λόγους. Τελικά, η μήτρα πρέπει να είναι από ένα πλαστικό που να παραμένει χημικά και φυσικά σταθερό, κατά τη διάρκεια και μετά τις διαδικασίες της ενίσχυσης και της διαμόρφωσης. Το υλικό της ίνας, για να είναι κατάλληλο για ενίσχυση, θα πρέπει να πληροί ορισμένες προδιαγραφές. Αρχικά, να αυξάνει την αντοχή σε εφελκυσμό και τον συντελεστή ελαστικότητας της μήτρας. Ακόμη, οι ίνες να υπερβαίνουν τις κρίσιμες τιμές των συστατικών τους. Στην συνέχεια, η αντοχή και η ελαστικότητα των ινών μόνο, θα πρέπει να υπερβαίνουν τα αντίστοιχα μεγέθη της μήτρας. Εν τέλει, θα πρέπει να υφίσταται βέλτιστος συνδυασμός/ συγκόλληση ανάμεσα στην μήτρα και τις ίνες.

2.7 Ιδιότητες σύνθετων υλικών

2.7.1. Γενικά

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

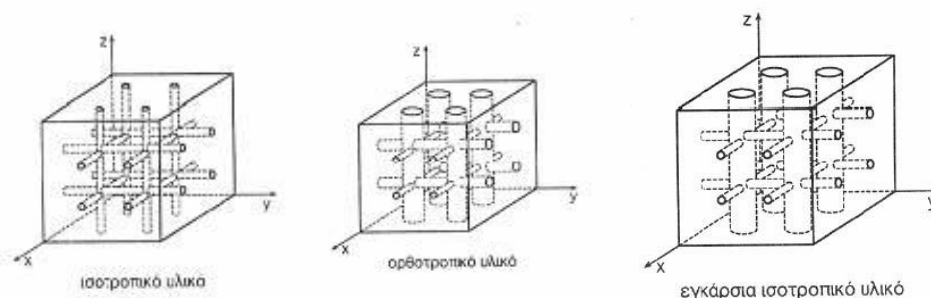
χρησιμοποιούνται για την επισκευή και ενίσχυση κατασκευών παρουσιάζουν πλαστική παραμόρφωση ή έστω διαρροή. Αντίθετα η θραύση είναι η τυπική μορφή αστοχίας ενός σύνθετου υλικού που καταπονείται από οριακή τιμή τάσης.

2.7.2. Μακροσκοπική ανάλυση

i) Ισοτροπικότητα – Ανισοτροπικότητα

Τα περισσότερα συμβατικά κατασκευαστικά υλικά είναι ομοιογενή και ισότροπα. Ομοιογενές είναι το σώμα του οποίου οι ιδιότητες έχουν την ίδια τιμή σε οποιαδήποτε θέση, δηλ. η ιδιότητα είναι ανεξάρτητη της θέσεως εντός του σώματος. Ισότροπο είναι το σώμα του οποίου οι ιδιότητες σε κάθε σημείο του είναι ίδιες σε κάθε διεύθυνση, δηλ. η ιδιότητα είναι ανεξάρτητη της διεύθυνσεως ή του προσανατολισμού.

Σε αντίθεση με τα συμβατικά υλικά, τα σύνθετα υλικά είναι κατά κανόνα ανομοιογενή και ανισότροπα, τις περισσότερες δε φορές ορθοτροπικά. Κατ' αντιστοιχία με τους παραπάνω ορισμούς: Ανομοιογενές είναι το σώμα του οποίου οι ιδιότητες σε κάποιο σημείο είναι συνάρτηση του προσανατολισμού ή της διεύθυνσεως και, ορθοτροπικό είναι το σώμα του οποίου οι ιδιότητες είναι διαφορετικές στις τρεις διευθύνσεις του καρτεσιανού συστήματος, έχουν όμως τρία επίπεδα συμμετρίας, που ορίζονται από το καρτεσιανό σύστημα.



ii) Μηχανικές ιδιότητες

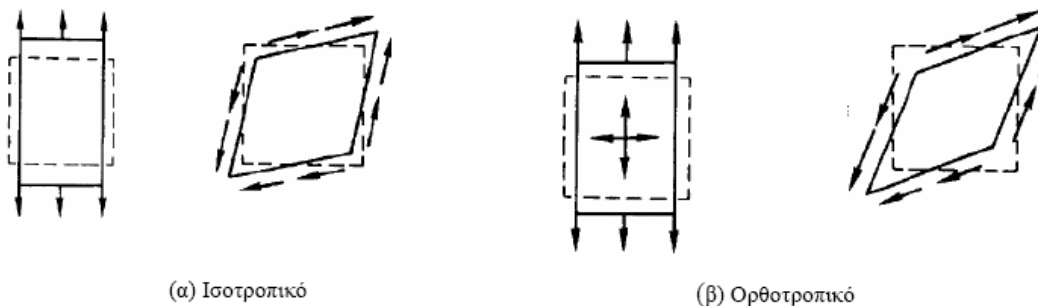
Οι ιδιότητες του σύνθετου υλικού προκύπτουν ως συνδυασμός των ιδιοτήτων των διακριτών συστατικών του υλικών, δηλαδή των ινών και της μήτρας. Στον Πίνακα 2.7.1 παρουσιάζονται η εφελκυστική αντοχή, το μέτρο ελαστικότητας και το πάχος μίας στρώσης των δύο συνηθέστερων τύπων ενισχυμένων πολυμερών υγρής εφαρμογής που χρησιμοποιούνται για ενίσχυση δομικών στοιχείων. Οι τύποι αυτοί προκύπτουν με συνδυασμό είτε υαλονημάτων και εποξικής ρητίνης είτε ανθρακονημάτων και εποξικής ρητίνης.

Τύπος σύνθετου υλικού	Εφελκυστική αντοχή (MPa)	Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	Πάχος στρώσης (mm)
Υαλονήματα και εποξική ρητίνη	1800-4300	65-80	0.30-1.30
Ανθρακονήματα και εποξική ρητίνη	2200-4300	200-145	0.12-0.60

Πίνακας 2.7.1 - Ενδεικτικές ιδιότητες σύνθετων υλικών ενισχυμένων πολυμερών

Τα κατασκευαστικά υλικά χαρακτηρίζονται από τις μηχανικές τους ιδιότητες, οι οποίες ποσοτικοποιούν τη συμπεριφορά τους, σε συγκεκριμένες φορτίσεις. Οι ιδιότητες αυτές είναι το μέτρο ελαστικότητας ή μέτρο του Young $\{E\}$, το οποίο σχετίζει τις παραμορφώσεις που παραλαμβάνει ένα υλικό σε σχέση με την κατακόρυφη τάση που δέχεται, ο λόγος Poisson $\{\nu\}$, ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος των παραμορφώσεων που λαμβάνει ένα υλικό σε δύο κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις, και το μέτρο διάτμησης $\{G\}$, το οποίο δείχνει τις παραμορφώσεις σε σχέση με τη διατμητική τάση που δέχεται ένα υλικό.

Τα σύνθετα πολύστρωτα είναι συχνά ορθοτροπικά, δηλαδή έχουν τουλάχιστον 2 επίπεδα συμμετρίας στα οποία οι ιδιότητες δεν εξαρτώνται από την κατεύθυνση. Μια εφαρμοζόμενη τάση προκαλεί διαφορετική παραμόρφωση στη διεύθυνση εφαρμογής της και στην κάθετη σ' αυτήν διεύθυνση, ενώ το μέτρο διάτμησης είναι ανεξάρτητο των μεγεθών E και ν . Για τον χαρακτηρισμό των ορθοτροπικών υλικών απαιτούνται 9 μεγέθη, 3 για κάθε διεύθυνση: E_{xy} , E_{yz} , E_{xz} , ν_{xy} , ν_{yz} , ν_{xz} , G_{xy} , G_{yz} , G_{xz} . Στα ορθοτροπικά υλικά δεν υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ διατμητικών τάσεων – ορθών παραμορφώσεων ($\tau - \epsilon$), ορθών τάσεων και διατμητικών παραμορφώσεων ($\sigma - \gamma$), καθώς και διατμητικών τάσεων – διατμητικών παραμορφώσεων σε διαφορετικά επίπεδα. Στο Σχήμα 2.7.1 παρουσιάζεται η συμπεριφορά ενός ισοτροπικού (Σχήμα 2.7.1α) και ενός ορθοτροπικού (Σχήμα 2.7.1β) υλικού, σε ορθή τάση και σε διάτμηση.



Σχήμα 2.7.1 - Συμπεριφορά σε ορθή τάση και σε διάτμηση ισοτροπικών και ορθο-τροπικών υλικών

Οι σχέσεις μεταξύ τάσεων και παραμορφώσεων στα σύνθετα υλικά είναι γραμμικές, και ακολουθούν το νόμο του Hooke, ο οποίος στα ομοιογενή ισότροπα υλικά ορίζει ότι η σχέση μεταξύ μιας επιβαλλόμενης τάσης σ και της παραμόρφωσης ϵ που προκαλείται είναι :

$$\sigma = E * \epsilon \quad (2-1)$$

Όταν ένα εξωτερικό φορτίο εφαρμόζεται στην διεύθυνση των ινών ενός μονοδιευθυντικού (οι ίνες προσανατολισμένες σε μία διεύθυνση) στρώματος συνθέτου υλικού, ίνες και μήτρα παραμορφώνονται το ίδιο, εφ' όσον η πρόσφυση μεταξύ τους είναι τέλεια, και συνεπώς ισχύει:

$$\epsilon_f = \epsilon_m = \epsilon_1 \quad (2-2)$$

όπου ο δείκτης 1 δείχνει την διεύθυνση των ινών, ο f τις ίνες και ο m την μήτρα. Οι αντίστοιχες τάσεις, με βάση τις σχέσεις (2-1) και (2-2) υπολογίζονται ως εξής:

$$\sigma_f = E_f * \epsilon_1 \quad (2-3)$$

$$\sigma_m = E_m * \epsilon_1 \quad (2-4)$$

Καθώς οι ίνες αποτελούν την ενισχυτική φάση του υλικού ($E_f > E_m$), φέρουν και το μεγαλύτερο μέρος του εξωτερικού φορτίου. Εάν P είναι η εφαρμοζόμενη δύναμη επί διατομής συνθέτου υλικού τότε η μέση ορθή τάση υπολογίζεται,

$$\sigma = P / A \quad (2-5)$$

Η δύναμη P κατανέμεται και στις δύο φάσεις έτσι ώστε $P = P_f + P_m$ ενώ ισχύει επίσης:

$$P_f = \sigma_f \cdot A_f \quad \text{και} \quad P_m = \sigma_m \cdot A_m$$

$$\text{Συνεπώς, } P = \sigma_f \cdot A_f + \sigma_m \cdot A_m$$

όπου P_f η δύναμη επί των ινών, P_m η δύναμη επί της μήτρας, A_f η καθαρή διατομή ινών στην διατομή του δοκιμίου και A_m η καθαρή διατομή μήτρας στην διατομή του δοκιμίου
Η τάση στην διεύθυνση 1 επί της διατομής A είναι:

$$\sigma_1 = E_1 \cdot \epsilon_1 \quad (2-6)$$

όπου E_1 το μέτρο ελαστικότητας του συνθέτου υλικού στη διεύθυνση 1 και ϵ_1 η μηχανική παραμόρφωση στην ίδια διεύθυνση. Με αντικατάσταση των Εξ. (2-5), (2-6) στην Εξ. (2-3) προσδιορίζεται το μέτρο ελαστικότητας του συνθέτου υλικού στη διεύθυνση 1

$$E_1 = E_f \cdot (A_f/A) + E_m \cdot (A_m/A) + E_f \cdot V_f + E_m \cdot V_m = E_f \cdot V_f + E_m \cdot (1 - V_f)$$

που δεν είναι τίποτε άλλο από τον νόμο των μίξεων. Στην πραγματικότητα, οι πειραματικές μετρήσεις δίνουν μια απόκλιση της τάξεως του 2% και αυτό οφείλεται στους διαφορετικούς λόγους Poisson των δύο φάσεων.

Παρόμοια είναι η ανάλυση για τον προσδιορισμό του εγκάρσιου μέτρου ελαστικότητας E_2 :

$$E_2 = (E_f \cdot E_m) / (E_f \cdot V_m + E_m \cdot V_f)$$

Ο προσδιορισμός του λόγου Poisson ν_{12} βασίζεται στις ίδιες υποθέσεις στις οποίες βασίστηκε η εξαγωγή του διαμήκους μέτρου ελαστικότητας E_1 . Έτσι βρίσκουμε για τον ν_{12} ,

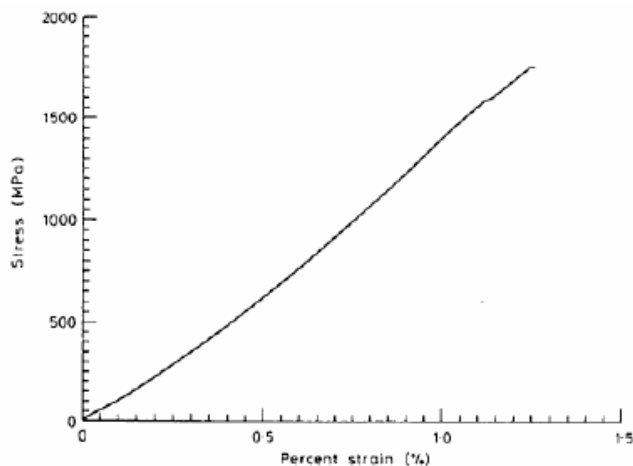
$$\nu_{12} = \nu_f \cdot V_f + \nu_m \cdot V_m$$

Το μέτρο διάτμησης G_{12} προσδιορίζεται εάν υποθέσουμε ότι διατμητικές τάσεις στην ίνα και στην μήτρα είναι ίδιες για διάτμηση στο επίπεδο 12. Επίσης θα πρέπει να αγνοήσουμε την μη γραμμική συμπεριφορά σε διατμητική τάση που παρουσιάζουν τα ινώδη υλικά και να θεωρήσουμε ότι η συμπεριφορά αυτή είναι γραμμική. Το αποτέλεσμα για το G_{12} είναι,

$$G_{12} = (G_f \cdot G_m) / (G_f \cdot V_m + G_m \cdot V_f) \quad (2-8)$$

Σημειώνεται επίσης ότι τα σύνθετα υλικά παρουσιάζουν μόνο γραμμική ελαστική συμπεριφορά. Αυτό σημαίνει ότι σε κατάσταση φόρτισης, οι παραμορφώσεις αυξάνονται

ανάλογα με την επιβαλλόμενη τάση, με σταθερό ρυθμό, μέχρι να επέλθει τελικά η θραύση. Η συμπεριφορά αυτή κατατάσσει τα σύνθετα υλικά ως ψαθυρά. Στο Σχήμα 2.7.2 απεικονίζεται μια τυπική καμπύλη τάσεων – παραμορφώσεων σύνθετου υλικού, όπου φαίνεται η γραμμική ελαστική συμπεριφορά τους.



Σχήμα 2.7.2 - Τυπική καμπύλη τάσεων – παραμορφώσεων μονοαξονικού σύνθετου υλικού

2.7.3. Μικροσκοπικά

Οι τελικές ιδιότητες ενός ινώδους σύνθετου υλικού εξαρτώνται και από γεωμετρικές παραμέτρους όπως διάμετρος, μήκος, περιεκτικότητα κατ' όγκο των ινών V_f , ευθυγράμμιση και χωρική διάταξη των ινών εντός του υλικού της μήτρας.

α) Συνεχείς ίνες σε μονοδιάστατη στρώση

Σε μια μονοδιάστατη στρώση οι ίνες θεωρούνται διατεταγμένες παράλληλα η μία δίπλα στην άλλη σχηματίζοντας τετραγωνικό ή εξαγωνικό πλέγμα. Η περιεκτικότητα κατ' όγκο των ινών V_f (volume fraction) προκύπτει αναλυτικά για κάθε μία ιδανική διάταξη συναρτήσει της διαμέτρου των ινών και της μεταξύ τους απόστασης. Η περιεκτικότητα κατ' όγκο μεγιστοποιείται όταν οι ίνες εφάπτονται η μία στην άλλη. Πρέπει να σημειωθεί ότι ακόμα και για τιμές $V_f = 0,3$ η απόσταση των περιμέτρων των ινών είναι μικρότερη της διαμέτρου των. Πρακτικά, περιεκτικότητα 0,7 είναι από τις μεγαλύτερες που επιτυγχάνονται. Όσο μικρότερη η περιεκτικότητα V_f , τόσο χειρότερη ευθυγράμμιση των ινών εντός της στρώσης. Η περιεκτικότητα κατά βάρος W_f εκφράζεται ως συνάρτηση της περιεκτικότητας κατ' όγκο και της πυκνότητας ρ των συστατικών υλικών:

$$W_f = \rho_f \cdot V_f / (\rho_f \cdot V_f + \rho_m \cdot V_m)$$

όπου $V_m = 1 - V_f$. Οι δείκτες f , m υποδεικνύουν την ίνα (fibre) και την μήτρα (matrix) αντίστοιχα, όπως έχει προαναφερθεί.

β) Πεπλεγμένες συνεχείς ίνες

Σε μερικές εφαρμογές η επιλογή υφάσματος πεπλεγμένων ινών εξυπηρετεί καλύτερα τις προδιαγραφές του προϊόντος από την μονοδιάστατη στρώση. Στις γεωμετρικές

μικρομηχανικές παραμέτρους όπως διάμετρος, μήκος και διάταξη ινών, πρέπει εδώ να προστεθούν το μήκος του κυματισμού του πλέγματος, το πλήθος των ινών ανά δεσμίδα και η γωνία μεταξύ των πεπλεγμένων δεσμίδων (συνήθως 90°). Ένα τέτοιο σύνθετο υλικό είναι ακόμα περισσότερο ανομοιογενές μιας και θύλακες ρητίνης δημιουργούνται στα σύνορα της πλέξης με αποτέλεσμα η μέγιστη δυνατή περιεκτικότητα κατ' όγκο για πεπλεγμένα σύνθετα υλικά να είναι μικρότερη αυτής για μονοδιάστατα σύνθετα υλικά.

γ) Τυχαία διάταξη ινών

Επίπεδες στρώσεις σύνθετων υλικών μπορούν να παραχθούν και από τυχαία διατεταγμένες ίνες μεγάλου μήκους είτε σε δέσμες είτε μεμονωμένες. Οι εμπορικά διαθέσιμες στρώσεις αυτού του υλικού έχουν τιμές Vf μεταξύ 0,1 και 0,3. Για στρώσεις με μικρού μήκους ίνες η αναγκαία μικρομηχανική παράμετρος που απαιτείται επιπλέον για τον πλήρη χαρακτηρισμό του σύνθετου είναι η κατανομή του μήκους των ινών. Για την παρασκευή σύνθετων υλικών με μικρού μήκους ίνες, δέσμες μεγάλου μήκους κόβονται και αναμιγνύονται με τη ρητίνη ή το θερμοπλαστικό. Κατά την ανάμειξή τους όμως, η ροή της υγρής φάσης μέσω των νηματιδίων δημιουργεί ισχυρά διατμητικά πεδία που συντελούν στην παραπέρα θραύση των νηματιδίων, λόγω υψηλών εφελκυστικών και καμπτικών τάσεων που αναπτύσσονται. Έτσι λοιπόν, η αρχική τιμή του μήκους δεν είναι η ίδια στο τελικό προϊόν.

δ) Διάκενα

Η επίδραση των διάκενων στην διατμητική και διαστρωματική αντοχή ενός σύνθετου υλικού είναι σημαντικότερη. Ανεξαρτήτως του τύπου των ινών ή της ρητίνης έχει διαπιστωθεί ότι διάκενα της τάξης του 4% επιφέρουν ελάττωση της διατμητικής αντοχής μέχρι 30%. Τα διάκενα δημιουργούνται κατά την παρασκευή του σύνθετου υλικού. Εμφανίζονται είτε εντός μιας στρώσης, παράλληλα των ινών, με ελλειψοειδή ή σφαιρική μορφή, είτε μεταξύ των στρώσεων ενός πολύστρωτου. Η δημιουργία τους οφείλεται σε δύο κυρίως λόγους:

- I) στην παγίδευση φυσαλίδων αέρα ανάμεσα στη ρητίνη και τις ίνες, και
- II) στην παρουσία πτητικών ουσιών που παράγονται κατά τη θερμική κατεργασία των θερμοσκληρυνόμενων ρητινών ή κατά την τήξη των θερμοπλαστικών.

Πρακτικά, η περιεκτικότητα κατ' όγκο των διακένων εντός ενός σύνθετου υλικού προσδιορίζεται με ποσοτική ανάλυση βασισμένη σε μικροφωτογράφιση πλήθους τομών, καθώς και με τεχνικές υπερηχητικής σάρωσης (C-scan), οι οποίες είναι μη καταστροφικές και βασίζονται στη μέτρηση της απόσβεσης ενός υπερηχητικού παλμού μετά τη διαπέραση του δοκιμίου.

ε) Η φύση και ο ρόλος της διεπιφάνειας

Η διεπιφάνεια ίνας – μήτρας (fibre – matrix interface) ορίζεται ως η κοινή επιφάνεια μεταξύ των δύο συστατικών υλικών, καθώς και η περιοχή στα σύνορα αυτής. Οι μηχανικές και φυσικές ιδιότητες της διεπιφάνειας διαφέρουν και από αυτές της μήτρας και από αυτές της ίνας. Για λόγους θεωρητικής ανάλυσης και μόνο, θεωρείται ως έχουσα μηδενικό πάχος. Στην πραγματικότητα όμως, και κατά τη διάρκεια των διεργασιών πρόσφυσης ίνας – μήτρας, διάφοροι παράγοντες επενεργούν στη διαφοροποίηση, τοπικά, των ιδιοτήτων και στις δύο πλευρές της διεπιφάνειας λόγω διάχυσης, χημικών αντιδράσεων και διαφόρων θερμικών φαινομένων. Αυτές οι δραστηριότητες

επεκτείνονται από μερικά νανόμετρα ως μερικές εκατοντάδες νανόμετρα πάχους, έτσι ώστε να έχει περισσότερη σημασία να μιλούμε για ενδιάμεση φάση (interphase) παρά για διεπιφάνεια (interface).

στ) Η μεταφορά του φορτίου από τη μήτρα στην ίνα

Ο μηχανισμός μεταβίβασης των τάσεων (ή μεταφοράς του φορτίου) από τη μήτρα στην ίνα μέσω της διεπιφάνειας ενεργοποιείται στα σημεία ασυνέχειας του συνθέτου υλικού, όπως τα άκρα των ινών, τα σημεία θραύσης, οι εγκοπές και οι ρωγμές. Το τασικό πεδίο στη διεπιφάνεια ίνας -μήτρας δημιουργείται υπό την επίδραση εξωτερικών φορτίων και των θερμικών τάσεων. Η ένταση αυτού του πεδίου εξαρτάται από τη διάταξη των ινών.

Όταν ένα ινώδες σύνθετο υλικό καταπονείται στη διεύθυνση των ευθυγραμμισμένων ινών, η ακεραιότητα του σύνθετου εξαρτάται από την ικανότητα της διεπιφάνειας να αντέξει στις μετατοπίσεις που αναπτύσσονται στην περιοχή. Με την προϋπόθεση ότι η δυσκαμψία των ινών είναι πολύ μεγαλύτερη από της μήτρας, η ελαστική ανάλυση του τασικού πεδίου της διεπιφάνειας βασίζεται στην παραδοχή ότι οι ίνες μεταφέρουν όλο το αξονικό φορτίο, ενώ η μήτρα φέρει τις διατμητικές τάσεις.

2.8. Ικανότητα απορρόφησης ενέργειας

Σε μία δοκιμή αξονικής καταπόνησης, η ενέργεια η οποία απορροφάται από το δοκίμιο κατά την διαδικασία αστοχίας και κατάρρευσης του μπορεί να υπολογιστεί με εμβαδομέτρηση του χωρίου κάτω από την αντίστοιχη καμπύλη φορτίου- βράχυνσης δοκιμίου (μετατόπιση). Αρχικά το αντικείμενο παραμορφώνεται ελαστικά ενώ το φορτίο αυξάνεται με σταθερό ρυθμό, σχεδόν γραμμικά, μέχρι μία μέγιστη τιμή P_{max} . Το μέγεθος της μέγιστης αυτής τιμής εξαρτάται από την γεωμετρία του κελύφους και τα χαρακτηριστικά του υλικού. Με την προσέγγιση της τιμής αυτής, το φορτίο εμφανίζει απότομη πτώση. Καθώς συνεχίζεται η παραμόρφωση, η μορφή της καμπύλης φορτίου-μετατόπισης εξαρτάται από τον τρόπο κατάρρευσης της κατασκευής και τις συνθήκες φόρτισης.

Γενικώς, για την καταγραφή της ικανότητας προς απορρόφηση ενέργειας ενός αξονικά καταπονούμενου κελύφους λαμβάνεται ως μέγεθος μέτρησης και σύγκρισης η ειδική ενέργεια απορρόφησης (specific energy) W_s . Αυτή ορίζεται σαν ο λόγος της ενέργειας που απορροφά το κέλυφος κατά την κατάρρευση του W , προς τη μάζα του υλικού που έχει αστοχήσει, mc , η οποία υπολογίζεται από τον αντίστοιχο όγκο V_c πολλαπλασιαζόμενο με την πυκνότητα του υλικού ρ .

2.9. Μέθοδοι διαμόρφωσης σύνθετων υλικών

Γενικά, τα υλικά ενίσχυσης και μήτρας συνδυάζονται, συμπίεζονται και οδηγούνται να υφίστανται τήξη. Ύστερα από την τήξη, το σχήμα του δοκιμίου έχει ουσιαστικά δοθεί, αν και μπορεί να παραμορφωθεί κάτω από ορισμένες συνθήκες κατεργασίας. Για ένα θερμοσκληρυνόμενο πολυμερές υλικό μήτρας, η τήξη είναι μια αντίδραση κατά την οποία τα πολυμερή συνδέονται χημικά για το σχηματισμό δικτύων πολυμερών. Η αντίδραση αυτή εισάγεται με την εφαρμογή επιπλέον θερμότητας ή χημικής

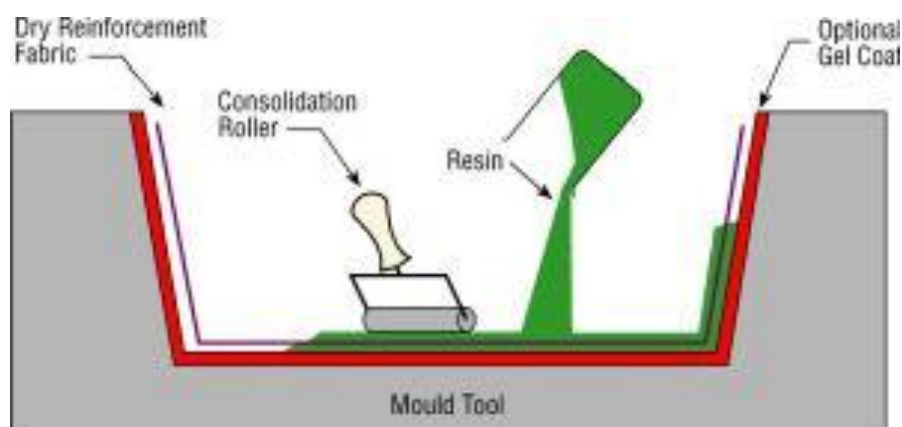
επενεργοποίησης, όπως ένα οργανικό υπεροξείδιο. Για ένα θερμοπλαστικό πολυμερές υλικό μήτρας, το αποτέλεσμα της τήξης είναι μια στερεοποίηση από την τηκόμενη κατάσταση. Για ένα μεταλλικό υλικό μήτρας, όπως είναι τα φύλλα τιτανίου, η τήξη επιτυγχάνεται σε υψηλή πίεση και σε θερμοκρασία κοντά στο σημείο τήξης.

Οι πλέον χρησιμοποιούμενες μέθοδοι διαμόρφωσης είναι οι ακόλουθες:

HAND LAY-UP

Η επίστρωση, στρωματοποίηση και έκχυση ρητίνης με το χέρι (Hand Lay-up) είναι η απλούστερη μέθοδος κατασκευής σύνθετων υλικών, και είναι η διαδικασία που έχει τις μικρότερες απαιτήσεις από πλευράς εγκαταστάσεων και μηχανημάτων.

Οι ίνες τοποθετούνται διαδοχικά, στρώμα προς στρώμα μέσα ή πάνω σε ένα καλούπι, το οποίο προηγουμένως έχει περαστεί με κερί και ενδεχομένως από ένα προστατευτικό στρώμα ρητίνης (gel coat). Αφού τοποθετηθεί το στρώμα ινών στο καλούπι, ο τεχνίτης το εμποτίζει με πινέλο, ρολό ή άλλο αντίστοιχο εργαλείο με ρητίνη. Στη συνέχεια, αφού βεβαιωθεί ότι το στρώμα έχει καλυφθεί με ρητίνη και δεν υπάρχουν ξηρές περιοχές, τοποθετεί το επόμενο και επαναλαμβάνει τη διαδικασία μέχρι να φτάσει το επιδιωκόμενο πάχος ή αριθμό στρωμάτων. Η μέθοδος αυτή παρουσιάζει μεγάλη ευελιξία λόγω των ελάχιστων απαιτήσεων της από πλευράς μηχανημάτων και εφαρμόζεται ευρέως σε ναυπηγεία και βιοτεχνίες σκαφών αναψυχής.

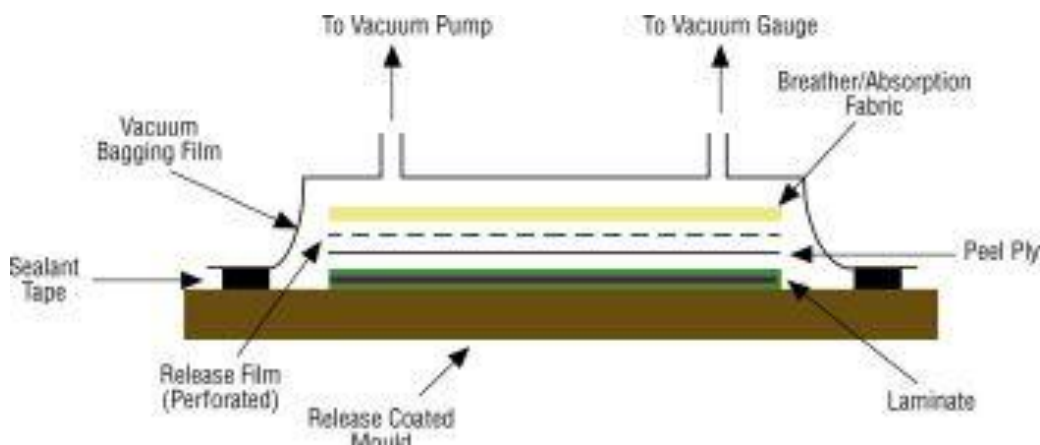


Σχήμα 2.9.1 – Διαδικασία στρωματοποίησης με το χέρι (hand layup)

ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΜΕ ΣΑΚΟ ΚΕΝΟΥ (VACUUM BAGGING)

Με αυτή τη μέθοδο εξασφαλίζουμε ότι αφού οι ίνες εμποτιστούν σε ρητίνη, μπορούν να αποκτήσουν σχήματα περίπλοκης γεωμετρίας. Πιο συγκεκριμένα, οι ίνες τοποθετούνται μέσα ή πάνω σε καλούπι, εμποτίζονται και στρωματοποιούνται κατά τα γνωστά. Στη συνέχεια, μπαίνει πάνω τους ένα ειδικό ύφασμα που δε κολλάει στη ρητίνη (peel ply) , ένα ύφασμα απορρόφησης της ρητίνης που περισσεύει (breather) και μια ειδική σακούλα νάιλον που κλείνει πάνω στο καλούπι. Στη σακούλα αυτή προσαρμόζεται ένας σωλήνας που συνδέει το σύστημα με αντλία κενού. Όταν η αντλία κενού ξεκινήσει τη 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 με αποτέλεσμα το τελικό προϊόν συνήθως να έχει καλύτερο ποσοστό περιεκτικότητας κατά βάρος σε άνθρακα και λιγότερες ατέλειες από την Hand Layup.

Είναι μια επεξεργασία που χρησιμοποιεί ένα σετ από καλούπια διπλής όψευς, τα οποία διαμορφώνουν και τις δύο επιφάνειες του τεμαχίου. Στην κάτω πλευρά είναι ένα στερεό καλούπι και στην άνω πλευρά είναι μια εύκαμπτη μεμβράνη ή ένας σάκος κενού (vacuum bag). Η εύκαμπτη μεμβράνη μπορεί να είναι ένα επαναχρησιμοποιούμενο σιλικονούχο υλικό ή ένα πολυμερές φιλμ. Στην συνέχεια, ο σάκος εφαρμόζεται στην κοιλότητα του καλούπιού. Αυτή η επεξεργασία μπορεί να εκπληρωθεί σε θερμοκρασία περιβάλλοντος ή αυξανόμενη με την ατμοσφαιρική πίεση περιβάλλοντος να επιδρά στον σάκο κενού. Πιο οικονομικός τρόπος είναι η χρήση σάκου venturi (venturi vacuum) και συμπιεστή αέρος ή σάκου με αντλία.



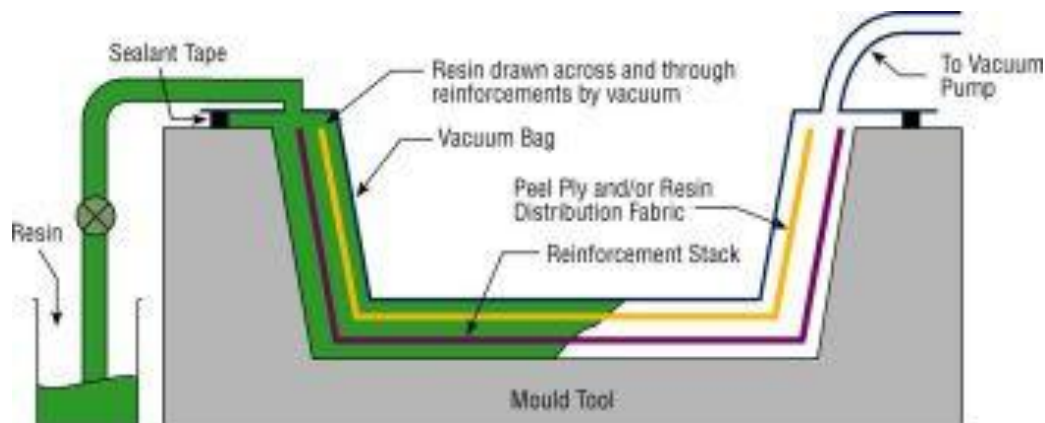
Σχήμα 2.9.2 – Τεχνική Vacuum Bagging

VACUUM ASSISTED RESIN INFUSION

Η μέθοδος VARI αποτελεί μια εξέλιξη της τεχνικής του vacuum bagging ώστε να επιταχυνθεί η κατασκευή δοκιμίων, παρακάμπτοντας τη διαδικασία της επίστρωσης και του εμποτισμού με το χέρι.

Στην μέθοδο αυτή τα στρώματα υφάσματος τοποθετούνται μέσα στο καλούπι χωρίς να γίνεται εμποτισμός σε ρητίνη. Στη συνέχεια, τοποθετείται η ειδική σακούλα του vacuum bagging όπως και τα υπόλοιπα ειδικά υφάσματα και επάνω στη σακούλα προσαρμόζονται δύο σωλήνες. Ο ένας πηγαίνει στην αντλία κενού και ο δεύτερος έρχεται από δοχείο ρητίνης.

Με την εκκίνηση της αντλίας κενού η ρητίνη αρχίζει να κυκλοφορεί μέσα στις στρώσεις και τις εμποτίζει μέχρι να φτάσει στο σωλήνα της αντλίας κενού, οπότε και ολοκληρώνεται η διαδικασία του hand layup. Το πρόβλημα της μεθόδου είναι ότι για να εφαρμοστεί απαιτούνται ρητίνες ειδικού ιξώδους ώστε να μπορεί να γίνει σωστή κυκλοφορία υγρού μέσα από τις ίνες.



Σχήμα 2.9.3 - VARI

ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΜΕ ΣΑΚΟ ΠΙΕΣΕΩΣ

Αυτή η επεξεργασία σχετίζεται με την διαμόρφωση με σάκο κενού. Ένα στερεό θηλυκό καλούπι χρησιμοποιείται κατά μήκος μαζί με ένα εύκαμπτο αρσενικό καλούπι. Η ενίσχυση τοποθετείται ανάμεσα στο θηλυκό καλούπι μαζί με αρκετή ρητίνη για να επιτρέψει στο ύφασμα να κολλήσει στο μέρος. Ύστερα, μια μετρημένη ποσότητα ρητίνης είναι γενναϊόδωρα τοποθετημένη με τυχαίο τρόπο μέσα στο καλούπι, και μετά το καλούπι συσφίγγεται σε μια μηχανή που περιέχει το αρσενικό εύκαμπτο καλούπι. Τότε, η εύκαμπτη αρσενική μεμβράνη είναι διογκωμένη με θερμασμένο συμπιεσμένο αέρα ή πιθανά ατμό. Το θηλυκό καλούπι μπορεί επίσης να θερμανθεί. Η περίσσεια ρητίνη διαφεύγει προς τα έξω, παράλληλα με τον παγιδευμένο αέρα. Αυτή η επεξεργασία χρησιμοποιείται εκτεταμένα στην παραγωγή των σύνθετων υλικών εξαιτίας του χαμηλότερου κόστους για ένα ανειδίκευτο εργαστήριο. Ο κυκλικός χρόνος για μια μηχανή διαμόρφωσης σύνθετων υλικών ποικίλει από 20 έως 45 λεπτά, μα τα τελειωμένα προϊόντα δεν απαιτούν επιπλέον χρόνο αποπεράτωσης, εάν θερμανθούν τα καλούπια.

ΑΕΡΟΣΤΕΓΗΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ

Είναι μια επεξεργασία που χρησιμοποιεί ένα σετ από καλούπια διπλής όψεως, το οποίο διαμορφώνει και τις δύο επιφάνειες του τεμαχίου. Στην κάτω πλευρά είναι ένα στερεό καλούπι και στην άνω πλευρά είναι μια εύκαμπτη μεμβράνη, κατασκευασμένη από σιλκόνη ή ένα πολυμερές φιλμ, όπως είναι το nylon. Τα υλικά ενίσχυσης μπορούν να τοποθετηθούν είτε χειρωνακτικά, είτε αυτόματα. Αυτά περιλαμβάνουν μορφές συνεχών ινών διαμορφωμένα σε υφάσματα. Πιο συχνά, είναι prepreg σε μορφή υφασμάτων ή ταινιών με μια διεύθυνση. Σε ορισμένες περιπτώσεις, ένα φιλμ ρητίνης εγκαθίσταται πάνω στο κάτω καλούπι και ξηρές ενισχύσεις τοποθετούνται πάνω του. Το άνω καλούπι είναι εγκατεστημένο και στην κοιλότητα του καλουπιού επικρατεί κενό. Η συσκευή είναι τοποθετημένη σε αεροστεγές δοχείο. Αυτή η επεξεργασία γενικά εκπληρώνεται σε αυξανόμενη πίεση και θερμοκρασία. Η χρήση της αυξανόμενης πίεσης διευκολύνει την πρόκληση μεγάλου τμήματος στον όγκο ινών και χαμηλής περιεκτικότητας κενού, για μεγαλύτερη κατασκευαστική αποτελεσματικότητα.

ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΡΗΤΙΝΗΣ

Είναι μια επεξεργασία που χρησιμοποιεί ένα σετ από καλούπια διπλής όψευς, το οποίο διαμορφώνει και τις δύο επιφάνειες του τεμαχίου. Η κάτω πλευρά είναι ένα στερεό καλούπι και η άνω πλευρά μπορεί να είναι ένα στερεό ή εύκαμπτο καλούπι. Τα ελαστικά καλούπια μπορούν να κατασκευάζονται από σύνθετα υλικά, σιλικόνη ή πολυμερή φιλμ, όπως είναι το nylon. Οι δύο πλευρές προσαρμόζονται μαζί για να παραχθεί η κοιλότητα του καλουπιού. Το ξεχωριστό χαρακτηριστικό της διαμόρφωσης μεταφοράς ρητίνης είναι ότι τα υλικά ενίσχυσης τοποθετούνται σε αυτήν την κοιλότητα και το σετ των καλουπιών κλείνει πριν την εισαγωγή του υλικού της μήτρας. Η διαμόρφωση μεταφοράς ρητίνης περιλαμβάνει πολυάριθμες παραλλαγές, οι οποίες διαφέρουν στο μηχανικό μέρος του τρόπου εισαγωγής της ρητίνης στις ενισχύσεις μέσα στην κοιλότητα του καλουπιού. Σε αυτές τις παραλλαγές συμπεριλαμβάνονται τα πάντα, από την έκχυση ρητίνης κενού έως την διαμόρφωση μεταφοράς ρητίνης με υποστήριξη κενού (VARTM). Αυτή η επεξεργασία μπορεί να εκπληρωθεί είτε σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, είτε σε αυξανόμενη.

ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΜΕ ΠΙΕΣΗ (PRESS MOLDING)

Το τμήμα του prepreg (σημαίνει ότι οι ρητίνες είναι ενισχυμένες με ίνες πριν τοποθετηθούν για την περαιτέρω επεξεργασία διαμόρφωσης) υφάσματος τοποθετείται στην κοιλότητα του καλουπιού. Το καλούπι κλείνει και το υλικό αποπερατώνεται μέσα σε αυτό, υπό την άσκηση πίεσης και θερμότητας. Η διαμόρφωση πίεσης προσφέρει εξαιρετικές λεπτομέρειες στα γεωμετρικά σχήματα, που κυμαίνονται από σχεδιαστικές και ανάγλυφες λεπτομέρειες έως πολύπλοκες καμπύλες και μηχανολογικά ακριβείς δομές. Ο μέγιστος χρόνος αποπεράτωσης είναι τα 20 λεπτά.

ΥΓΡΗ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗ ΣΤΡΩΜΑΤΩΝ (WET LAY-UP)

Η υγρή διαμόρφωση συνδυάζει την ενίσχυση των ινών και την διεύθυνση της μήτρας κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας διαμόρφωσης. Το ενισχυμένο ύφασμα με ίνες τοποθετείται σε ένα ανοικτό καλούπι, και στη συνέχεια γίνεται έκχυση της ρητίνης πάνω του. Στην συνέχεια, το καλούπι αφήνεται, για να αποπερατωθεί η ρητίνη, συνήθως σε θερμοκρασία δωματίου, αν και η θέρμανση κάποιες φορές διασφαλίζει μια επακόλουθη επεξεργασία αποπεράτωσης. Τα υαλονήματα είναι τα πιο γνωστά που χρησιμοποιούνται σε αυτήν την επεξεργασία, και τα αποτελέσματα συναντώνται σε αγαθά ευρείας κατανάλωσης, όπως είναι τα πέδιλα του σκι, τα κανώ, τα καγιάκ και οι σανίδες του σερφ.

ΠΕΡΙΕΛΙΞΗ ΝΗΜΑΤΟΣ (FILAMENT WINDING)

Η περιέλιξη νήματος είναι μια διαδικασία κατασκευής μιας σύνθετης δομής, στην οποία περιτυλίγουμε τεντωμένη γύρω από έναν περιστρεφόμενο άξονα μια συνεχή ενισχυμένη ίνα, είτε prepreg, είτε με έκχυση της ρητίνης κατά τη διάρκεια της περιέλιξης. Τα δοκίμια αποπερατώνονται είτε σε θερμοκρασία δωματίου, είτε σε αυξανόμενη θερμοκρασία.

ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΜΕ ΑΕΡΟΘΑΛΑΜΟ

Μεμονωμένα στρώματα prepreg υλικού διαστρωματώνονται και τοποθετούνται σε ένα θηλυκής μορφής καλούπι κατά μήκος, με ένα μηχάνημα σαν μπαλόκι που ταυτόχρονα διαμορφώνει και αποκαθιστά ένα υλικό με αεροθάλαμο. Το καλούπι κλείνει και τοποθετείται σε θερμαινόμενη πρέσα. Τελικά, τα στρώματα του υλικού αναγκάζονται να πιεστούν ενάντια στα τοιχώματα του καλουπιού. Το δοκίμιο αποπερατώνεται και απομακρύνεται από το ζεστό καλούπι. Η επεξεργασία με το μηχάνημα σαν μπαλόκι που ταυτόχρονα διαμορφώνει και αποκαθιστά ένα υλικό με αεροθάλαμο, έχει έναν σχετικά σύντομο χρόνο αποπεράτωσης ανάμεσα στα 15 και στα 60 λεπτά, γεγονός που το καθιστά ιδανικό για την δημιουργία πολύπλοκων γεωμετρικών σχημάτων με οπές, με χαμηλά κόστη.

ΠΙΣΤΟΛΙ ΚΟΠΗΣ

Συνεχή νήματα πιέζονται μέσω ενός πιστολιού, το οποίο και τα κόβει, αλλά και τα συνδυάζει με μια καταλυτική ρητίνη, όπως είναι ο πολυεστέρας. Τα κομμένα νήματα είναι εγκατεστημένα πάνω στην επιφάνεια του καλουπιού σε οποιοδήποτε πάχος είναι κατάλληλο με βάση το σχέδιο και την γνώμη του χειριστή. Αυτή η επεξεργασία είναι ιδανική για μεγάλες παραγωγές, εξαιτίας του οικονομικού κόστους, μα παράγει γεωμετρικά σχήματα με μικρότερη αντοχή από ότι άλλες επεξεργασίες διαμόρφωσης, και έχει μικρή ανοχή στις διαστάσεις.

PULTRUSION

Είναι μια επεξεργασία παραγωγής συνεχούς ίνας για προηγμένες συνθέσεις, που συμπεριλαμβάνει την τοποθέτηση της ενίσχυσης μέσα σε δεξαμενές με ρητίνη (η οποία διαμορφώνεται μια μόνο φορά), μια συσκευή prepreg, και κατόπιν μέσα από ένα καλούπι, όπου το προϊόν παίρνει την τελική του μορφή. Η επεξεργασία αυτή είναι κατάλληλη για οποιοδήποτε ημιμαλακό υλικό και γεωμετρικό σχήμα.

RTM & VARTM

Τα υφάσματα τοποθετούνται σε ένα καλούπι, στο οποίο περιχύνεται και η υγρή ρητίνη. Τυπικά, η ρητίνη πιέζεται και αναγκάζεται να εισέλθει στην κοιλότητα, στην οποία επικρατεί κενό, στην επεξεργασία RTM. Η ρητίνη ωθείται προς την κοιλότητα υπό κενό, στην επεξεργασία VARTM. Αυτή η επεξεργασία διαμόρφωσης επιτρέπει ακριβείς ανοχές και λεπτομερειακό σχηματισμό, αλλά μπορεί να κάποιες φορές να αποτύχουν να διαποτίσουν πλήρως, προκαλώντας αδύναμα σημεία στην τελική μορφή.

ΑΛΛΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

Άλλοι τύποι διαμόρφωσης είναι:

- διαμόρφωση μεταφοράς (transfer molding) ,
- διαδικασία παραγωγής συνεχούς ίνας για προηγμένες συνθέσεις prepregs που συμπεριλαμβάνουν την ενίσχυση του υλικού σε δεξαμενές με ρητίνη που διαμορφώνεται μια μόνο φορά, και κατόπιν μέσα από ένα καλούπι, όπου το προϊόν παίρνει την τελική του μορφή (pultrusion molding) ,

- διαδικασία κατά την οποία το υλικό σχηματίζεται τοποθετώντας το με χύτευση σε μια μήτρα ή σε ένα καλούπι και αφήνοντάς το να στερεοποιηθεί (casting),
- μέθοδος διαμόρφωσης θερμοπλαστικών ρητινών κατά την οποία το λιωμένο υλικό στερεοποιείται μέσα σε ένα θερμαινόμενο δοχείο που περιστρέφεται γρήγορα και παίρνει το σχήμα της εσωτερικής επιφάνειάς του (centrifugal casting).

Υπάρχουν επίσης ικανότητες διαμόρφωσης , όπως είναι η CNC περιέλιξη νήματος, η έκχυση ρητίνης κενού, η διαμόρφωση υπό πίεση και θέρμανση όταν κλείνει το καλούπι , και η θερμοπλαστική διαμόρφωση.

2.10. Εφαρμογές σύνθετων υλικών

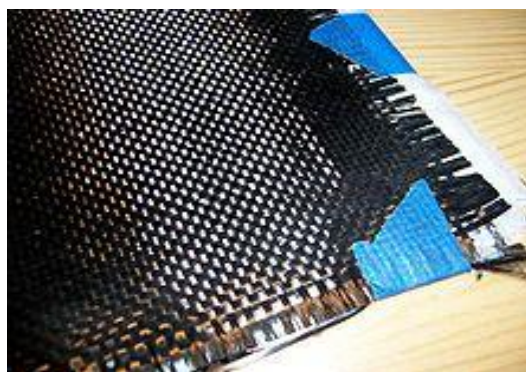
Τα σύνθετα υλικά έχουν γίνει δημοφιλή (παρόλο το μεγάλο τους κόστος) σε προϊόντα υψηλών επιδόσεων, τα οποία χρειάζεται να είναι ελαφριά, αρκετά δυνατά ώστε να δέχονται σκληρές συνθήκες φορτίσεως. Τέτοια είναι τα συστατικά των αεροσκαφών (ουρές, φτερά, ατράκτοι , προπέλες), κελύφη για βάρκες και κουπιά , πλαίσια ποδηλάτων και αμαξώματα για αγωνιστικά αυτοκίνητα. Άλλες χρήσεις περιλαμβάνουν καλάμια για ψάρεμα, αποθηκευτικές δεξαμενές και ρόπαλα για μπέηζμπολ. Η νέα κατασκευή του Boeing 787 , συμπεριλαμβανομένων των φτερών και των ατράκτων, αποτελείται σε μεγάλο βαθμό από σύνθετα υλικά. Τα σύνθετα υλικά γίνονται ακόμη πιο γνωστά από το πεδίο της ορθοπεδικής χειρουργικής.

Τα σύνθετα υλικά με άνθρακα είναι ένα υλικό – κλειδί για τα σημερινά οχήματα εκτόξευσης και διαστημόπλοια. Ακόμη, χρησιμοποιείται ευρέως στα υποστρώματα των φωτοβολταϊκών συστημάτων , στις ανακλαστικές κεραίες και στους ζυγούς/σφιγκτήρες των διαστημόπλοιων. Επίσης, χρησιμοποιείται σε προσαρμογείς συνολικού φορτίου αεροσκάφους , σε εσωτερικού χώρου κατασκευές και ασπίδες θερμότητας στα οχήματα εκτόξευσης.

Το 2007 ένα ολικά σύνθετο στρατιωτικό τροχοφόρο όχημα υψηλής κινητικότητας για πολλές χρήσεις, παρουσιάστηκε από τις TPI Composites Inc and Armor Holdings Inc, και αποτέλεσε το πρώτο ολικά σύνθετο στρατιωτικό όχημα. Συνεπώς, με την χρήση των σύνθετων υλικών το όχημα είναι σημαντικά ελαφρύτερο. Το 2008, ίνες άνθρακα και DuPont Kevlar (5 φορές δυνατότερο από το ατσάλι) συνδυάστηκαν με θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες για να φτιάξουν στρατιωτικές θήκες μεταφοράς, οι οποίες είναι ελαφρύτερες κατά 30% και με μεγαλύτερη αντοχή.

3. ΙΝΕΣ ΑΝΘΡΑΚΑ

3.1. Εισαγωγή



Σχήμα 3.1.1 - Ένα κομμάτι από ύφασμα ανθρακονημάτων

Το ανθρακόνημα είναι ένα υλικό αποτελούμενο από υπερβολικά λεπτές ίνες, περίπου 0.005–0.010 mm σε διάμετρο, και συντίθεται περισσότερο από άτομα άνθρακα. Τα άτομα άνθρακα συνδέονται μαζί σε μικροσκοπικούς κρυστάλλους, οι οποίοι είναι περισσότερο ή λιγότερο ευθυγραμμισμένοι παράλληλα με την μεγάλη πλευρά των ινών. Η κρυσταλλική ευθυγράμμιση επιφέρει στην ίνα μεγάλη αντοχή για το μέγεθός της. Αρκετές χιλιάδες ίνες άνθρακα περιστρέφονται μαζί για να σχηματίσουν ένα ανθρακόνημα, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε μόνο του είτε πλεγμένο σε μορφή υφάσματος. Το ανθρακόνημα μπορεί να πλεχθεί σε πολλά διαφορετικά σχέδια πλέξης, και μπορεί να συνδυαστεί με μια πλαστική ρητίνη και να διαμορφωθεί για να σχηματίσει σύνθετο υλικό (όπως είναι το πλαστικό ενισχυμένο με ανθρακονήματα – cfpr), έτσι ώστε να προκύψει μεγάλος λόγος αντοχής – βάρους. Η πυκνότητα του ανθρακονήματος είναι αισθητά χαμηλότερη από την πυκνότητα του ατσαλιού, γεγονός που το καθιστά ιδανικό για εφαρμογές που απαιτούν χαμηλό βάρος. Οι ιδιότητες του ανθρακονήματος, όπως υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό, χαμηλό βάρος και χαμηλή θερμική εκτόνωση, το καθιστούν πολύ δημοφιλές υλικό στην αεροδιαστημική, στην πεδίο του πολιτικού μηχανικού, στον στρατιωτικό τομέα, στα αγωνιστικά και μη αθλήματα. Το ανθρακόνημα είναι πολύ ανθεκτικό όταν εφελκύεται ή κάμπτεται, αλλά πολύ αδύναμο σε περίπτωση που δεχθεί φορτίο θλίψης ή εκτεθεί σε μεγάλη κρούση.

Το πολυμερές ενισχυμένο με ανθρακονήματα, (carbon fiber reinforced plastic) ή πλαστικό ενισχυμένο με ανθρακονήματα, είναι πολύ δυνατό ελαφρύ και ακριβό σύνθετο υλικό. Παρόμοιο με τα υαλονήματα (πολυμερές ενισχυμένο με ίνες γυαλιού), αυτό το σύνθετο υλικό συχνά αναφέρεται και ως απλά ανθρακονήματα, από το όνομα των ενισχυσέων του. Το πολυμερές είναι τις περισσότερες φορές εποξική ρητίνη, μα και άλλα πολυμερή, όπως είναι ο πολυεστέρας, ο βινυλεστέρας ή το nylon, χρησιμοποιούνται κάποιες φορές. Ορισμένα σύνθετα υλικά περιέχουν και ανθρακονήματα, και άλλες ίνες, όπως είναι οι ενισχύσεις αλουμινίου, υαλονημάτων και Kevlar.

3.2 Ιστορική αναδρομή

Το 1958, ο Dr. Roger Bacon δημιούργησε τα ανθρακονήματα στο Union Carbide Parma Technical Center, που βρίσκεται λίγο έξω από το Cleveland (United States), Ohio. Εκείνες οι ίνες είχαν κατασκευαστεί από θερμά ανθρακονήματα από rayon μέχρι να ανθρακοποιηθούν. Αυτή η επεξεργασία έχει αποδειχθεί αναποτελεσματική, καθώς οι παραγόμενες ίνες περιέχουν μόνο γύρω στο 20% άνθρακα και έχει χαμηλή αντοχή και ελαστικότητα. Στα αρχές του 1960, μια επεξεργασία αναπτύχθηκε, χρησιμοποιώντας πολυακρυλονιτρίλιο (PAN) ως ακατέργαστο υλικό. Με αυτόν τον τρόπο, παράχθηκε ανθρακόνημα που περιείχε περίπου 55% άνθρακα και πολύ καλύτερες ιδιότητες. Η επεξεργασία μετατροπής του PAN γρήγορα έγινε η πρωταρχική μέθοδος για την παραγωγή ανθρακονημάτων.

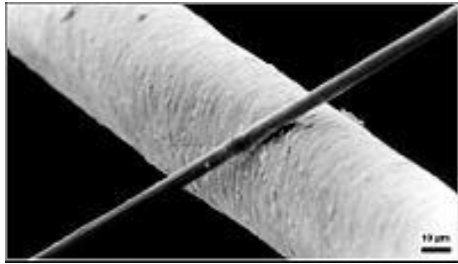
Η υψηλή αντοχή του ανθρακονήματος εξακριβώθηκε το 1963 σε μια επεξεργασία που αναπτύχθηκε στο Royal Aircraft Establishment στο Farnborough, Hampshire. Η επεξεργασία αυτή ανακηρύχθηκε ως πατέντα από το Ministry of Defence και στη συνέχεια αδειοδοτήθηκε από το NRDC σε 3 Βρετανικές εταιρίες: την Rolls-Royce, την Morganite και την Courtaulds. Αυτές ήταν ικανές να εγκαθιδρύσουν ιδιότητες βιομηχανικού ανθρακονήματος για λίγα χρόνια, και η Rolls-Royce πλεονέκτησε στις ιδιότητες του νέου υλικού, με το να ταραξεί την Αμερικανική αγορά με την RB-211 μηχανή για αεροπλάνα.

Δυστυχώς, η Rolls-Royce χρησιμοποίησε ανθρακονήματα στα πτερύγια του συμπιεστή της μηχανής, γεγονός το οποίο ήταν ικανό για να καταστραφεί η μηχανή από τις κρούσεις με πουλιά. Αυτό που φαινόταν να είναι ένας πραγματικός Βρετανικός τεχνολογικός θρίαμβος, γρήγορα κατέληξε σε τραγωδία, αφού το φιλόδοξο εγχείρημα της Rolls-Royce για το RB-211 ναυάγησε. Πράγματι, τα προβλήματα της έγιναν τόσο μεγάλα, ώσπου η εταιρία εθνικοποιήθηκε από την κυβέρνηση Edward Heath's το 1971, και το εργοστασιακό συγκρότημα της παραγωγής ανθρακονημάτων πουλήθηκε στα Bristol Composites.

Δεδομένης της περιορισμένης αγοράς για ένα πολύ ακριβό προϊόν ποικίλης ποιότητας, η Morganite αποφάσισε ότι η παραγωγή ανθρακονημάτων ήταν περιφερειακή για τον πυρήνα της επιχείρησής της, αφήνοντας την Courtaulds ως τον μοναδικό μεγάλο κατασκευαστή στην Βρετανία. Η εταιρία αυτή συνέχισε να παράγει ανθρακονήματα, αναπτύσσοντας δύο βασικές αγορές: την αεροδιαστημική και τον εξοπλισμό για τα αθλήματα. Η ταχύτητα της παραγωγής και η ποιότητα των προϊόντων βελτιώθηκαν. Κατά τη διάρκεια των 1980, η Courtaulds συνέχιζε να είναι ο βασικός προμηθευτής των ανθρακονημάτων στην αγορά για τα αγαθά των αθλημάτων, με την Mitsubishi τον σημαντικότερο πελάτη της.

Κατά την διάρκεια των 1970, πειραματικές εργασίες για την εύρεση εναλλακτικών ακατέργαστων α' υλών οδήγησαν στην εισαγωγή των ανθρακονημάτων κατασκευασμένων από ρητίνη πετρελαίου. Αυτές οι ίνες περιείχαν περίπου 85% άνθρακα και είχαν εξαιρετική αντοχή σε κάμψη.

3.3 Δομή και ιδιότητες



Σχήμα 3.3.1 - Μια ίνα άνθρακα διαμέτρου 6μm (ζεκινά από κάτω αριστερά) σε σύγκριση με μια ανθρώπινη τρίχα

Τα ανθρακονήματα έχουν αρκετές παρόμοιες ιδιότητες με τον αμίαντο. Κάθε ανθρακόνημα απαρτίζεται από μια δέσμη από πολλές χιλιάδες ίνες άνθρακα. Η καθεμία ίνα άνθρακα έχει διάμετρο 5-8μm και περιέχει σχεδόν εξολοκλήρου άνθρακα. Η αρχική γενιά ινών άνθρακα είχε διαμέτρους 7-8 μm, ενώ η πιο πρόσφατη γενιά έχει διαμέτρους το πολύ 5μm.

Η ατομική δομή της ίνας άνθρακα μοιάζει με αυτήν του γραφίτη, και περιλαμβάνει στρώματα από άτομα άνθρακα τοποθετημένα σε ένα κανονικό εξάγωνο σχήμα. Η διαφορά έγκειται στον τρόπο που συνδέονται. Ο γραφίτης είναι ένα κρυσταλλικό υλικό, στο οποίο τα στρώματα είναι τοποθετημένα παράλληλα μεταξύ τους σε κανονικό σχήμα. Οι ελκτικές δυνάμεις ανάμεσα στα στρώματα είναι σχετικά μικρές δυνάμεις Van der Waals, που δίνουν στο γραφίτη τα απαλά και λαμπερά χαρακτηριστικά του. Εξαρτώμενη από τον τρόπο της κατασκευής της ίνας, αυτή μπορεί να είναι turbostratic ή γραφιτική, ή να έχει μια υβριδική δομή όπου εμφανίζονται και turbostratic μέρη και γραφίτη. Στην ίνα άνθρακα turbostratic, τα στρώματα των ατόμων άνθρακα είναι τυχαία διπλωμένα μαζί. Οι ίνες άνθρακα που παράγονται από PAN είναι turbostratic, ενώ οι ίνες που παράγονται από μεσοφασική ρητίνη είναι γραφιτικές μετά από την επίδραση θερμότητας σε θερμοκρασίες που ξεπερνούν τους 2200 °C. Οι turbostratic ίνες άνθρακα τείνουν να έχουν υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό, ενώ οι ίνες άνθρακα που παράγονται από μεσοφασική ρητίνη μετά από την επίδραση θερμότητας, έχουν υψηλό μέτρο του Young και υψηλή θερμική αγωγιμότητα.

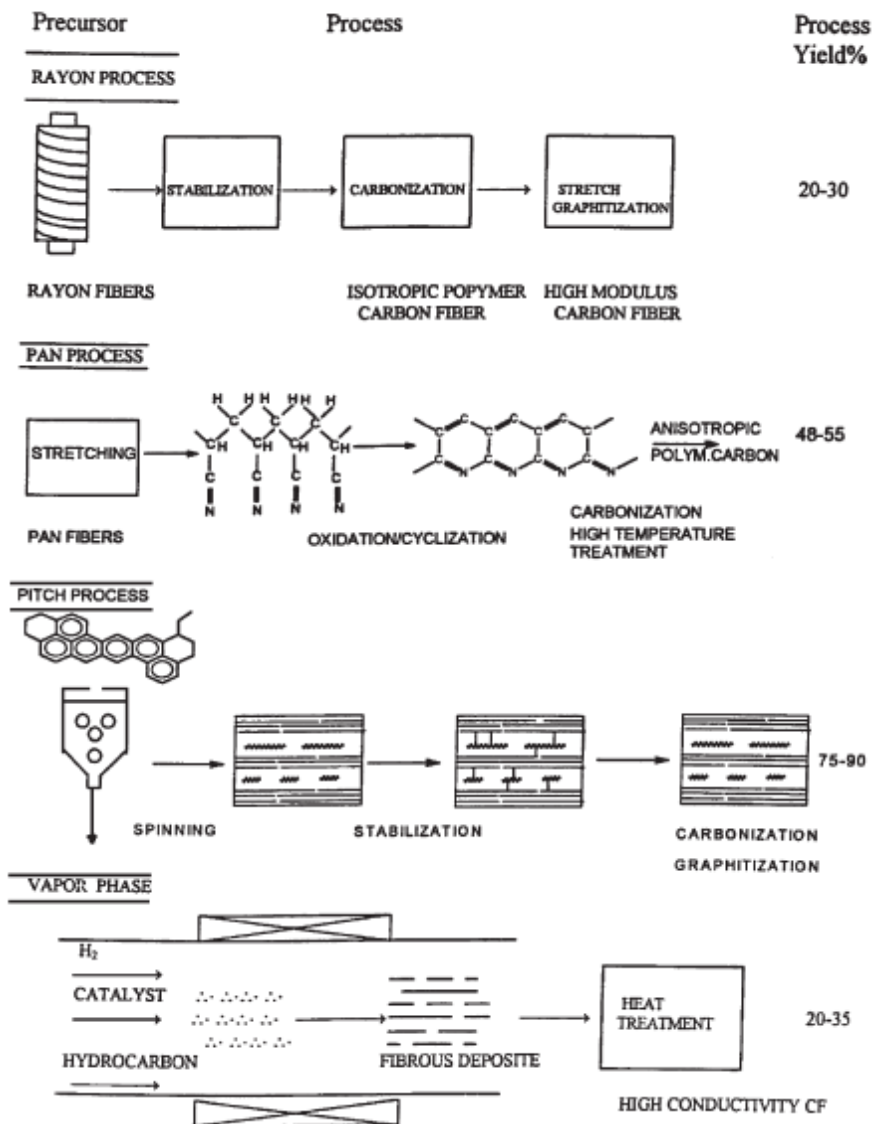
Δομικά υλικά για τα ανθρακονήματα είναι το πολυακρυλονιτρίλιο (PAN), το rayon και η ρητίνη (pitch). Τα ανθρακονήματα χρησιμοποιούνται σε πολλές τεχνικές επεξεργασίας, από τις οποίες οι ευρείες χρήσεις είναι για προπαρασκευή (prepreg), περιτύλιξη νήματος, πλέξη, ύφανση, κ.λ.π. Το ανθρακόνημα εκτιμάται ότι έχει γραμμική πυκνότητα (βάρος ανά μονάδα μήκους) ή αριθμό ινών σε ένα νήμα, κάποιες χιλιάδες. Για παράδειγμα, 200g/1000m για 3000 ίνες από ανθρακονήματα, είναι 3 φορές πιο ανθεκτικό από 1000 ανθρακονήματα, αλλά και 3 φορές πιο βαρύ. Στη συνέχεια, το νήμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να πλεχθεί σε ένα ύφασμα από ανθρακονήματα. Γενικά, η εμφάνιση αυτού του υφάσματος εξαρτάται από την γραμμική πυκνότητα του νήματος και της πλέξης που έχει επιλεγεί. Ορισμένοι τύποι πλέξεων που χρησιμοποιούνται συχνά είναι η plain, η satin και η twill.

3.4 Κατασκευή ινών άνθρακα

Κάθε ίνα άνθρακα παράγεται από ένα δομικό πολυμερές. Το πολυμερές αυτό είναι συνήθως συνθετικό μετάξι (rayon), πολυακρυλονιτρίλιο (PAN) ή ρητίνη πετρελαίου. Για τα συνθετικά πολυμερή, όπως είναι το συνθετικό μετάξι ή το PAN, το δομικό πολυμερές αρχικά περιστρέφεται μέσα στις ίνες, χρησιμοποιώντας χημικές ή μηχανικές

επεξεργασίες για να ευθυγραμμίσει τα άτομα του πολυμερούς με τρόπο ώστε να βελτιωθούν οι τελικές φυσικές ιδιότητες του ολοκληρωμένου ανθρακονήματος. Οι συνδυασμοί του δομικού πολυμερούς και οι μηχανολογικές επεξεργασίες που χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια της περιτύλιξης, μπορεί να ποικίλουν ανάλογα τον κατασκευαστή. Μετά από την περιτύλιξη, οι ίνες πολυμερούς θερμαίνονται για να απομακρύνονται τα άτομα που δεν είναι άνθρακα (carbonization), παράγοντας την τελική ίνα άνθρακα. Οι ίνες άνθρακα μπορεί να επεξεργαστούν περαιτέρω για να αναδείξουν καλύτερη ποιότητα, και στη συνέχεια πλέκονται πάνω σε ειδικούς κύλινδρους (μπομπίνες). Ύστερα, οι κύλινδροι αυτοί χρησιμοποιούνται να τροφοδοτούν μηχανές που παράγουν ανθρακονήματα.

Μια κοινή μέθοδος κατασκευής είναι η θέρμανση των τυλιγμένων PAN ινών στους 300 °C σε αέρα, όπου σπάνε πολλοί από τους δεσμούς υδρογόνου, και το υλικό οξειδώνεται. Το οξειδωμένο PAN στη συνέχεια μεταφέρεται μέσα σε έναν κλίβανο, που έχει μια αδρανή ατμόσφαιρα από αέριο, όπως το αργό, και θερμαίνεται στους 2000° C. Σε αυτήν την θερμοκρασία, η οποία παρακινεί την γραφίτιποίηση (graphitizing) του υλικού, αλλάζει η μοριακή δομή του δεσμού. Όταν θερμαίνεται υπό τις σωστές συνθήκες, αυτές οι σειρές συνδέονται στα διπλανά τους τμήματα (κλιμακωτά πολυμερή), σχηματίζοντας στενά στρώματα, τα οποία τελικά συγχωνεύονται για να σχηματίσουν μια μονή, κιονοειδή ίνα. Το αποτέλεσμα συνήθως είναι 93-95% άνθρακας. Μια χαμηλότερης ποιότητας ίνα μπορεί να κατασκευαστεί χρησιμοποιώντας ρητίνη ή συνθετικό μετάξι ως δομικό υλικό αντί για το PAN. Ο άνθρακας μπορεί να βελτιωθεί περαιτέρω, για να αποκτήσει μεγαλύτερη αντοχή ή ελαστικότητα, με επεξεργασίες θέρμανσης. Ο άνθρακας που θερμαίνεται στο πεδίο των 1500 – 2000°C (carbonization) , παρουσιάζει την υψηλότερη αντοχή σε εφελκυσμό (820,000 psi ή 5,650 MPa ή 5,650 N/mm²) , ενώ ο άνθρακας που θερμαίνεται από 2500 έως 3000°C (graphitizing) παρουσιάζει το υψηλότερο μέτρο ελαστικότητας (77,000,000 psi ή 531 GPa ή 531 kN/mm²). Στο ακόλουθο σχήμα 3.4.1 φαίνεται σχηματικά η σύγκριση στις μεθόδους κατασκευής ανθρακονημάτων.



Σχήμα 3.4.1- Σύγκριση στις κατασκευαστικές μεθόδους ινών άνθρακα

Η επιλογή της μήτρας έχει μια σημαντική επίδραση στις ιδιότητες του τελικού προϊόντος. Μια μέθοδος παραγωγής cfbr τεμαχίων είναι η εναπόθεση στρώσεων από τα υφάσματα ανθρακονημάτων την μία πάνω στην άλλη, έτσι ώστε να δημιουργηθούν διαστρωματώσεις, σε ένα καλούπι με το σχήμα του επιθυμητού προϊόντος. Η ευθυγράμμιση και η πλέξη των υφασμάτων cfbr επιλέγονται για να βελτιώσουν την αντοχή και την ελαστικότητα. Το καλούπι γεμίζεται με την εποξική ρητίνη και στην συνέχεια θερμαίνεται ή αποπερατώνεται με αέρα. Το προϊόν είναι πολύ ανθεκτικό στη διάβρωση, ελαστικό και έχει μεγάλη αντοχή, σε σχέση με το βάρος του. Τα τεμάχια που χρησιμοποιούνται σε λιγότερο κρίσιμες περιοχές κατασκευάζονται από τοποθέτηση υφάσματος πάνω σε καλούπι με ρητίνη, είτε προεμποτισμένης στις ίνες (prepreg), είτε διαρρέεται στη συνέχεια. Ενώ, τα τεμάχια για εξειδικευμένες χρήσεις (high-performance) χρησιμοποιούν μονά καλούπια και συνήθως σάκους κενού ή/και αεροστεγή αποπεράτωση, διότι ακόμη και μικρές φυσαλίδες αέρα μέσα στο υλικό θα μειώσουν την αντοχή του.

Η επεξεργασία με την οποία κατασκευάζονται τα cfr ποικίλει, ανάλογα με το προϊόν, την απαιτούμενη τελική επιφάνεια, καθώς και τον αριθμό των τεμαχίων που θα παραχθούν.

Για απλά τεμάχια, από τα οποία χρειάζονται σχετικά λίγα αντίγραφα (1 – 2 την ημέρα), ο σάκος κενού μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Ένα καλούπι από υαλονήματα, ανθρακονήματα ή αλουμίνιο γυαλίζεται και κερώνεται, και έχει επάλειψη από ένα βοηθητικό μέσο για την αποκόλληση, πριν εφαρμοσθούν το ύφασμα και η ρητίνη. Στη συνέχεια, εφαρμόζεται το κενό και αφήνει το τεμάχιο να αποπερατωθεί. Υπάρχουν δύο τρόποι να εφαρμοσθεί η ρητίνη στο ύφασμα σε ένα καλούπι υπό κενό. Ο πρώτος είναι η εναπόθεση στρώσεων, όπου η διμερής ρητίνη αναμιγνύεται και εφαρμόζεται πριν τοποθετηθεί στο καλούπι και μετά στο δοχείο. Ο άλλος τρόπος είναι ένα σύστημα εισαγωγής ρητίνης, στο οποίο το ξηρό ύφασμα και το καλούπι τοποθετούνται μέσα στο δοχείο. Η ρητίνη εισάγεται αρχικά μέσω ενός μικρού σωλήνα στο δοχείο, στη συνέχεια μέσω ενός σωλήνα με οπές για να εξαπλωθεί εν τέλει στο ύφασμα. Ένας τρίτος τρόπος κατασκευής σύνθετων υλικών cfr είναι η ξηρή εναπόθεση στρώσεων. Σε αυτήν, το υλικό από ανθρακονήματα είναι ήδη εμποτισμένο με ρητίνη (προπαρασκευασμένο - prepreg), και τοποθετείται στο καλούπι με παρόμοιο τρόπο όπως μια μεμβράνη. Το σύνολο, στη συνέχεια, τοποθετείται σε κενό για να αποπερατωθεί. Αυτή η μέθοδος έχει τις λιγότερες απώλειες ρητίνης και μπορεί να επιτύχει ελαφρότερες κατασκευές από την υγρή εναπόθεση στρωμάτων. Επίσης, αφού μεγαλύτερα ποσά ρητίνης είναι πιο δύσκολο να διαφύγουν με την υγρή εναπόθεση στρωμάτων, τα προπαρασκευασμένα τεμάχια γενικά έχουν λιγότερες μικρές οπές. Η εξάλειψη των μικρών οπών με τις ελάχιστες ποσότητες ρητίνης, γενικά απαιτούν την χρήση αεροστεγών πιέσεων για να ωθηθούν τα εναπομείναντα αέρια έξω.

Μια ταχύτερη μέθοδος χρησιμοποιεί ένα καλούπι πίεσεως. Αυτό είναι ένα καλούπι 2 τμημάτων (αρσενικό και θηλυκό), και συνήθως κατασκευάζονται από υαλονήματα ή αλουμίνιο. Το καλούπι κλείνει με πίεση, έχοντας στο εσωτερικό του τα υφάσματα και τη μήτρα. Το προτέρημα είναι ότι εξαιτίας της πίεσης δεν χρειάζεται αποπεράτωση σε κενό και η επιφάνεια που προκύπτει έχει καλή ποιότητα. Παρόλα αυτά, τα καλούπια απαιτούν αρκετό υλικό να παρακρατείται μαζί κατά τη διάρκεια πολλών χρήσεων, κάτω από αυτή την πίεση.

Πολλά τεμάχια cfr κατασκευάζονται με ένα μονό στρώμα υφάσματος άνθρακα και συμπληρώνεται με υαλονήματα. Ένα εργαλείο που ονομάζεται όπλο κοπής, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να δημιουργήσει γρήγορα τέτοιους τύπους τεμαχίων. Από την στιγμή που δημιουργείται ένα κέλυφος από ανθρακονήματα, το όπλο κοπής, το οποίο είναι ένα εργαλείο με πεπιεσμένο αέρα (αεροκίνητο), κόβει τα υαλονήματα από ένα ρολό και παράλληλα ψεκάζει ρητίνη, έτσι ώστε τα υαλονήματα και η ρητίνη να αναμειγνύονται στο κάθε σημείο. Η ρητίνη είναι είτε μια εξωτερική μίξη, όπου το ενισχυτικό και η ρητίνη ψεκάζονται ξεχωριστά, είτε εσωτερικά, όπου αναμειγνύονται, και είναι μέθοδος που απαιτεί καθαρισμό μετά από κάθε χρήση.

Για δύσκολα ή πολύπλοκα σχήματα, η μέθοδος της περιέλιξης νήματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή τεμαχίων.

3.5 Κατασκευαστές ινών άνθρακα

Οι πλέον γνωστοί κατασκευαστές ινών άνθρακα, ανάλογα με τον τομέα που ασχολούνται, είναι οι ακόλουθοι:

➤ PAN ανθρακονήματα για αεροδιαστημική:

- Toray Industries (μεγαλύτερος κατασκευαστής παγκοσμίως)
- Toho Tenax
- Mitsubishi Rayon
- Hexcel
- Cytec Industries
- Schunk Gruppe

➤ PAN ανθρακονήματα εμπορικά:

- Zoltek
- SGL Carbon
- Fortafil

➤ Ανθρακονήματα ρητίνης:

- Sumitomo
- Kureha Corporation

3.6 Εφαρμογές ινών άνθρακα

Τα CFRP υλικά χρησιμοποιούνται ευρέως στα αγωνιστικά αυτοκίνητα. Το υψηλό κόστος των ανθρακονημάτων μετριάζεται με τον αξεπέραστο λόγο αντοχής προς βάρος του υλικού, καθώς το μικρό βάρος είναι ουσιώδες χαρακτηριστικό για τα αγωνιστικά. Οι κατασκευαστές των αγωνιστικών έχουν αναπτύξει μεθόδους για να δώσουν στα τεμάχια από ανθρακονήματα αντοχή σε μια συγκεκριμένη διεύθυνση, κάνοντάς τα ανθεκτικά στην διεύθυνση άσκησης της δύναμης, αλλά και αδύναμα σε διευθύνσεις όπου ασκείται στο τεμάχιο μικρό ή καθόλου φορτίο. Ακόμη, οι κατασκευαστές ανέπτυξαν τις πλέξεις ανθρακονημάτων με πολλές διευθύνσεις, οι οποίες προσδίδουν αντοχή σε όλες τις διευθύνσεις.

Έως και πριν από λίγα χρόνια, το υλικό είχε περιορισμένη χρήση στα αυτοκίνητα μαζικής παραγωγής, εξαιτίας του υψηλού κόστους των υλικών, του εξοπλισμού, αλλά και του περιορισμένου αριθμού των ανθρώπων με γνώσεις για τον χειρισμό του. Σύντομα όμως, τα εμπόδια αυτά αντιμετωπίζονται και αρκετοί κατασκευαστές οχημάτων ξεκίνησαν να χρησιμοποιούν τα CFRP σε αυτοκίνητα καθημερινής χρήσεως.

Τις τελευταίες δύο δεκαετίες, το υλικό CFRP έχει αποκτήσει μια σημαντική θέση σε εφαρμογές στο πεδίο του πολιτικού μηχανικού. Η χρήση του σε αυτό το πεδίο αφορά την εναλλακτική ενίσχυση (αντί για σίδηρο) των δομικών υλικών, και την ενίσχυση των ήδη υφιστάμενων κατασκευών για αύξηση της αντοχής.



Σχήμα 3.6.1 - Ουρά από RC ελικόπτερο, κατασκευασμένη από CFRP

Στην πρώτη κατηγορία της εναλλακτικής ενίσχυσης, χρησιμοποιείται ως ενίσχυση στο μπετόν για να του προσδώσει ελαστικότητα. Ακόμη, έχει μεγάλη επίδραση στην αντοχή (πολλές φορές την διπλασιάζει), και αυξάνει την ελαστικότητα κατά 10%.

Όσον αφορά την δεύτερη περίπτωση, είναι και η πλέον διαδεδομένη χρήση του υλικού. Οι εφαρμογές περιλαμβάνουν την αύξηση της ικανότητας σε παλιές κατασκευές να αντισταθμίζουν φορτία (όπως οι γέφυρες), οι οποίες είχαν σχεδιαστεί να αντέχουν χαμηλότερα φορτία από ότι τα σημερινά, σεισμική ενίσχυση, και επιδιόρθωση κατεστραμμένων κατασκευών. Η ενίσχυση των παλαιών κατασκευών είναι δημοφιλής σε πολλές περιπτώσεις, επειδή το υψηλό κόστος αντικατάστασης της προβληματικής δομής μπορεί εύκολα να αποφευχθεί με αυτήν την μέθοδο.

Επιπλέον, τα υλικά CFRP εφαρμόζονται για να ενδυναμώσουν την αντοχή σε διάτμηση του ενισχυμένου μπετόν, με την τοποθέτηση υφασμάτων ή ινών γύρω από την περιοχή που επιθυμούμε (όπως κολώνες κτιρίων ή γέφυρες). Αυτή η μέθοδος μπορεί επίσης να αυξήσει την ολκιμότητα της περιοχής, κάνοντάς την περισσότερο ανθεκτική στην κατάρρευση από τους σεισμούς.

Εάν η κολώνα είναι κυλινδρική (ή περίπου), επιτυγχάνεται επίσης μια αύξηση στην αξονική της ικανότητα. Στην εφαρμογή αυτή, η ενίσχυση με CFRP ενδυναμώνει την αντοχή συμπίεσης του μπετόν.

Παρόλα αυτά τα πλεονεκτήματα που προσδίδουν στις εφαρμογές τους, υπάρχει ακόμα μια αμφισβήτηση στην κοινότητα των μηχανικών σχετικά με την χρήση αυτών των εναλλακτικών υλικών. Πιο συγκεκριμένα, αυτό οφείλεται στην έλλειψη τυποποίησης

και της κατάλληλης φύσης των συνδυασμών ινών και ρητίνης στην αγορά, αν και παρέχουν το πλεονέκτημα της δημιουργίας κατά παραγγελία των ιδιοτήτων για το υλικό με βάση τις επιθυμίες και τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής.

Το CFRP χρησιμοποιείται αρκετά και στον εξοπλισμό πολλών αθλημάτων. Για παράδειγμα, στα αγωνιστικά ποδήλατα ένα πλαίσιο από CFRP ζυγίζει πολύ λιγότερο από το αντίστοιχο πλαίσιο αλουμινίου. Η επιλογή της πλέξης, και σε αυτές τις εφαρμογές, θα πρέπει να γίνει προσεκτικά για να μεγιστοποιείται η ελαστικότητα. Επίσης, προσφέρουν αεροδυναμικά οφέλη, τα οποία χρήζουν ιδιαίτερης εκτίμησης στα αγωνιστικά ποδήλατα. Όμως, σύντομα έχουν αρχίσει να χρησιμοποιούνται και σε απλά ποδήλατα μέτριας και υψηλής οικονομικής αξίας. Τα εξαρτήματα που κατασκευάζονται από CFRP είναι οι σκελετοί, τα πηρούνια, οι τροχοί, οι αναπτύξεις, τα τιμόνια και οι λαιμοί τιμονιού και σέλας των ποδηλάτων και άλλα.

Αλλα αθλήματα που χρησιμοποιούν εξαρτήματα από CFRP είναι οι ρακέτες για το τένις, το σκουός και το μπάντμιντον, τα καλάμια για το ψάρεμα, τα σκάφη για την κωπηλασία.

Τα σύνθετα υλικά από ανθρακονήματα χρησιμοποιούνται και στην ιατρική σε επιθέματα ή στηρίγματα για το ανθρώπινο σώμα. Επίσης, βοηθά σε ασθένειες όπως η Charcot-Marie-Tooth disease και άλλες διαταραχές του νευρολογικού συστήματος, ή σε εγκαύματα.

Επιπλέον, χρησιμοποιούνται σε μια πληθώρα από εξαρτήματα για μουσικά όργανα, όπως είναι το δοξάρι για βιολί, η πένα για κιθάρα, και η γκάιντα. Ακόμη, βρίσκουν εφαρμογές και σε μαντολίνα και τσέλο.

Μια ακόμη εφαρμογή των CFRP είναι τα πυροβόλα όπλα. Σε αυτά, αντικαθιστούν μεταλλικές, ξύλινες ή υαλονημάτων τμήματα, για να μειωθεί το συνολικό τους βάρος.

Επίσης, οι κατασκευαστές παπουτσιών χρησιμοποιούν το ανθρακονήμα ως βάση για τα αθλητικά παπούτσια του μπάσκετ, για να παραμένει το πόδι σταθερό. Συνήθως, τοποθετείται σε όλο το μήκος του παπουτσιού ακριβώς πάνω από την σόλα του, και είναι εκτεθειμένο σε κάποιες περιοχές, όπως στην καμάρα του πέλματος.

Τέλος, έχει μεγάλη χρήση στην αεροδιαστημική βιομηχανία, προσφέροντας σε αεροσκάφη και διαστημόπλοια πολλαπλά οφέλη. Για παράδειγμα, το Rudder του A310 Airbus (επίπεδη, συνήθως ελασματοειδής κινητή επιφάνεια ελέγχου προσαρμοσμένη όρθια στην πρύμνη) κατασκευάζεται με CFRP. Τα πλεονεκτήματα σε σχέση με το παραδοσιακό rudder, κατασκευασμένο από φύλλα αλουμινίου είναι :

- 25% μείωση στο βάρος.
- 95% μείωση στα συστατικά από τον συνδυασμό μερών και δομών σε απλούστερα διαμορφωμένα τμήματα.
- Συνολική μείωση σε παραγωγικά και λειτουργικά κόστη, καθώς η οικονομία στα τμήματα οδηγεί σε χαμηλότερα παραγωγικά κόστη, και η εξοικονόμηση βάρους προκαλεί εξοικονόμηση στα καύσιμα, και συνεπώς χαμηλότερα λειτουργικά κόστη ενός αεροπλάνου.

3.7 Τέλος διάρκειας ζωής / ανακύκλωση

Τα CFRP έχουν μία σχεδόν ολοκληρωμένη διάρκεια ζωής όταν προστατεύονται από τον ήλιο, αλλά δεν έχουν ένα όριο διάρκειας όταν φορτίζονται κυκλικά. Όταν έλθει η ώρα να διασπασθούν τα CFRP, δεν μπορούν να αποσυντεθούν στον αέρα, όπως πολλά μέταλλα. Όταν τα CFRP είναι χωρίς βινύλια και άλλα πολυμερή, μπορούν να αποσυντεθούν θερμικά μέσω θερμικού αποπολυμερισμού, σε ένα περιβάλλον χωρίς οξυγόνο. Αυτή η διαδικασία μπορεί να επιτευχθεί σε ένα διωλιστήριο με ένα βήμα. Η παραλαβή και η

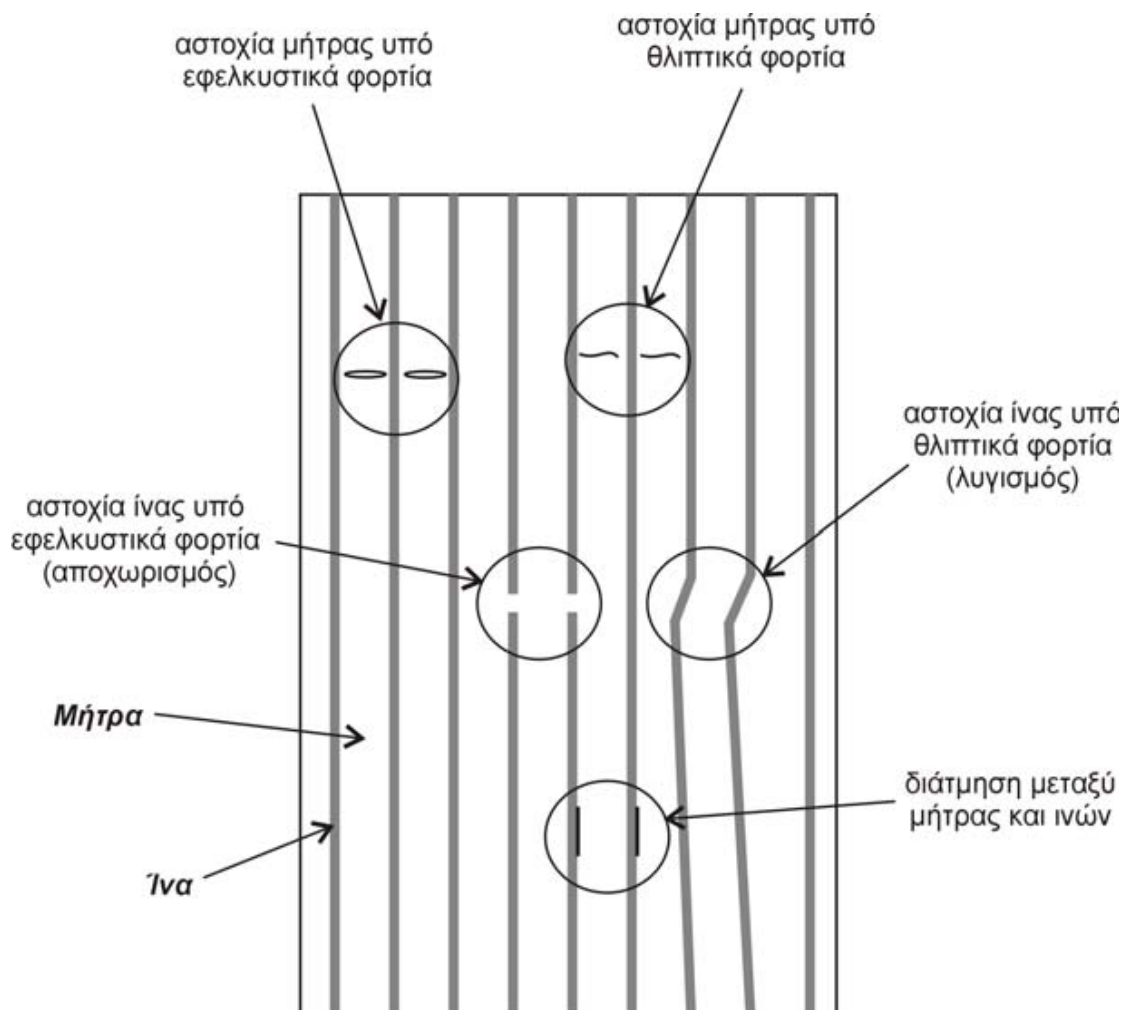
επανεκμετάλλευση του άνθρακα και των μονομερών είναι τότε πιθανή. Τα *cfbr* μπορούν ακόμη να επεξεργασθούν ή να κομματιαστούν σε χαμηλή θερμοκρασία για να αναμορφωθούν τα ανθρακονήματα, αν και αυτή η επεξεργασία συρρικνώνει τις ίνες δραματικά. Η συρρίκνωση αυτή των ινών προκαλεί στο ανακυκλούμενο υλικό να είναι πιο αδύναμο από το κανονικό υλικό. Παρόλα αυτά, υπάρχουν πολλές βιομηχανικές εφαρμογές που δεν χρειάζονται την αντοχή των ολόκληρων ενισχυτικών ινών άνθρακα. Για παράδειγμα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν στα ηλεκτρονικά ευρείας κατανάλωσης, όπως τα λάπτοπς.

4. Η ΑΣΤΟΧΙΑ ΣΤΑ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

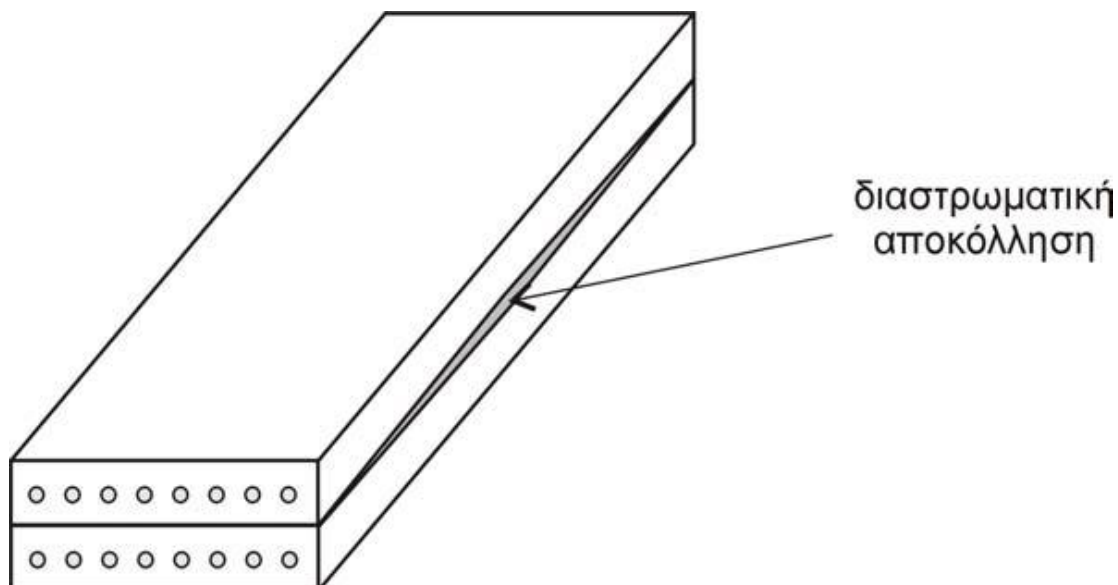
4.1. Εισαγωγή

Σε αντίθεση με τα μέταλλα, όπου η αστοχία ορίζεται ως η δημιουργία και διάδοση ρωγμών, στα σύνθετα υλικά, ο μακροσκοπικός ορισμός της αστοχίας δεν είναι διακριτός. Τα ετερογενή πολύστρωτα υλικά εμφανίζουν πολλές διαφορετικές τοπικές αστοχίες πριν από τον διαχωρισμό τους σε διαφορετικά κομμάτια. Οι τοπικές αστοχίες αναφέρονται ως 'βλάβη' και η ανάπτυξη τους με την αύξηση του φορτίου ή την παρέλευση του χρόνου ως 'συσσώρευση βλάβης'.

Οι μηχανισμοί αστοχίας στα ινώδη σύνθετα υλικά είναι πολύπλοκοι. Σε μικρή κλίμακα οι κύριοι μηχανισμοί αστοχίας είναι: η αστοχία της μήτρας υπό εφελκυστικά και θλιπτικά φορτία, η αστοχία των ινών υπό εφελκυστικά (αποχωρισμός ινών) και θλιπτικά φορτία (λυγισμός των ινών) και η διάτμηση μεταξύ μήτρας και ινών (Σχ.4.1.1). Στο επίπεδο πολύστρωτης πλάκας, η διαστρωματική αποκόλληση ή delamination (αποκόλληση μεταξύ των στρώσεων, Σχ.4.1.2) είναι η πιο συχνά παρατηρούμενη αστοχία.



Σχήμα 4.1.1- Σχηματική αναπαράσταση των μηχανισμών αστοχίας σε μια ινώδη στρώση.



Σχήμα 4.1.2- Σχηματική αναπαράσταση της διαστρωματικής αποκόλλησης (delamination).

Οι αστοχίες στα σύνθετα υλικά έχουν σχέση είτε με την αντοχή, είτε με τη δυσκαμψία. Οι αστοχίες που οφείλονται στην αντοχή παρουσιάζονται όταν κάποια τάση υπερβεί την ικανότητα του πολύστρωτου να φέρει φορτία, ενώ οι αστοχίες που οφείλονται στη δυσκαμψία εμφανίζονται όταν οι παραμορφώσεις υπερβούν τα ανώτατα επιτρεπόμενα όρια του πολύστρωτου. Σε κάθε περίπτωση, λόγω της ορθοτροπικότητας των πολύστρωτων σύνθετων υλικών, η εκτίμηση της αντοχής τους είναι πιο πολύπλοκη, σε σχέση με τα ισότροπα υλικά. Η πιο σημαντική δυσκολία οφείλεται στο γεγονός ότι οι αντοχές των πολύστρωτων, όπως και οι ελαστικές τους σταθερές, μεταβάλλονται στις διάφορες δευθύνσεις. Επομένως, σε ένα ορθοτροπικό υλικό, μπορεί να μετρηθεί άπειρος αριθμός αντοχών, ακόμη και με τη διεξαγωγή μιας μονοαξονικής δοκιμής, ανάλογα με τη διεύθυνση επιβολής του φορτίου. Για σχεδιαστικούς λόγους ο αριθμός των αντοχών περιορίζεται σε 5, στις κύριες διευθύνσεις του υλικού. Τελικά οι αντοχές που χρησιμοποιούνται είναι

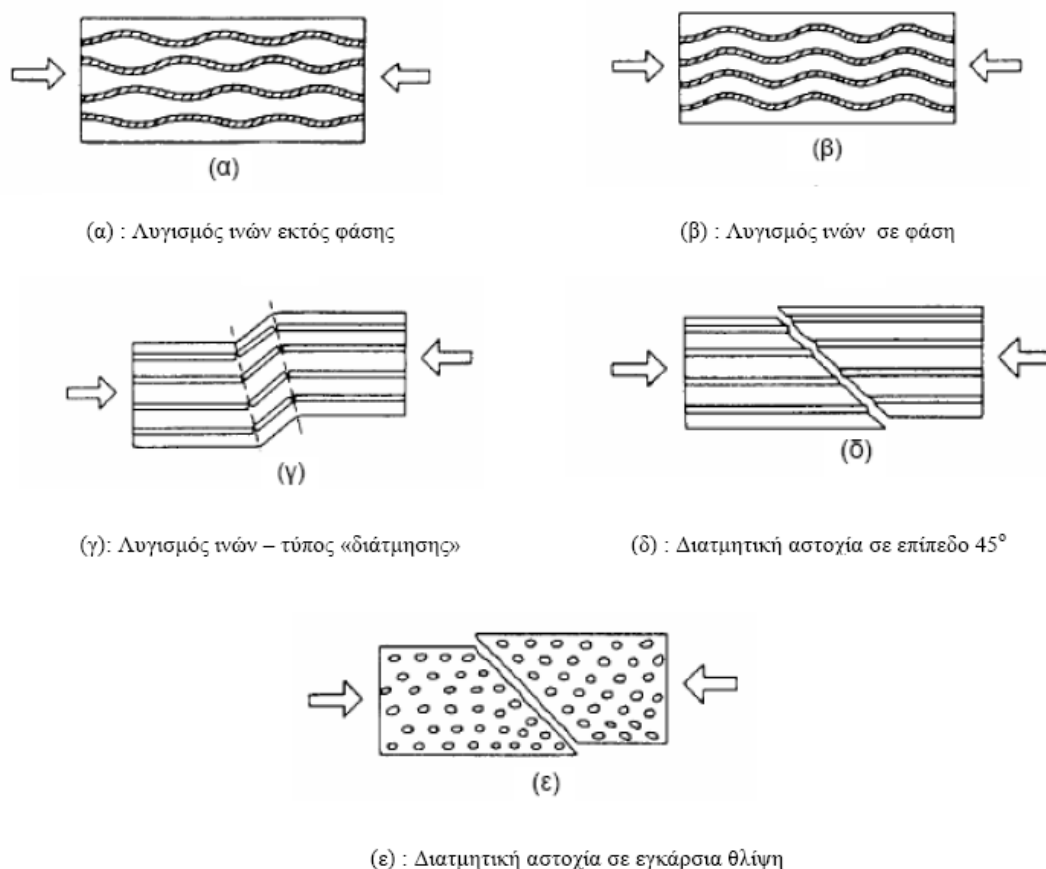
Εφελκυσμός στη διεύθυνση των ινών 1	Xt
Θλίψη στη διεύθυνση των ινών 1	Xc
Εφελκυσμός στη κάθετη διεύθυνση 2	Yt
Θλίψη στην κάθετη διεύθυνση 2	Yc
Διάτμηση στο επίπεδο 1-2	S

4.2. Τρόποι αστοχίας σε θλίψη

Στην παρούσα εργασία, ιδιαίτερα ενδιαφέρει η αστοχία πολύστρωτου σύνθετου υλικού σε θλίψη. Η αστοχία μιας στρώσης υπό την επίδραση θλιπτικών φορτίων παράλληλων στη διεύθυνση των ινών σχετίζεται με τον μικροσκοπικό λυγισμό των μεμονωμένων ινών, οι οποίες λειτουργούν σαν δοκοί – κολώνες σε ελαστική έδραση που παρέχεται από τη ρητίνη που τις περιβάλλει. Ο λυγισμός μπορεί να είναι τύπου «έκτασης» (Σχήμα 4.2.1 α , 4.2.1 β), ο οποίος εμφανίζεται μόνο σε στρώσεις με πολύ

μικρό όγκο ινών, ή τύπου «διάτμησης» (Σχήμα 4.2.1 γ), ο οποίος οδηγεί στη δημιουργία έκκεντρων ζωνών. Οι ζώνες αυτές παρατηρούνται πολύ συχνά κατά την αστοχία πολύστρωτων σε θλίψη. Σε σύνθετα υλικά που περιέχουν ίνες υψηλής δυσκαμψίας, μπορεί να προηγηθεί του λυγισμού των ινών αστοχία της μήτρας σε διάτμηση σε επίπεδο 45° (Σχήμα 4.2.1δ). Παρόμοια μορφή κατάρρευσης προκαλείται και από θλιπτικά φορτία κάθετα στις ίνες, αστοχία που περιλαμβάνει τη θραύση πολύ λίγων ή καθόλου ινών.

Η αστοχία σε θλίψη των πολύστρωτων από ίνες και ρητίνη επηρεάζεται πολύ από τις διαφόρων ειδών ατέλειες, όπως η ατελής ευθυγράμμιση των ινών, η μη ικανοποιητική γειτνίαση των ινών, ατελείς δεσμοί ινών – ρητίνης και τα κενά, ιδίως όταν αυτά εμφανίζονται στην κοινή επιφάνεια ίνας- ρητίνης.



Σχήμα 4.2.1 - Τρόποι αστοχίας σε θλίψη μιας μονοαξονικής στρώσης

4.3. Τρόποι αστοχίας σε εφελκυσμό

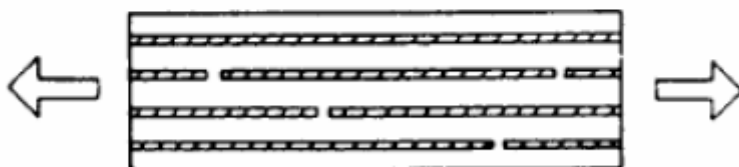
Η αστοχία ενός πολύστρωτου σε εφελκυσμό, με φορτίο παράλληλο στη διεύθυνση των ινών είναι πολύπλοκη διαδικασία. Στα τυπικά σύνθετα υλικά από ίνες γυαλιού και πολυεστερική ρητίνη, η μέγιστη παραμόρφωση των ινών είναι μεγαλύτερη από εκείνη της ρητίνης ($\epsilon_f > \epsilon_m$). Τότε επέρχεται πρώτα αστοχία της ρητίνης και το φορτίο μεταβιβάζεται στις ίνες, οπότε δεν επηρεάζεται σημαντικά η αντοχή της στρώσης (Σχήμα 4.3.1). Στα σύνθετα με πολυεστερική ή εποξική ρητίνη και ίνες άνθρακα, η θραύση των ινών προηγείται της θραύσης της ρητίνης. Όταν θραύονται οι ίνες, με την προϋπόθεση ότι ο δεσμός ίνας – ρητίνης είναι καλός, μεταφέρεται φορτίο με διάτμηση από τις σπασμένες ίνες μέσω της ρητίνης στις παρακείμενες άθικτες ίνες (Σχήμα 4.3.2). Έτσι, οι σπασμένες ίνες ανακτούν την ικανότητα να φέρουν φορτία σε μια απόσταση από την

θραύση ίση περίπου με 10 ως 100 φορές τη διάμετρο της ίνας. Η θραύση της στρώσης επέρχεται όταν αθροίζονται πολλές θραύσεις ινών κοντά στην ίδια εγκάρσια διατομή, ικανές να υπερνικήσουν την ικανότητα αυτή.

Η αστοχία μιας μονοαξονικής στρώσης σε εφελκυστικό φορτίο κάθετο στη διεύθυνση των ινών εμφανίζεται με τη μορφή ρηγματώσεως της ρητίνης και αποχωρισμού του δεσμού ίνας – ρητίνης.



Σχήμα 4.3.1 - Ρηγματώση ρητίνης πριν τη θραύση των ινών

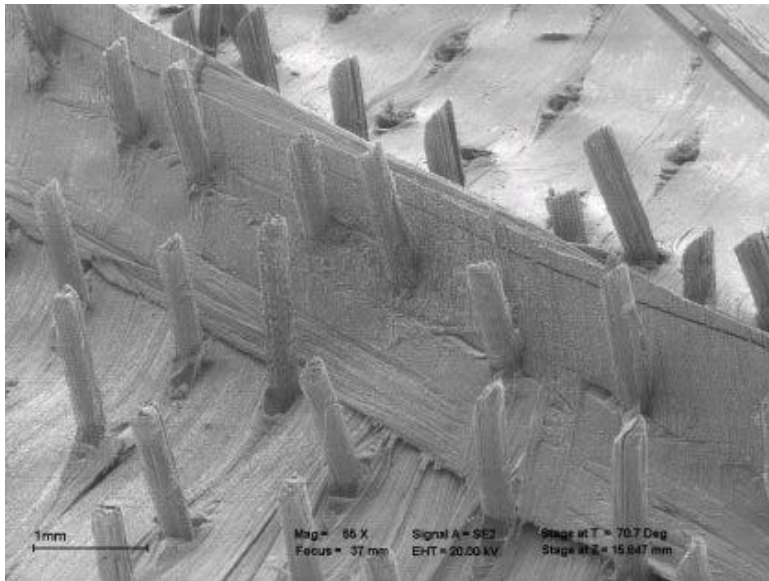


Σχήμα 4.3.2 - Θραύση πρώτα των ινών

4.4. Μορφές αστοχίας

Πιο αναλυτικά, σαν πιο βασικές μορφές αστοχίας των σύνθετων υλικών θα μπορούσαν να αναφερθούν οι κάτωθι:

- (α) θραύση/σπάσιμο των ινών (fibre breakage),
- (β) παραμόρφωση και θραύση της μήτρας (matrix deformation and cracking),
- (γ) αποχωρισμός των ινών από τη μήτρα είτε,
 - (i) λόγω εμφάνισης και διάδοσης ρωγμών στην διεπιφάνεια ίνας μήτρας (debonding),
 - (ii) λόγω θραύσης, των ινών και εκρίζωσης τους από τη μήτρα (pull-out),
- (δ) διαχωρισμός μιας στρώσης από την άλλη σ' ένα πολύστρωτο σύνθετο υλικό που καλείται διαστρωματική αποκόλληση (delamination).



Σχήμα 4.4.1 - Εσωτερική αστοχία

Η επίδραση της εσωτερικής αστοχίας πάνω στην μακροσκοπική συμπεριφορά του υλικού παρατηρείται μόνο όταν η συχνότητα των εσωτερικών αστοχιών είναι εξαιρετικά μεγάλη.

➤ Θραύση ινών

Όταν μία ρωγή διαδίδεται σε κάθετη διεύθυνση προς τις ίνες, προκαλείται βαθμιαία θραύση των ινών μέχρι τον πλήρη διαχωρισμό, κατά την έννοια του πάχους, του σύνθετου ελάσματος. Οι ίνες θραύονται όταν η παραμόρφωση τους προσεγγίσει την παραμόρφωση θραύσης τους. Αν και οι ίνες συμμετέχουν ουσιαστικά στην υψηλή αντοχή των σύνθετων υλικών, η απαιτούμενη ενέργεια για την θραύση των ινών, αντιστοιχεί σ' ένα πολύ μικρό μόνο ποσοστό της συνολικής απορροφούμενης ενέργειας που αναφέρεται στην υπέρθεση των μηχανισμών αστοχίας του υλικού.

➤ Παραμόρφωση και θραύση της μήτρας

Το υλικό της μήτρας που περιβάλλει τις ίνες πρέπει να θραυστεί για να ολοκληρωθεί η θραύση του συνθέτου υλικού. Οι θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες, όπως εποξικές και πολυεστερικές, ανήκουν στα ψαθυρά υλικά και επιδέχονται περιορισμένη συνολική παραμόρφωση μέχρι την θραύση τους, ενώ αντίθετα οι μεταλλικές μήτρες μπορούν να υποστούν εκτεταμένη πλαστική παραμόρφωση. Ο μηχανισμός απορρόφησης ενέργειας στην περίπτωση μητρών από πολυμερές υλικό χαρακτηρίζεται από θραύση και μικρή παραμόρφωση της μήτρας και συνεπώς, η συνεισφορά του στην συνολική απορροφούμενη ενέργεια είναι σχετικά πολύ μικρή σε σύγκριση με αυτή των σύνθετων υλικών μεταλλικής μήτρας.

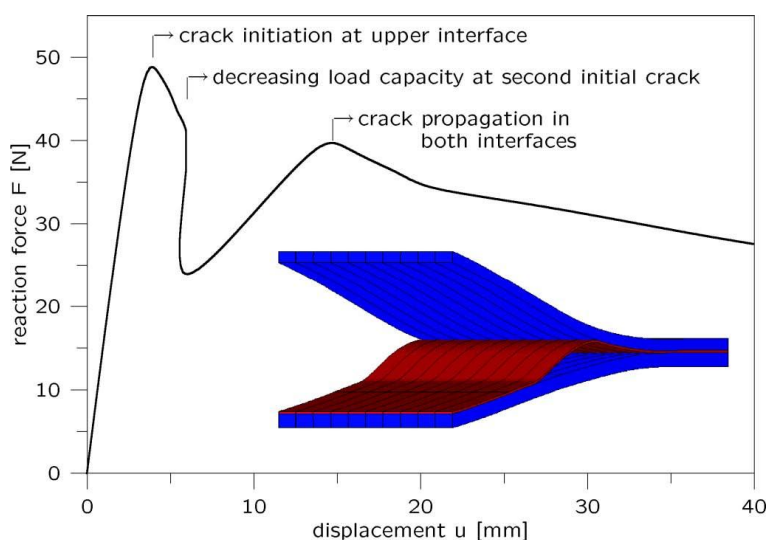
➤ Αποκόλληση ινών από μήτρα (debonding)

Κατά την διαδικασία θραύσης οι ίνες μπορούν να αποκολληθούν από το υλικό της μήτρας λόγω εμφάνισης και διάδοσης ρωγμών παράλληλα προς τις ίνες (debonding cracks). Σε αυτή την διαδικασία οι χημικοί ή δευτερεύοντες δεσμοί μεταξύ των ινών και του υλικού μήτρας σπάνε. Μια τέτοια ρωγή (debonding crack) μπορεί να διαδίδεται

στην διεπιφάνεια ίνας -μήτρας ή μέσα στην μήτρα, ανάλογα με τη σχετική τους αντοχή. Με μείωση της αντοχής της διεπιφάνειας μπορεί να συμβεί εκτεταμένη αποκόλληση οδηγώντας συνεπώς σε μία σημαντική αύξηση της απορροφούμενης ενέργειας.

➤ Διαστρωματική αποκόλληση (delamination)

Μία ρωγμή που διαδίδεται σε μία στρώση ενός πολύστρωτου ελάσματος από σύνθετο υλικό, μπορεί να αποτελέσει την κορυφή ρωγμής που θα προσεγγίσει τις ίνες της γειτονικής στρώσης. Αυτή η διαδικασία προσέλκυσης ρωγμών είναι όμοια με την περίπτωση ρωγμής που διαδίδεται στη μήτρα και προσελκύεται στην διεπιφάνεια ίνας - μήτρας. Λόγω όμως μεγάλων διατμητικών τάσεων στη μήτρα που γειτονεύει με την κορυφή της ρωγμής, η ρωγμή μπορεί να διακλαδωθεί και να αρχίσει να διατρέχει την διεπιφάνεια παράλληλα προς το επίπεδο των στρώσεων. Αυτές οι ρωγμές λέγονται ρωγμές διαστρωματικής αποκόλλησης και όπου εμφανίζονται είναι "υπεύθυνες" για την απορρόφηση ενός πολύ σημαντικού ποσού ενέργειας θραύσεως. Συνήθως εμφανίζονται με μεγάλη συχνότητα, όταν πολύστρωτα σύνθετα υλικά υπόκεινται σε καμπτικές καταπονήσεις.



Σχήμα 4.4.2 - Διαστρωματική αποκόλληση

4.5. Κριτήρια αστοχίας

Παρόλη την πρόοδο που έχει σημειωθεί στην ανάπτυξη κριτηρίων πρόβλεψης των αστοχιών σε επίπεδο στρώσης πολύστρωτων πλακών, δεν υπάρχουν μέχρι σήμερα κριτήρια τα οποία να προβλέπουν ικανοποιητικά την αστοχία σε όλα τα επίπεδα της ανάλυσης, για όλες τις συνθήκες φόρτισης και για όλους τους τύπους των σύνθετων υλικών. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην δυσκολία της μοντελοποίησης των πολύπλοκων μηχανισμών αστοχίας στα σύνθετα υλικά. Το αποτέλεσμα είναι να έχουν αναπτυχθεί διάφορα κριτήρια εξειδικευμένα για συγκεκριμένες εφαρμογές. Ενδεικτικά, ορισμένα από τα κριτήρια που έχουν χρησιμοποιηθεί εκτενώς είναι τα κριτήρια Μέγιστης τάσης και Μέγιστης παραμόρφωσης, το κριτήριο Tsai-Hill , το κριτήριο Tsai-Wu και τα κριτήρια Hashin.

4.5.1. Κριτήριο Μέγιστης Τάσης

Σύμφωνα με το κριτήριο αυτό, εμφανίζεται αστοχία όταν οποιαδήποτε από τις τάσεις στις κύριες διευθύνσεις υπερβεί την αντίστοιχη επιτρεπόμενη τιμή. Οπότε η αστοχία επέρχεται όταν ικανοποιούνται οι σχέσεις:

$$\begin{array}{ll} \text{Εφελκυσμός} & \text{Θλίψη} \\ \sigma_1 < X_t & \sigma_1 < X_c \\ \sigma_2 < Y_t & \sigma_2 < Y_c \\ \text{Διάτμηση} & \\ |\tau_{12}| < S & \end{array}$$

Όπου σ_1 , σ_2 οι τάσεις στις κύριες διευθύνσεις του υλικού, δηλαδή σ_1 η τάση παράλληλα στις ίνες, σ_2 η τάση σε διεύθυνση κάθετη στις ίνες.

4.5.2. Κριτήριο Μέγιστης Παραμόρφωσης

Σύμφωνα με το κριτήριο αυτό παρουσιάζεται αστοχία όταν οποιαδήποτε από τις παραμορφώσεις στις κύριες διευθύνσεις του υλικού υπερβεί την αντίστοιχη επιτρεπόμενη τιμή. Οπότε η αστοχία επέρχεται όταν ικανοποιούνται οι σχέσεις:

$$\begin{array}{ll} \text{Εφελκυσμός} & \text{Θλίψη} \\ \varepsilon_1 < X_{et} & \varepsilon_1 < X_{ec} \\ \varepsilon_2 < Y_{et} & \varepsilon_2 < Y_{ec} \\ \text{Διάτμηση} & \\ |\gamma_{12}| < S_\varepsilon & \end{array}$$

Όπου ε_1 και ε_2 οι δείκτες 1 και 2 δείχνουν διεύθυνση παράλληλη ή κάθετη στη διεύθυνση των ινών, ενώ αντίστοιχα X_{et} , X_{ec} είναι οι μέγιστες επιτρεπόμενες εφελκυστικές ή θλιπτικές παραμορφώσεις στη διεύθυνση 1, Y_{et} , Y_{ec} είναι οι μέγιστες επιτρεπόμενες εφελκυστικές ή θλιπτικές παραμορφώσεις στη διεύθυνση 2 και S_ε η μέγιστη διατμητική παραμόρφωση.

Λόγω της γραμμικότητας στην ελαστική συμπεριφορά των σύνθετων, τα κριτήρια μέγιστης τάσης και παραμόρφωσης είναι όμοια. Οι μέγιστες τάσεις και παραμορφώσεις συνδέονται μέσω των λόγων :

$$X_{et} = \frac{X_t}{E_1}$$

(4-1)

$$Y_{et} = \frac{Y_t}{E_2}$$

(4-2)

$$S_\varepsilon = \frac{S}{G_{12}}$$

(4-3)

4.5.3. Κριτήριο Tsai – Hill

Σύμφωνα με το κριτήριο αυτό, έχουμε έναρξη αστοχίας σε συνθήκες επίπεδης εντατικής κατάστασης, όταν παραβιάζεται η ανισότητα:

$$\frac{\sigma_1^2}{X^2} - \frac{\sigma_1 \sigma_2}{X^2} + \frac{\sigma_2^2}{Y^2} + \frac{T_{12}^2}{S^2} < 1 \quad (4-4)$$

όπου X, Y, S είναι οι αντοχές στις διευθύνσεις 1 και 2 και στο επίπεδο 1- 2, ανάλογα με το είδος των τάσεων. Όταν οι τάσεις είναι εφελκυστικές, χρησιμοποιούνται οι αντοχές σε εφελκυσμό X_t , Y_t , ενώ αν οι τάσεις είναι θλιπτικές χρησιμοποιούνται οι αντίστοιχες αντοχές σε θλίψη X_c , Y_c .

4.5.4. Κριτήριο Tsai – Wu

Σύμφωνα με το κριτήριο αυτό, σε μια ορθοτροπική στρώση σε συνθήκες επίπεδης εντατικής κατάστασης, για να μη συμβαίνει αστοχία πρέπει:

$$F_1 \sigma_1 + F_2 \sigma_2 + F_6 \sigma_6 + F_{11} \sigma_1^2 + F_{22} \sigma_2^2 + F_{66} \sigma_6^2 + 2F_{12} \sigma_1 \sigma_2 < 1 \quad (4-5)$$

όπου:

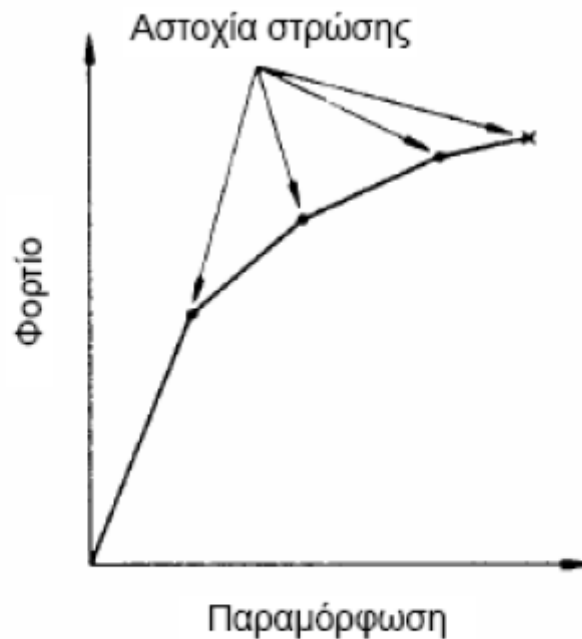
$$F_1 = \frac{1}{X_t} + \frac{1}{X_c}, \quad F_2 = \frac{1}{Y_t} + \frac{1}{Y_c}, \quad F_{11} = -\frac{1}{X_t X_c}, \quad F_{22} = -\frac{1}{Y_t Y_c} \quad (4-6) \quad (4-7) \quad (4-8) \quad (4-9)$$

$$F_6 = 0, \quad F_{66} = \frac{1}{S^2}, \quad F_{12} = \frac{1}{2\sigma^2} \left[1 - \left(\frac{1}{X_t} + \frac{1}{X_c} + \frac{1}{Y_t} + \frac{1}{Y_c} \right) \sigma + \left(\frac{1}{X_t X_c} + \frac{1}{Y_t Y_c} \right) \sigma^2 \right] \quad (4-10) \quad (4-11) \quad (4-12)$$

σ είναι η αντοχή του υλικού σε διαξονικό εφελκυσμό, ενώ οι δείκτες στις αντοχές X, Y, S είναι οι ίδιοι όπως αναφέρονται και προηγουμένως.

Οι παραπάνω σχέσεις, καθώς και ο υπολογισμός τάσεων – παραμορφώσεων στα πολύστρωτα σύνθετα υλικά αναφέρονται σε μία μόνο στρώση. Επομένως, με τις μεθόδους αυτές μπορεί να ελεγχθεί αν θα αστοχήσει κάποια από τις στρώσεις, ή, αντίστροφα, ποιά στρώση θα αστοχήσει πρώτα σε συγκεκριμένο φορτίο. Οι στρώσεις αστοχούν με τη σειρά, ξεκινώντας από τις πιο ευαίσθητες, που είναι συνήθως εκείνες που έχουν ίνες διατεταγμένες κάθετα στη διεύθυνση του φορτίου. Έτσι, η αστοχία πρώτης στρώσης μπορεί να συμβεί σε σχετικά μικρό φορτίο, χωρίς το πολύστρωτο να κινδυνεύει ολοκληρωτικά. Μερικές φορές, η επίδραση αστοχίας πρώτης στρώσης μπορεί να μην είναι εμφανής στη μακροσκοπική συμπεριφορά του πολύστρωτου. Καθώς όμως αστοχούν περισσότερες στρώσεις η μείωση της δυσκαμψίας γίνεται εμφανής, και η απόκριση του πολύστρωτου αποκλίνει από την αρχική συμπεριφορά. Όμως, το πολύστρωτο είναι ικανό να φέρει ακόμη φορτία, τα οποία προκαλούν μεγαλύτερες παραμορφώσεις από εκείνες που θα προκαλούσαν πριν την αστοχία πρώτης στρώσης. Σταδιακά με αυτό τον τρόπο αστοχούν όλο και περισσότερες στρώσεις, με την αντίστοιχη μείωση δυσκαμψίας του πολύστρωτου. Αυτή η σταδιακή μείωση της δυσκαμψίας έχει ως αποτέλεσμα η μορφή της καμπύλης τάσεων παραμορφώσεων να εμφανίζει «γόνατα», για κάθε σημείο όπου οι στρώσεις που έχουν αστοχήσει είναι τέτοιες, ώστε να μειώνεται σημαντικά η δυσκαμψία. Ανάμεσα όμως στα «γόνατα» - και

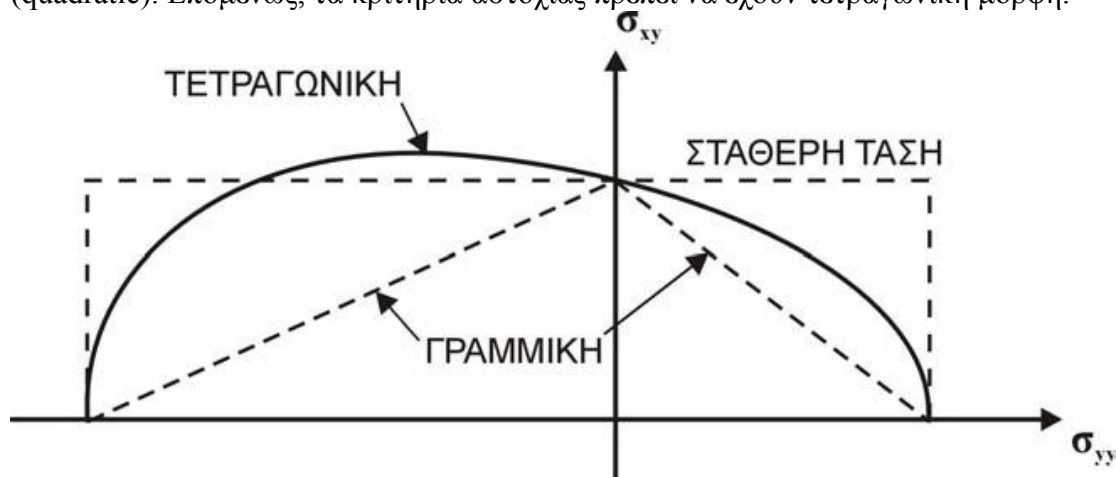
κατά συνέπεια στις επιμέρους αστοχίες στρώσεων – το πολύστρωτο διατηρεί τη γραμμική ελαστική συμπεριφορά του (Σχήμα 4.5.1).



Σχήμα 4.5.1 - Καμπύλη φορτίου – παραμόρφωσης πολύστρωτου

4.5.5. Κριτήρια Hashin

Στο Σχ.4.5.2 φαίνονται οι σχηματικές αναπαραστάσεις τριών απεικονίσεων της επιφάνειας αστοχίας (failure surface). Η απλούστερη απεικόνιση, η οποία και προσαρμόζει τα πειραματικά δεδομένα με τον καλύτερο τρόπο είναι η τετραγωνική (quadratic). Επομένως, τα κριτήρια αστοχίας πρέπει να έχουν τετραγωνική μορφή.



Σχήμα 4.5.2 - Σχηματική αναπαράσταση των επιφανειών αστοχίας

Τα μονοαξονικά ινώδη σύνθετα υλικά είναι εγκαρσίως ισότροπα ως προς την διεύθυνση των ινών, λόγω ότι οι ίνες είναι τυχαία κατανεμημένες. Θεωρούμε ένα

κυλινδρικό δοκίμιο από υλικό ενισχυμένο με ίνες, το οποίο αναφέρεται σε ένα σύστημα συντεταγμένων στο οποίο ο άξονας x συμπίπτει με την διεύθυνση των ινών και οι άξονες y, z με τις εγκάρσιες διευθύνσεις. Από την εγκάρσια ισοτροπία προκύπτει ότι το κριτήριο αστοχίας πρέπει να είναι αμετάβλητο ως προς κάθε περιστροφή των αξόνων y, z γύρω από τον x. Επομένως, το κριτήριο αστοχίας μπορεί να είναι το πολύ συνάρτηση των αναλλοίωτων (invariables) του τανυστή τάσεων ως προς αυτές τις περιστροφές. Οι αναλλοίωτες είναι :

$$I_1 = \sigma_{xx} \quad (4-13)$$

$$I_2 = \sigma_{yy} + \sigma_{zz} \quad (4-14)$$

$$I_3 = \sigma_{yz}^2 + \sigma_{yy}\sigma_{zz} \quad \text{ή} \quad \frac{1}{4}(\sigma_{yy} + \sigma_{zz}) + \sigma_{yz}^2 \quad (4-15)$$

$$I_4 = \sigma_{xy}^2 + \sigma_{xz}^2 \quad (4-16)$$

$$I_5 = 2\sigma_{xy}\sigma_{yz}\sigma_{xz} - \sigma_{yy}\sigma_{xz}^2 - \sigma_{zz}\sigma_{xy}^2 \quad (4-17)$$

Η εναλλακτική έκφραση της εξ.(4-15) εκφράζει το τετράγωνο της μέγιστης εγκάρσιας διατμητικής τάσης ενώ η εξ.(4-16) εκφράζει την μέγιστη αξονική διατμητική τάση. Οι δύο εναλλακτικές μορφές της εξ.(4-15) σχετίζονται με όρους της εξ.(4-14).

Η επιλογή της τετραγωνικής (quadratic) προσέγγισης αναιρεί την ύπαρξη της εξίσωσης (4-17) στα κριτήρια αστοχίας. Έτσι, η πιο γενική τετραγωνική εγκάρσια ισοτροπική προσέγγιση μπορεί να έχει την μορφή

$$A_1 I_1 + B_1 I_1^2 + A_2 I_2 + B_2 I_2^2 + C_{12} I_1 I_2 + A_3 I_3 + A_4 I_4 = 1 \quad (4-18)$$

Οι αντοχές του υλικού στο συγκεκριμένο κριτήριο συμβολίζονται ως εξής:

σ^+_A : αντοχή σε εφελκυσμό στην διεύθυνση των ινών

σ^-_A : αντοχή σε θλίψη στην διεύθυνση των ινών

σ^+_T : αντοχή σε εφελκυσμό στην εγκάρσια διεύθυνση

σ^-_T : αντοχή σε θλίψη στην εγκάρσια διεύθυνση

τ_t : εγκάρσια διατμητική αντοχή, σπt στο Σχ. 4.5.3(β)

τ_A : αξονική διατμητική αντοχή, σln στο Σχ. 4.5.3(β)

Με εφαρμογή των εξισώσεων (4-17) και (4-18) για καθαρή εγκάρσια ή αξονική διάτμηση προκύπτει αμέσως ότι:

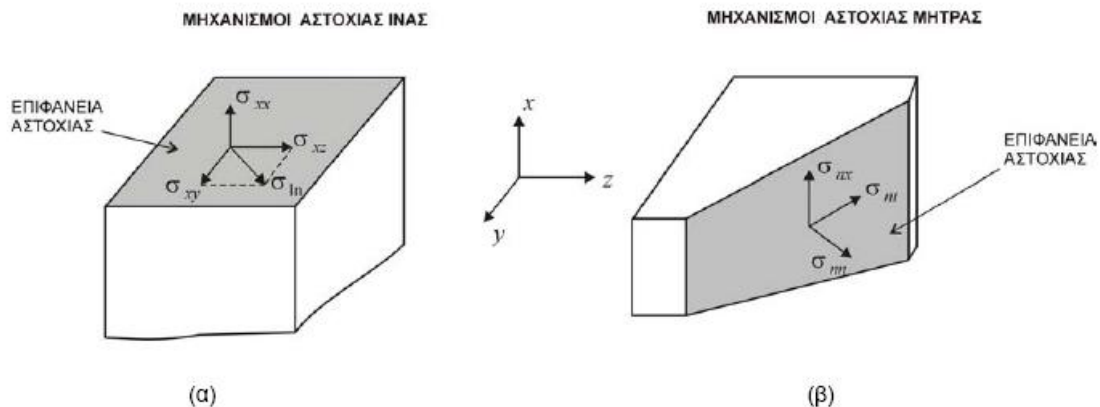
$$A_3 = \frac{1}{\tau_T^2}$$

$$A_4 = \frac{1}{\tau_A^2} \quad (4-19)$$

Η παρατήρηση της αστοχίας στα μονοδιευθυντικά ινώδη σύνθετα υλικά έχει δείξει ότι υπάρχουν δύο κύριοι μηχανισμοί αστοχίας. Ο μηχανισμός αστοχίας των ινών, κατά τον

οποίο το σύνθετο υλικό αστοχεί λόγω διάρρηξης της ίνας υπό εφελκυστικά φορτία ή λόγω λυγισμού της ίνας υπό θλιπτικά φορτία, και ο μηχανισμός αστοχίας της μήτρας, κατά τον οποίο δημιουργείται μια επίπεδη ρωγμή παράλληλα στις ίνες.

Από την στιγμή που μπορεί να οριστεί ένα επίπεδο αστοχίας, μπορεί να υποθεθεί ότι η αστοχία προκαλείται από τις ορθές και διατμητικές τάσεις που ασκούνται σε αυτό το επίπεδο. Στην περίπτωση του μηχανισμού αστοχίας των ινών, το επίπεδο αστοχίας είναι κατά προσέγγιση το επίπεδο yz. Επομένως, οι τάσεις που προκαλούν την αστοχία είναι οι σ_{xx} , σ_{xy} και σ_{xz} (Σχ.4.5.3(α)). Ο μηχανισμός αστοχίας της μήτρας είναι μια επίπεδη αστοχία στην διεύθυνση των ινών (Σχ.4.5.3(β)). Οι τάσεις σε αυτό το επίπεδο είναι οι σ_{yy} , σ_{zz} και σ_{yz} , ενώ η τρίτη σε όρους σ_{xy} και σ_{xz} . Επομένως, η τάση σ_{xx} δεν συμμετέχει σε αυτόν τον μηχανισμό αστοχίας.



Σχήμα 4.5.3 - Μηχανισμοί και επίπεδα αστοχίας

Εάν οι παραπάνω συνθήκες συνδυαστούν με την τετραγωνική προσέγγιση (4-18) και τα αποτελέσματα (4-19) προκύπτουν τα εξής κριτήρια για τους δύο μηχανισμούς αστοχίας:

Μηχανισμός αστοχίας ινών:

$$A_f \sigma_{xx} + B_f \sigma_{xx}^2 + \frac{1}{\tau_A^2} (\sigma_{xy}^2 + \sigma_{xz}^2) = 1 \quad (4-20)$$

Μηχανισμός αστοχίας μήτρας:

$$A_m (\sigma_{yy} + \sigma_{zz}) + B_m (\sigma_{yy} + \sigma_{zz})^2 + \frac{1}{\tau_T^2} (\sigma_{yz}^2 + \sigma_{yy} \sigma_{zz}) + \frac{1}{\tau_A^2} (\sigma_{xy}^2 + \sigma_{xz}^2) = 1 \quad (4-21)$$

Οι μηχανισμοί και οι τάσεις αστοχίας είναι διαφορετικοί για τον εφελκυσμό και θλίψη, τόσο στην διεύθυνση των ινών όσο και στην εγκάρσια διεύθυνση. Συνεπώς, κάθε κύριος μηχανισμός αστοχίας διαιρείται σε εφελκυστικούς και θλιπτικούς μηχανισμούς.

➤ **Μηχανισμοί αστοχίας ινών:**

Αστοχία ινών υπό εφελκυστικά φορτία ($\sigma_{xx} > 0$).

Οι πληροφορίες που εξάγονται από το απλό πείραμα του μονοξονικού εφελκυσμού στην διεύθυνση των ινών επαρκούν για τον καθορισμό μόνο των δύο σταθερών A_f και B_f

της εξ. (4-20). Για τον υπολογισμό της επιπρόσθετης εξίσωσης απαιτούνται δεδομένα αστοχίας από συνδυασμένη αξονική και διατμητική φόρτιση (π.χ. εφελκυσμός-στρέψη).

Είναι αναμενόμενο, ότι η εφελκυστική σ_{xx} και η διατμητική σ_{xy} τάση εξασθενούν αμοιβαία. Εφόσον συμβαίνει αυτό, ο τόπος της αστοχίας για αυτές τις δύο τάσεις θα είναι κυρτός. Μια πιθανή ικανοποιητική απλή προσέγγιση θα είναι μια τετραγωνική έλλειψη που τέμνει τους άξονες x και y στα σ^+_A και τ_A , αντίστοιχα. Με βάση αυτήν την προσέγγιση η εξ.(4-20) γίνεται:

$$\left(\frac{\sigma_{xx}}{\sigma^+_A}\right)^2 + \frac{1}{\tau_A^2}(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{xz}^2) = 1 \quad (4-22)$$

Μια ακόμη πιο δραστική προσέγγιση για την αστοχία των ινών υπό εφελκυστικά φορτία είναι η χρήση του ακόλουθου κριτηρίου μέγιστης τάσης

$$\sigma_{xx} = \sigma^+_A \quad (4-23)$$

με το οποίο απαλείφεται η συμβολή της διατμητικής τάσης.

Αστοχία ινών υπό θλιπτικά φορτία ($\sigma_{xx} < 0$).

Οι πληροφορίες που προκύπτουν από το πείραμα θλίψης είναι ότι $\sigma_{uxx} = -\sigma^-_A$, οι οποίες δεν είναι αρκετές για τον υπολογισμό των δύο σταθερών A_f και B_f της εξ.(4-21). Επειδή δεν ήταν γνωστό στον Hashin εάν οι διατμητικές τάσεις συμβάλλουν στην αστοχία των ινών υπό θλιπτικά φορτία, το κριτήριο αστοχίας σε αυτήν την περίπτωση αναπαραστάθηκε από το απλό κριτήριο μέγιστης τάσης

$$\sigma_{xx} = -\sigma^-_A$$

Σημειώνεται ότι η εξάρτηση και των δύο μηχανισμών αστοχίας των ινών από τις αξονικές διατμητικές τάσεις δεν είναι πλήρως κατανοητή και χρειάζεται περαιτέρω πειραματική διερεύνηση.

➤ Μηχανισμοί αστοχίας μήτρας:

Η πρόβλεψη των μηχανισμών αστοχίας της μήτρας είναι δυσκολότερη, από την στιγμή που το επίπεδο αστοχίας δεν ορίζεται εκ των προτέρων. Μια πιθανή διαδικασία θα ήταν να αναπτυχθεί ένα επιφανειακό κριτήριο αστοχίας, το οποίο θα εξαρτιόταν από τις τάσεις σ_{nn} , σ_{nt} και σ_{ln} . Για παράδειγμα, μια απλή επιλογή για την περίπτωση της εφελκυστικής εγκάρσιας ορθής τάσης είναι

$$f(\sigma_{nn}, \sigma_{nt}, \sigma_{ln}) = \left(\frac{\sigma_{nn}}{\sigma^+_T}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{nt}}{\tau_T}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{ln}}{\tau_A}\right)^2 = 1 \quad (4-24)$$

Για την θλιπτική τάση σ_{nn} , πρέπει να χρησιμοποιηθεί διαφορετικό κριτήριο. Εάν οι τάσεις σ_{nn} , σ_{nt} και σ_{ln} εκφραστούν με τανυστικό μετασχηματισμό σε όρους των τάσεων σ_{yy} , σ_{zz} , σ_{yz} , σ_{xy} και σ_{xz} και η γωνία $(x_2, n) = \theta$ τότε η εξ.(4-24) θα είναι της γενικής μορφής:

$$g(\sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \sigma_{yz}, \sigma_{xy}, \sigma_{xz}, \theta) = 1 \quad (4-25)$$

και η αστοχία θα συμβεί στο επίπεδο που ορίζεται από την γωνία θ_0 , η οποία μεγιστοποιεί την αριστερή πλευρά της εξ.(4-25). Το κριτήριο αστοχίας δίνεται από την εξ.(4-25) με $\theta = \theta_0$.

Επιστρέφοντας στο απλό κριτήριο της εξ.(4-21) για την αστοχία της μήτρας, αυτό υποτίθεται ότι αναπαριστά ένα εφελκυστικό μηχανισμό που ορίζεται από $\sigma_{nn} > 0$ και ένα θλιπτικό μηχανισμό που ορίζεται από $\sigma_{nn} < 0$. Οι σταθερές A_m, B_m είναι διαφορετικές για κάθε μηχανισμό και θα διαχωριστούν με + και - υπερδείκτες.

Αστοχία μήτρας υπό εφελκυστικά φορτία $\sigma_{nn} < 0$.

Οι διαθέσιμες πληροφορίες είναι η ισότητα:

$$\sigma_{yy}^u = \sigma_T^+$$

η οποία όταν χρησιμοποιηθεί στην εξ.(4-21) δίνει:

$$A_m^+ \sigma_T^+ + B_m^+ \sigma_T^{+2} = 1 \quad (4-26)$$

Χρησιμοποιώντας παρόμοιους ισχυρισμούς με αυτούς που οδήγησαν στην εξ.(4-22), και μηδενίζοντας το A_{+m} κατά προσέγγιση καταλήγουμε στο κριτήριο:

$$\frac{1}{\sigma_T^{+2}} (\sigma_{yy} + \sigma_{yz})^2 + \frac{1}{\tau_T^2} (\sigma_{yz}^2 + \sigma_{yy} \sigma_{zz}) + \frac{1}{\tau_A^2} (\sigma_{xy}^2 + \tau_{xz}^2) = 1 \quad (4-27)$$

Αστοχία μήτρας υπό θλιπτικά φορτία $\sigma_{nn} > 0$.

Σε αυτήν την περίπτωση, οι διαθέσιμες πληροφορίες είναι η ισότητα $\sigma_{yy} = -\sigma_T^+$,

η οποία όταν χρησιμοποιηθεί στην εξ.(4-21) δίνει:

$$-A_m^- \sigma_T^- + B_m^- \sigma_T^{-2} = 1 \quad (4-28)$$

Για να εξαχθούν επιπρόσθετες πληροφορίες, μπορεί να θεωρηθεί ότι εάν το υλικό αστοχήσει εξαιτίας εγκάρσιας ισοτροπικής τάσης $\sigma_{yy} = \sigma_{zz} = -\sigma$, αυτή η τάση θα είναι πολύ πιο μεγάλη από την θλιπτική μονοαξονική τάση αστοχίας. Έτσι,

$$\sigma \gg \sigma_T^- \quad (4-29)$$

Για να εφαρμοστεί αυτή η συνθήκη, οι σταθερές A_{-m} και B_{-m} καθορίζονται σε όρους της σ_T^- και της σ και η συνθήκη (4-30) λαμβάνεται υπόψη με διατήρηση μόνο των όρων πρώτης τάξης ως προς την έκφραση σ/σ_T^- . Το προκύπτον κριτήριο αστοχίας είναι:

$$\frac{1}{\sigma_T^-} \left[\left(\frac{\sigma_T^-}{2\tau_T} \right)^2 - 1 \right] (\sigma_{yy} + \sigma_{zz}) + \frac{1}{4\tau_T^2} (\sigma_{yy} + \sigma_{zz})^2 + \frac{1}{\tau_T^2} (\sigma_{yz}^2 - \sigma_{yy}\sigma_{zz}) + \frac{1}{\tau_A^2} (\sigma_{xy}^2 + \sigma_{xz}^2) = 1$$

(4-30)

Οι εξισώσεις (4-22), (4-23) και (4-27), (4-30) εκφράζουν τα κριτήρια Hashin για την αστοχία των ινών και της μήτρας, αντίστοιχα.

5. Η ΑΞΟΝΙΚΗ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΛΕΠΤΟΤΟΙΧΩΝ ΣΩΛΗΝΩΝ

5.1. Μέθοδοι κατάρρευσης σύνθετων υλικών

Η χρήση των ενισχυμένων με ίνες πλαστικών σύνθετων υλικών δύναται, λόγω των βελτιωμένων ιδιοτήτων των υλικών, να οδηγήσει σε πολλά οικονομικά και λειτουργικά οφέλη, που κυμαίνονται από τη μείωση του βάρους ως την αυξημένη αντοχή και διάρκεια. Η ικανότητα προστασίας σε περίπτωση σύγκρουσης (crashworthiness) των σύνθετων δομών και συνδέσμων φτιαγμένων από σύνθετα υλικά μόνο πρόσφατα έχει ερευνηθεί, επομένως, η αντοχή στην σύγκρουση ενός δομικού συστατικού υπό αξονική συμπίεση και κάμψη αποτελεί ένα αντικείμενο περαιτέρω λεπτομερούς έρευνας.

Οι προηγούμενες έρευνες σχετικά με την αξονική συμπίεση των λεπτότοιχων σύνθετων δομών υπό μορφή κυλινδρικών ή τετραγωνικών σωλήνων, έδειξαν ότι αυτά τα σύνθετα κελύφη παραμορφώνονται κατά τρόπο διαφορετικό από παρόμοιες δομές φτιαγμένες από συμβατικά υλικά. Η πλαστική παραμόρφωση εδώ δεν είναι ο κυβερνώντας μηχανισμός της κατάρρευσης, αλλά η εκτενής ανάπτυξη μικρορωγμών που μπορεί να ελεγχθεί εύκολα ανάλογα με τις ιδιότητες των ινών και των ρητινών, καθώς επίσης και με τον προσανατολισμό των ινών. Οι τρόποι κατάρρευσης επομένως, εξαρτώνται από τη γεωμετρία, τα υλικά και τις παραμέτρους του πειράματος.

Σε όλες τις περιπτώσεις, παρατηρήθηκε ότι σύνθετοι σωλήνες, που καταρρέουν κατά τρόπο σταθερό, προοδευτικό και ελεγχόμενο, μπορούν να απορροφήσουν ένα μεγάλο ποσό ενέργειας. Από την ευρεία πειραματική επεξεργασία των αξοσυμμετρικών 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 I)
- Ψαθυρό σπάσιμο της δομής με συνέπεια την καταστροφική αστοχία με χαμηλή ενεργειακή απορρόφηση (τρόπος II και III ανάλογα από τη μορφή ρωγμών)
- Προοδευτικό δίπλωμα (folding) παρόμοιο με τη συμπεριφορά συντριβής λεπτότοιχου μεταλλικού και πλαστικού σωλήνα, που παρουσιάζει μέτρια ικανότητα ενεργειακής απορρόφησης (τρόπος IV).

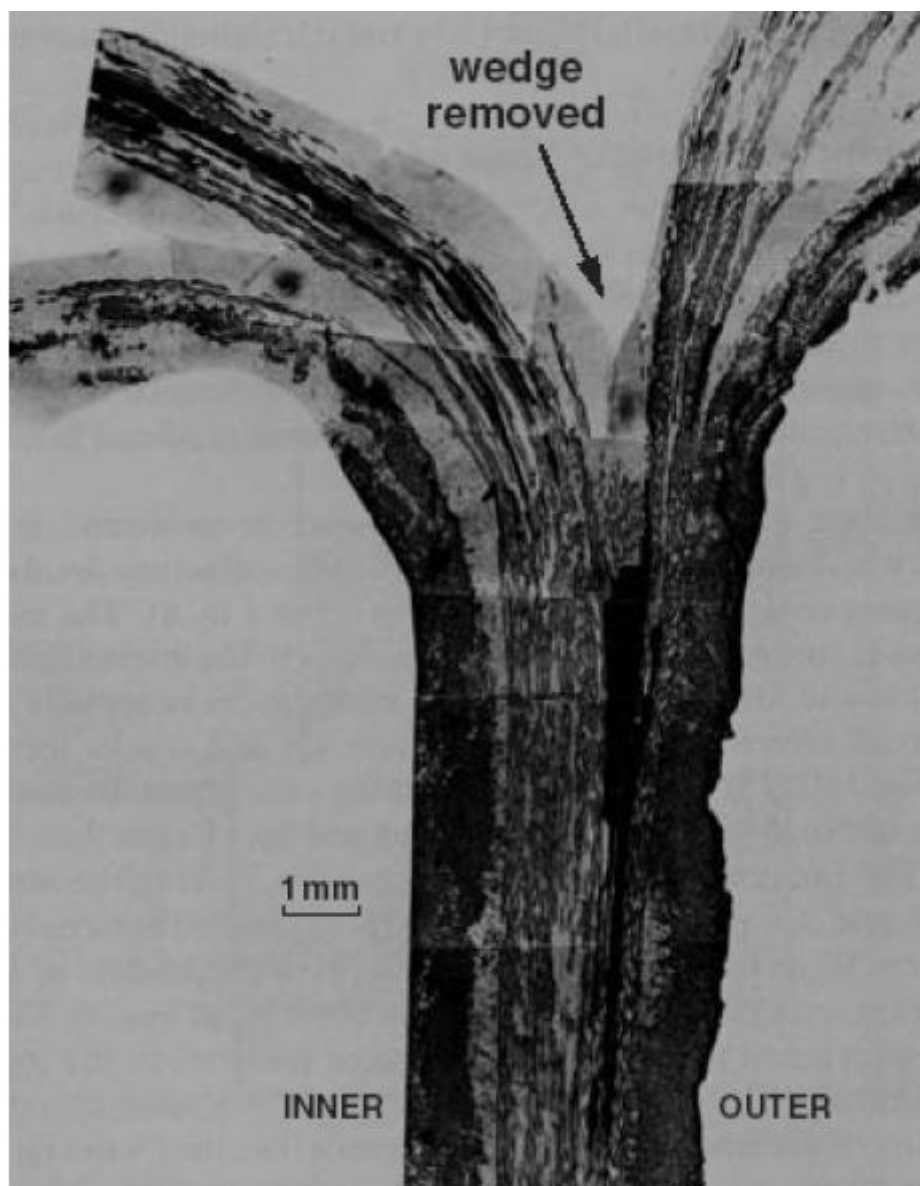
Πιο συγκεκριμένα:

Τρόπος κατάρρευσης I

Χαρακτηρίζεται κυρίως από την σταθερή και σταδιακή κατάρρευση του δοκιμίου καθώς και τον συνεχή θρυμματισμό του υλικού στην ζώνη παραμόρφωσης του. Αυτός ο τρόπος κατάρρευσης παρατηρείται σε τρεις διαφορετικές μορφές.

(i) Η πρώτη μορφή κατάρρευσης, η οποία λόγω ομοιότητας αναφέρεται και σαν μορφή αστοχίας "μανιτάρι" ("mushrooming" failure), χαρακτηρίζεται κυρίως από την σταδιακή κατάρρευση του κελύφους μέσω του σχηματισμού συνεχών μετώπων τα οποία

εκτείνονται εσωτερικά και εξωτερικά και με την ταυτόχρονη ανάπτυξη ενός αριθμού αξονικών διαρηγματώσεων (axial splits) στο εξωτερικό μέτωπο.



Σχήμα 5.1.1- Μορφή ‘μανιτάρι’

(ii) Η δεύτερη μορφή κατάρρευσης χαρακτηρίζεται από την προοδευτική στροφή του διαρρέοντος θρυμματιζόμενου υλικού προς τα μέσα. Η στροφή αυτή του παραμορφωθέντος υλικού προς τα μέσα εξελίσσεται σε όλη τη περιφέρεια και καθ' όλο το πάχος του τοιχώματος. Δεν εμφανίζονται αξονικές διαρηγματώσεις.

(iii) Η τρίτη μορφή κατάρρευσης χαρακτηρίζεται από την ολική στροφή του παραμορφωθέντος υλικού προς τα έξω. Οι αξονικές διαρηγματώσεις αποτελούν βασικό χαρακτηριστικό της μορφής αυτής. Η ζώνη παραμόρφωσης εκτείνεται στη βάση του κελύφους.

Τρόπος κατάρρευσης II

Ο τρόπος κατάρρευσης II χαρακτηρίζεται κυρίως από εκτεταμένη ψαθυρή θραύση που οδηγεί σε καταστροφική αστοχία του κελύφους. Στην περίπτωση των κυλινδρικών κελυφών ο τρόπος αυτός χαρακτηρίζεται από την ανάπτυξη μίας ελικοειδούς ή διαμήκου ρωγμής διαδιδόμενης στην περιφέρεια του κελύφους, ενώ στην περίπτωση των τετραγωνικών δοκιμίων, κύριο χαρακτηριστικό του τρόπου αυτού είναι η εμφάνιση διαμηκών ρωγμών στις τέσσερις γωνίες της βάσης του κελύφους.

Τρόπος κατάρρευσης III

Ο τρόπος κατάρρευσης III χαρακτηρίζεται από την καταστροφική αστοχία του υλικού με την εμφάνιση περιφερειακής θραύσης περίπου στο μέσο ύψος του κελύφους η οποία προκαλεί τον διαχωρισμό του σε ακανόνιστα σχήματα. Αυτός ο τρόπος αστοχίας έχει ορισμένα χαρακτηριστικά όμοια με τον λυγισμό πολύ λεπτών μεταλλικών και PVC σωλήνων.



Σχήμα 5.1.2- Θραύση σε ακανόνιστα σχήματα

Τρόπος κατάρρευσης IV

Ο τρόπος κατάρρευσης IV χαρακτηρίζεται βασικά από την εμφάνιση σχεδόν με την έναρξη της φόρτισης γραμμών πτυχώσεως (κατά το ορθότερο, γραμμών θραύσεως) ομοίων με αυτές που εμφανίζονται στους μεταλλικούς και PVC σωλήνες. Πρόκειται για καθαρά καταστροφικής μορφής κατάρρευση των κελυφών.

Πρέπει να τονιστεί ότι από τους τέσσερις τρόπους κατάρρευσης μόνο ο πρώτος δίνει την δυνατότητα στην κατασκευή να απορροφήσει σημαντικά ποσά ενέργειας κατά την διαδικασία εξέλιξης του μηχανισμού κατάρρευσης. Η ενέργεια αυτή διαχέεται στους επιμέρους μηχανισμούς αστοχίας του υλικού.

Αν και σημαντική πειραματική εργασία έχει εκτελεσθεί στη στατική κατάρρευση δομών, μελέτες στη δυναμική συντριβή είναι αρκετά περιορισμένες σε αριθμό. Γενικώς αναφέρεται ότι τα αποτελέσματα αξιολόγησης της δυνατότητας απορρόφησης ενέργειας κατά τη διάρκεια της δυναμικής δοκιμής ήταν χαμηλότερα σε σχέση με τις στατικές, για λεπτότοιχου σωλήνες πολυεστέρα (ενισχυμένου με υαλονήματα). Παρατηρείται ακόμη γενικά ότι οι κυλινδρικοί σωλήνες παρουσιάζουν υψηλότερη ειδική ενέργεια απορρόφησης από τους τετραγωνικούς σωλήνες.

Όταν το φορτίο εφαρμόζεται στις άκρες ενός σωλήνα, εμφανίζεται τοπική αποτυχία του υλικού και διαστρωματικές μικρές ρωγμές. Το μήκος των ρωγμών αυτών και το εάν οι στρωματώσεις του σύνθετου υλικού συσσωρεύσουν την αστοχία, καθορίζουν το εάν ο προκύπτων τρόπος συντριβής θα είναι εγκάρσια διάτμηση, κάμψη του υλικού, ή ένας συνδυασμός αυτών των τρόπων (ψαθυρό σπάσιμο). Δύο ευδιάκριτοι τρόποι κατάρρευσης, που ταξινομούνται ως τρόπος I και II (βλέπε ανωτέρω), αντίστοιχα, παρατηρούνται στις περισσότερες από τις αξονικές στατικές και δυναμικές δοκιμές. Τα μικρού μήκους δοκίμια, ακολουθούν την προοδευτική κατάρρευση (τρόπος I) ενώ τα σχετικά μακρόστενα δοκίμια χαρακτηρίζονται από τον τρόπο αστοχίας II.

5.2. Χαρακτηριστικά ενεργειακής απορρόφησης

Χαρακτηριστικές καμπύλες φορτίων / μετατοπίσεων για κάθε τρόπο κατάρρευσης (στατική και δυναμική φόρτιση) για τετραγωνικής διατομής σωλήνα παρουσιάζονται στο κάτωθεν σχήμα 5.2.1. Αρχικά το κέλυφος συμπεριφέρεται ελαστικά και το φορτίο ανεγκύεται με σταθερό ρυθμό σε μια τιμή κορύφωσης, P_{max} , και μειώνεται έπειτα απότομα.

Καθώς η παραμόρφωση προχωρεί, η μορφή της καμπύλης φορτίων/μετατοπίσεων εξαρτάται κυρίως από τον τρόπο κατάρρευσης. Για τα λεπτότοιχα σύνθετα κελύφη που υποβάλλονται σε αξονική φόρτιση παρατηρείται ότι η συμπεριφορά θραύσης του δοκιμίου εμφανίζεται να έχει επιπτώσεις στη σταθερότητα της φόρτισης καθώς επίσης και στο μέγεθος του φορτίου συντριβής (crush load) και την ενεργειακή απορρόφηση κατά τη διάρκεια της διαδικασίας κατάρρευσης. Στο στάδιο που το φορτίο σύνθλιψη φθάνει την τιμή P_{max} , και για τον τρόπο κατάρρευσης I, ρωγμές διαμορφώνονται στο δοκίμιο συνοδευόμενες από το σχηματισμό εσωτερικής κεντρικής ρωγμής. Η περιοχή του διαγράμματος μετά την σύνθλιψη χαρακτηρίζεται από ταλαντώσεις γύρω από ένα μέσο φορτίο P .

Οι καμπύλες φορτίων/μετατοπίσεων που αντιστοιχούν στον τρόπο κατάρρευσης II, οι οποίες φαίνονται και στο σχήμα 5.2.1, παρουσιάζει τυπική συμπεριφορά πριν από τη σύνθλιψη, αλλά η αρχική ελαστική απόκριση ακολουθείται από πολύ απότομη πτώση στο φορτίο. Ο τρόπος II είναι παρόμοιος με αυτόν της θεώρησης του Euler κατά την αξονική συμπίεση των πολύ λεπτών σωλήνων μετάλλων ή PVC, που προσφέρουν πολύ μικρή ενεργειακή απορρόφηση.

Παρατηρείται επίσης ότι για τους φορτισμένους κυλινδρικούς σωλήνες, το μεγαλύτερο μέρος του φορτίου φέρεται στις άκρες τους, ενώ στην περίπτωση των τετραγωνικών δοκιμίων αυτό συμβαίνει στις γωνίες τους

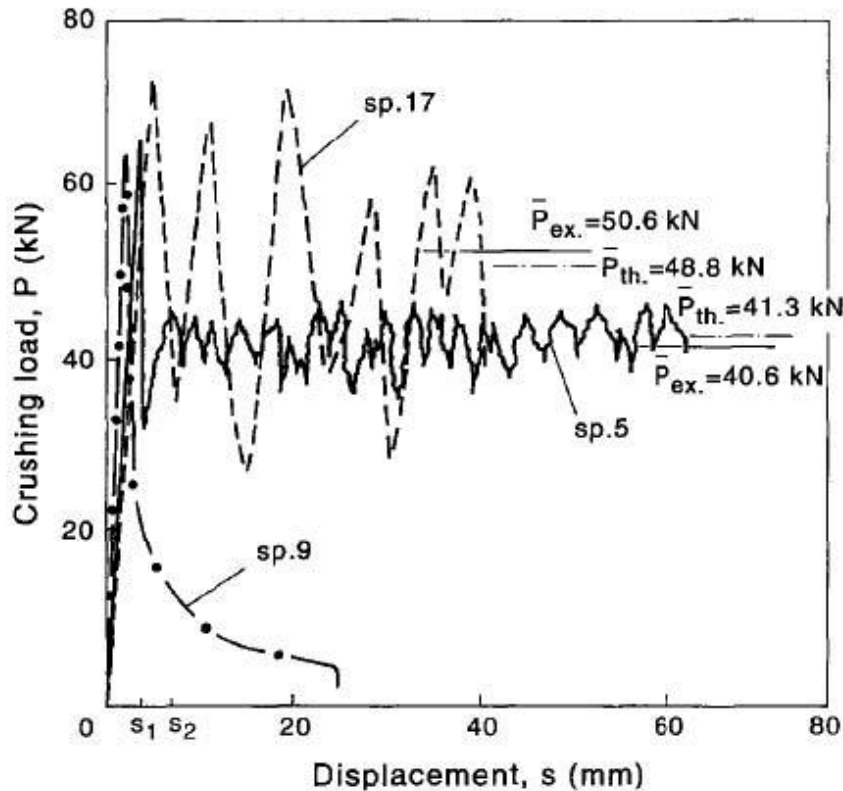


Figure 4 Load–displacement curves for square tubes subjected to static and dynamic loading for various collapse mode (— Mode I, static (sp. 5); —•— Mode II, static (sp. 9); - - - Mode I, dynamic (sp. 17))

Σχήμα 5.2.1

Όσον αφορά στην αρχική μέγιστη τιμή του φορτίου στην ελαστική περιοχή, P_{max} , πρέπει να σημειωθεί ότι αυτό το μέγεθος επηρεάζεται πολύ από το πάχος των τοιχωμάτων και τη μέση περιφέρεια των κελυφών και για τη στατική αλλά και για τη δυναμική κατάρρευση. Από την καμπύλη φορτίου παρατηρείται επίσης ότι το αξονικό μήκος των σωλήνων δεν έχει καμία επίδραση στο μέγιστο φορτίο P_{max} . Για ένα δεδομένο υλικό το μέγεθος της περιοχής ελαστικής παραμόρφωσης είναι μεγαλύτερο για τους σωλήνες με μεγαλύτερο πάχος. Αυτό μπορεί ακόμη να επηρεαστεί από το πόσο παράλληλες είναι η μια ως προς την άλλη οι πλευρές του τετραγωνικού σωλήνα. Το φορτίο που επιτυγχάνεται στο τέλος της ελαστικής περιοχής, για το κέλυφος που υποβάλλεται στον τρόπο κατάρρευσης I, είναι συνήθως το μέγιστο φορτίο που το κέλυφος μπορεί να στηρίξει. Πρέπει να σημειωθεί ότι το μέγιστο φορτίο έχει πολύ λίγη επίδραση στο μέσο φορτίο και τη συνολική ενέργεια που απορροφάται.

6. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

6.1. Σκοπός του πειράματος

Επειδή σε ορισμένες περιπτώσεις το μέγιστο φορτίο που εμφανίζεται σε δοκίμια με επίπεδα άκρα επηρεάζει σημαντικά την μετελαστική συμπεριφορά του κελύφους, ενώ απεναντίας δεν συνεισφέρει ουσιωδώς στο συνολικό ποσό της απορροφούμενης ενέργειας, μπορούμε να προβούμε σε χρήση κάποιου μηχανισμού διαμόρφωσης στο πάνω άκρο του κελύφους επιτυγχάνοντας έτσι την σταθερή και σταδιακή κατάρρευση του (μηχανισμοί triggering).

Ο σκοπός της διεξαγωγής των πειραμάτων που εντάσσονται στα πλαίσια της παρούσης διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της επίδρασης διαφόρων μηχανισμών triggering στην ικανότητα απορρόφησης ενέργειας κυλινδρικών δοκιμίων κατασκευασμένων από ανθρακονήματα.

6.2. Χαρακτηρισμός του υλικού

Για τις δοκιμές χρησιμοποιήσαμε κελύφη κυκλικής διατομής από σύνθετο υλικό αποτελούμενο από ίνες άνθρακα carbon unidirectional prepreg VTM264/T700S (124)-150-36%RW και carbon fabric prepreg VTM264/CF0100-40%RW με 2836 / m² 4X4 twill weave 3K carbon fabric. Αρχικά, βρήκαμε τις διαφορετικές διαστρωματώσεις του. Για να επιτευχθεί αυτό, χρησιμοποιήσαμε ένα δοκιμαστικό τεμάχιο του υλικού και το λειάνουμε με γυαλόχαρτα σταδιακά, έτσι ώστε να αποκαλυφθούν όλες οι διαφορετικές μορφές των στρώσεων του στο μικροσκόπιο. Σε κάθε βήμα, μετράμε το πάχος του εναπομείναντος υλικού, και προχωρούμε στην επόμενη διαστρωμάτωση. Η λείανση των δοκιμίων έγινε σε ειδική μηχανή λείανσης τύπου STRUERS (DAP-V, Pendemin – 2) με περιστροφική ταχύτητα των δίσκων του λειαντικού 300 rpm. Ο φακός που χρησιμοποιήθηκε στο μικροσκόπιο προσέφερε μεγέθυνση 10 φορές και το γυαλόχαρτο που χρησιμοποιήθηκε ήταν αριθμού 320. Το αρχικό πάχος του δοκιμαστικού δοκιμίου είναι 3 mm. Πιο αναλυτικά, οι μορφές των διαστρωματώσεων που λήφθηκαν βρίσκονται στον ακόλουθο πίνακα.

Από την συγκεκριμένη μελέτη, διαπιστώσαμε πως το υλικό μας αποτελείται από 29 στρώσεις και κάθε στρώμα έχει μέσο όρο πάχους 0,10 mm. Ακολούθως, παρατίθενται και οι ακριβείς γωνίες των ινών άνθρακα για κάθε στρώση ξεκινώντας από την εξωτερική και προχωρώντας προς το εσωτερικό. Επισημαίνουμε ότι ως 0 ° είναι η κατεύθυνση του άξονα του δοκιμίου.

Αριθμός Στρώματος	Γωνία Προσανατολισμού
1	multidirectional
2	unidirectional +45°
3	unidirectional -22,5°
4	unidirectional +22,5°
5	unidirectional -45°
6	unidirectional +90°
7	πλεκτή twill 4x4 ±90°
8	unidirectional -22,5°
9	πλεκτή twill 4x4 ±90°
10	unidirectional +22,5°
11	unidirectional +90°
12	unidirectional -22,5°
13	πλεκτή twill 4x4 ±90°
14	unidirectional 0°
15	unidirectional -22,5°
16	unidirectional +22,5°
17	unidirectional +90°
18	πλεκτή twill 4x4 ±90°
19	unidirectional 0°
20	unidirectional -22,5°
21	unidirectional +22,5°
22	πλεκτή twill 4x4 ±90°
23	unidirectional -45°
24	unidirectional +22,5°
25	unidirectional -45°
26	unidirectional +22,5°
27	unidirectional -45°
28	unidirectional +22,5°
29	unidirectional -45°

6.3. Ετοιμασία των δοκιμίων

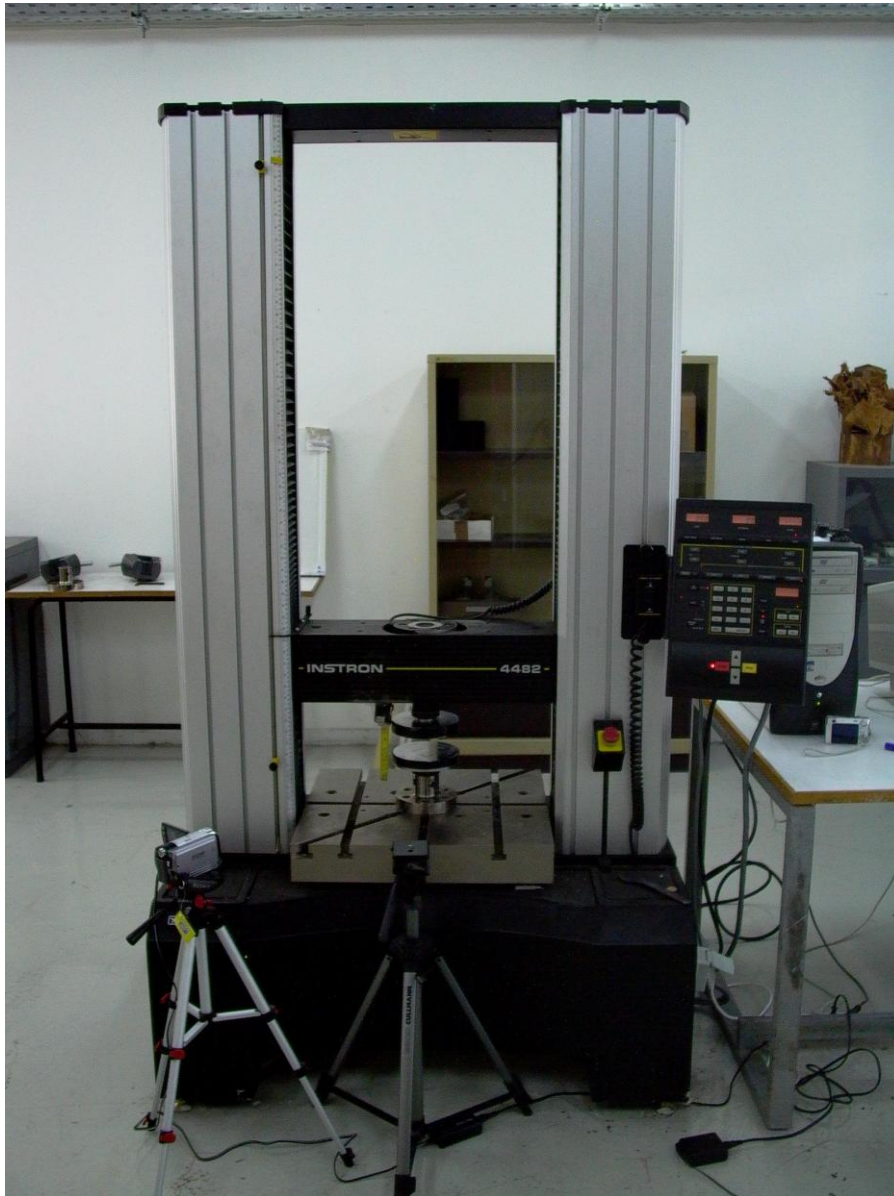
Η προετοιμασία των δοκιμίων προϋπέθεσε αρχικά την κοπή των μακρών λεπτότοιχων σωλήνων σε 9 δοκίμια ονομαστικού μήκους 50mm και πάχους 3mm, με τη βοήθεια τροχού κοπής με διαμάντι. Έπειτα σε κάθε δοκίμιο, πλην του πρώτου, επήλθε ειδική διαμόρφωση στο ένα τους άκρο (triggering) για να οδηγηθούν εκούσια στον επιθυμητό τρόπο κατάρρευσης. Οι δημιουργηθείσες αυτές μορφές παρουσιάζονται λεπτομερώς στην συνέχεια.

6.4. Περιγραφή πειραματικού εξοπλισμού

Για την αξονική στατική καταπόνηση χρησιμοποιήθηκε η πρέσα δοκιμών INSTRON 4482 του εργαστηρίου. Πρόκειται για μηχανική πρέσα (μηχανισμού κοχλία - περικοχλίου) ονομαστικού φορτίου 10tn.

Τα βασικά μέρη της πρέσας αυτής, είναι:

- Το πλαίσιο, μορφής Ο, που περιλαμβάνει το τραπέζι στερέωσης του δοκιμίου και το μηχανισμό κίνησης του εργαλείου διαμόρφωσης.
- Ο μηχανισμός της κινητής κεφαλής.
- Ο πίνακας ελέγχου, ο οποίος διαθέτει θύρα επικοινωνίας συμβατή με το πρωτόκολλο IEEE, συνδεδεμένη μέσω παράλληλης θύρας με ηλεκτρονικό υπολογιστή.



Σχήμα 6.4.1 -Πρέσα δοκιμών INSTRON 4482, ονομαστικού φορτίου 10tn

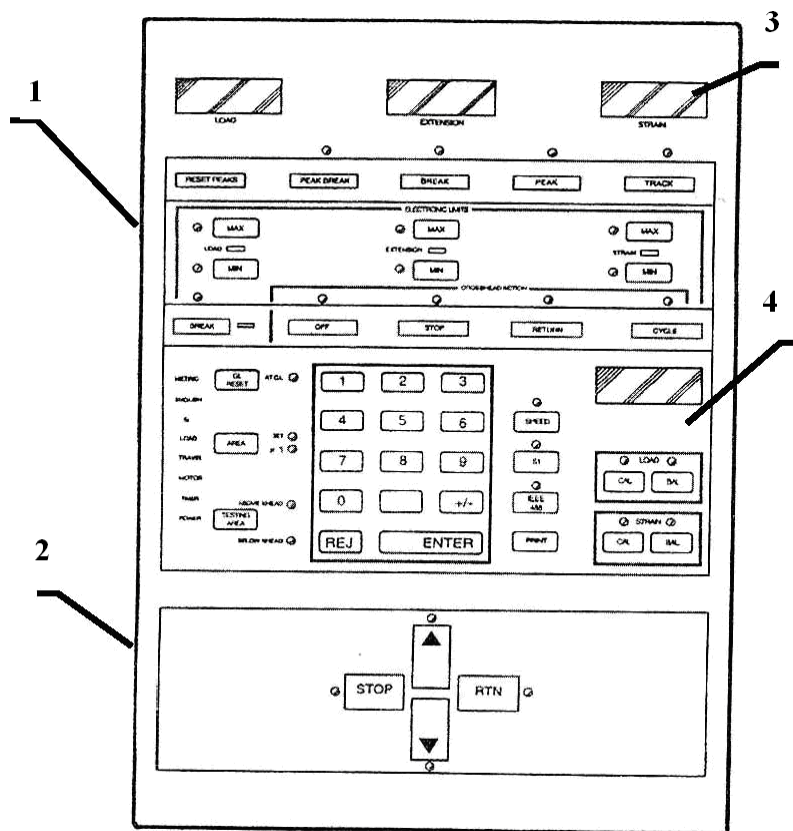
Τα βασικά λειτουργικά χαρακτηριστικά της πρέσας είναι:

- Ονομαστική δύναμη: 10tn.
- Μέγιστη ταχύτητα κινητής κεφαλής: 500 mm min^{-1} .
- Ταχύτητα επιστροφής κινητής κεφαλής στην αρχική θέση: 600 mm min^{-1} .
- Μέγιστο αναπτυσσόμενο φορτίο στη μέγιστη ταχύτητα: 75 KNt.
- Μέγιστη ταχύτητα κινητής κεφαλής σε μέγιστο φορτίο: 250 mm min^{-1} .

-Ευαισθησία κεφαλής πρέσας: 2 mV V⁻¹.

Ο πίνακας ελέγχου έχει ενσωματωμένο μικροεπεξεργαστή που αναλαμβάνει τη ρύθμιση όλων των παραμέτρων κατεργασίας και την επεξεργασία των απαραίτητων υπολογισμών. Όπως φαίνεται στο κάτωθεν σχήμα, ο πίνακας ελέγχου απαρτίζεται από τέσσερις κυρίους τομείς:

- 1) Τον τομέα οριοθετήσεως.
- 2) Τον τομέα κίνησης κεφαλής.
- 3) Τον τομέα οθονών υγρών κρυστάλλων.
- 4) Τον κεντρικό τομέα.



Σχήμα 6.4.2 – Πίνακας ελέγχου

Στον κεντρικό τομέα υπάρχει αριθμητικό πληκτρολόγιο και οθόνη υγρών κρυστάλλων, τεσσάρων ψηφίων, καθώς και λυχνίες ένδειξης στο αριστερό μέρος, όπου αναγράφεται το χρησιμοποιούμενο σύστημα μέτρησης (SI, ENGLISH, METRIC). Η επιλογή του συστήματος μέτρησης γίνεται μέσω διακόπτη που βρίσκεται στο πίσω μέρος του πίνακα. Από τον κεντρικό τομέα υπάρχει η δυνατότητα για τις εξής ρυθμίσεις :

- Καλιμπράρισμα της μηχανής.
- Επιλογή της ταχύτητας κίνησης της κεφαλής.
- Οριοθέτηση της διαδρομής κίνησης.
- Καθορισμός του εύρους ενεργούς συμπίεσης του δοκιμίου.
- Έλεγχος της διαδικασίας εκτύπωσης των αποτελεσμάτων.
- Ενεργοποίηση της επικοινωνίας του πίνακα ελέγχου με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή.

- Λειτουργία ειδικού λογισμικού διάγνωσης όλων των λειτουργιών της πρέσας.
- Καλιμπράρισμα των μετρητικών φορτίου και παραμόρφωσης.

Στον τομέα οθονών υγρών κρυστάλλων περιέχονται τρεις τετραψήφιες οθόνες υγρών κρυστάλλων καθώς και πλήκτρα, τα οποία επιτρέπουν την επιλογή φορτίου, επιμήκυνσης ή συμπίεσης δοκιμίου, καθώς επίσης και τα ακρότατα αυτών. Όλες οι τιμές αποθηκεύονται και είναι διαθέσιμες προς επεξεργασία μετά το πέρας της δοκιμής. Σε κάθε περίπτωση, η επιλεγείσα λειτουργία υποδεικνύεται από αντίστοιχη λυχνία.

Στον τομέα οριοθέτησης δηλώνεται το όριο οποιασδήποτε λειτουργίας, το οποίο δεν πρέπει να υπερβεί το σύστημα. Τα όρια αυτά πρέπει να εισάγονται για λόγους ασφαλείας στην περίπτωση καταπόνησης δοκιμίου με κρίσιμο ύψος, για την αποφυγή ενδεχομένου συναντήσεως κινητής και σταθερής πλάκας από εσφαλμένο καλιμπράρισμα της μέγιστης διαδρομής. Οι καταχωρήσεις εκτελούνται μέσω του αριθμητικού πληκτρολογίου του πίνακα ελέγχου και οι επιλεγείσες τιμές εμφανίζονται στην οθόνη υγρών κρυστάλλων του κεντρικού τομέα.

Οι λειτουργίες που μπορούν να πραγματοποιηθούν, μόλις επιτευχθούν τα όρια στις τιμές του φορτίου (LOAD), της επιμήκυνσης (EXTENSION), της παραμόρφωσης (STRAIN) και της θραύσης (BREAK) είναι οι εξής :

- Στάση της κεφαλής στη συγκεκριμένη θέση (STOP).
- Επιστροφή της κεφαλής στηναρχική θέση (RETURN).
- Αλλαγή της κατεύθυνσης για επαναλαμβανόμενη κίνηση (CYCLE).
- Σταμάτημα της κίνησης της κεφαλής (OFF).

Στον τομέα κίνησης της κεφαλής, που βρίσκεται στο κάτω μέρος του πίνακα ελέγχου, υπάρχει η δυνατότητα χειροκίνητου ελέγχου της κίνησης της κεφαλής μέσω τεσσάρων πλήκτρων. Να σημειωθεί ότι με την επιλογή του κομβίου «επιστροφή» η κεφαλή δεν κινείται με την προγραμματισμένη ταχύτητα αλλά με την μέγιστη δυνατή και σταματά στο σημείο εκκίνησης. Επίσης, αξίζει να τονίσουμε ότι στην κεφαλή της μηχανής υπάρχει πιεζομετρικό σύστημα, το οποίο μετατρέπει το φορτίο που ασκείται σε τάση.

Στον πίνακα ελέγχου είναι επίσης ενσωματωμένα και τα ολοκληρωμένα κυκλώματα που αναλαμβάνουν τον έλεγχο και την επικοινωνία του συστήματος με τα μετρητικά φορτίου και παραμόρφωσης.

Όσον αφορά την ταχύτητα της δοκιμής είναι ένα μέγεθος που εξαρτάται από πολλές παραμέτρους όπως είναι το υλικό του δοκιμίου, οι αλλαγές που θα υποστεί το δοκίμιο κατά την διάρκεια του πειράματος και η μέγιστη ταχύτητα του εξωτερικού καταγραφέα-λήπτη που εξαρτάται από το ρυθμό δειγματοληψίας. Η ταχύτητα μπορεί να οριστεί με ακρίβεια ενός δεκαδικού ψηφίου.



Σχήμα 6.4.3

Ιδιαίτερη σημασία έχει η σωστή τοποθέτηση του δοκιμίου στην κάτω πλάκα της πρέσας, ώστε να αποφευχθεί τυχόν μετακίνηση του, και οι δύο πλάκες να παραμένουν παράλληλες μεταξύ τους, κατά την διάρκεια της δοκιμής. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγεται η επιβολή μεγάλων φορτίων και εφαρμογή στρεπτικής δύναμης στην πλάκα της βάσης.

6.5. Ρύθμιση πρέσας

Το λογισμικό που χρησιμοποιήσαμε για την ρύθμιση της μηχανής είναι το Bluehill 2. Για την ρύθμιση της μηχανής στις δομικές που διεξήγαμε, στο Bluehill 2 εισάγαμε τα χαρακτηριστικά των δοκιμίων, όπως: κυλινδρικό τεμάχιο, εξωτερική διάμετρο (28,575 mm), πάχος τοιχώματος (3 mm), ύψος δοκιμίων (50 mm) αλλά και οδηγίες απαραίτητες για την διεκπεραίωση των δοκιμών, όπως: την ταχύτητα της κεφαλής (5 mm/min), την επιλογή της θλίψης και το κριτήριο για να τελειώνει κάθε πείραμα που είναι να φθάνει κάθε δοκίμιο στο μισό του ύψος (25 mm).

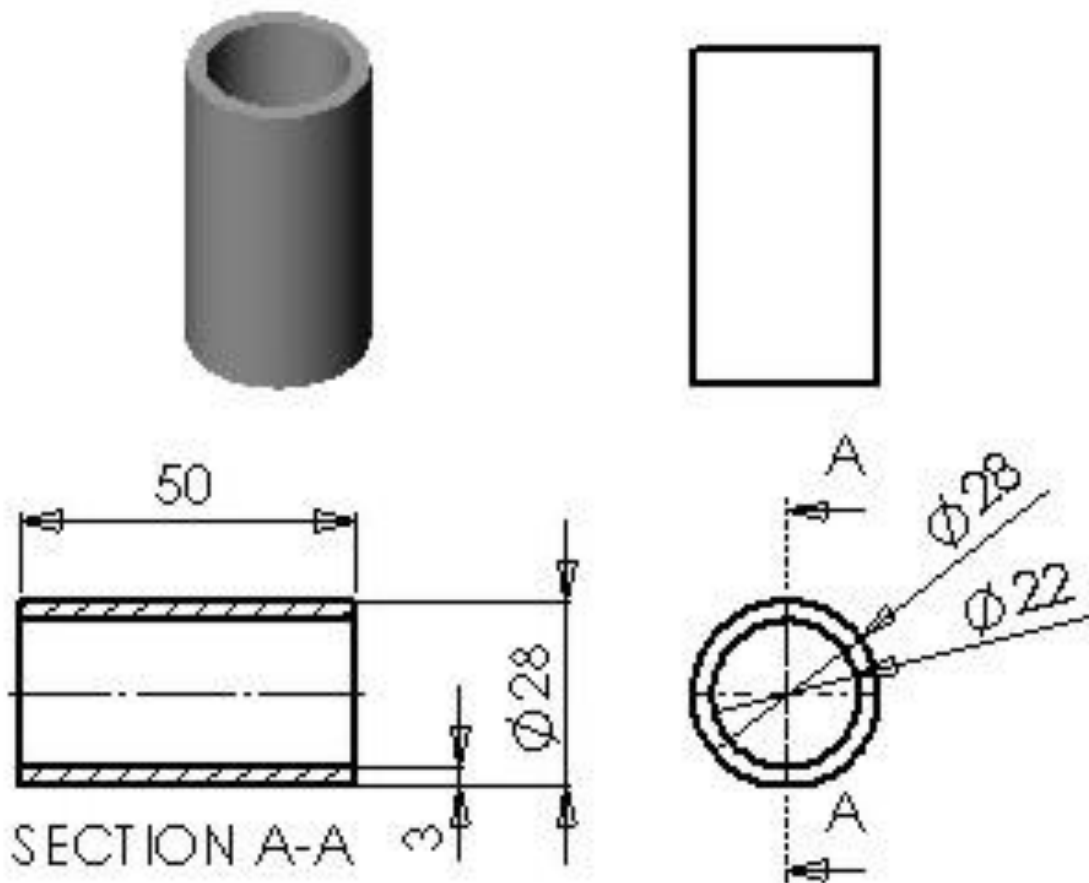
Στην συνέχεια, μετά την τοποθέτηση κάθε δοκιμίου στην μηχανή ρυθμίζαμε από τον πίνακα ελέγχου τον μηδενισμό των τιμών του φορτίου και της μετατόπισης, όταν η κεφαλή της πρέσας ακουμπούσε ελάχιστα το τεμάχιο.

Να τονίσουμε ότι όλα τα δοκίμια που έχουν υποστεί triggering , τα τοποθετήσαμε στην μηχανή με το διαμορφωμένο άκρο τους προς τα πάνω.

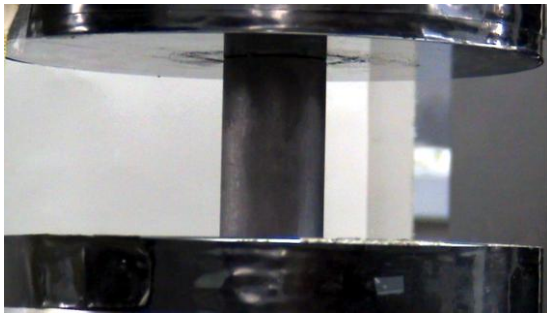
6.6 Πειραματικές δοκιμές και μετρήσεις

6.6.1. ΔΟΚΙΜΙΟ 1 (χωρίς καμία διαμόρφωση)

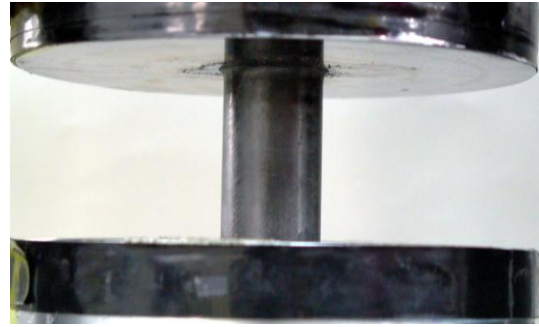
Αρχικά πραγματοποιήθηκε δοκιμή θλίψης με το σύνθετο κυλινδρικό λεπτότοιχο δοκίμιο, χωρίς να έχει υποστεί triggering. Παρατίθεται ένα σχέδιο του αρχικού δοκιμίου πριν το πείραμα με τις διαστάσεις του. Κάτωθεν παρουσιάζονται διαδοχικές φωτογραφίες από την πορεία της κατάρρευσης του υλικού αυτού, οι οποίες λήφθηκαν σε διάφορες φάσεις της καθόδου του εμβόλου. Επίσης, παρουσιάζεται και το διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης που λάβαμε με τη βοήθεια του ειδικού προγράμματος κατά την εκτέλεση του πειράματος της θλίψης. Στο προαναφερθέν διάγραμμα φαίνονται και οι μετατοπίσεις που έχουν συμβεί κατά τις χρονικές στιγμές λήψης των αντίστοιχων φωτογραφιών.



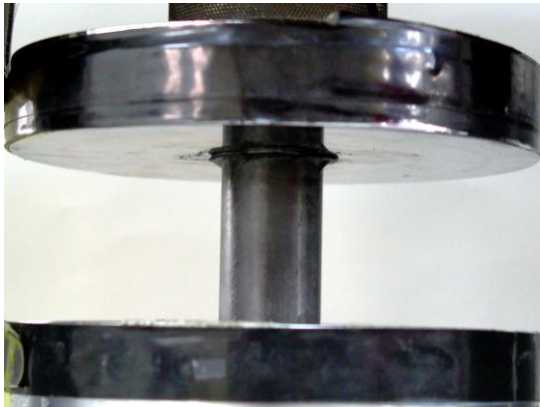
$t_0 = 0s$



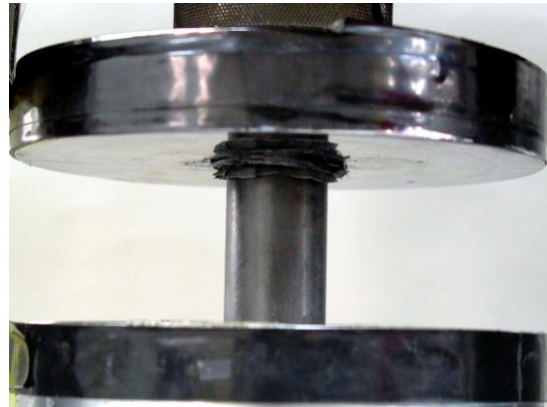
$t_1 = 20s$



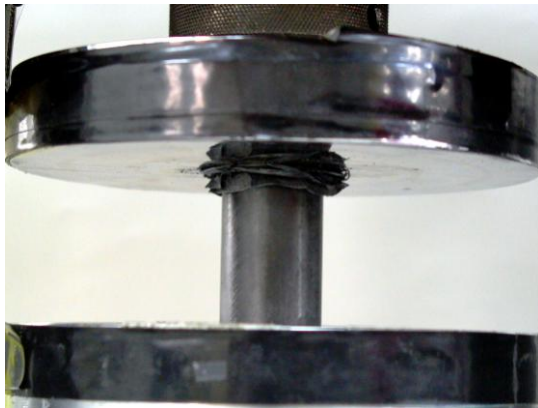
$t_2 = 40s$



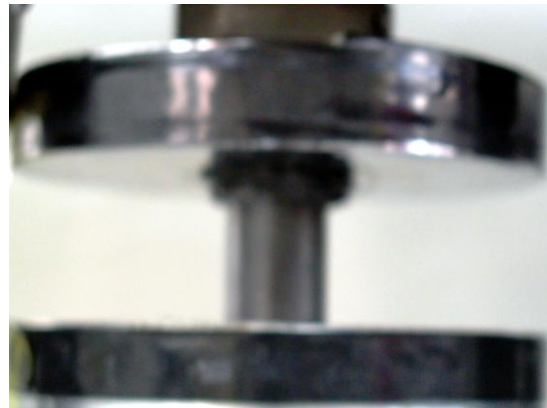
$t_3 = 60s$



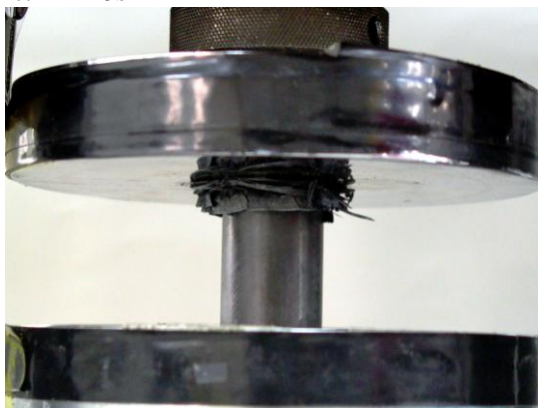
$t_4 = 80s$



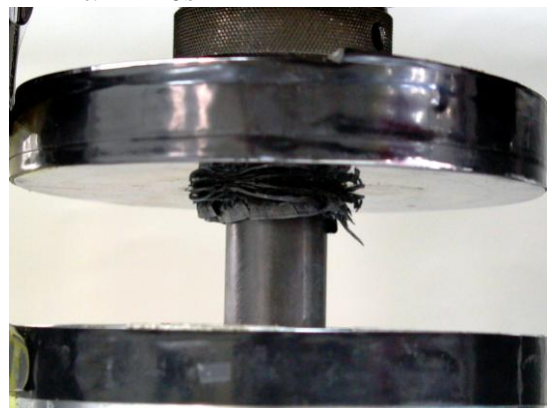
$t_5 = 100s$



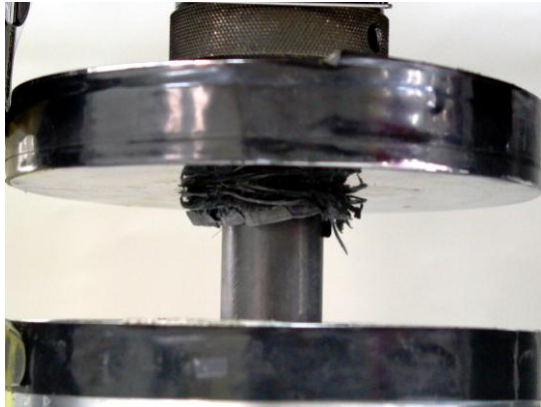
$t_6 = 120s$



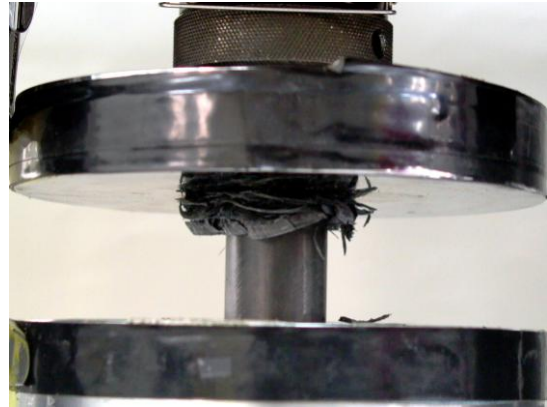
$t_7 = 140s$



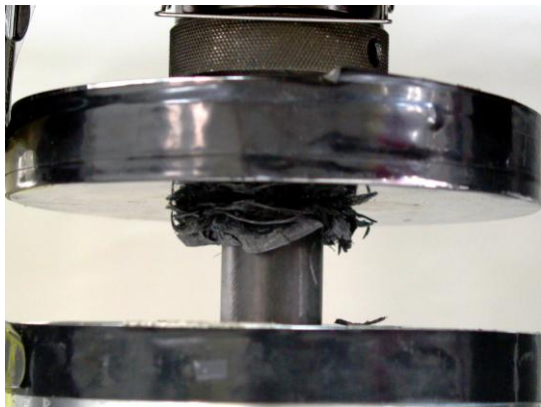
t₈ = 160s



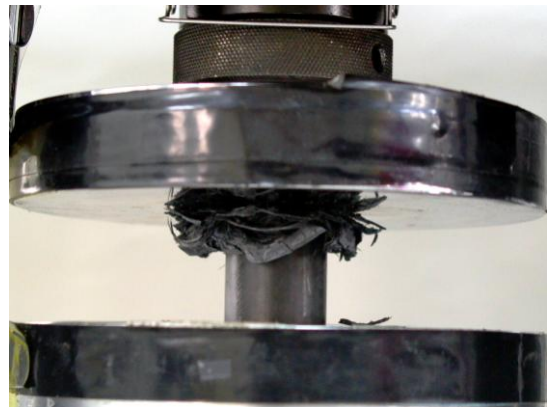
t₉ = 180s



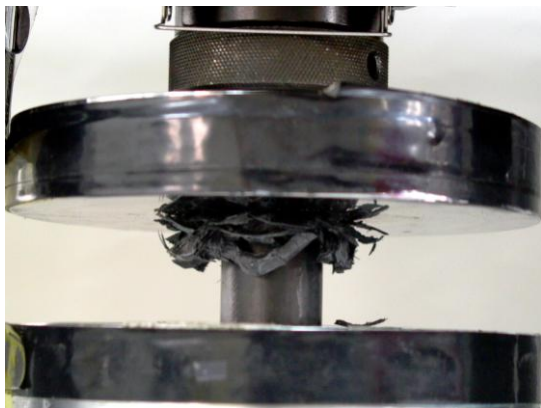
t₁₀ = 200s



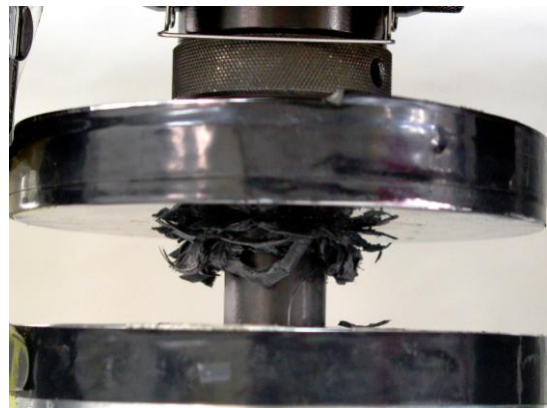
t₁₁ = 220s



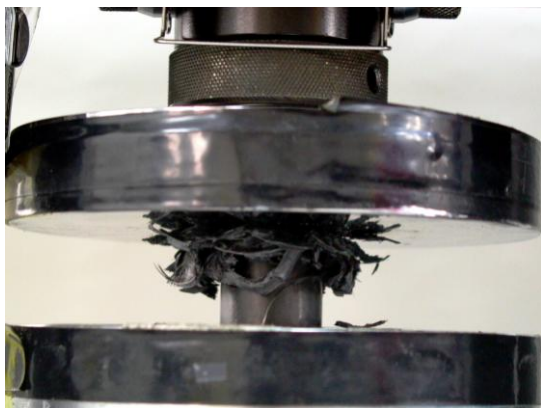
t₁₂ = 240s



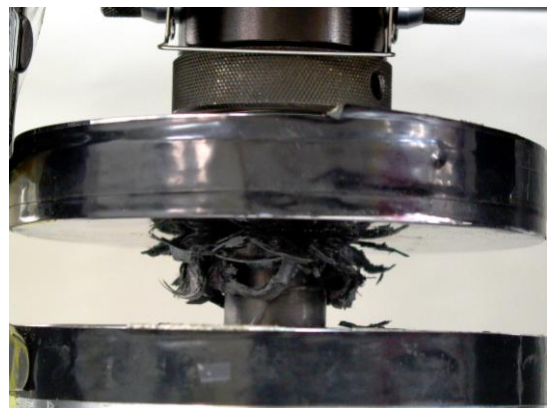
t₁₃ = 260s

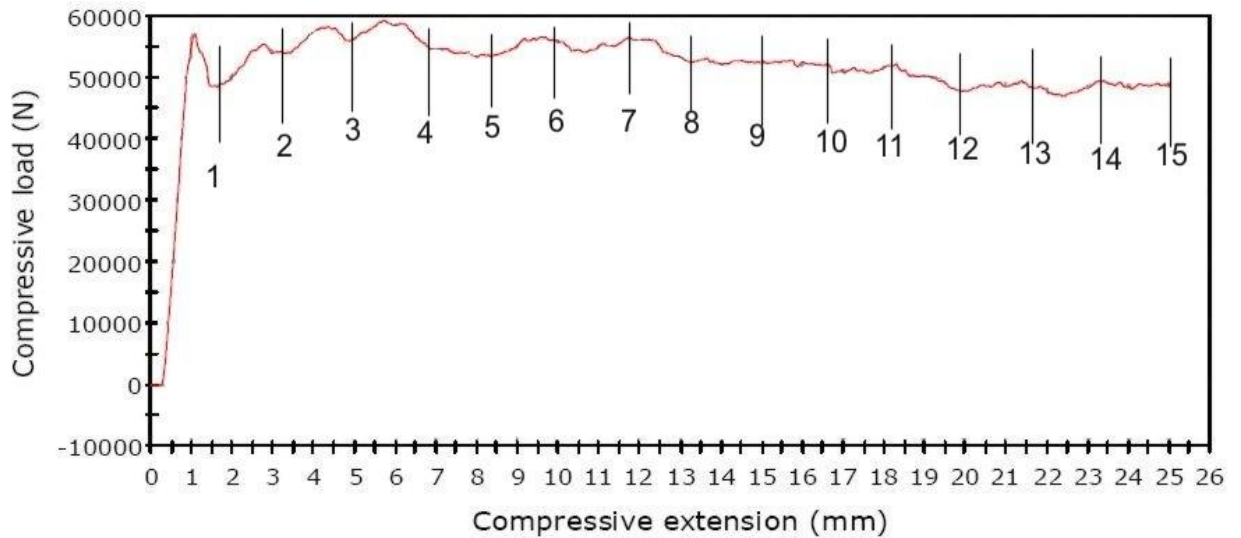


t₁₄ = 280s



t₁₅ = 300s





Σχολιασμός της διαδικασίας κατάρρευσης

Στο σημείο αυτό θα παραθέσουμε ενδιαφέρουσες επισημάνσεις και στοιχεία που παρατηρήθηκαν προΐούσης της διαδικασίας κατάρρευσης του ανωτέρου δοκιμίου:

- Στο πρώτο στάδιο της συμπίεσης του σύνθετου υλικού παρατηρούμε ταχεία αύξηση του φορτίου. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς το υλικό είναι ακόμη ακέραιο και ανθίσταται στη δύναμη της πρέσας με πολύ μικρή παραμόρφωση.
- Κοντά στα 1,2mm παραμόρφωσης παρατηρούμε μια τοπική μέγιστη τιμή του φορτίου, η οποία 57000 N, όπου και ξεκινά η προοδευτική κατάρρευση (φωτογρ. I-15).
- Οι στρωματώσεις του λοιπόν αποσχίστηκαν (delamination) και οι μισές διέφυγαν προς το εξωτερικό του υλικού, ενώ οι υπόλοιπες συμπίεστηκαν στο εσωτερικό του σωλήνα.
- Η αναπτυσσόμενη τριβή στη διεπιφάνεια των τμημάτων στο επικείμενο στάδιο, διατηρεί το φορτίο περίπου στα 54000 N για τα υπόλοιπα mm συμπίεσης, ακολουθώντας μια σχετικά ομαλή πορεία.

Στις ακόλουθες φωτογραφίες φαίνεται η τελική εικόνα του δοκιμίου μετά την κατάρρευση στις ακόλουθες όψεις αντιστοίχως:

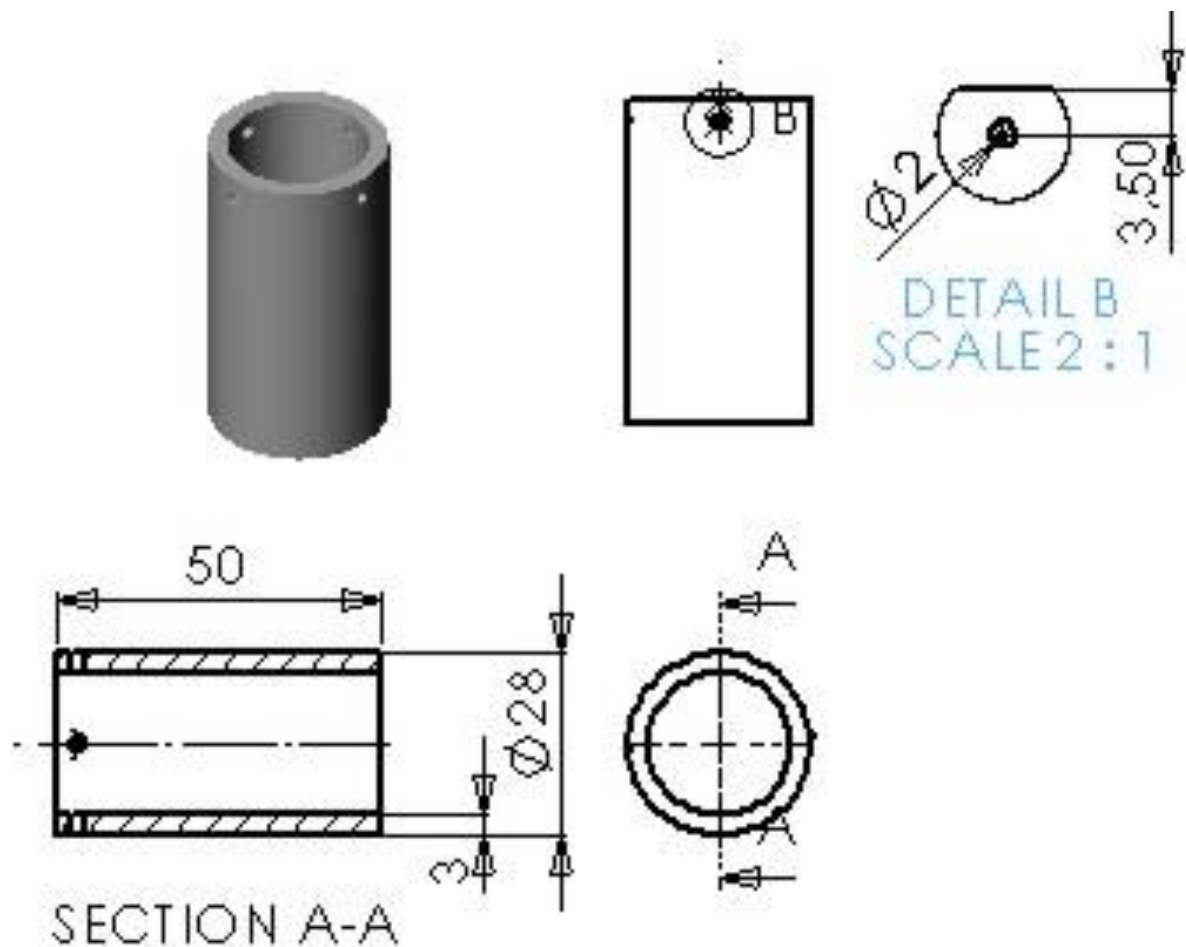
- κάτοψη
- άνοψη
- πλάγια όψη
- τομή.

έτσι ώστε να αποτυπωθούν τα μακροσκοπικά χαρακτηριστικά τους.

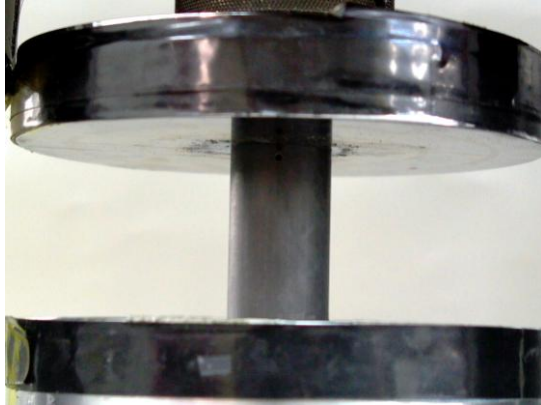


6.6.2. ΔΟΚΙΜΙΟ 2 (με τις 4 περιφερειακές οπές)

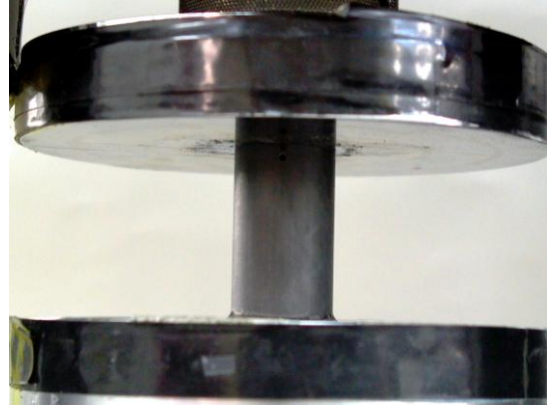
Το δοκίμιο αυτό έχει υποστεί διαμόρφωση στο ένα του άκρο, και περιλαμβάνει την διάνοιξη 4 οπών διαμέτρου 2 mm , των οποίων το κέντρο βρίσκεται 3,5 mm κάτω από το άκρο. Οι οπές απέχουν μεταξύ τους γωνία 90°. Στο ακόλουθο σχέδιο φαίνεται η μορφή του δοκιμίου πριν το πείραμα με τις διαστάσεις του. Κάτωθεν παρουσιάζονται διαδοχικές φωτογραφίες από την πορεία της κατάρρευσης του υλικού αυτού , οι οποίες λήφθηκαν σε διάφορες φάσεις της καθόδου του εμβόλου. Επίσης, παρουσιάζεται και το διάγραμμα δύναμη-μετατόπιση που λάβαμε με τη βοήθεια του ειδικού προγράμματος κατά την εκτέλεση του πειράματος της θλίψης. Στο προαναφερθέν διάγραμμα φαίνονται και οι μετατοπίσεις που έχουν συμβεί κατά τις χρονικές στιγμές λήψης των αντίστοιχων φωτογραφιών.



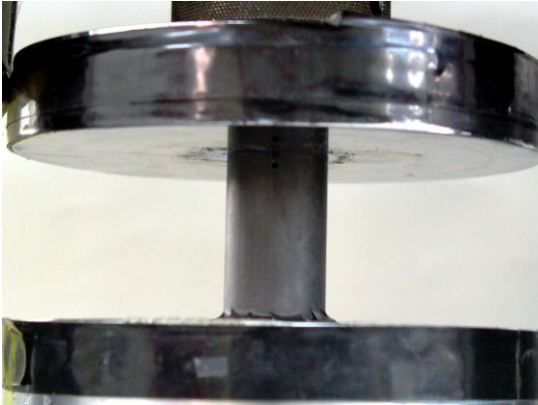
$t_0 = 0s$



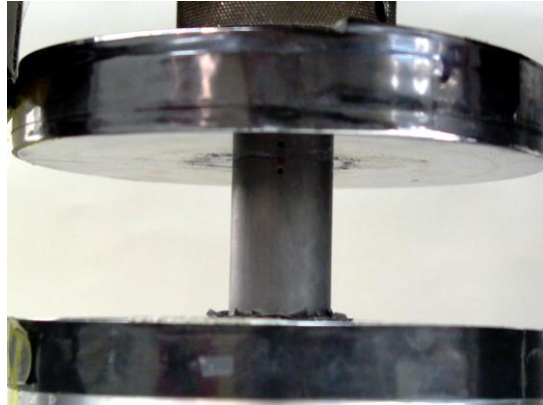
$t_1 = 20s$



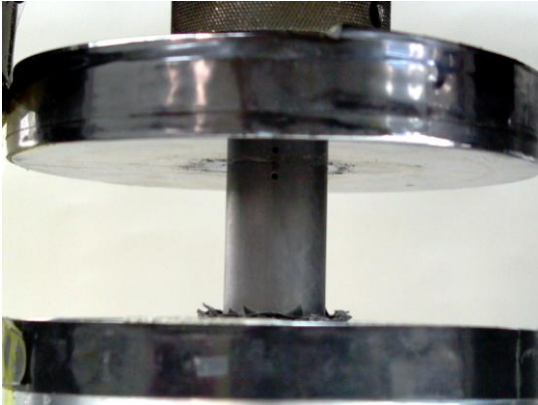
$t_2 = 40s$



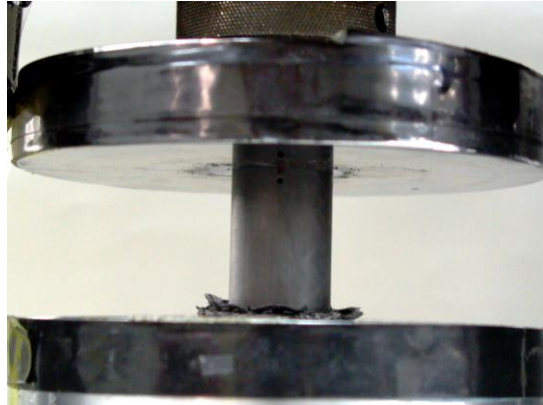
$t_3 = 60s$



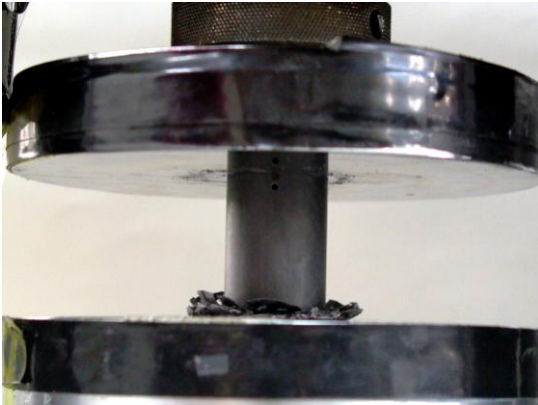
$t_4 = 80s$



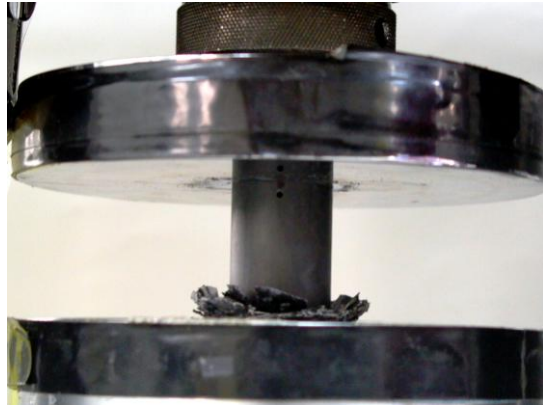
$t_5 = 100s$



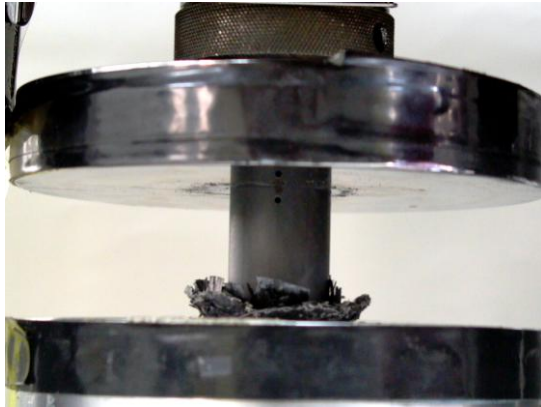
$t_6 = 120s$



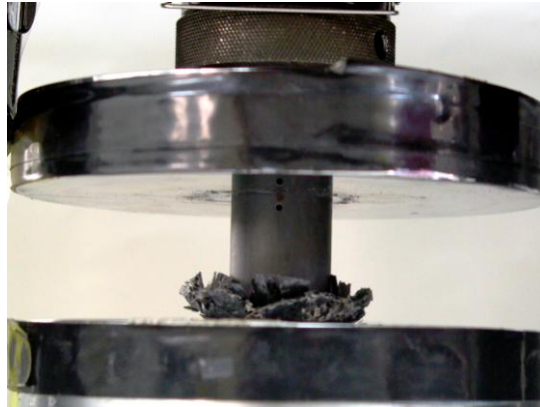
$t_7 = 140s$



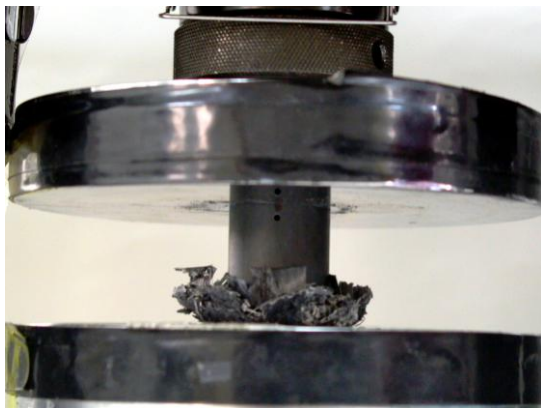
t₈ = 160s



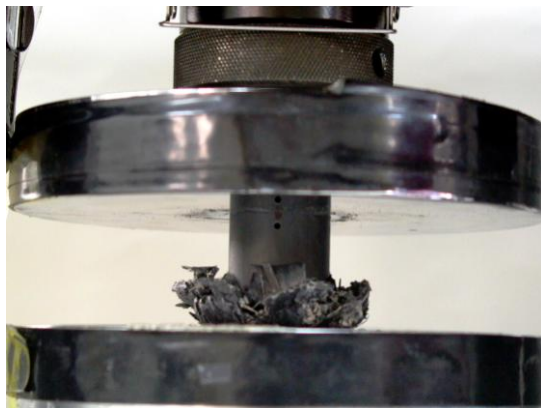
t₉ = 180s



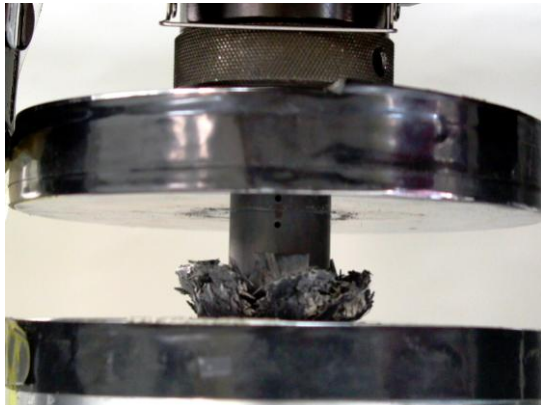
t₁₀ = 200s



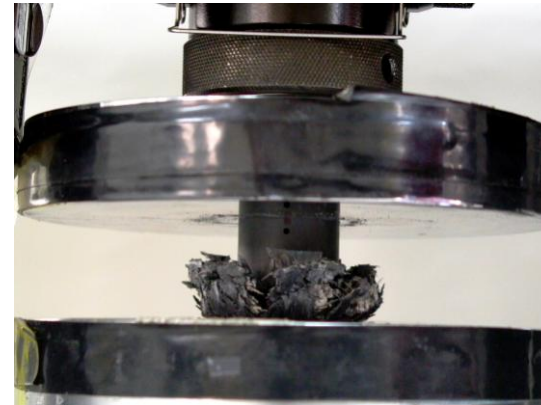
t₁₁ = 220s



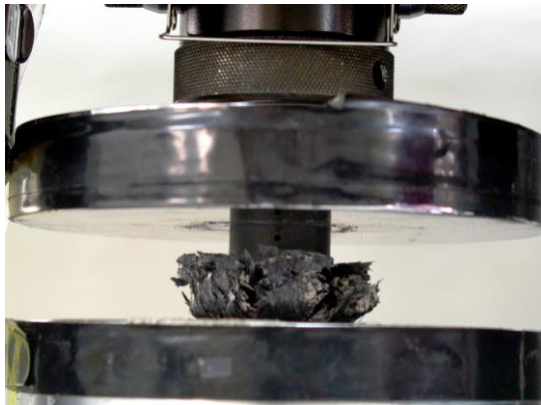
t₁₂ = 240s



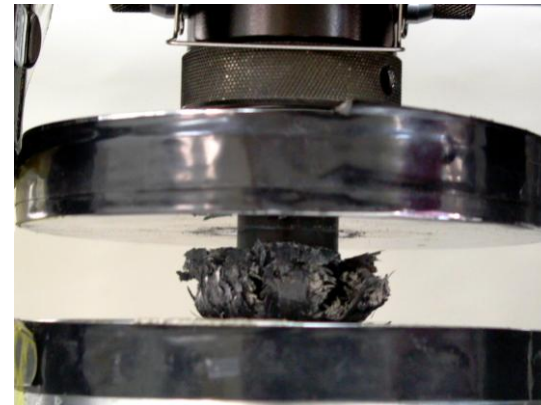
t₁₃ = 260s

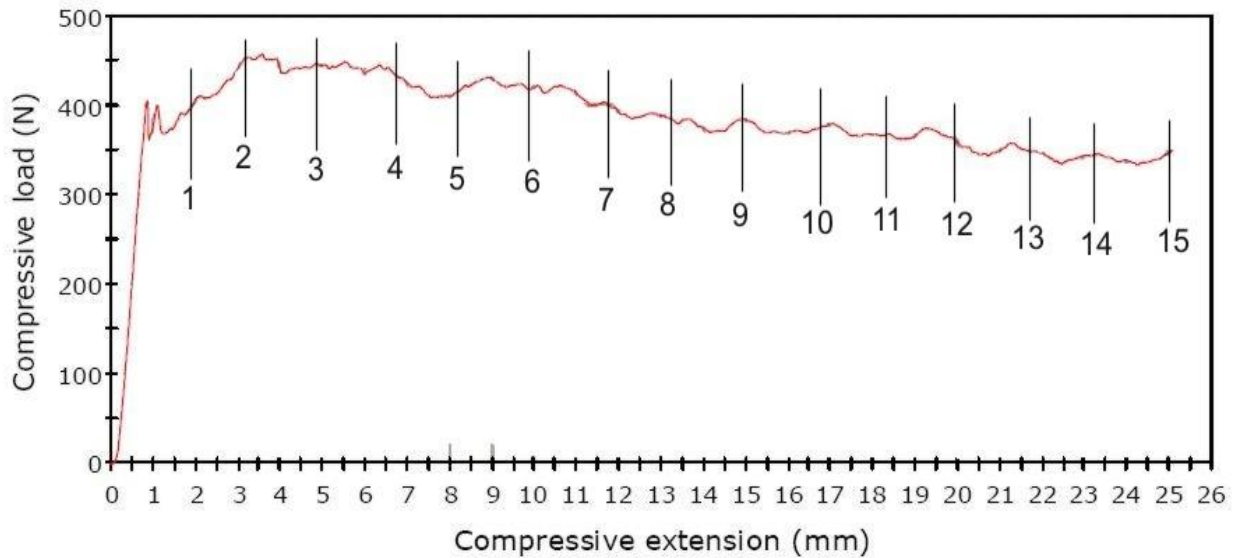


t₁₄ = 280s



t₁₅ = 300s





Σχολιασμός της διαδικασίας κατάρρευσης

- Όπως και στην περίπτωση του σκέτου δοκιμίου έτσι και εδώ η καμπύλη του φορτίου ανεβαίνει απότομα λόγω της αντίστασης του σύνθετου υλικού στην παραμόρφωση. Θα μας φαινόταν πιο φυσιολογικό να επέλθει η θραύση στο τεμάχιο ξεκινώντας από την πλευρά όπου δημιουργήθηκαν οι ειδικές διαμορφώσεις. Αντίθετα όμως με τις προβλέψεις μας η κατάρρευση του δοκιμίου επήλθε από την αντίθετη μεριά (την κάτω). Και αυτό το δοκίμιο ακολούθησε προοδευτική κατάρρευση (φωτογρ.1-15). Οι στρωματώσεις του λοιπόν αποσχίστηκαν (delamination) και οι μισές διέφυγαν προς το εξωτερικό του υλικού, ενώ οι υπόλοιπες συμπιέστηκαν στο εσωτερικό του σωλήνα.
- Στην δοκιμή αυτή παρατηρήσαμε μια μέγιστη τοπικά τιμή φορτίου γύρω στο 1mm μετατόπισης , η οποία ήταν 400N, και έπειτα μια σχεδόν ομαλά φθίνουσα πορεία. Το φορτίο σύνθλιψης καθ'όλο το μήκος της καμπύλης είναι φανερά πολύ μικρότερο σε σύγκριση με το πρώτο δοκίμιο (τάξη εκατοντάδων). Αυτό δικαιολογείται από την αρνητική επίδραση των ειδικών διαμορφώσεων στο δεύτερο δοκίμιο.

Στις ακόλουθες φωτογραφίες φαίνεται η τελική εικόνα του δοκιμίου μετά την κατάρρευση στις ακόλουθες όψεις αντιστοίχως:

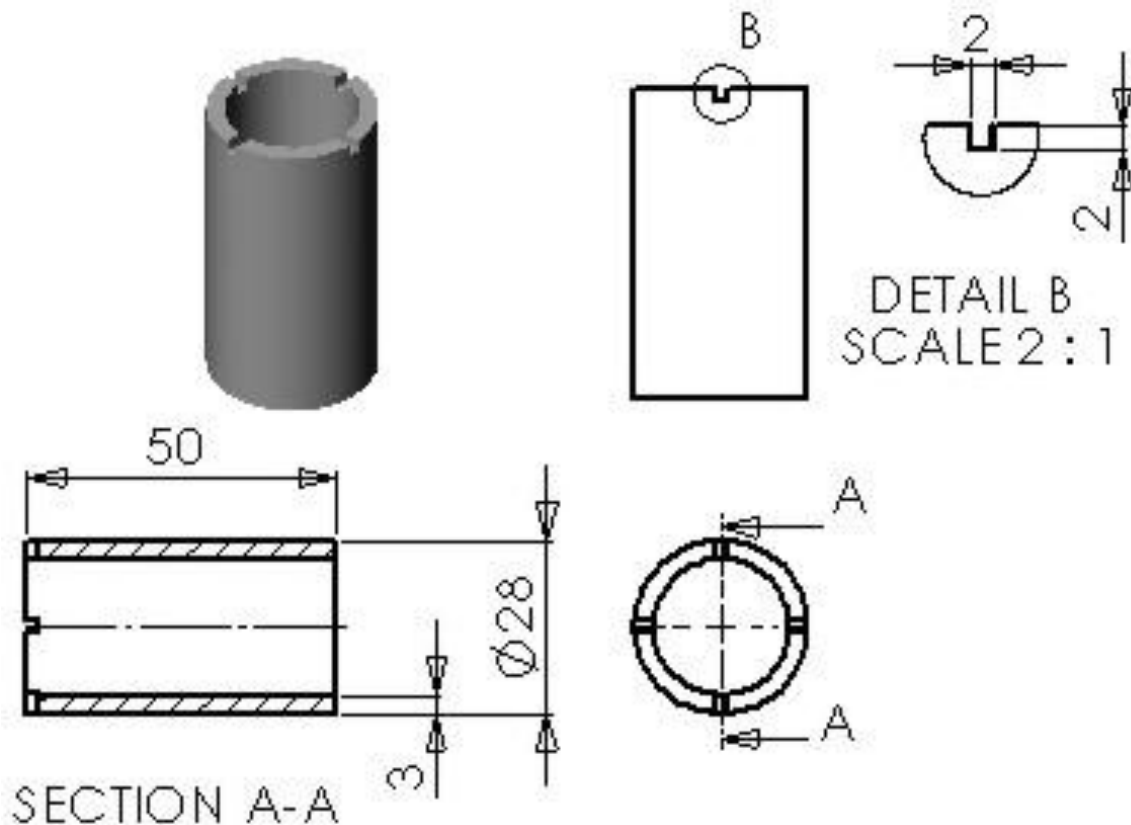
- άνοψη
- κάτωψη
- πλάγια όψη
- τομή.

έτσι ώστε να αποτυπωθούν τα μακροσκοπικά χαρακτηριστικά τους.

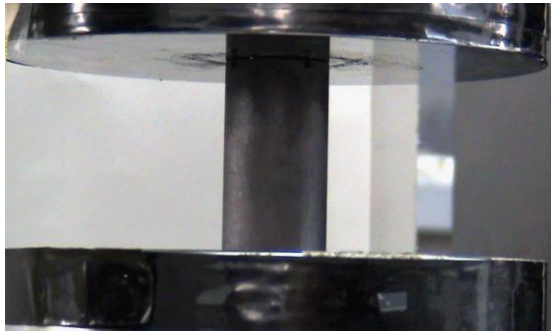


6.6.3. ΔΟΚΙΜΙΟ 3 (με 4 τετράγωνα περιφερειακά του στομιού)

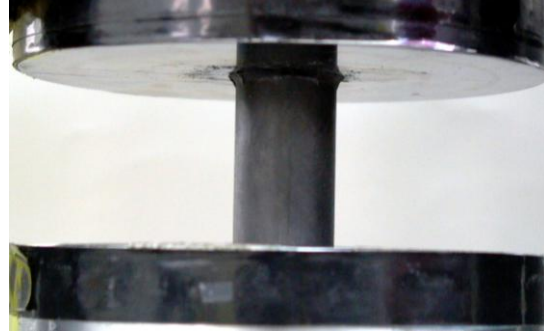
Το δοκίμιο αυτό έχει υποστεί triggering στο ένα του άκρο, και περιλαμβάνει την διάνοιξη 4 τετραγώνων με διαστάσεις πλευρών 2 x 2 mm , τα οποία έχουν ανοιχθεί ακριβώς στην περιφέρεια του ενός άκρου. Τα τετράγωνα απέχουν μεταξύ τους γωνία 90°. Στο ακόλουθο σχέδιο φαίνεται η μορφή του δοκιμίου πριν το πείραμα με τις διαστάσεις του. Κάτωθεν παρουσιάζονται διαδοχικές φωτογραφίες από την πορεία της κατάρρευσης του υλικού αυτού , οι οποίες λήφθηκαν σε διάφορες φάσεις της καθόδου του εμβόλου. Επίσης, παρουσιάζεται και το διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης που λάβαμε με τη βοήθεια του ειδικού προγράμματος κατά την εκτέλεση του πειράματος της θλίψης. Στο προαναφερθέν διάγραμμα φαίνονται και οι μετατοπίσεις που έχουν συμβεί κατά τις χρονικές στιγμές λήψης των αντίστοιχων φωτογραφιών.



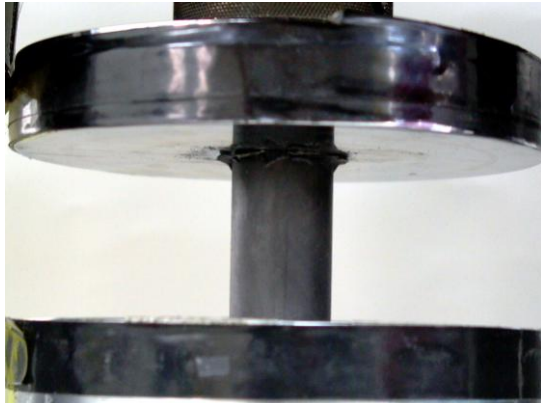
$t_0 = 0s$



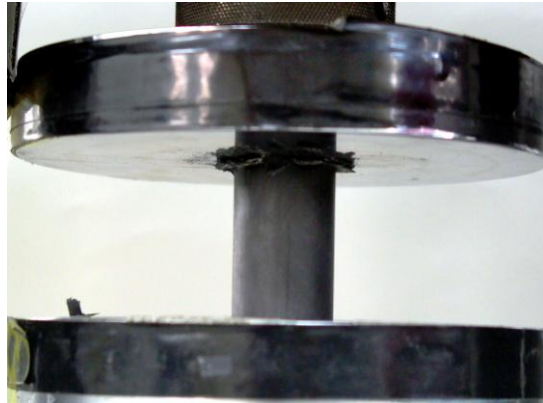
$t_1 = 20s$



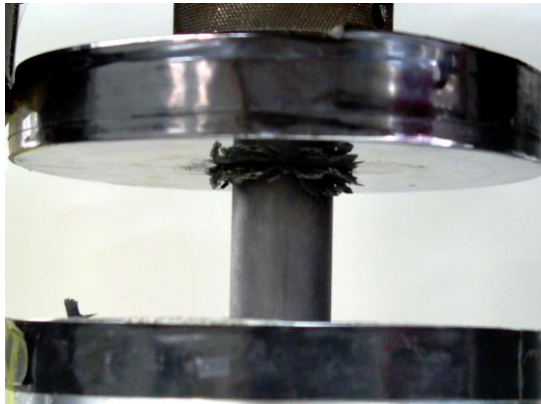
$t_2 = 40s$



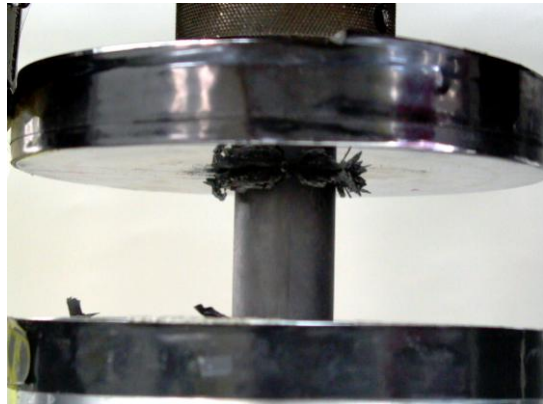
$t_3 = 60s$



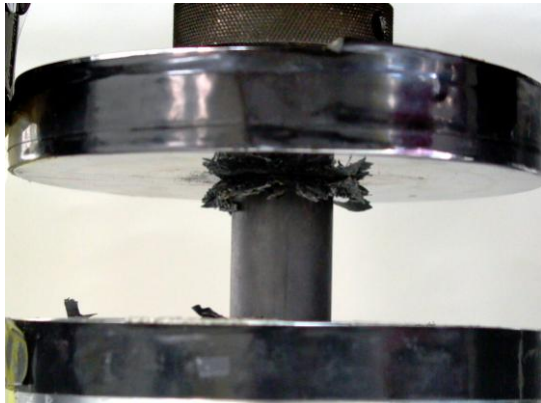
$t_4 = 80s$



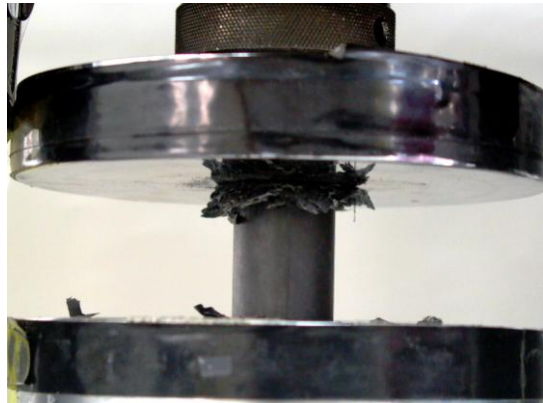
$t_5 = 100s$



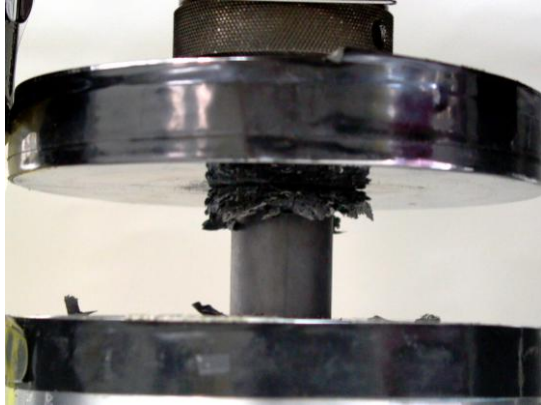
$t_6 = 120s$



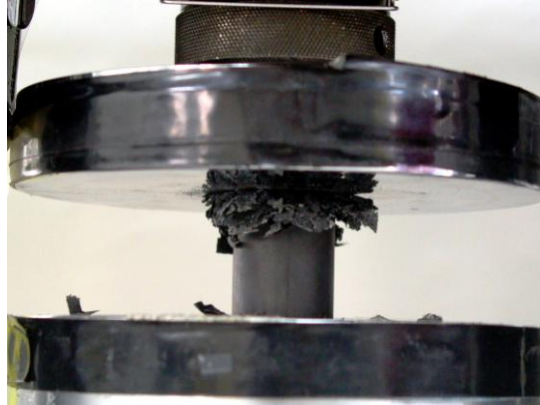
$t_7 = 140s$



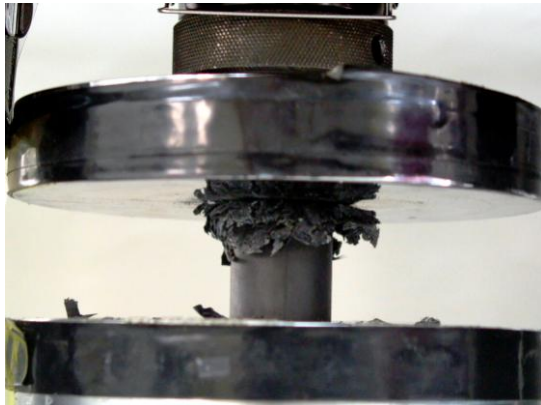
t₈ = 160s



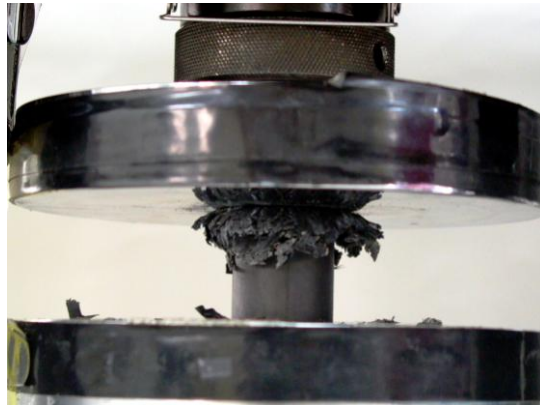
t₉ = 180s



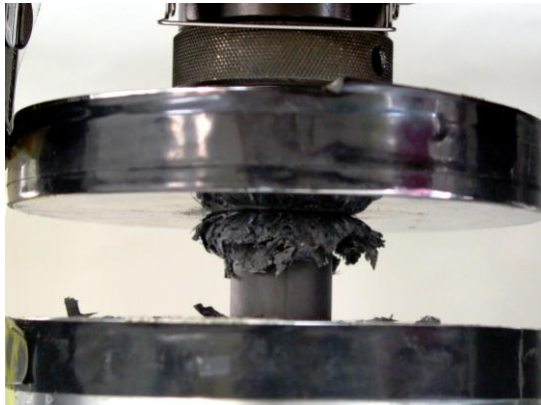
t₁₀ = 200s



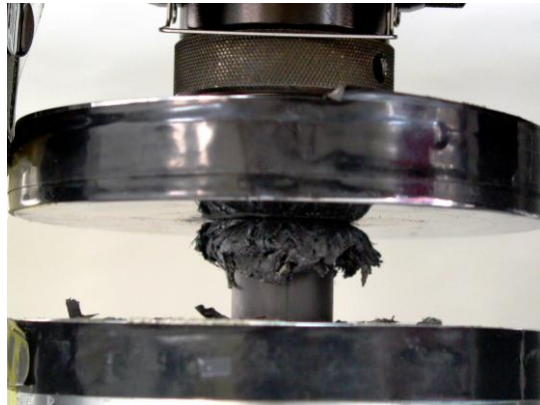
t₁₁ = 220s



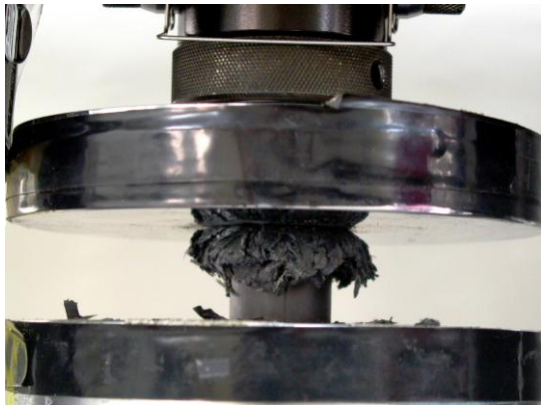
t₁₂ = 240s



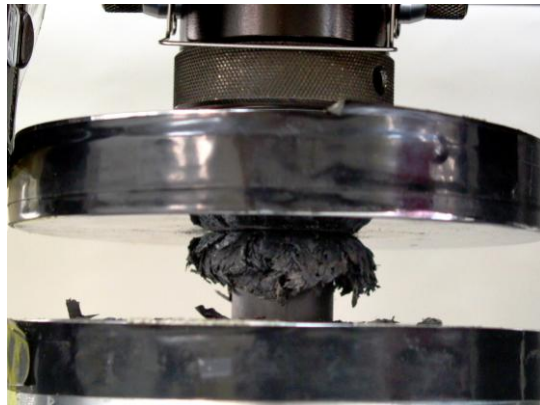
t₁₃ = 260s

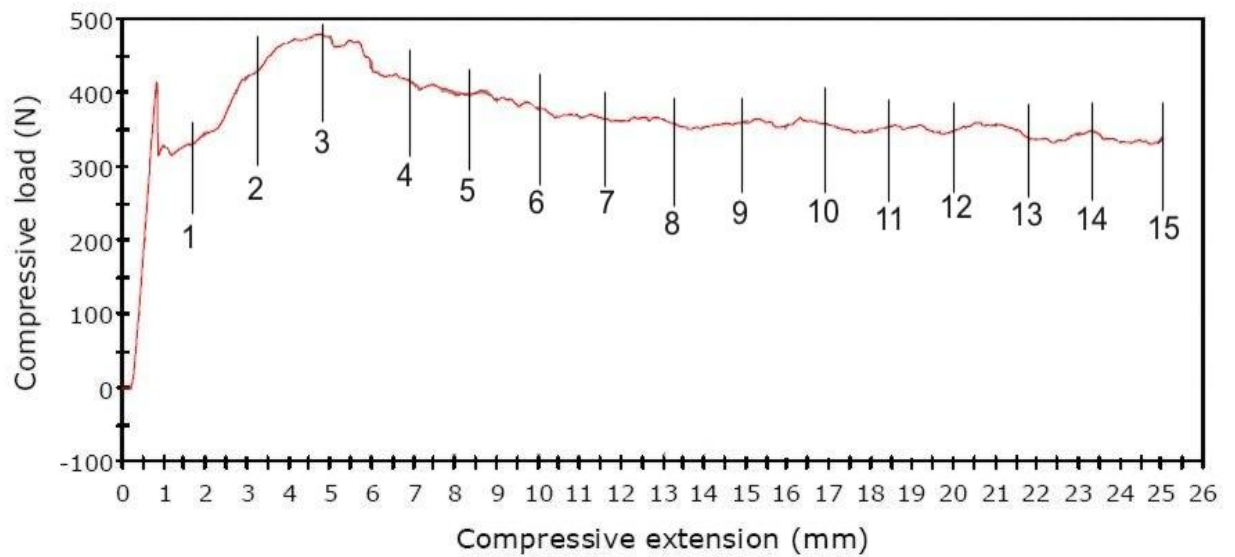


t₁₄ = 280s



t₁₅ = 300s





Σχολιασμός της διαδικασίας κατάρρευσης

- Όπως αναμενόταν, το δοκίμιο κατέρρευσε από την πλευρά που βρίσκονταν οι ατέλειες, και με προοδευτική θραύση.
- Από το διάγραμμα, παρατηρούμε την ύπαρξη ενός τοπικού μεγίστου στο 1mm μετατόπισης με τιμή φορτίου 405N, όπου την στιγμή αυτή καταρρέει η επιφάνεια που έχει υποστεί triggering.
- Στην συνέχεια, το φορτίο αυξάνεται ραγδαία παίρνοντας την μέγιστη τιμή των 490N, και μετά μειώνεται με βραδύ ρυθμό.
- Η μορφή του τελικού δοκιμίου είναι και εδώ οι στρωματώσεις να αποσχίζονται (delamination) και οι μισές να διαφεύγουν προς το εξωτερικό του υλικού, ενώ οι υπόλοιπες συμπιέζονται στο εσωτερικό του σωλήνα.

Στις ακόλουθες φωτογραφίες φαίνεται η τελική εικόνα του δοκιμίου μετά την κατάρρευση στις ακόλουθες όψεις αντιστοίχως:

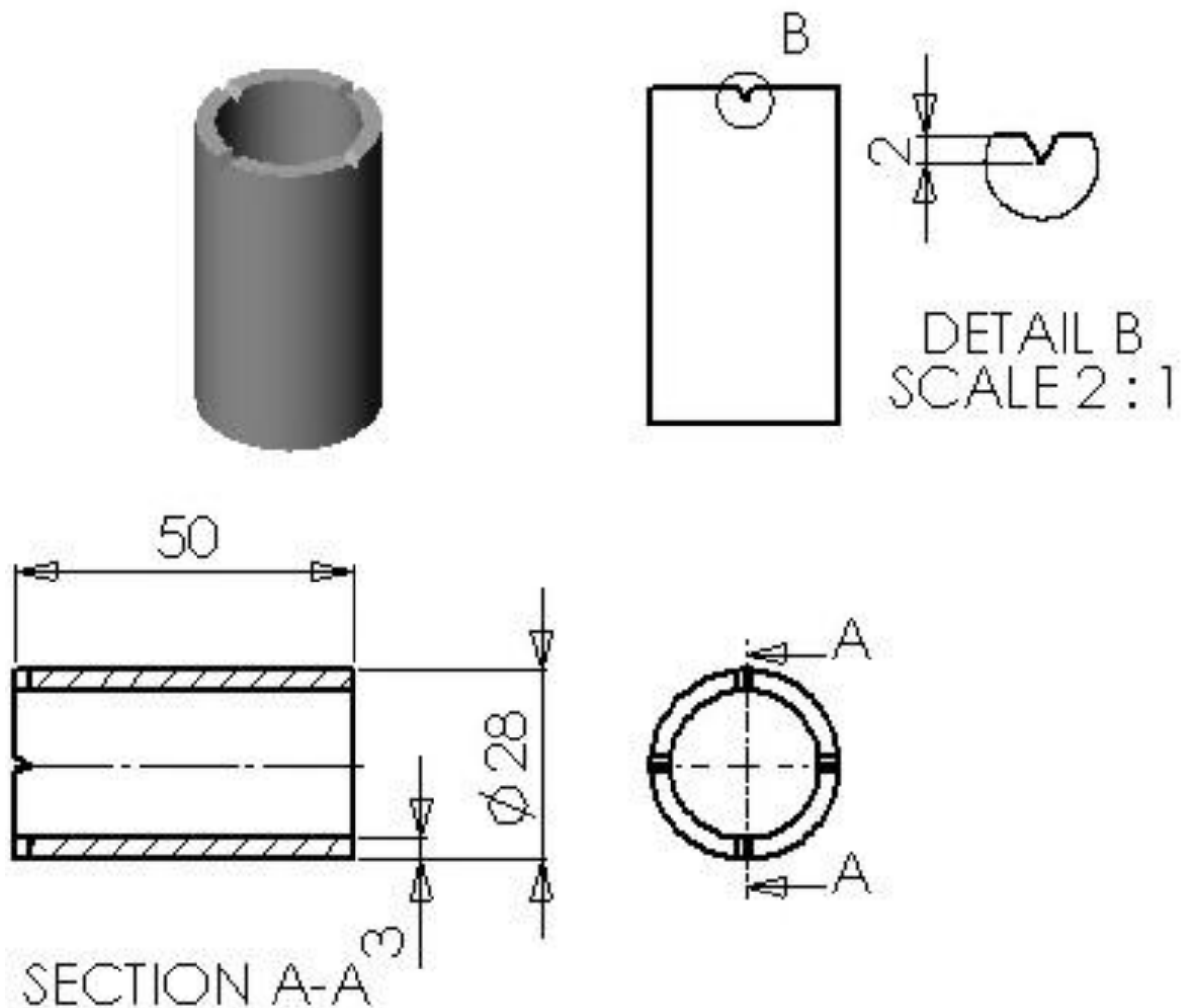
- κάτοψη
- άνοψη
- πλάγια όψη
- τομή.

έτσι ώστε να αποτυπωθούν τα μακροσκοπικά χαρακτηριστικά τους.

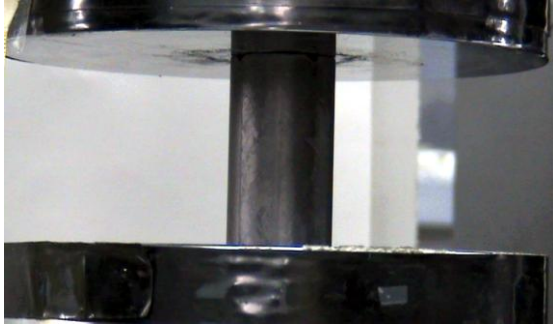


6.6.4. ΔΟΚΙΜΙΟ 4 (με 4 τρίγωνα περιφερειακά του στομίου)

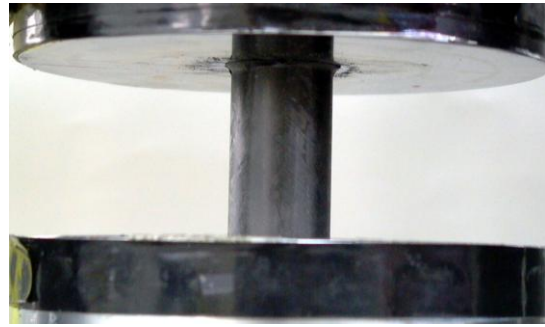
Το δοκίμιο αυτό έχει υποστεί triggering στο ένα του άκρο, και περιλαμβάνει την διάνοιξη 4 τριγώνων με ύψη 2 mm, τα οποία έχουν ανοιχθεί ακριβώς στην περιφέρεια του ενός άκρου. Τα τρίγωνα απέχουν μεταξύ τους γωνία 90°. Στο ακόλουθο σχέδιο φαίνεται η μορφή του δοκιμίου πριν το πείραμα με τις διαστάσεις του. Κάτωθεν παρουσιάζονται διαδοχικές φωτογραφίες από την πορεία της κατάρρευσης του υλικού αυτού, οι οποίες λήφθηκαν σε διάφορες φάσεις της καθόδου του εμβόλου. Επίσης, παρουσιάζεται και το διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης που λάβαμε με τη βοήθεια του ειδικού προγράμματος κατά την εκτέλεση του πειράματος της θλίψης. Στο προαναφερθέν διάγραμμα φαίνονται και οι μετατοπίσεις που έχουν συμβεί κατά τις χρονικές στιγμές λήψης των αντίστοιχων φωτογραφιών.



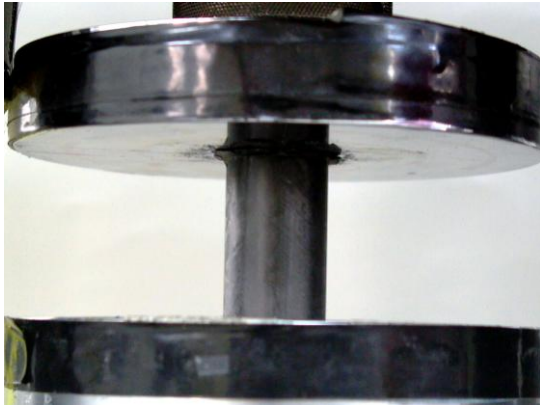
$t_0 = 0s$



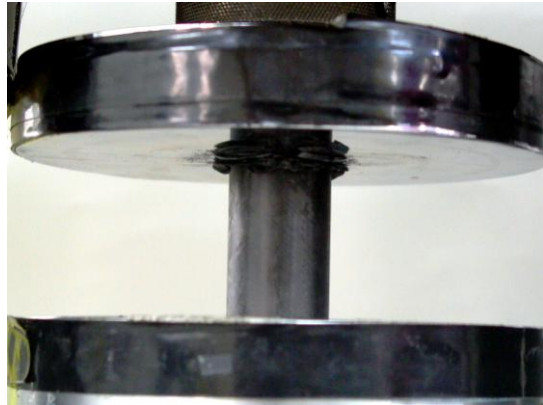
$t_1 = 20s$



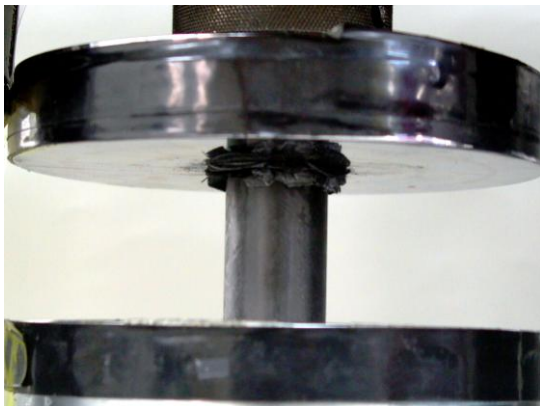
$t_2 = 40s$



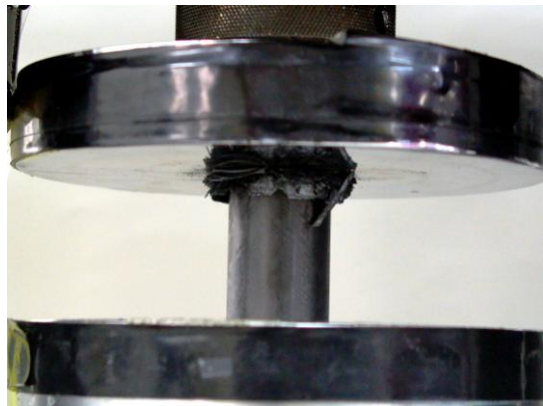
$t_3 = 60s$



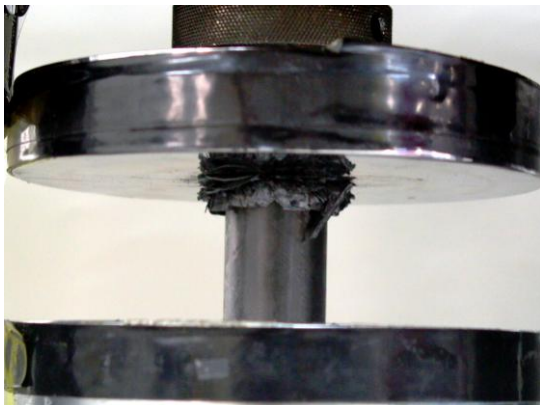
$t_4 = 80s$



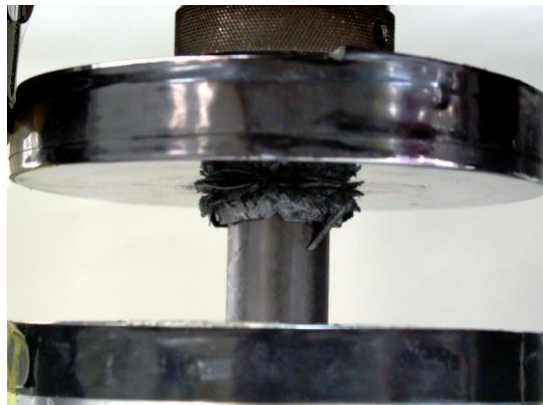
$t_5 = 100s$



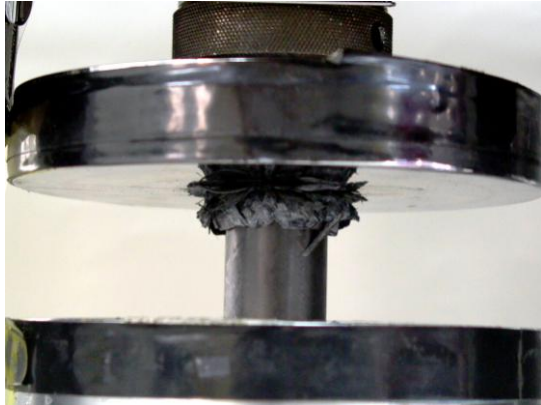
$t_6 = 120s$



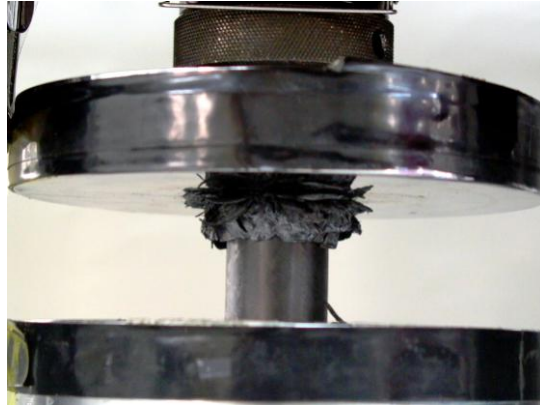
$t_7 = 140s$



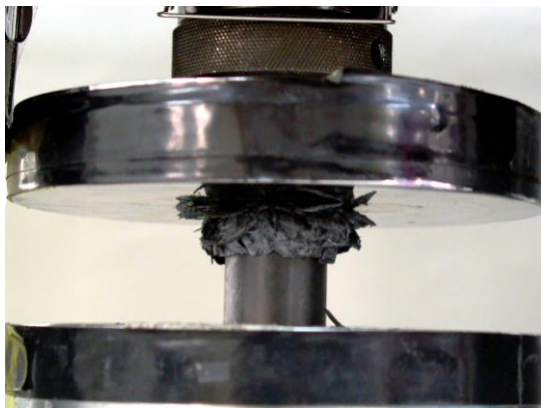
t₈ = 160s



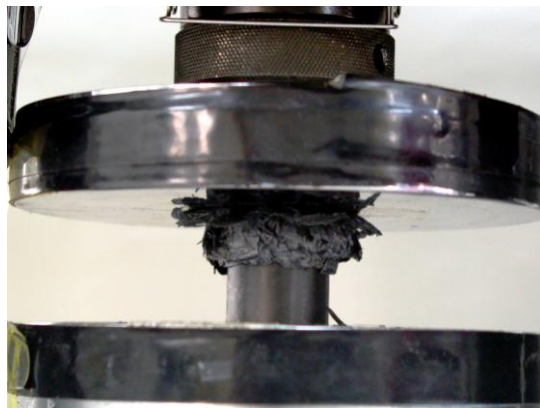
t₉ = 180s



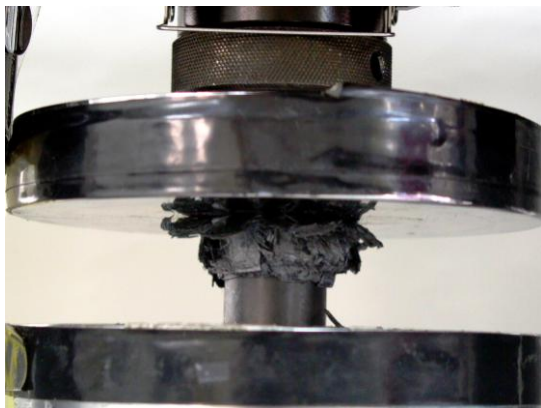
t₁₀ = 200s



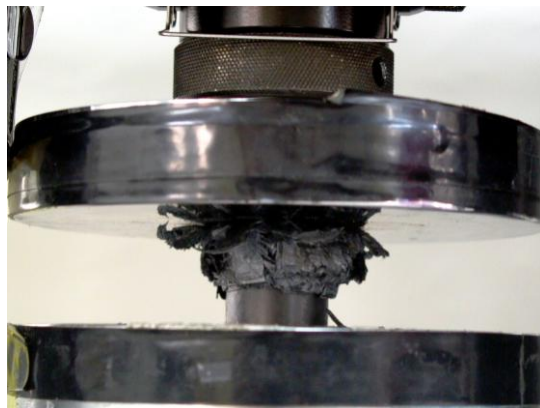
t₁₁ = 220s



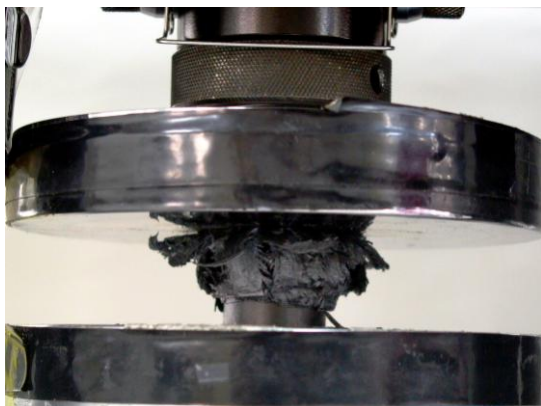
t₁₂ = 240s



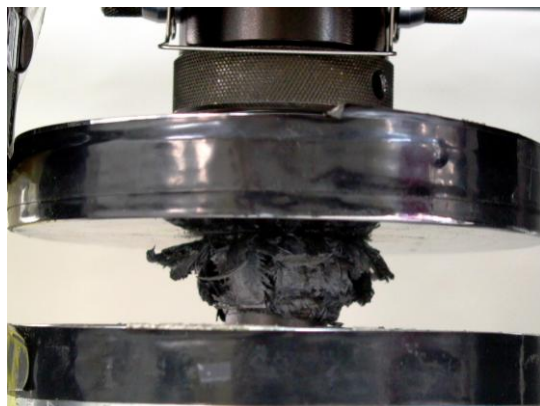
t₁₃ = 260s

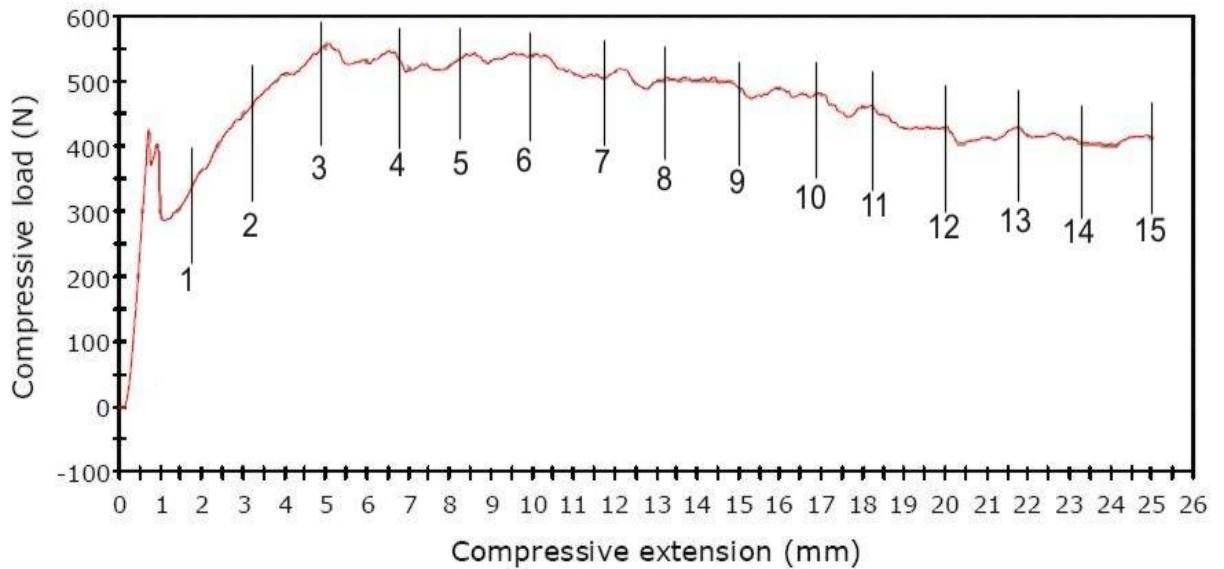


t₁₄ = 280s



t₁₅ = 300s





Σχολιασμός της διαδικασίας κατάρρευσης

- Όπως αναμενόταν, το δοκίμιο κατέρρευσε από την πλευρά που βρίσκονταν οι ατέλειες, και με προοδευτική θραύση.
- Από το διάγραμμα, παρατηρούμε την ύπαρξη ενός τοπικού μεγίστου κοντά στο 1mm μετατόπισης με τιμή φορτίου 410N, όπου την στιγμή αυτή καταρρέει η επιφάνεια που έχει υποστεί triggering.
- Στην συνέχεια, το φορτίο αυξάνεται με έντονο ρυθμό παίρνοντας την μέγιστη τιμή των 550N, και μετά μειώνεται με βραδύ ρυθμό φθάνοντας έως τα 400N.
- Η μορφή του τελικού δοκιμίου είναι και εδώ οι στρωματώσεις του να αποσχίζονται (delamination) και οι μισές να διαφεύγουν προς το εξωτερικό του υλικού, ενώ οι υπόλοιπες συμπιέζονται στο εσωτερικό του σωλήνα.

Στις ακόλουθες φωτογραφίες φαίνεται η τελική εικόνα του δοκιμίου μετά την κατάρρευση στις ακόλουθες όψεις αντιστοίχως:

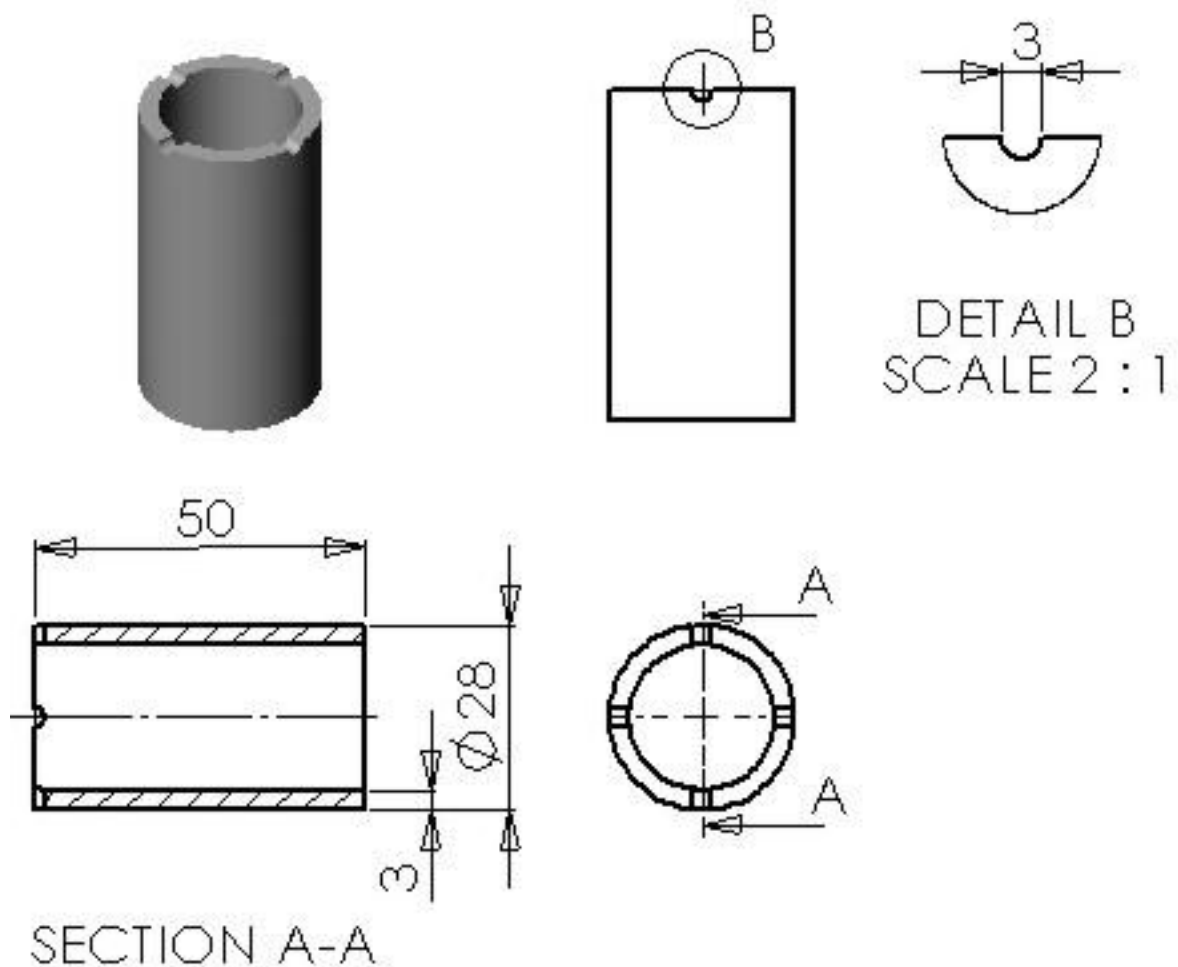
- κάτοψη
- άνοψη
- πλάγια όψη
- τομή.

έτσι ώστε να αποτυπωθούν τα μακροσκοπικά χαρακτηριστικά τους.

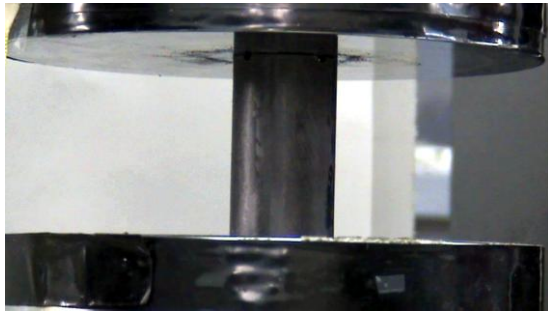


6.6.5. ΔΟΚΙΜΙΟ 5 (με 4 ημικύκλια περιφερειακά του στομίου)

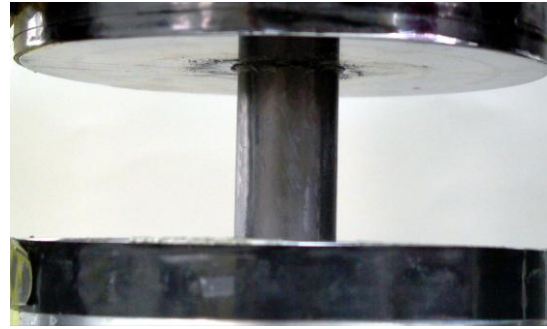
Το δοκίμιο αυτό έχει υποστεί triggering στο ένα του άκρο, και περιλαμβάνει την διάνοιξη 4 ημικυκλίων με διάμετρο 3 mm , τα οποία έχουν ανοιχθεί ακριβώς στην περιφέρεια του ενός άκρου. Τα ημικύκλια απέχουν μεταξύ τους γωνία 90°. Στο ακόλουθο σχέδιο φαίνεται η μορφή του δοκιμίου πριν το πείραμα με τις διαστάσεις του. Κάτωθεν παρουσιάζονται διαδοχικές φωτογραφίες από την πορεία της κατάρρευσης του υλικού αυτού , οι οποίες λήφθηκαν σε διάφορες φάσεις της καθόδου του εμβόλου. Επίσης, παρουσιάζεται και το διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης που λάβαμε με τη βοήθεια του ειδικού προγράμματος κατά την εκτέλεση του πειράματος της θλίψης. Στο προαναφερθέν διάγραμμα φαίνονται και οι μετατοπίσεις που έχουν συμβεί κατά τις χρονικές στιγμές λήψης των αντίστοιχων φωτογραφιών.



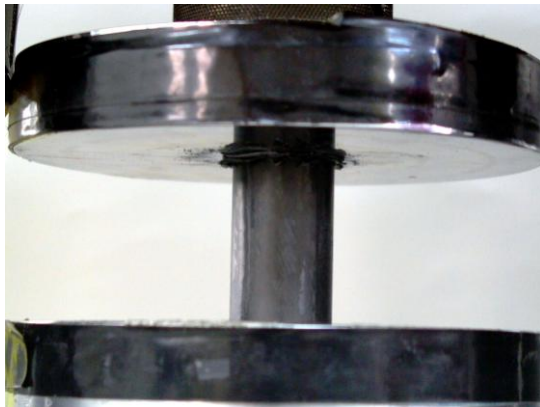
$t_0 = 0s$



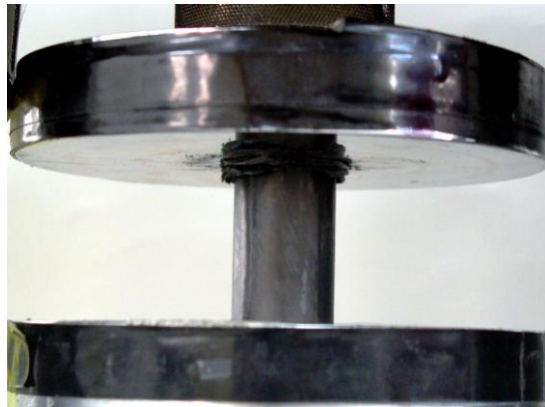
$t_1 = 20s$



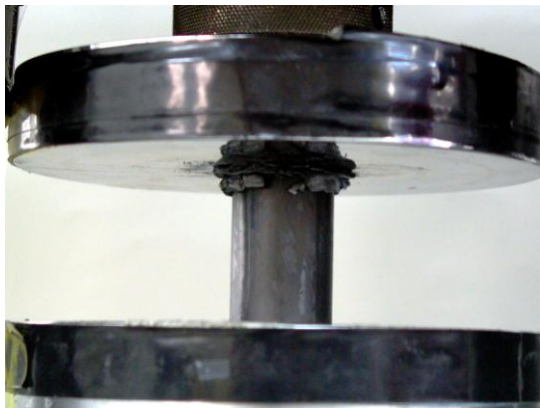
$t_2 = 40s$



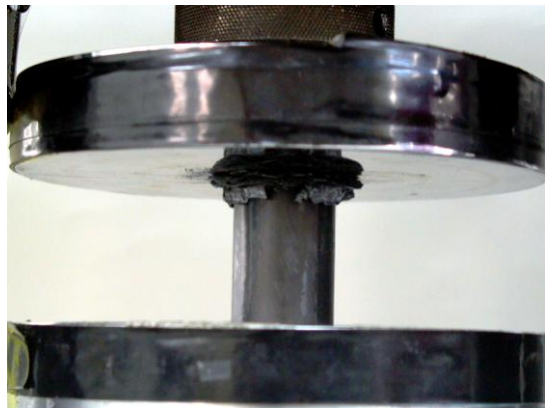
$t_3 = 60s$



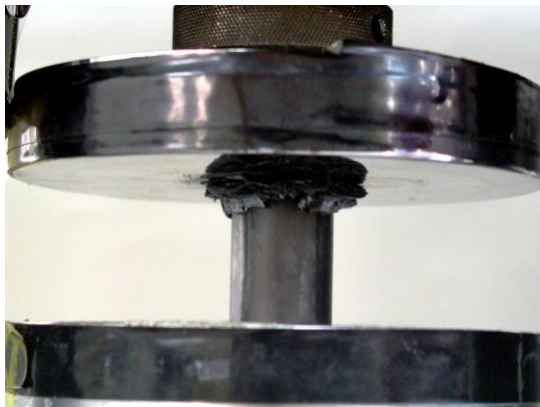
$t_4 = 80s$



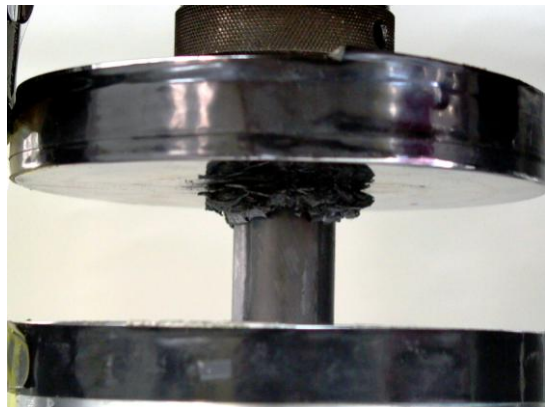
$t_5 = 100s$



$t_6 = 120s$



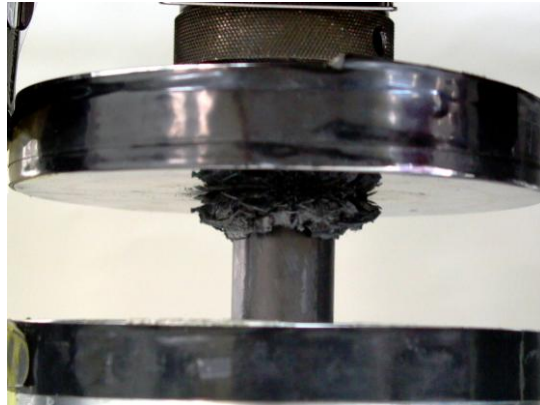
$t_7 = 140s$



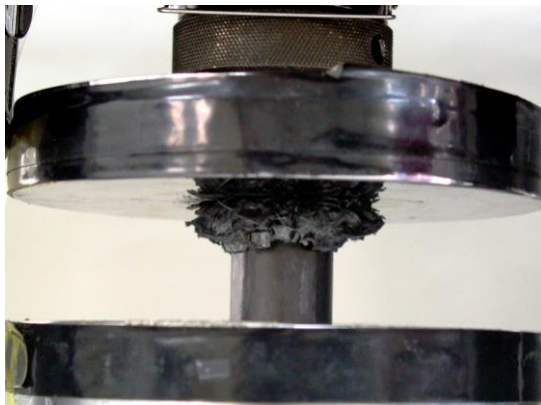
t₈ = 160s



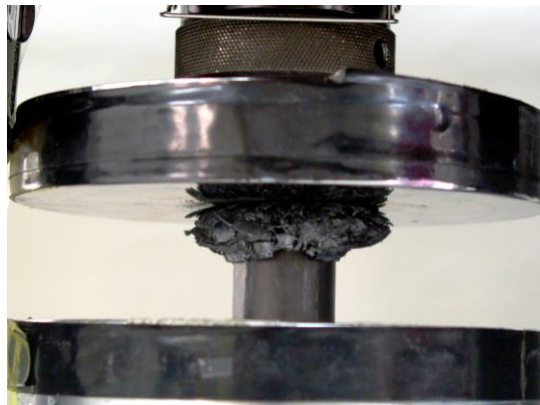
t₉ = 180s



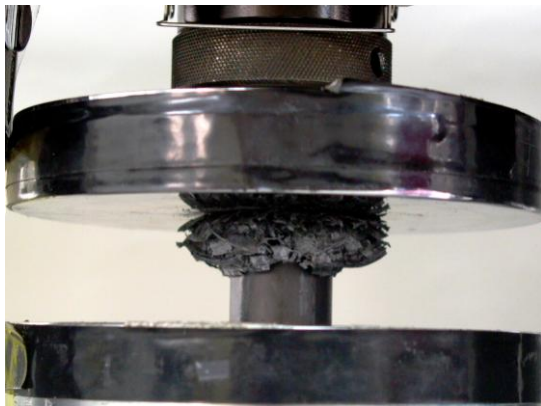
t₁₀ = 200s



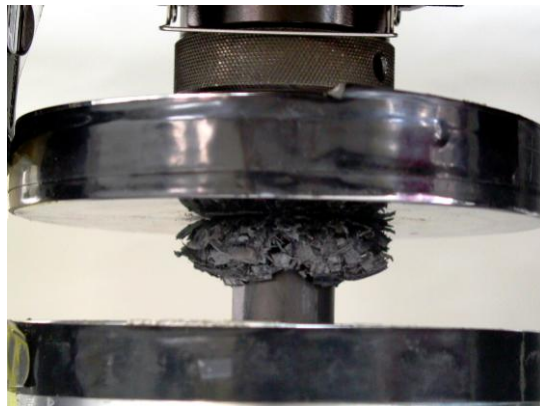
t₁₁ = 220s



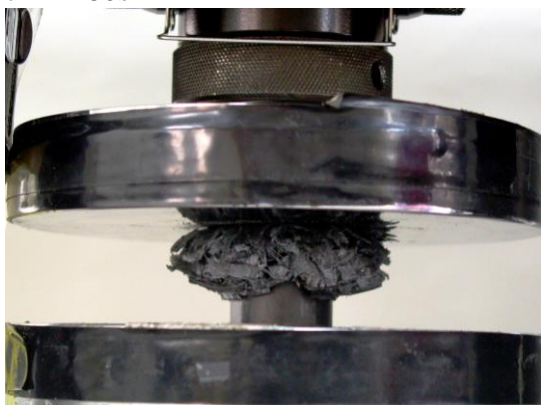
t₁₂ = 240s



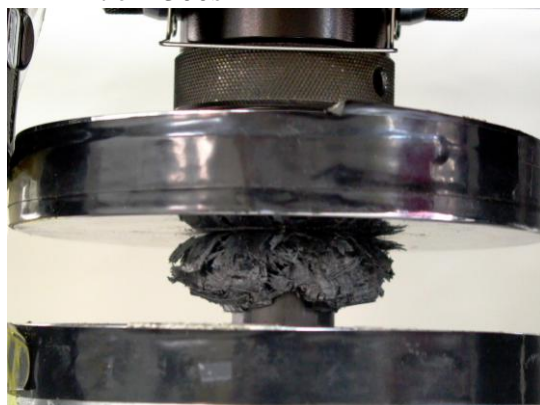
t₁₃ = 260s

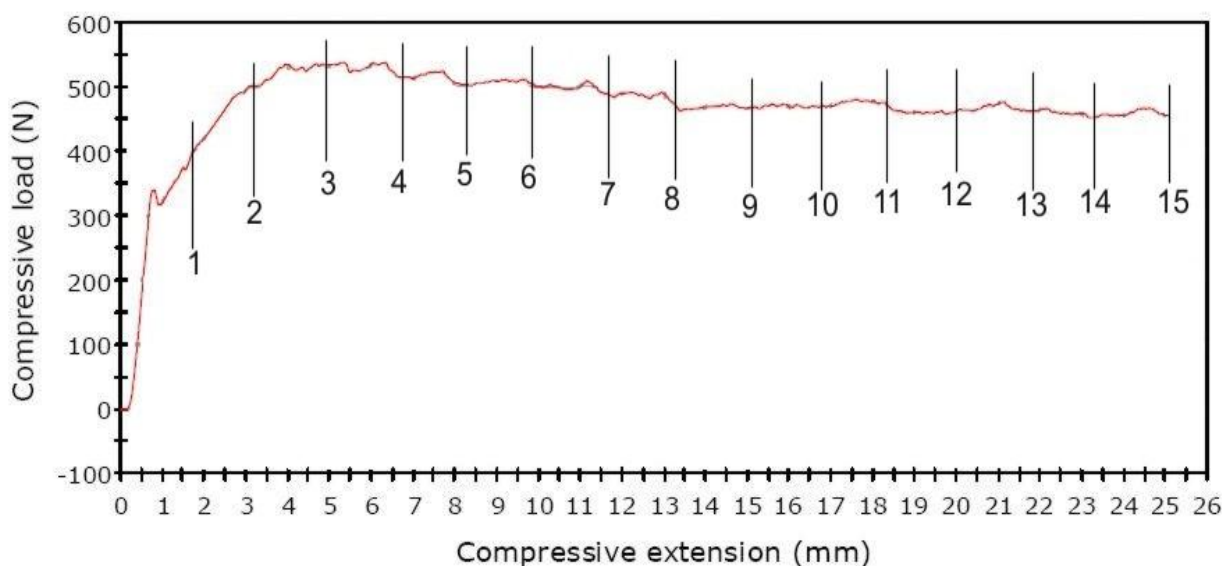


t₁₄ = 280s



t₁₅ = 300s





Σχολιασμός της διαδικασίας κατάρρευσης

- Όπως αναμενόταν, το δοκίμιο κατέρρευσε από την πλευρά που βρίσκονταν οι ατέλειες, και με προοδευτική θραύση.
- Από το διάγραμμα, παρατηρούμε την ύπαρξη ενός τοπικού μεγίστου κοντά στο 1mm μετατόπισης με τιμή φορτίου 330N, όπου την στιγμή αυτή καταρρέει η επιφάνεια που έχει υποστεί triggering. Η κορυφή αυτή δεν είναι τόσο έντονη, όσο στα υπόλοιπα δοκίμια, δείχνοντας πως για να καταρρεύσει η συγκεκριμένη ατέλεια, δεν απαιτείται μεγάλη αύξηση στην πρόσδοση φορτίου, συγκριτικά με το υπόλοιπο μέρος του.
- Στην συνέχεια, το φορτίο αυξάνεται, παίρνοντας την μέγιστη τιμή των 540N, και μετά μειώνεται με αρκετά βραδύ ρυθμό, διατηρώντας τα επίπεδα του φορτίου γύρω στα 500N.
- Η μορφή του τελικού δοκιμίου είναι και εδώ οι στρωματώσεις να αποσχίζονται (delamination) και οι μισές να διαφεύγουν προς το εξωτερικό του υλικού, ενώ οι υπόλοιπες συμπιέζονται στο εσωτερικό του σωλήνα.

Στις ακόλουθες φωτογραφίες φαίνεται η τελική εικόνα του δοκιμίου μετά την κατάρρευση στις ακόλουθες όψεις αντιστοίχως:

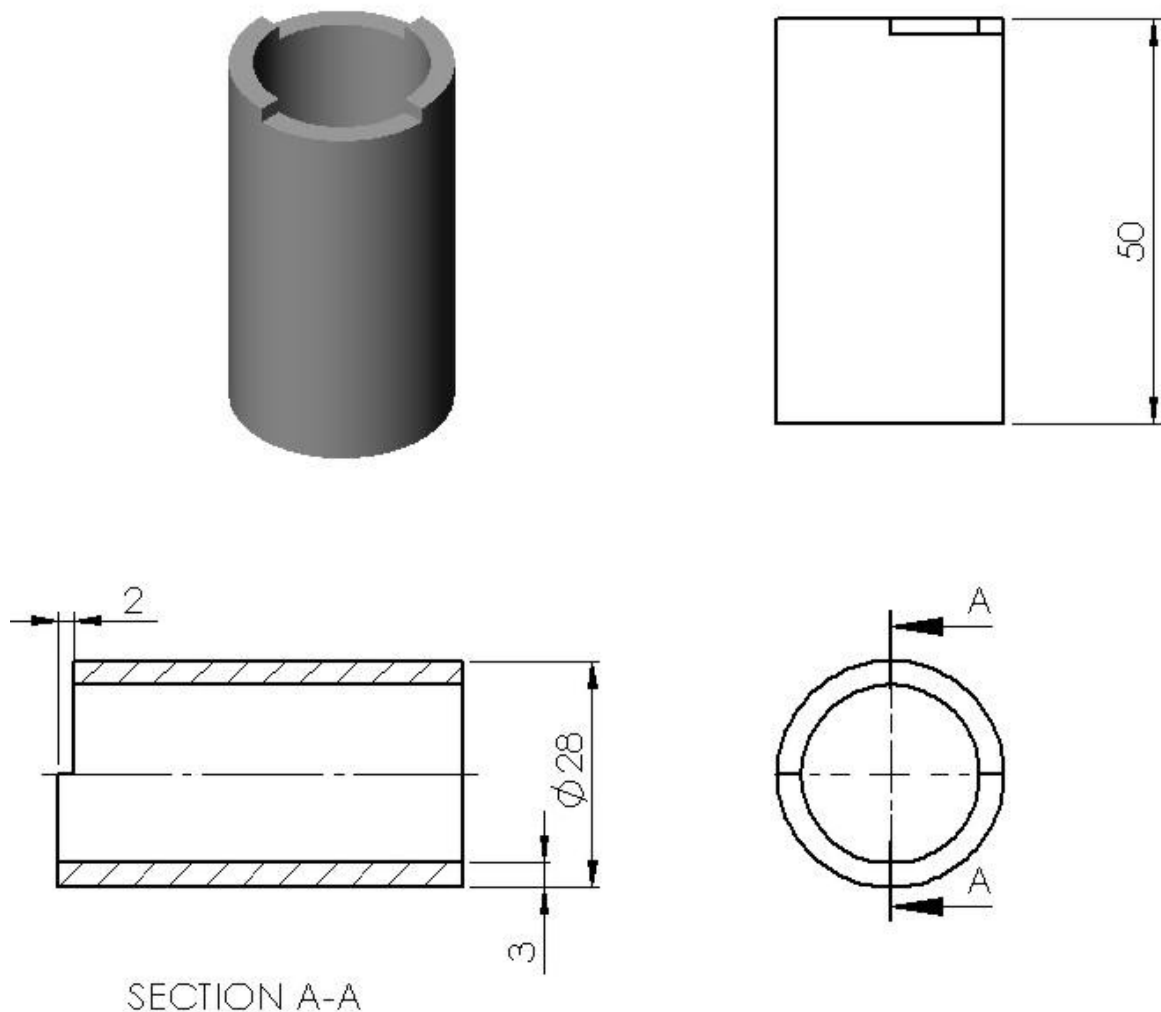
- κάτοψη
- άνοψη
- πλάγια όψη
- τομή.

έτσι ώστε να αποτυπωθούν τα μακροσκοπικά χαρακτηριστικά τους.

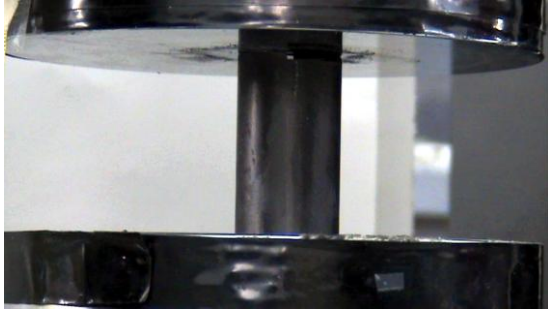


6.6.6. ΔΟΚΙΜΙΟ 6 (με 2 τεταρτοκύκλια περιφερειακά του στομίου)

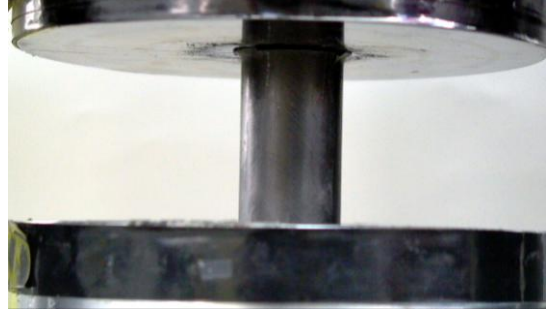
Το δοκίμιο αυτό έχει υποστεί triggering στο ένα του άκρο, και περιλαμβάνει την διάνοιξη 2 τεταρτοκυκλίων γωνίας 90° με βάθος 2 mm , τα οποία έχουν ανοιχθεί ακριβώς στην περιφέρεια του ενός άκρου. Στο ακόλουθο σχέδιο φαίνεται η μορφή του δοκιμίου πριν το πείραμα με τις διαστάσεις του. Κάτωθεν παρουσιάζονται διαδοχικές φωτογραφίες από την πορεία της κατάρρευσης του υλικού αυτού , οι οποίες λήφθηκαν σε διάφορες φάσεις της καθόδου του εμβόλου. Επίσης, παρουσιάζεται και το διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης που λάβαμε με τη βοήθεια του ειδικού προγράμματος κατά την εκτέλεση του πειράματος της θλίψης. Στο προαναφερθέν διάγραμμα φαίνονται και οι μετατοπίσεις που έχουν συμβεί κατά τις χρονικές στιγμές λήψης των αντίστοιχων φωτογραφιών.



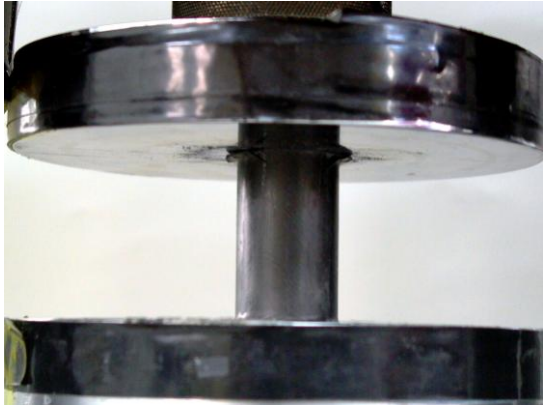
$t_0 = 0s$



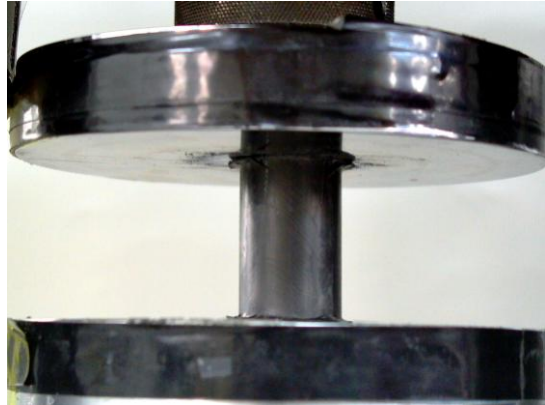
$t_1 = 20s$



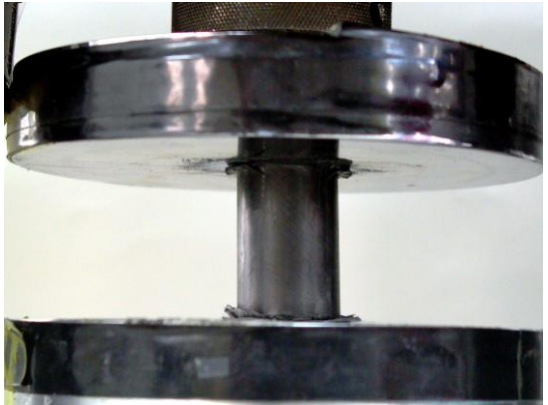
$t_2 = 40s$



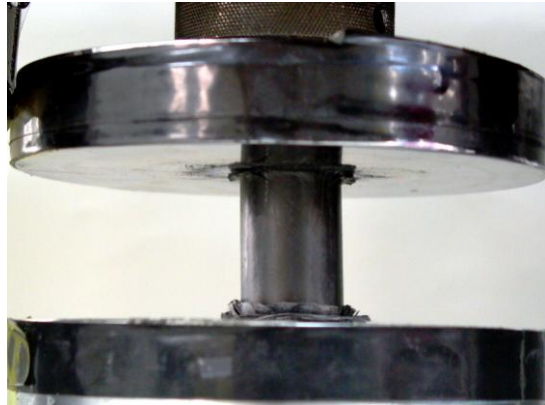
$t_3 = 60s$



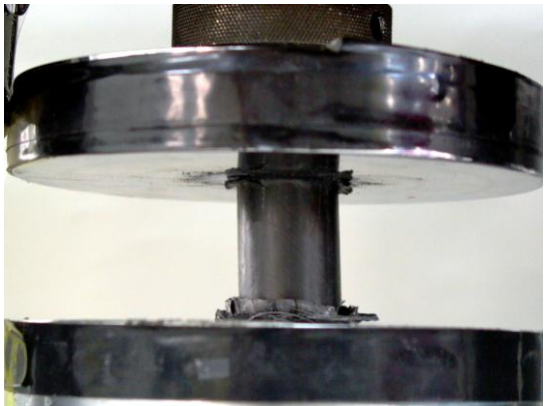
$t_4 = 80s$



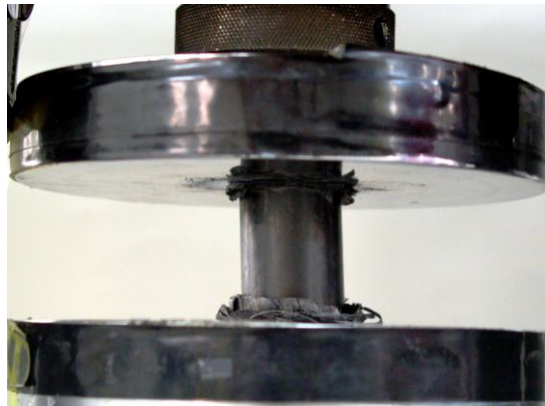
$t_5 = 100s$



$t_6 = 120s$



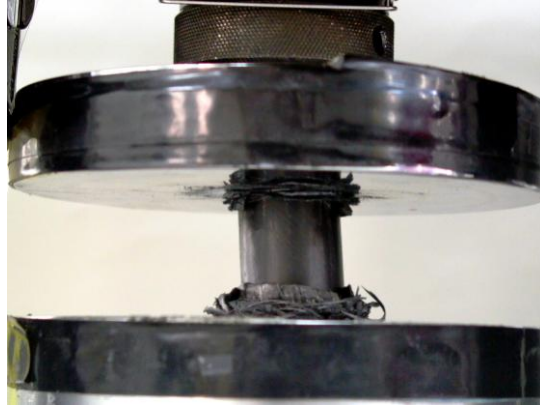
$t_7 = 140s$



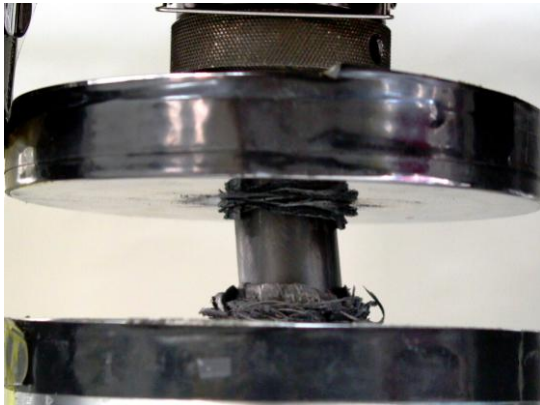
t₈ = 160s



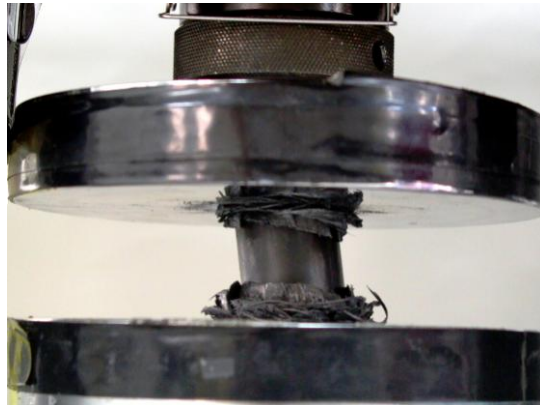
t₉ = 180s



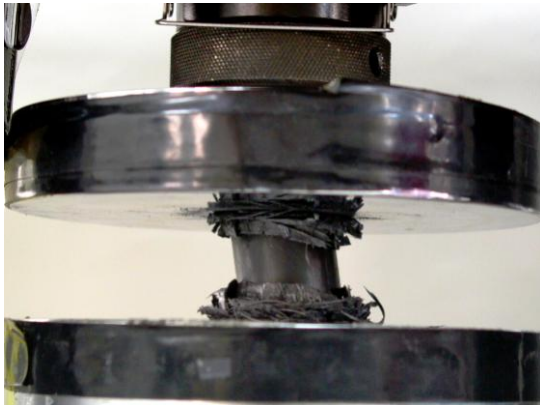
t₁₀ = 200s



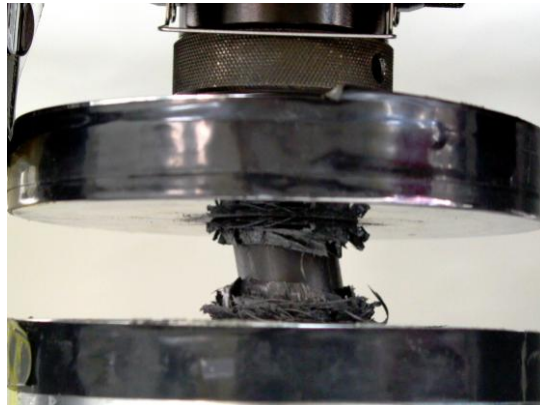
t₁₁ = 220s



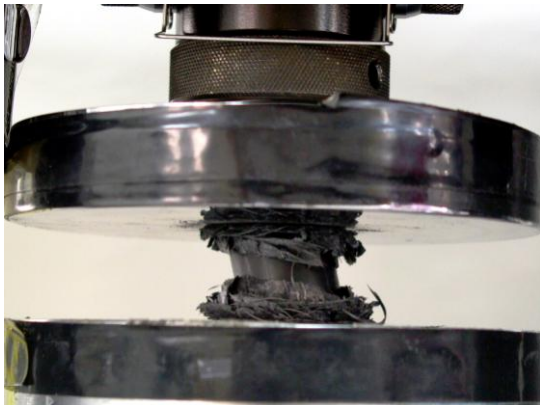
t₁₂ = 240s



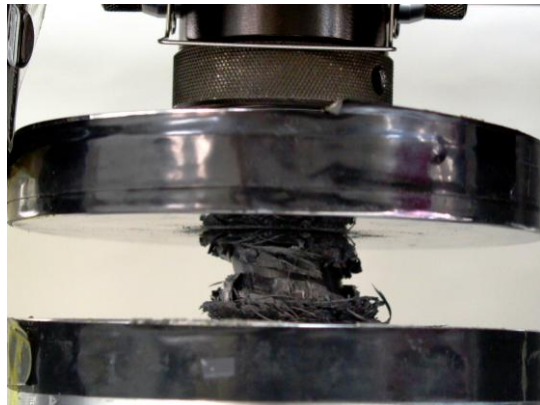
t₁₃ = 260s

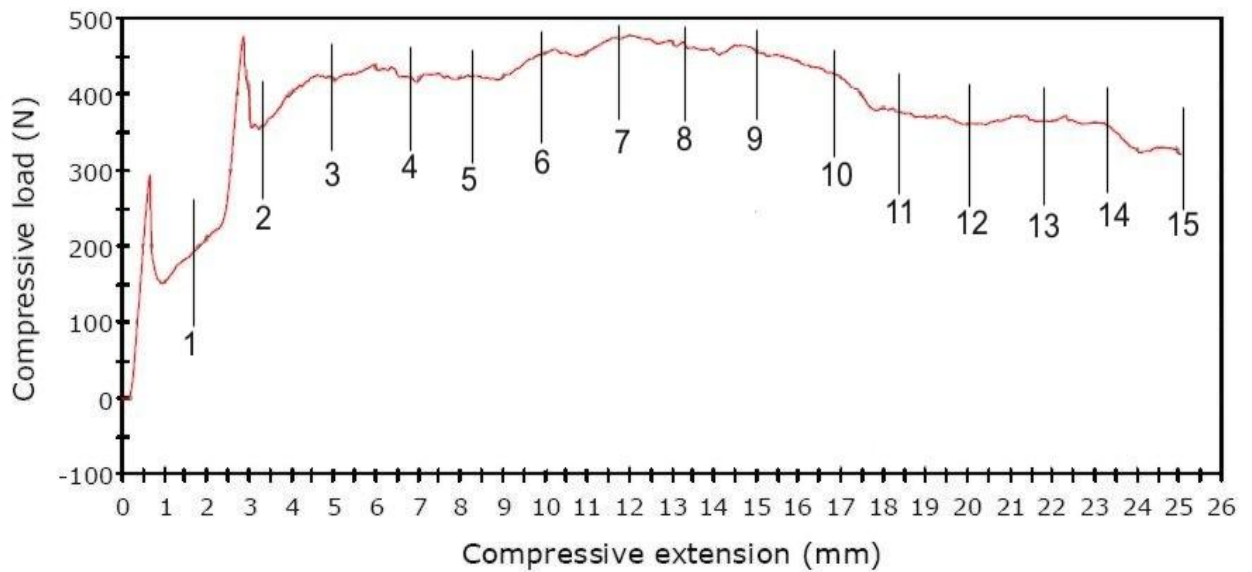


t₁₄ = 280s



t₁₅ = 300s





Σχολιασμός της διαδικασίας κατάρρευσης

- Αναμέναμε να εκκινούσε η κατάρρευση από την πλευρά του δοκιμίου η οποία έχει υποστεί την διαμόρφωση. Απρόσμενα, όμως, το υλικό του δοκιμίου άρχισε να διαρρέει υπό γωνία και προς τις δύο πλευρές. Υπό τον τρόπο αυτό η κατάρρευση συνεχίστηκε ως το τέλος με το υλικό να διαρρέει από αμφότερες τις πλευρές του. Οι διαστρωματώσεις του άρχισαν να αποσχίζονται και οι μισές διέφευγαν προς το εξωτερικό του υλικού, ενώ οι υπόλοιπες αναδιπλώνονταν στο εσωτερικό του δοκιμίου.
- Από το διάγραμμα παρατηρούμε ότι στα 0,7 mm μετατόπισης παρουσιάζεται ένα τοπικό μέγιστο της τιμής του φορτίου (300N), όπου και ξεκινά η θραύση των πρώτων στρωμάτων στην διαμορφωμένη περιοχή του δοκιμίου.
- Στην συνέχεια, δημιουργείται και ένα μέγιστο απαιτούμενο φορτίο των 480N, στα 3mm, όπου και αρχίζει η κατάρρευση των στρωμάτων της απομένουσας περιοχής του δοκιμίου από την διαμόρφωση. Είναι απόλυτα λογικό και αναμενόμενο να χρειάζεται αυξημένο ποσό φορτίου στην μη διαμορφωμένη επιφάνεια, αφού οι ατέλειες είναι ευκολότερο να αντιμετωπισθούν.
- Έπειτα, η μορφή της καμπύλης είναι αρχικά αύξουσα, πάντα όμως ευρισκόμενη σε υψηλά επίπεδα φορτίου. Ακόμη, αποτέλεσμα της γωνιακής διαρροής ήταν η πτώση του φορτίου στο τέλος της δόκιμης αφού στο σημείο εκείνο το δοκίμιο είχε αρχίσει να καταπονείται σε κάμψη, στην οποία και οφειλόταν μερικώς η μείωση του ύψους του.

Στις ακόλουθες φωτογραφίες φαίνεται η τελική εικόνα του δοκιμίου μετά την κατάρρευση στις ακόλουθες όψεις αντιστοίχως:

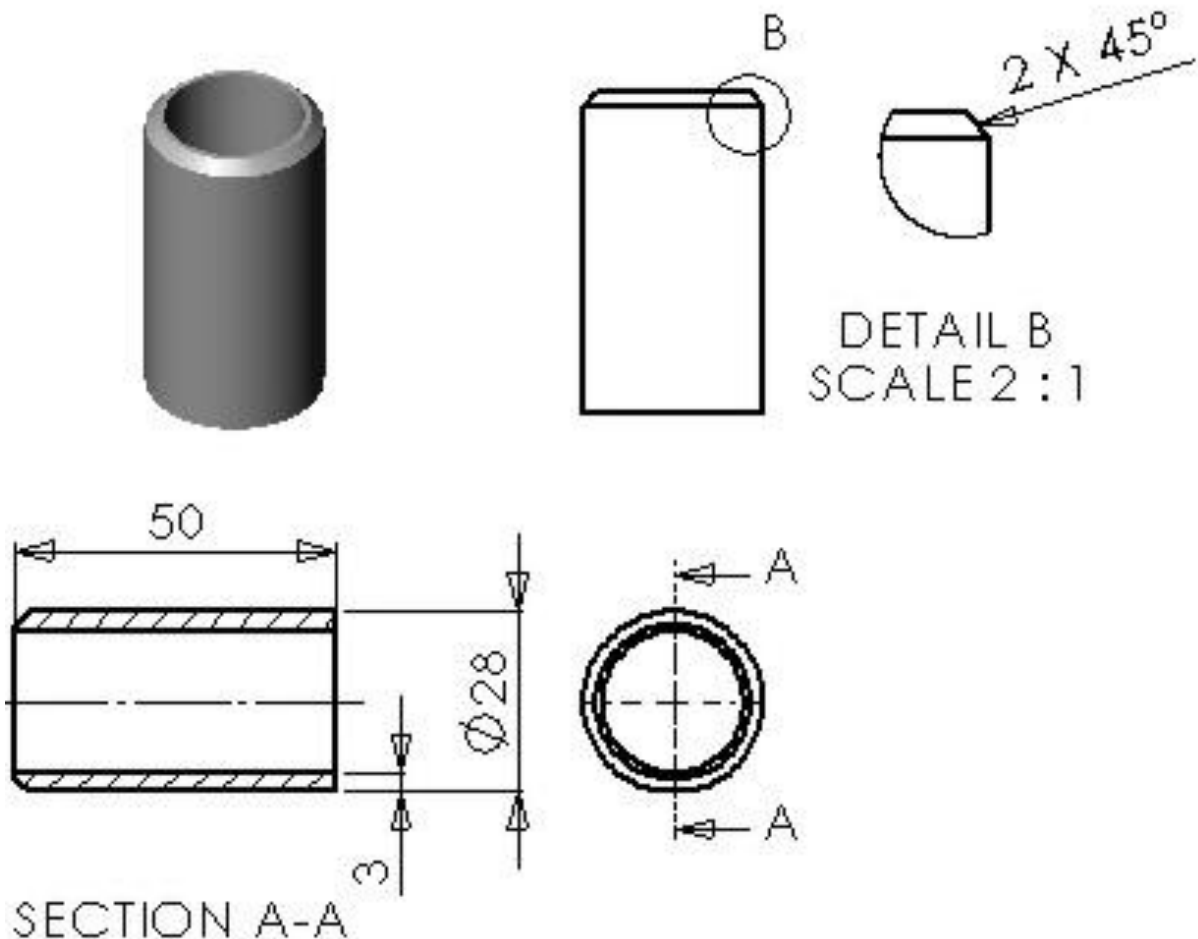
- κάτοψη
- άνοψη
- πλάγια όψη
- τομή.

έτσι ώστε να αποτυπωθούν τα μακροσκοπικά χαρακτηριστικά τους.

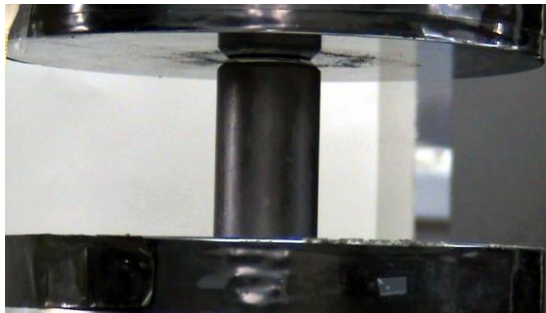


6.6.7. ΔΟΚΙΜΙΟ 7 (με σχηματισμό κωνικότητας προς το εξωτερικό του στομίου)

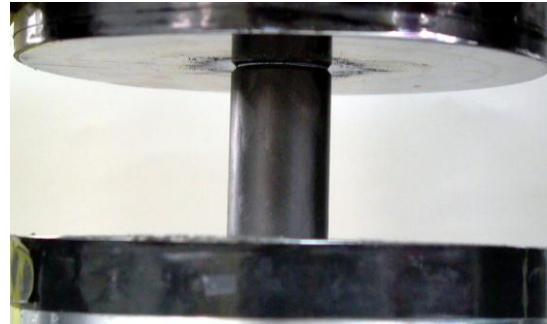
Το δοκίμιο αυτό έχει υποστεί triggering στο ένα του άκρο, και περιλαμβάνει την δημιουργία λοξόμητης γωνίας της τάξεως των 45° προς το εξωτερικό του κυλίνδρου , σε βάθος 2 mm , η οποία βρίσκεται ακριβώς στην περιφέρεια του ενός άκρου. Στο ακόλουθο σχέδιο φαίνεται η μορφή του δοκιμίου πριν το πείραμα με τις διαστάσεις του. Κάτωθεν παρουσιάζονται διαδοχικές φωτογραφίες από την πορεία της κατάρρευσης του υλικού αυτού , οι οποίες λήφθηκαν σε διάφορες φάσεις της καθόδου του εμβόλου. Επίσης, παρουσιάζεται και το διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης που λάβαμε με τη βοήθεια του ειδικού προγράμματος κατά την εκτέλεση του πειράματος της θλίψης. Στο προαναφερθέν διάγραμμα φαίνονται και οι μετατοπίσεις που έχουν συμβεί κατά τις χρονικές στιγμές λήψης των αντίστοιχων φωτογραφιών.



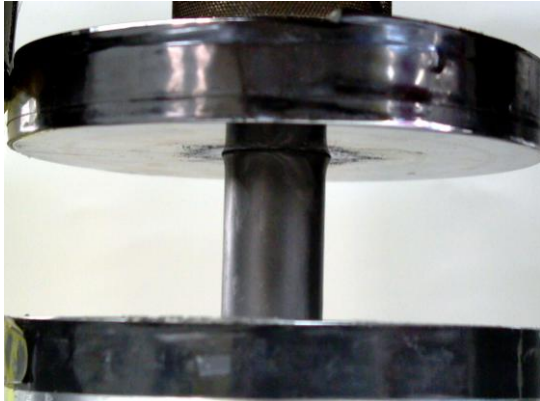
$t_0 = 0s$



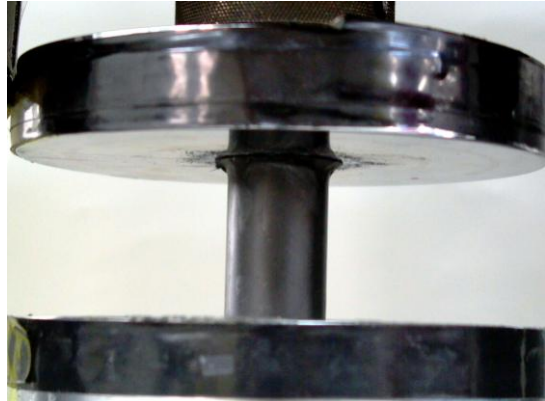
$t_1 = 20s$



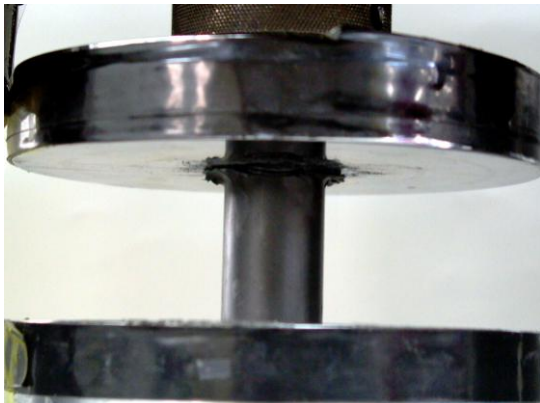
$t_2 = 40s$



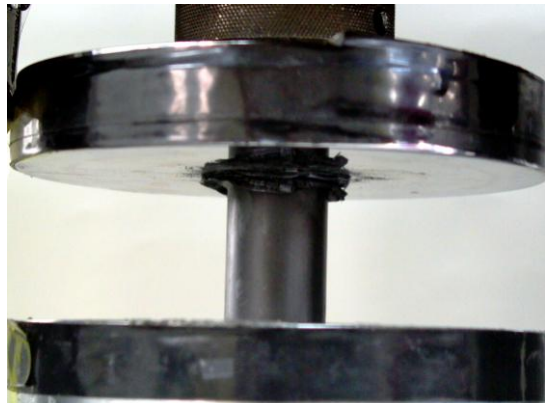
$t_3 = 60s$



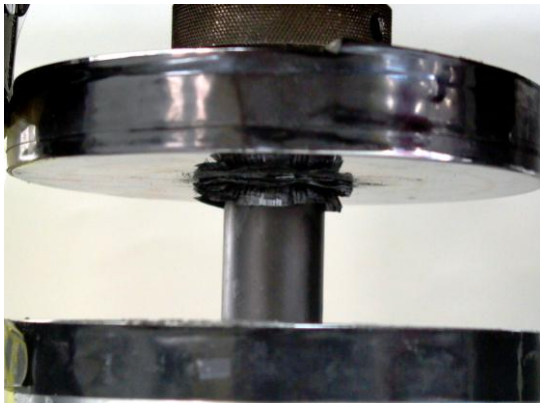
$t_4 = 80s$



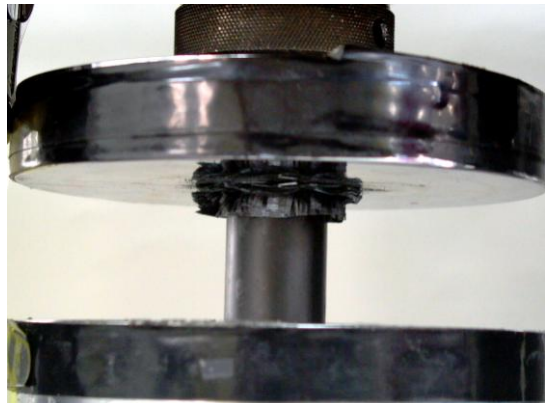
$t_5 = 100s$



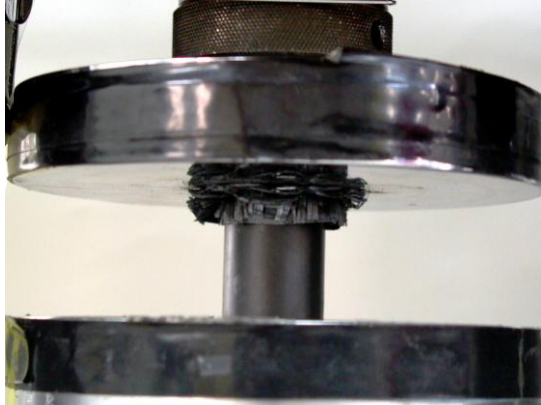
$t_6 = 120s$



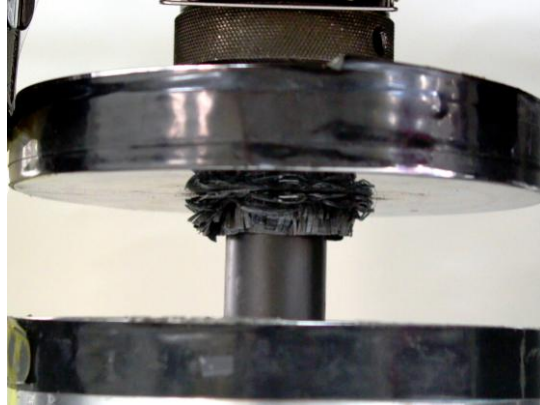
$t_7 = 140s$



t₈ = 160s



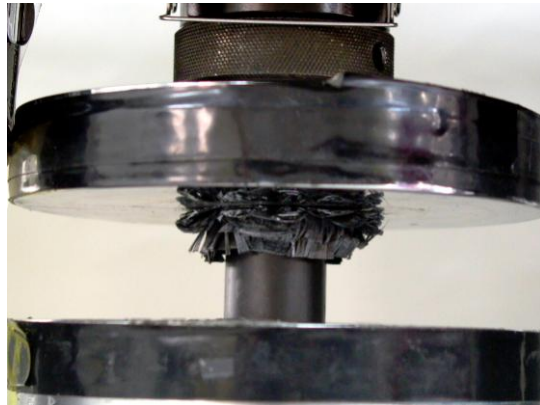
t₉ = 180s



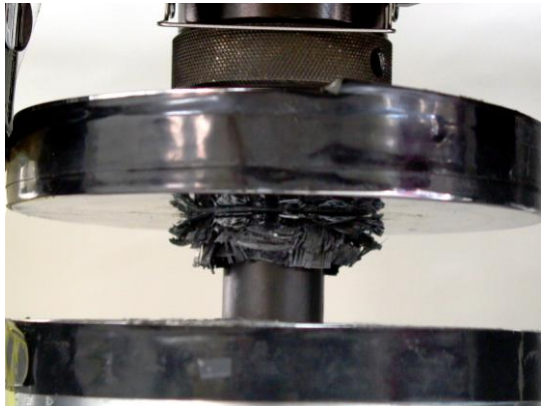
t₁₀ = 200s



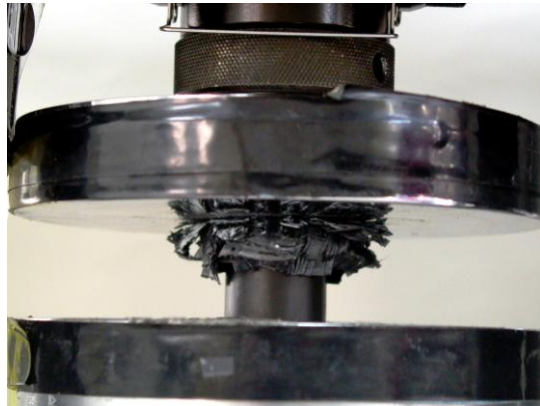
t₁₁ = 220s



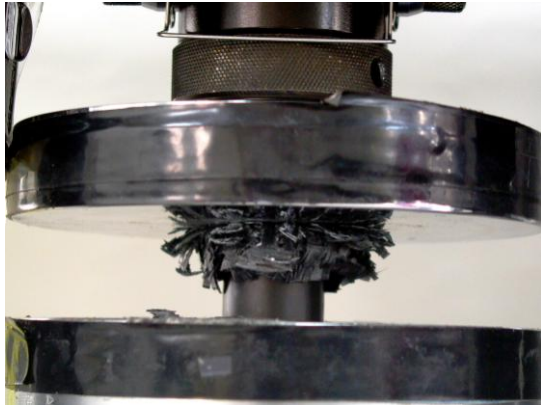
t₁₂ = 240s



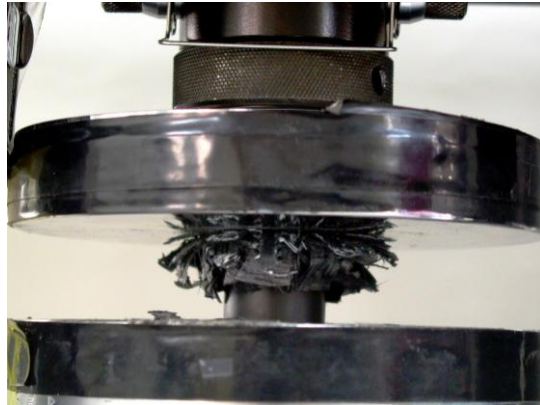
t₁₃ = 260s

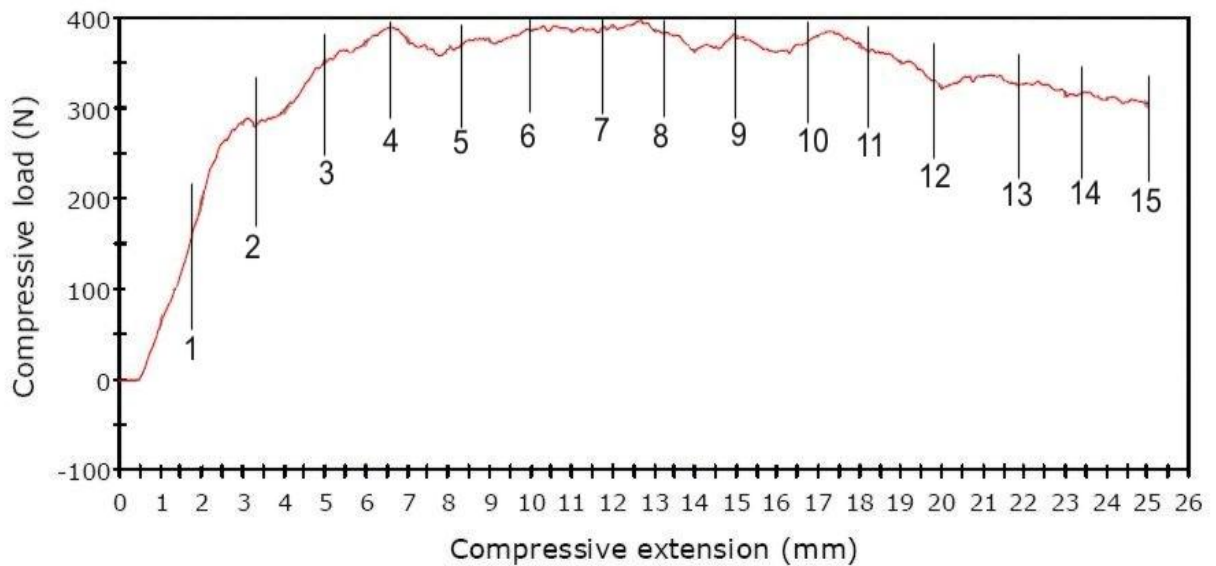


t₁₄ = 280s



t₁₅ = 300s





Σχολιασμός της διαδικασίας κατάρρευσης

- Όπως αναμενόταν, το δοκίμιο κατέρρευσε από την πλευρά που βρίσκονταν οι ατέλειες, και με προοδευτική θραύση.
- Από το διάγραμμα, παρατηρούμε μια ομαλή αύξηση της τιμής του φορτίου όσο αυξάνεται η μετατόπιση, η οποία ακολουθείται από μια πορεία σε υψηλά επίπεδα με κάποιες διακυμάνσεις με μέγιστη τιμή τα 400N. Στο τέλος, μειώνεται το φορτίο σταδιακά, φθάνοντας τα 300N.
- Με βάση την μορφή του διαγράμματος, συμπεραίνουμε επίσης ότι απουσιάζει η ύπαρξη ενός τοπικού μεγίστου στην τιμή του φορτίου. Η κορυφή αυτή δεν είναι έντονη, όσο στα υπόλοιπα δοκίμια, δείχνοντας πως για να καταρρεύσει η συγκεκριμένη ατέλεια, δεν απαιτείται μεγάλη αύξηση στην πρόσδοση φορτίου, συγκριτικά με το υπόλοιπο μέρος του.
- Η μορφή του τελικού δοκιμίου είναι και εδώ οι στρωματώσεις να αποσχίζονται (delamination) και οι μισές να διαφεύγουν προς το εξωτερικό του υλικού, ενώ οι υπόλοιπες συμπιέζονται στο εσωτερικό του σωλήνα.

Στις ακόλουθες φωτογραφίες φαίνεται η τελική εικόνα του δοκιμίου μετά την κατάρρευση στις ακόλουθες όψεις αντιστοίχως:

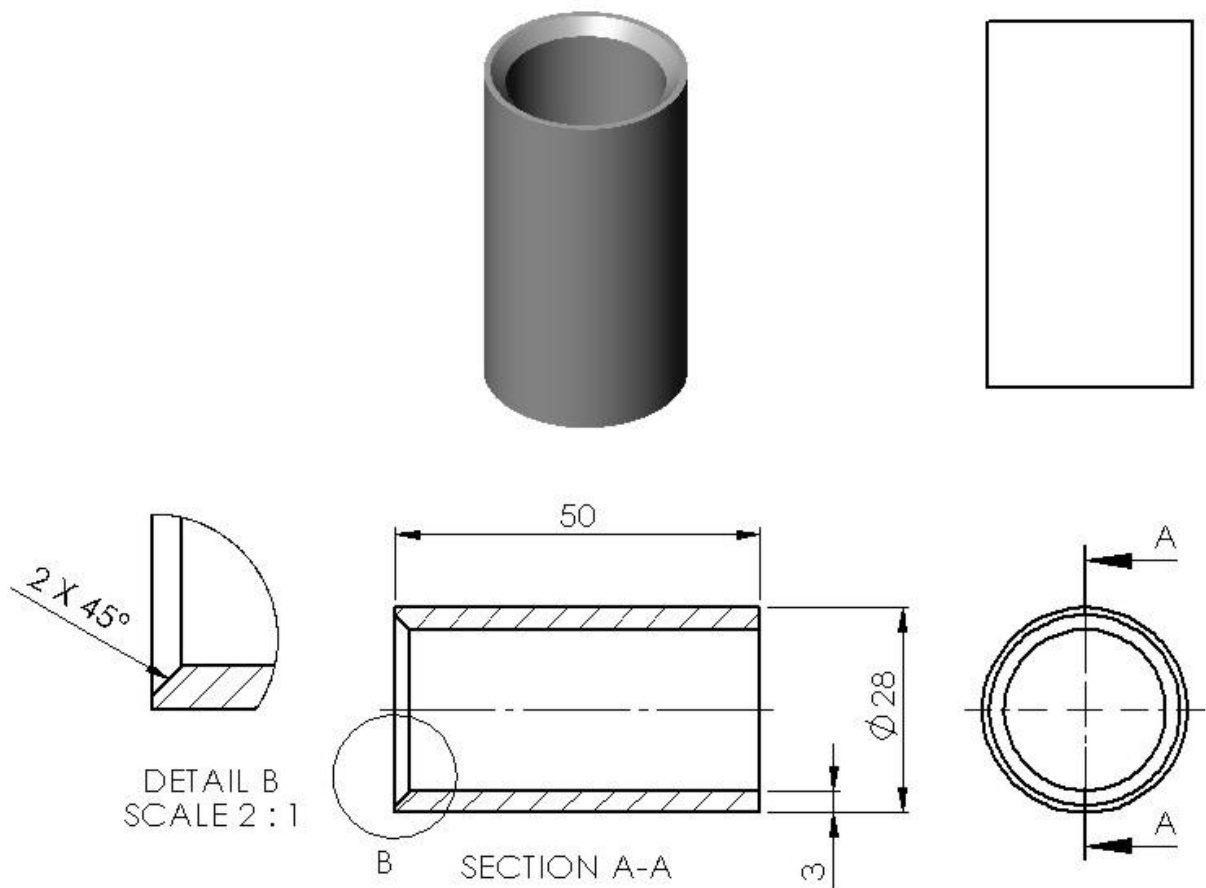
- κάτοψη
- άνοψη
- πλάγια όψη
- τομή.

έτσι ώστε να αποτυπωθούν τα μακροσκοπικά χαρακτηριστικά τους.

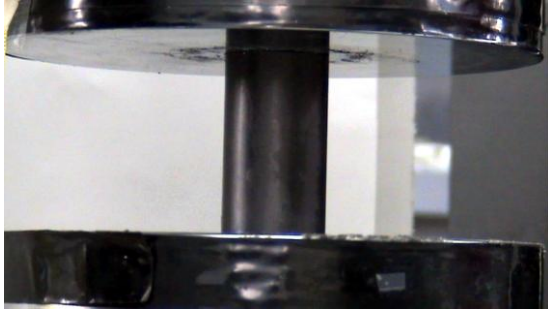


6.6.8. ΔΟΚΙΜΙΟ 8 (με σχηματισμό κωνικότητας προς το εσωτερικό του στομίου)

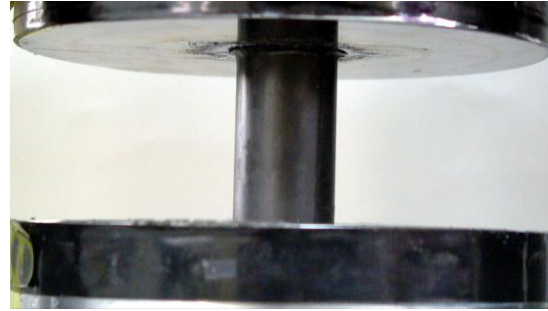
Το δοκίμιο αυτό έχει υποστεί triggering στο ένα του άκρο, και περιλαμβάνει την δημιουργία λοξότμητης γωνίας της τάξεως των 45° προς το εσωτερικό του κυλίνδρου , σε βάθος 2 mm , η οποία βρίσκεται ακριβώς στην περιφέρεια του ενός άκρου. Στο ακόλουθο σχέδιο φαίνεται η μορφή του δοκιμίου πριν το πείραμα με τις διαστάσεις του. Κάτωθεν παρουσιάζονται διαδοχικές φωτογραφίες από την πορεία της κατάρρευσης του υλικού αυτού , οι οποίες λήφθηκαν σε διάφορες φάσεις της καθόδου του εμβόλου. Επίσης, παρουσιάζεται και το διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης που λάβαμε με τη βοήθεια του ειδικού προγράμματος κατά την εκτέλεση του πειράματος της θλίψης. Στο προαναφερθέν διάγραμμα φαίνονται και οι μετατοπίσεις που έχουν συμβεί κατά τις χρονικές στιγμές λήψης των αντίστοιχων φωτογραφιών.



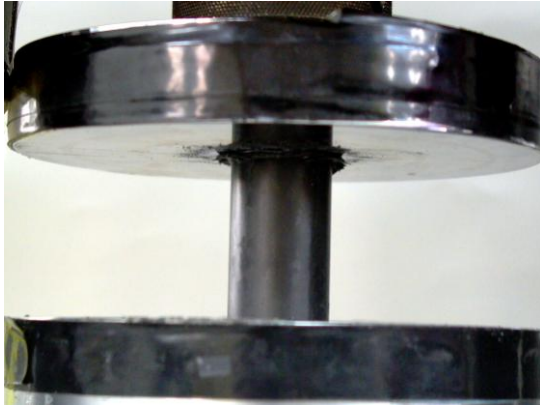
$t_0 = 0s$



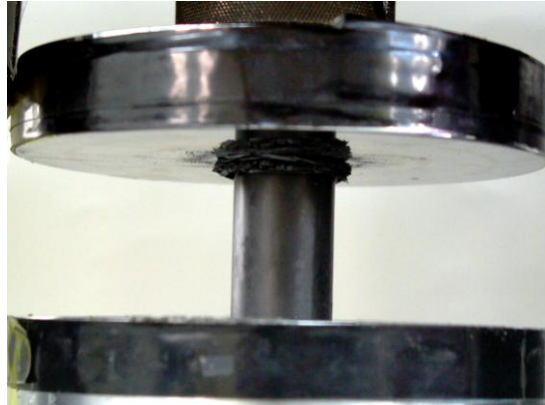
$t_1 = 20s$



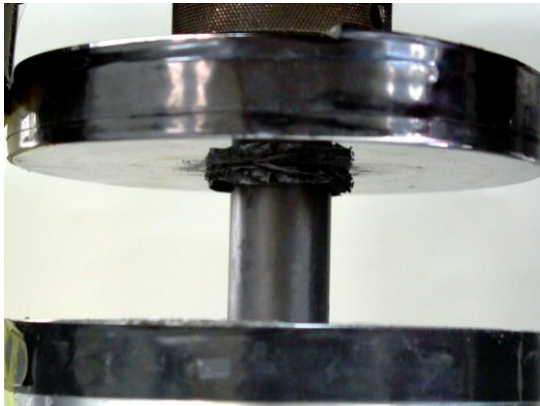
$t_2 = 40s$



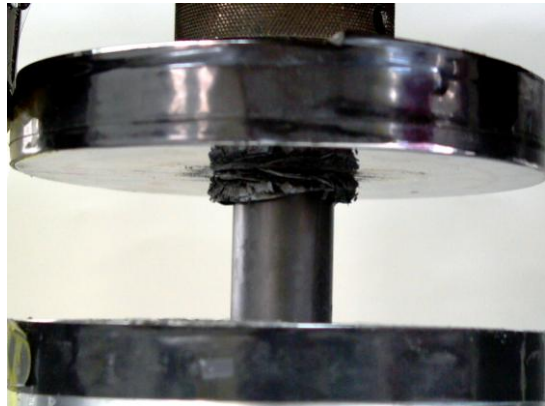
$t_3 = 60s$



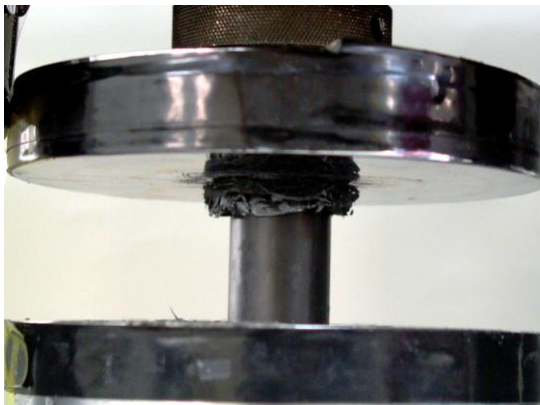
$t_4 = 80s$



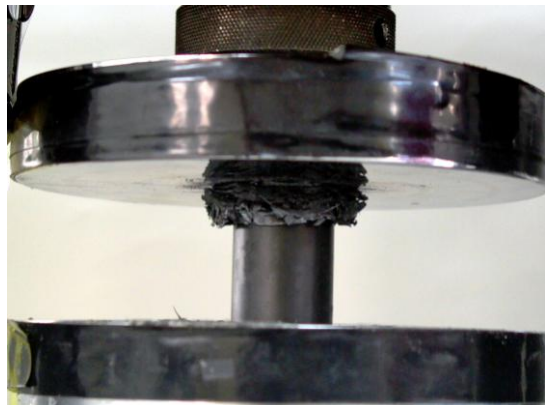
$t_5 = 100s$



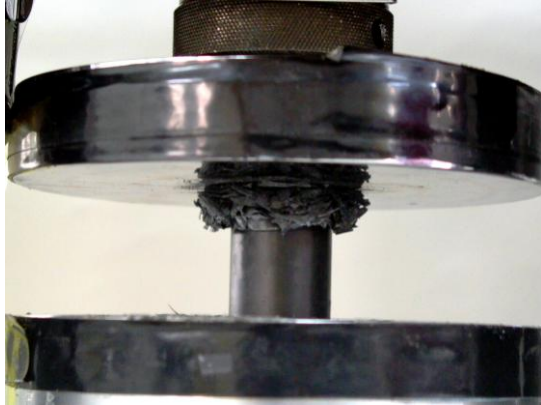
$t_6 = 120s$



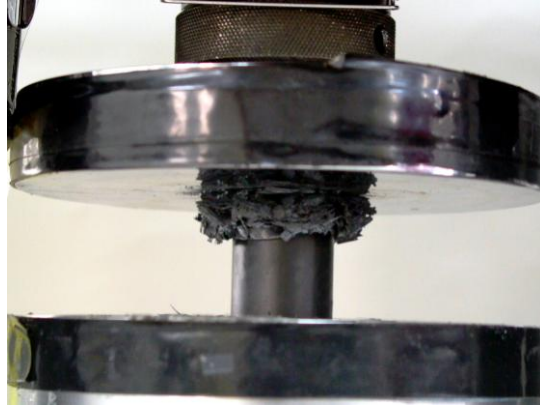
$t_7 = 140s$



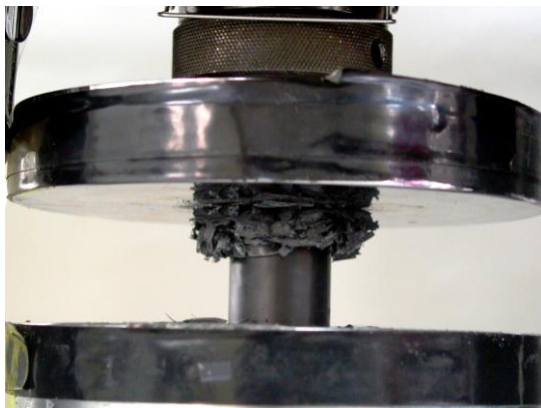
t₈ = 160s



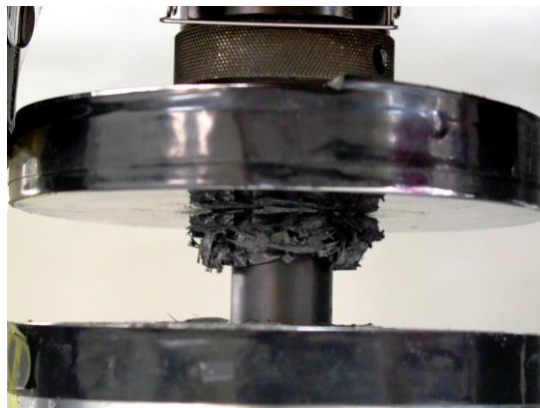
t₉ = 180s



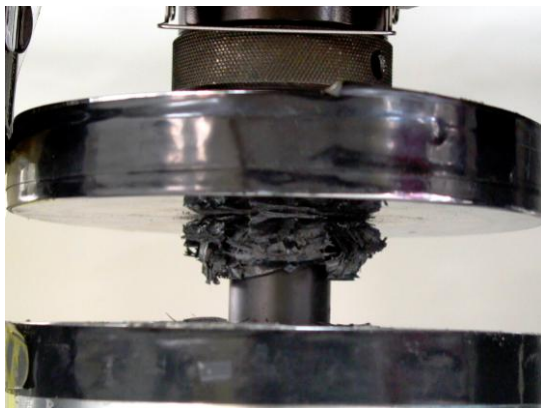
t₁₀ = 200s



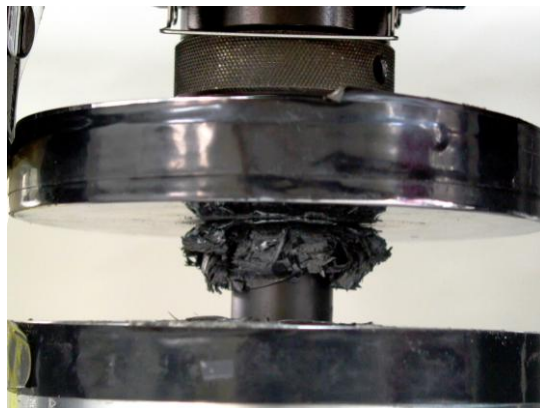
t₁₁ = 220s



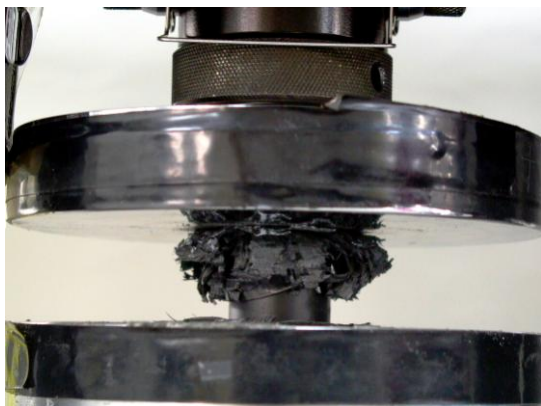
t₁₂ = 240s



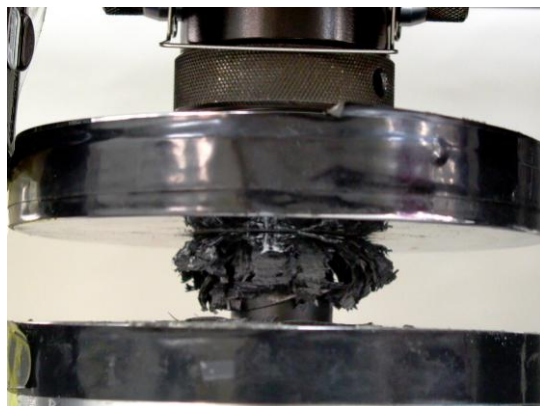
t₁₃ = 260s

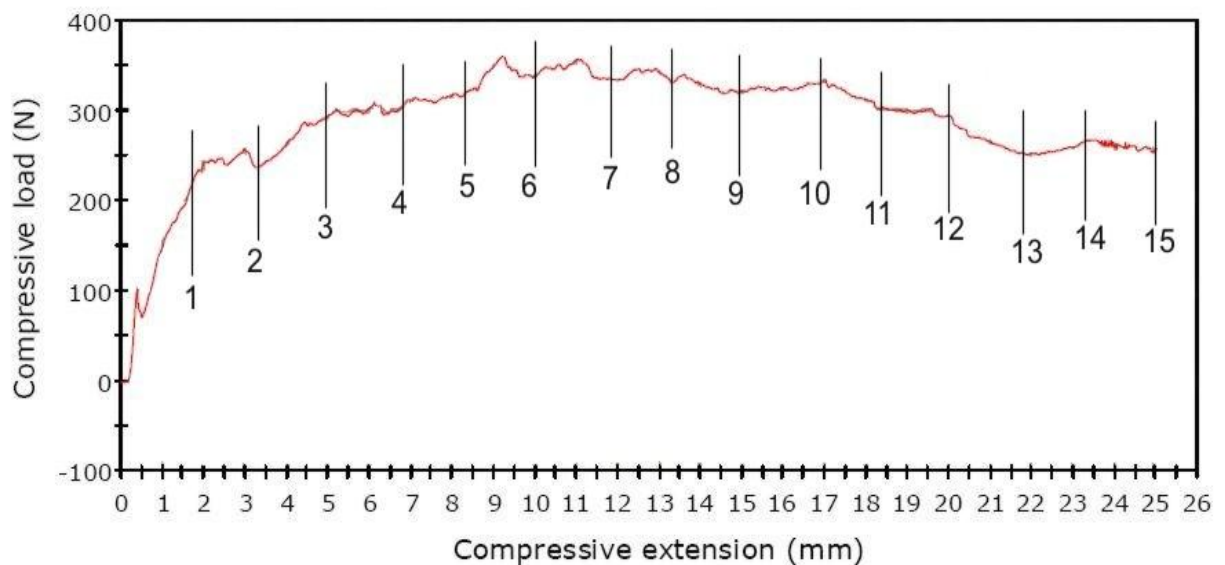


t₁₄ = 280s



t₁₅ = 300s





Σχολιασμός της διαδικασίας κατάρρευσης

- Όπως αναμενόταν, το δοκίμιο κατέρρευσε από την πλευρά που βρίσκονταν οι ατέλειες, και με προοδευτική θραύση.
- Από το διάγραμμα, παρατηρούμε μια ομαλή αύξηση της τιμής του φορτίου όσο αυξάνεται η μετατόπιση, η οποία ακολουθείται από μια πορεία σε υψηλά επίπεδα με κάποιες διακυμάνσεις με μέγιστη τιμή τα 360N. Στο τέλος, μειώνεται το φορτίο σταδιακά, φθάνοντας τα 250N.
- Με βάση την μορφή του διαγράμματος, συμπεραίνουμε επίσης ότι απουσιάζει η ύπαρξη ενός τοπικού μεγίστου στην τιμή του φορτίου. Η κορυφή αυτή δεν είναι έντονη, όσο στα υπόλοιπα δοκίμια, δείχνοντας πως για να καταρρεύσει η συγκεκριμένη ατέλεια, δεν απαιτείται μεγάλη αύξηση στην πρόσδοση φορτίου, συγκριτικά με το υπόλοιπο μέρος του.
- Η μορφή του τελικού δοκιμίου είναι και εδώ οι στρωματώσεις να αποσχίζονται (delamination) και οι μισές να διαφεύγουν προς το εξωτερικό του υλικού, ενώ οι υπόλοιπες συμπιέζονται στο εσωτερικό του σωλήνα.

Στις ακόλουθες φωτογραφίες φαίνεται η τελική εικόνα του δοκιμίου μετά την κατάρρευση στις ακόλουθες όψεις αντιστοίχως:

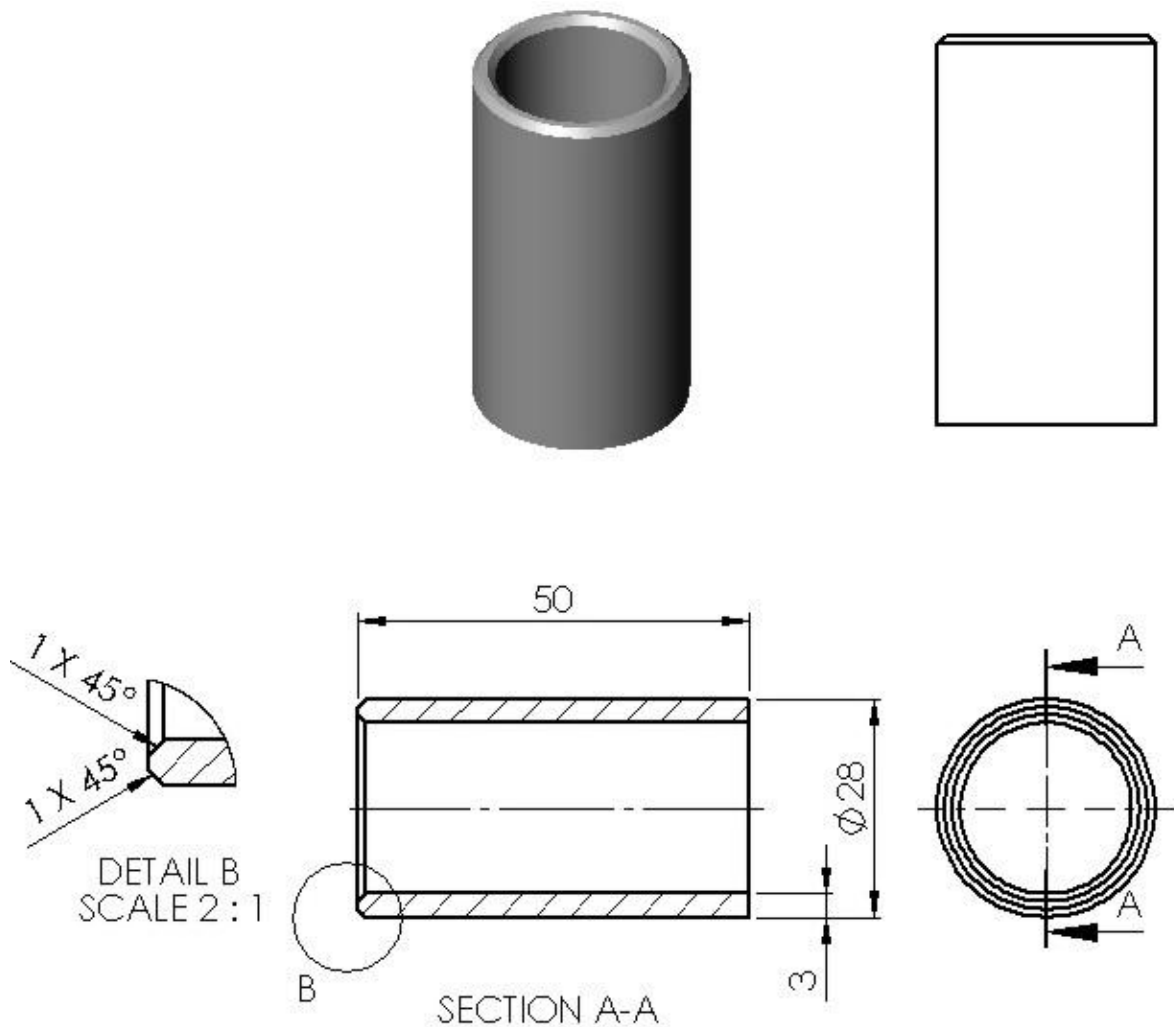
- κάτοψη
- άνοψη
- πλάγια όψη
- τομή.

έτσι ώστε να αποτυπωθούν τα μακροσκοπικά χαρακτηριστικά τους.

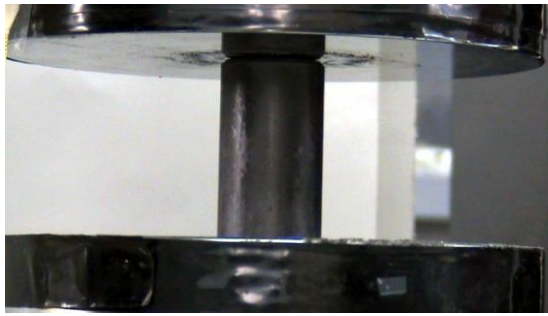


ΔΟΚΙΜΙΟ 9 (με σχηματισμό κωνικότητας και προς το εσωτερικό και προς το εξωτερικό του στομίου)

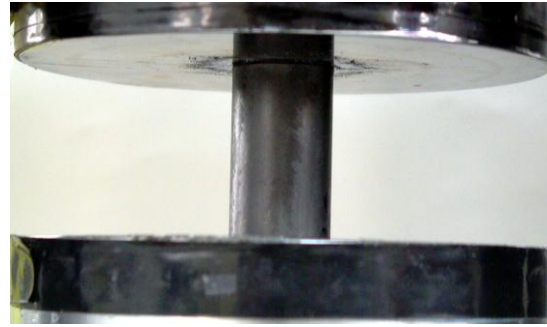
Το δοκίμιο αυτό έχει υποστεί triggering στο ένα του άκρο, και περιλαμβάνει την δημιουργία 2 λοξόμητων γωνιών της τάξεως των 45° , μια προς το εσωτερικό και μια προς το εξωτερικό του κυλίνδρου, σε βάθος 1 mm, οι οποίες βρίσκονται ακριβώς στην περιφέρεια του ενός άκρου. Στο ακόλουθο σχέδιο φαίνεται η μορφή του δοκιμίου πριν το πείραμα με τις διαστάσεις του. Κάτωθεν παρουσιάζονται διαδοχικές φωτογραφίες από την πορεία της κατάρρευσης του υλικού αυτού, οι οποίες λήφθηκαν σε διάφορες φάσεις της καθόδου του εμβόλου. Επίσης, παρουσιάζεται και το διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης που λάβαμε με τη βοήθεια του ειδικού προγράμματος κατά την εκτέλεση του πειράματος της θλίψης. Στο προαναφερθέν διάγραμμα φαίνονται και οι μετατοπίσεις που έχουν συμβεί κατά τις χρονικές στιγμές λήψης των αντίστοιχων φωτογραφιών.



$t_0 = 0s$



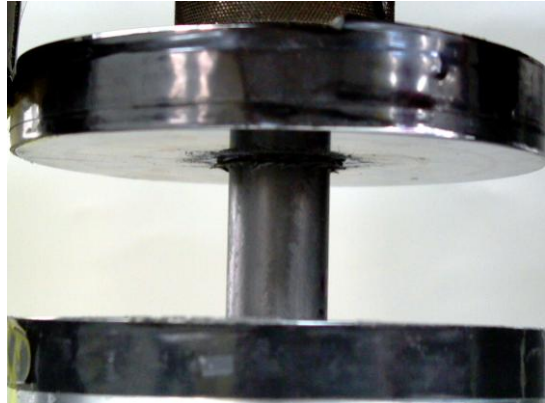
$t_1 = 20s$



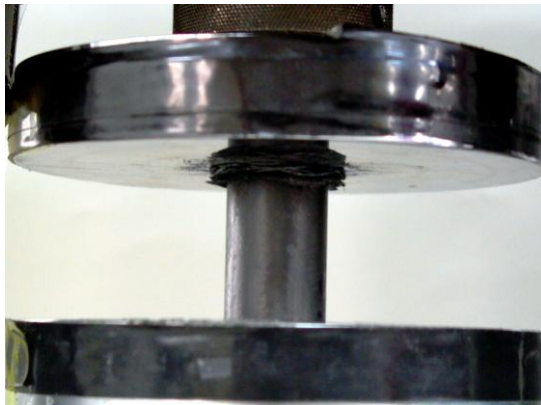
$t_2 = 40s$



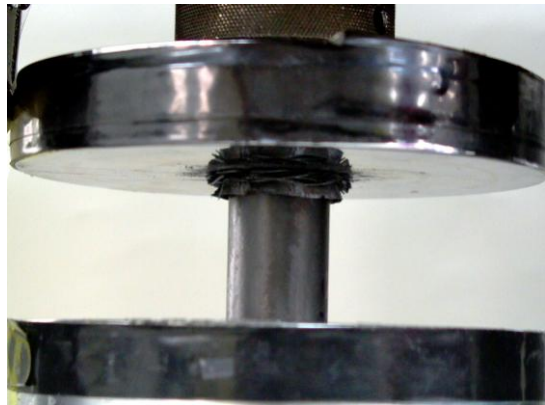
$t_3 = 60s$



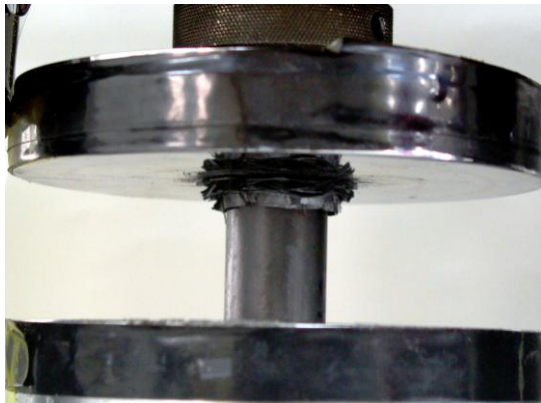
$t_4 = 80s$



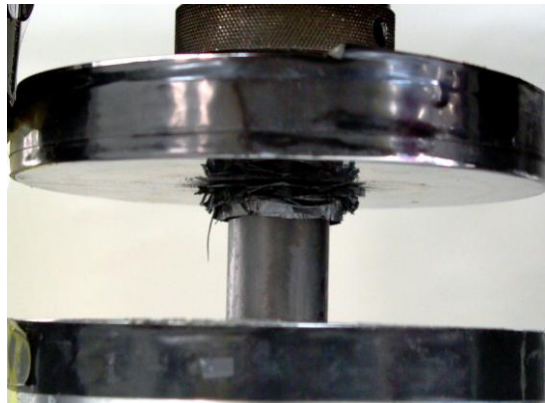
$t_5 = 100s$



$t_6 = 120s$



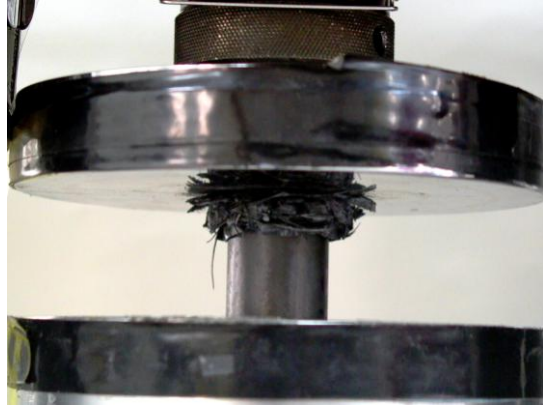
$t_7 = 140s$



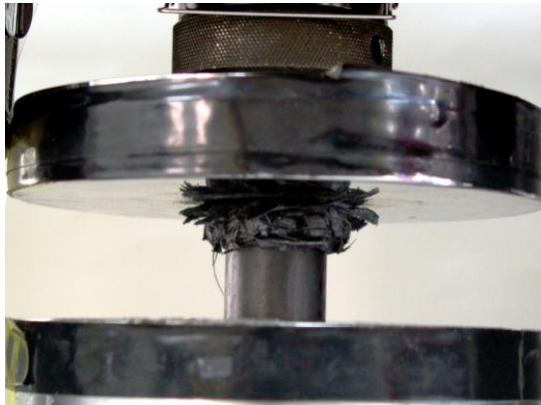
t₈ = 160s



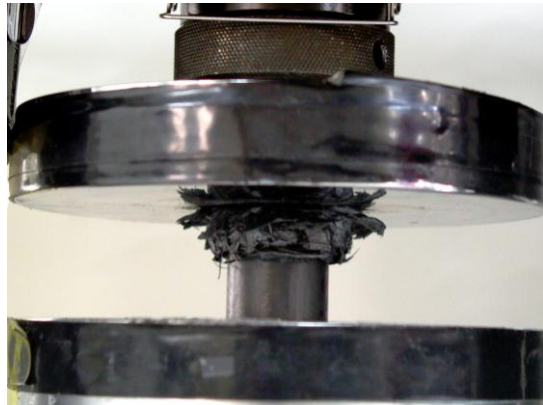
t₉ = 180s



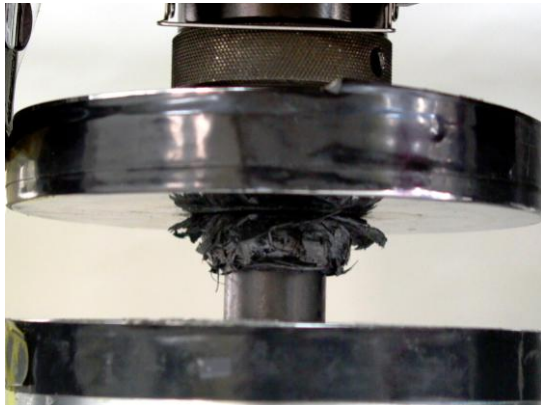
t₁₀ = 200s



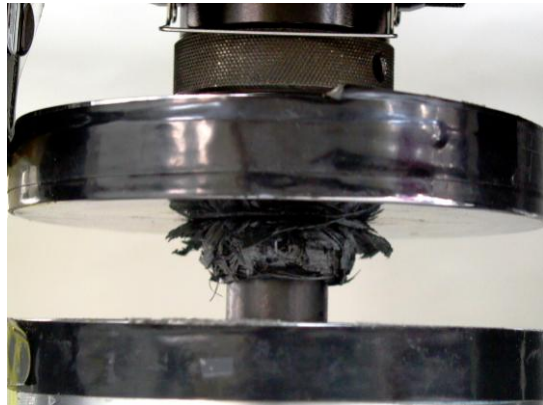
t₁₁ = 220s



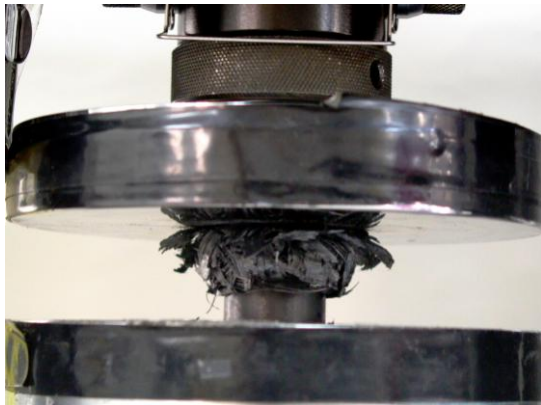
t₁₂ = 240s



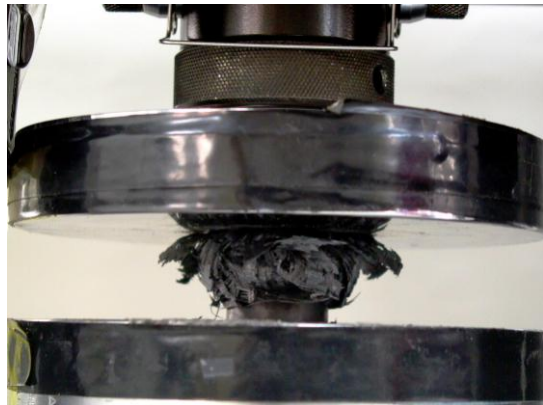
t₁₃ = 260s

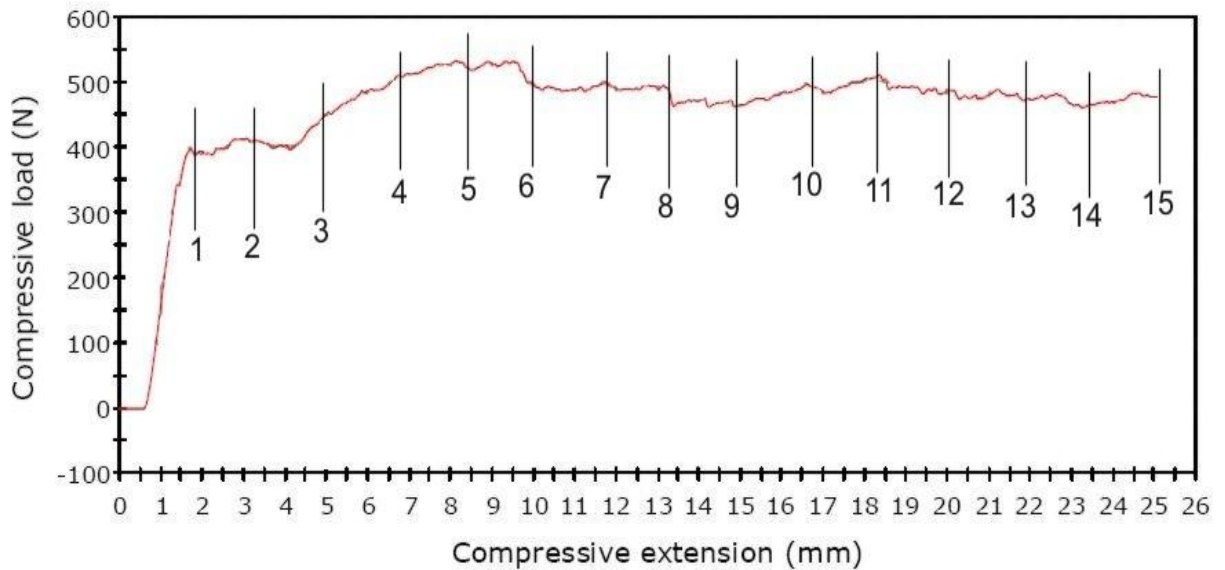


t₁₄ = 280s



t₁₅ = 300s





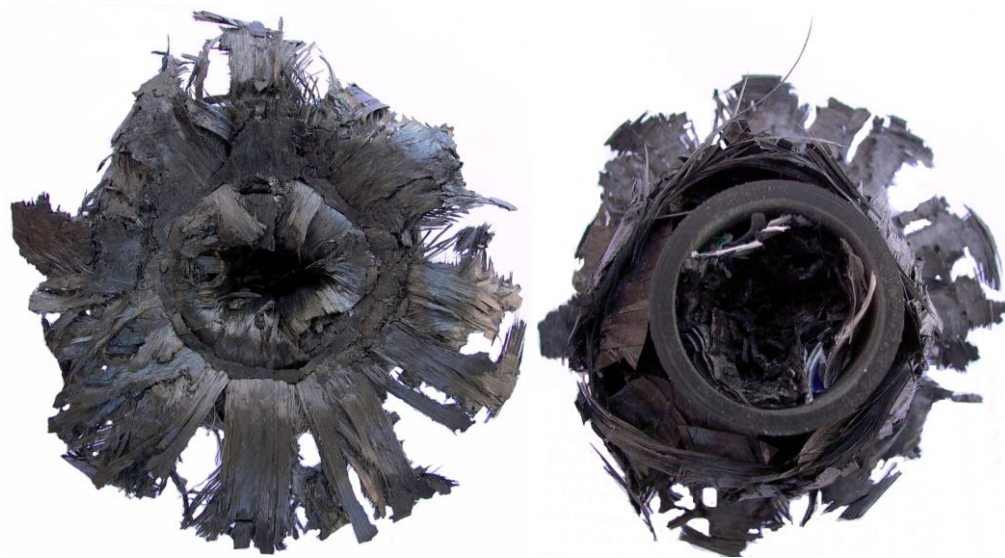
Σχολιασμός της διαδικασίας κατάρρευσης

- Όπως αναμενόταν, το δοκίμιο κατέρρευσε από την πλευρά που βρίσκονταν οι ατέλειες, και με προοδευτική θραύση.
- Από το διάγραμμα, παρατηρούμε μια ομαλή αύξηση της τιμής του φορτίου όσο αυξάνεται η μετατόπιση, η οποία ακολουθείται από μια πορεία σχεδόν σταθερή για 3mm γύρω στα 400N φορτίου. Όσο η μετατόπιση αυξάνεται, η πορεία του φορτίου αυξάνεται ομαλά μέχρι την μέγιστη τιμή των 530N. Στο τέλος, το φορτίο διατηρεί μια σταθερή σχεδόν πορεία για 15mm περίπου, γύρω στα 500N.
- Με βάση την μορφή του διαγράμματος, συμπεραίνουμε επίσης ότι απουσιάζει η ύπαρξη ενός τοπικού μεγίστου στην τιμή του φορτίου. Η κορυφή αυτή δεν είναι έντονη, όσο στα υπόλοιπα δοκίμια, δείχνοντας πως για να καταρρεύσει η συγκεκριμένη ατέλεια, δεν απαιτείται μεγάλη αύξηση στην πρόσδοση φορτίου, συγκριτικά με το υπόλοιπο μέρος του.
- Επίσης, στο συγκεκριμένο δοκίμιο συναντούμε και περιοχές όπου το φορτίο διατηρείται σχεδόν σταθερό, γεγονός το οποίο το διαφοροποιεί συγκριτικά με τα υπόλοιπα δοκίμια.
- Η μορφή του τελικού δοκιμίου είναι και εδώ οι στρωματώσεις να αποσχίζονται (delamination) και οι μισές να διαφεύγουν προς το εξωτερικό του υλικού, ενώ οι υπόλοιπες συμπιέζονται στο εσωτερικό του σωλήνα.

Στις ακόλουθες φωτογραφίες φαίνεται η τελική εικόνα του δοκιμίου μετά την κατάρρευση στις ακόλουθες όψεις αντιστοίχως:

- κάτοψη
- άνοψη
- πλάγια όψη
- τομή.

έτσι ώστε να αποτυπωθούν τα μακροσκοπικά χαρακτηριστικά τους.



6.7. Μικρογραφική ανάλυση

6.7.1. Διαδικασία

Τα τελικά δοκίμια που ελήφθησαν από την παραπάνω διαδικασία, κόπηκαν κατά μήκος στο ένα τέταρτο του μεγέθους τους. Στην συνέχεια, τοποθετήθηκαν σε καλούπια, όπου και σταθεροποιήθηκαν με τη βοήθεια ρητίνης ψυχρού πολυμερισμού, ούτως ώστε να είναι δυνατή η περεταίρω επεξεργασία τους. Ακολούθησε λείανση που έγινε σε 8 στάδια με τη βοήθεια σειράς από γυαλόχαρτα (120, 320, 500, 800, 1200 και 2400) με περιστροφική ταχύτητα των δίσκων του λειαντικού 300 rpm. Η λείανση των δοκιμίων έγινε σε ειδική μηχανή λείανσης (Σχήμα 6.7.1) τύπου STRUERS (DAP-V , Pendemin – 2) . Με τον τρόπο αυτό μπορούμε να παρατηρήσουμε στο μικροσκόπιο (Σχήμα 6.7.2) τις ατέλειες που έχουν δημιουργηθεί σε κάθε δοκίμιο μετά την κατάρρευσή του.



Σχήμα 6.7.1

6.7.2. Παρατηρήσεις

Μετά από διεξοδική παρατήρηση των δειγμάτων που ελήφθησαν από τα κατεστραμμένα δοκίμια, καταλήξαμε στις ακόλουθες επισημάνσεις.

Ο μικρομηχανισμός αστοχίας των κυλινδρικών δοκιμίων μας που υπόκεινται σε αξονική στατική καταπόνηση χαρακτηρίζεται κύρια από:

- Εμφάνιση μιας ευκρινούς ζώνης παραμόρφωσης, η οποία μετατοπίζεται αξονικά προς το μέσο (κατά μήκος) του δοκιμίου (ταυτόχρονα με την επιβολή περεταίρω φόρτισης και την μείωση του ύψους του δοκιμίου), διατηρώντας όμως τα όριά της σταθερά. Το κύριο χαρακτηριστικό της είναι η ύπαρξη μιας δακτυλιοειδούς σφήνας κωνικής διατομής από κονιοποιημένο υλικό, η οποία πιέζει αξονικά προς τα κάτω προκαλώντας τη δημιουργία και τη διάδοση μιας κεντρικής κύριας ρωγμής στο μέσο του τοιχώματος του σωλήνα.



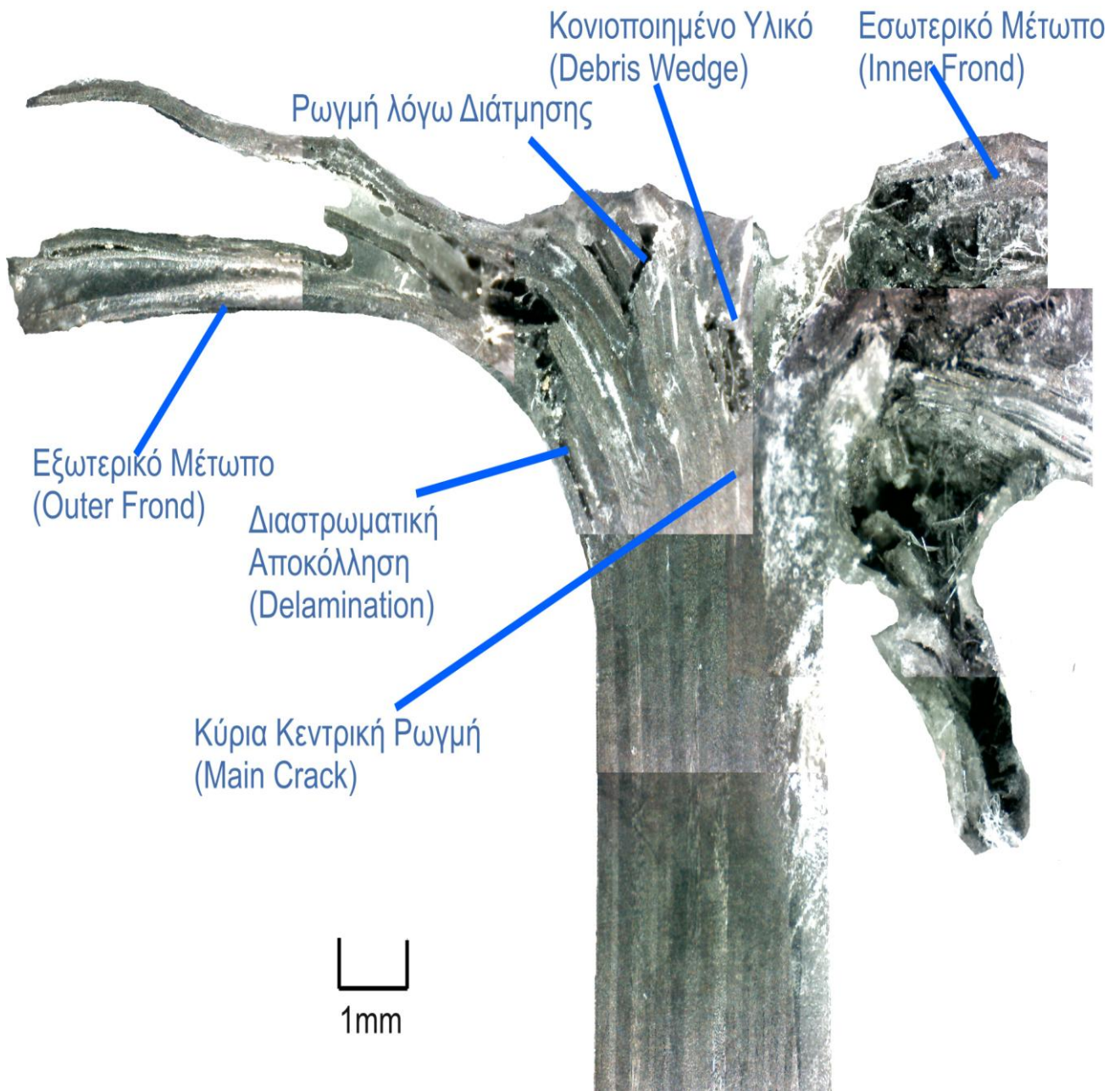
Σχήμα 6.7.2

- Αρχική ζώνη θραύσης, η οποία σχηματίζεται και εξελίσσεται στην συνέχεια από την περαιτέρω διείσδυση της σχηματιζόμενης σφήνας από κονιοποιημένο (θρυμματισμένο) υλικό, μεταπίπτει σε μια σταθερά κινούμενη εσωτερική ρηγματώση μέσα στο τοίχωμα του δοκιμίου καθ' όλη τη διάρκεια επιβολής της εξωτερικής φόρτισης, προκαλώντας έτσι τον διαχωρισμό των στρώσεων σε δύο δέσμες σχεδόν ίσου πάχους στην περιοχή της αστοχίας.
- Οι δέσμες αυτές εξαπλώνονται ακτινικά προς το εσωτερικό και το εξωτερικό μέρος του τοιχώματος. Οι δύο ισοπαχείς νεοδημιουργηθείσες δέσμες στρώσεων αντιστέκονται στο εφαρμοζόμενο φορτίο μέχρι μια κρίσιμη τιμή και τελικά κάμπτονται ή λυγίζουν.
- Σαν αποτέλεσμα του ανωτέρω μηχανισμού μικρο-θραύσεων, έχουμε τον σχηματισμό της τριγωνικής σφήνας που αποτελείται από λεπτό θρυμματισμένο υλικό που επικάθεται στο πάνω άκρο της κεντρικής ρωγμής και εφάπτεται στην επιφάνεια του εμβόλου. Η σφήνα αυτή αποτελείται από μικρά κομμάτια θραυσμένων ινών άνθρακα αναμεμιγμένων με κονιοποιημένη ρητίνη.
- Το εσωτερικό μέτωπο ινών κάμπτεται σημαντικά κατά μια γωνία σχεδόν 90° ή και ακόμη μεγαλύτερες, ως προς τον κεντρικό άξονα. Στα σημεία κλίσης του μετώπου αυτού αναπτύσσονται διατμητικές ζώνες προκαλώντας αστοχία του υλικού με τη δημιουργία και εξέλιξη ρωγμών κατά τις διευθύνσεις αυτές, ενώ το υπόλοιπο μέρος του σωλήνα παραμένει ουσιαστικά αναλλοίωτο.

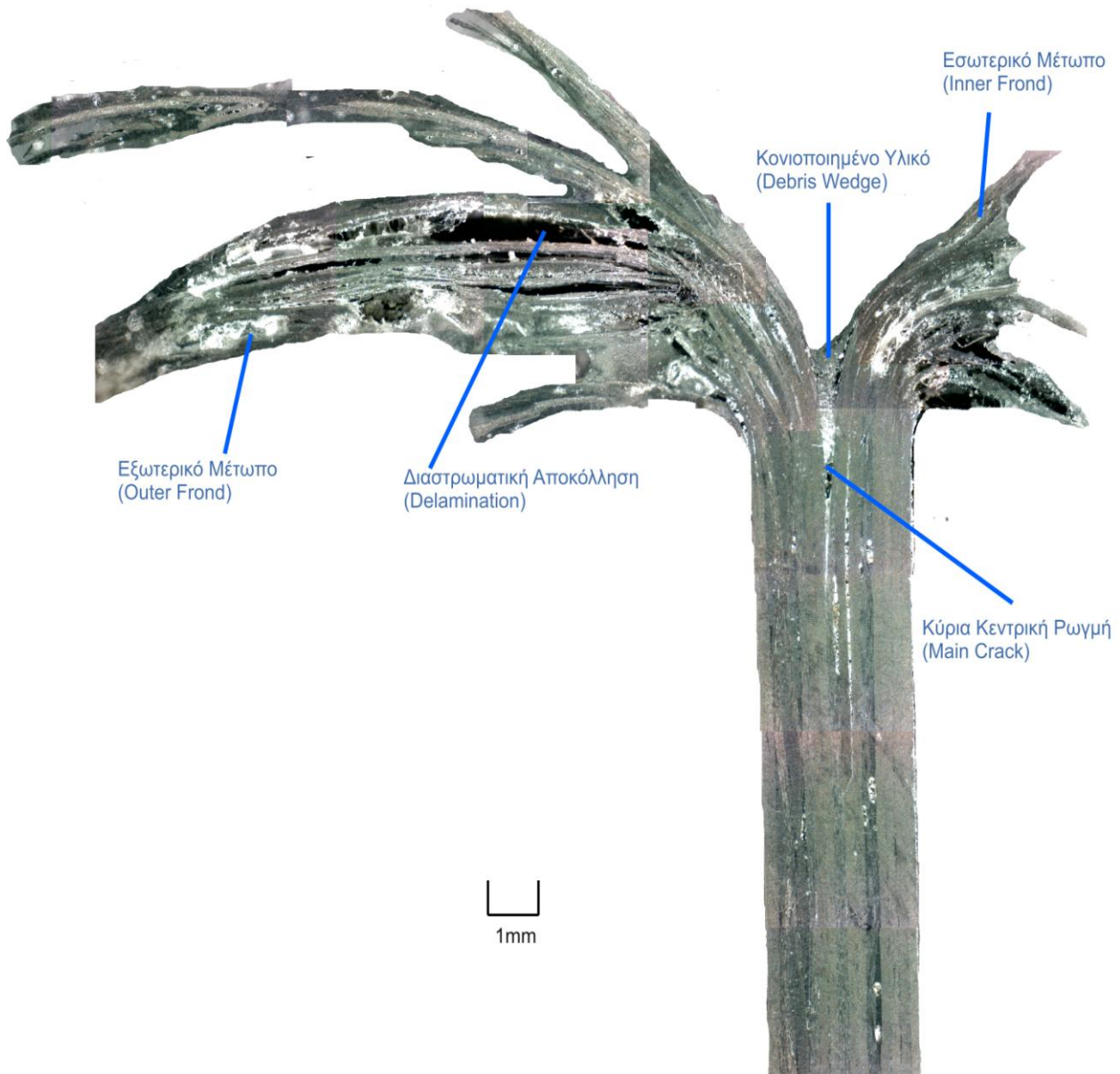
- Στα εξωτερικά μέτωπα διαμήκεις ρωγμές οδηγούν σε δευτερεύοντες διαχωρισμούς των ινών του ήδη παραμορφωμένου μέρους του σωλήνα και σε πολλαπλά “ξεφλουδίσματα” των άκρων, χωρίς όμως να επηρεάζουν την κεντρική ρωγμή. Ρωγμές, οι οποίες διαδίδονται παράλληλα προς την αξονική διεύθυνση, προκαλούν στις διαμήκεις ίνες τοπικό διαχωρισμό, ενώ στις εγκάρσιες ίνες αποκόλλησή τους από την μήτρα και λύσιμο του μεταξύ τους δεσμού.
- Διάδοση της κύριας εσωτερικής ρωγμής κατά την αξονική διεύθυνση στο μέσο του τοιχώματος του κελύφους. Οι διαστάσεις της ρωγμής εξαρτώνται από τις ιδιότητες του υλικού, τον αριθμό των στρώσεων, καθώς και από τις συνθήκες φόρτισης (στατική ή δυναμική καταπόνηση).
- Εκτεταμένη διαστρωματική αποκόλληση (delamination) στα μέτωπα που αποκτούν μικρή ακτίνα καμπυλότητας κατά την είσοδο της σφήνας.
- Καμπτική αστοχία (flexural damage) στα όρια της διαστρωματικής αποκόλλησης με τη μορφή πολλαπλών ακτινικών ρωγμών στις διπλώσεις που παρουσιάζονται στα μέτωπα.
- Αξονική διαρρηγμάτωση των μετώπων (axial splitting). Ο αριθμός των αξονικών διαρρηγματώσεων εξαρτάται από τη γεωμετρία του κελύφους (για παράδειγμα, στην περίπτωση των κυλινδρικών κελυφών εξαρτάται από την διάμετρο του δοκιμίου, ενώ στην περίπτωση των κελυφών τετραγωνικής διατομής το πρόβλημα είναι πιο απλό αφού οι αξονικές διαρρηγματώσεις εμφανίζονται μόνο στις θέσεις των ακμών).
- Πολλαπλές διαμήκεις ρωγμές μέσα στις διπλώσεις των μετώπων καθώς αυτά τείνουν να γίνουν επίπεδα κατά την καταπόνηση.

Παρακάτω παρτίθενται οι φωτογραφίες που ελήφθησαν από το μικροσκόπιο για καθένα από τα δοκίμια, όπου και επισημαίνονται οι αστοχίες που παρατηρούνται.

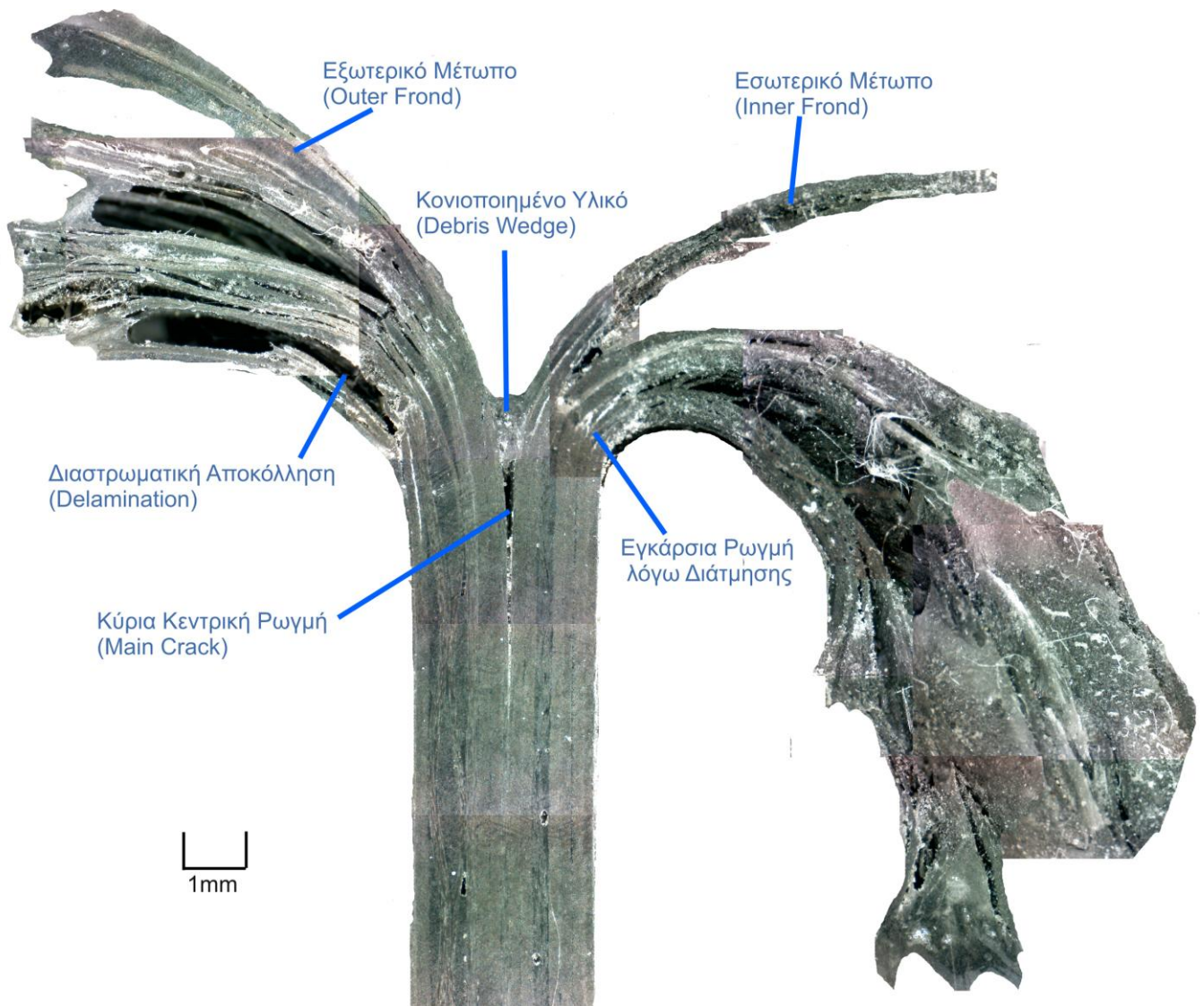
ΔΟΚΙΜΙΟ 1



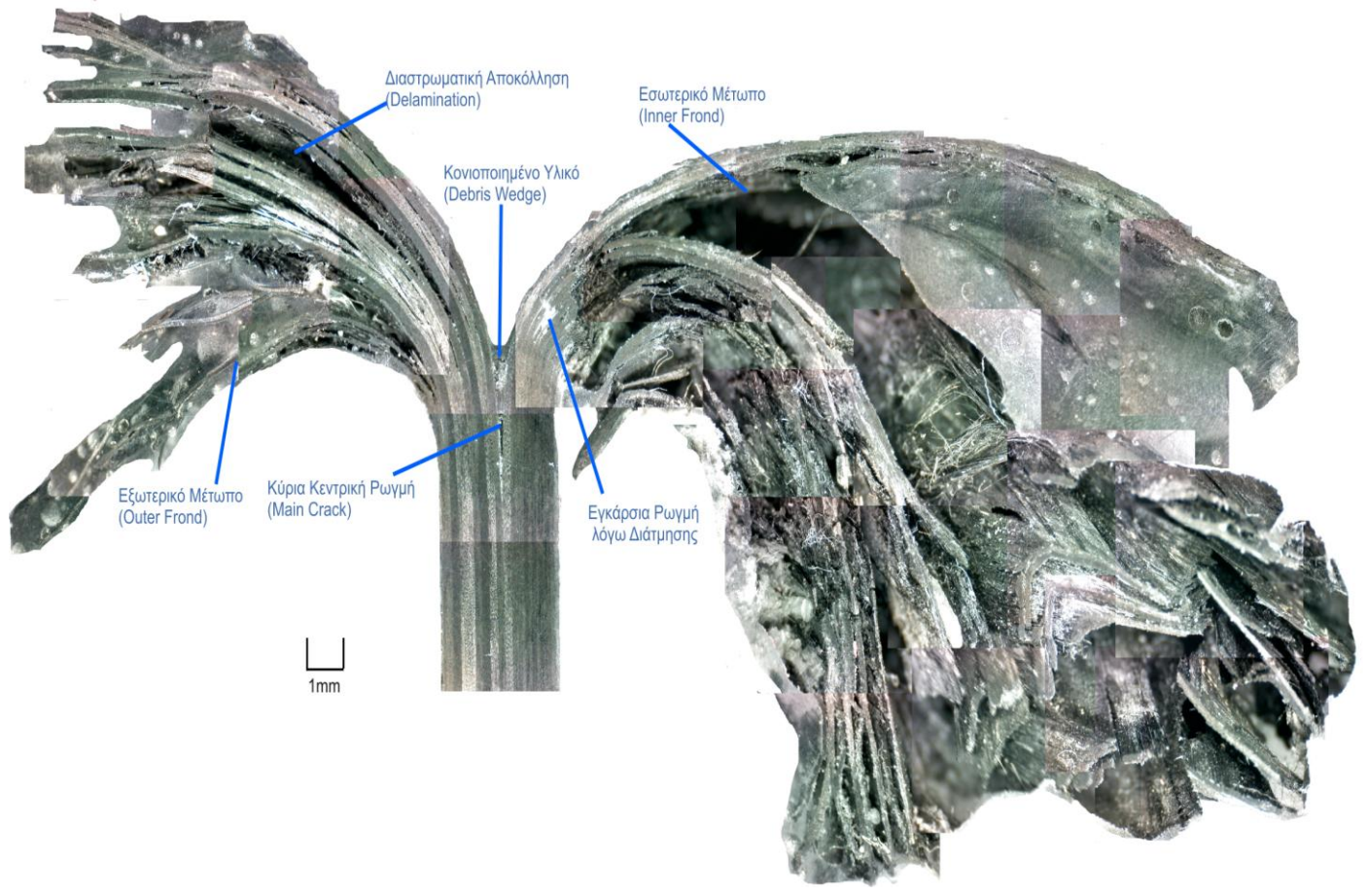
ΔΟΚΙΜΙΟ 2



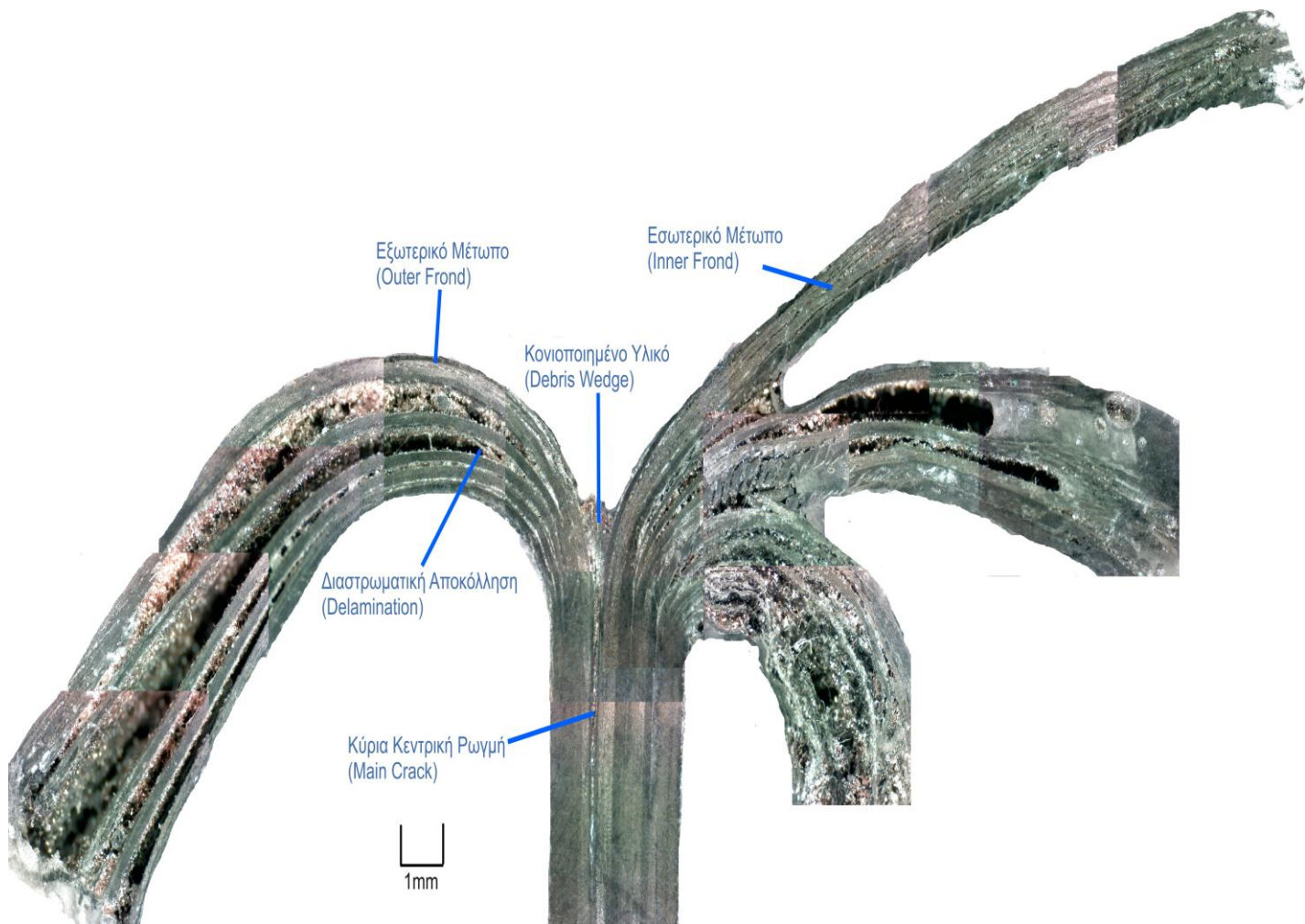
ΔΟΚΙΜΙΟ 3



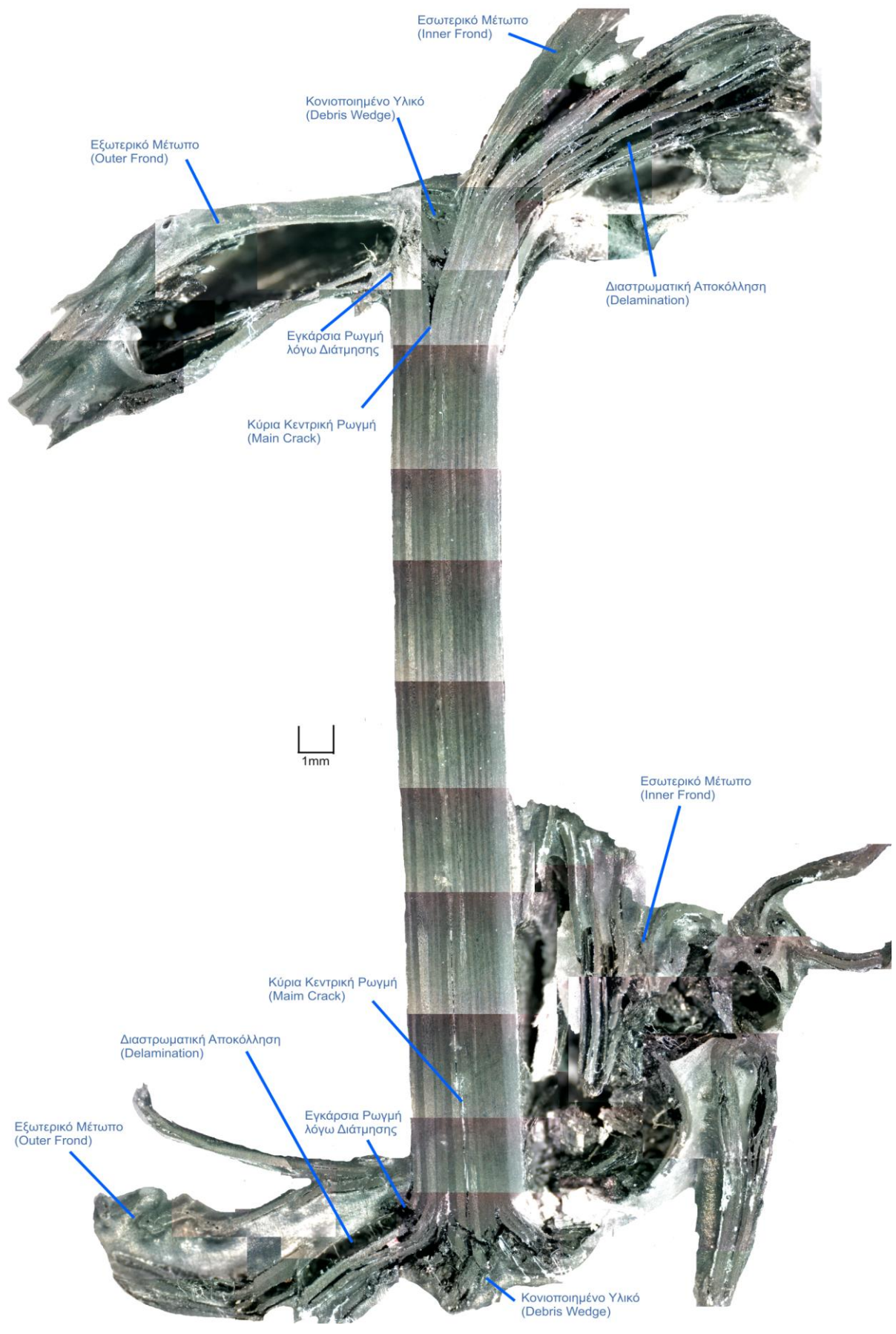
ΔΟΚΙΜΙΟ 4



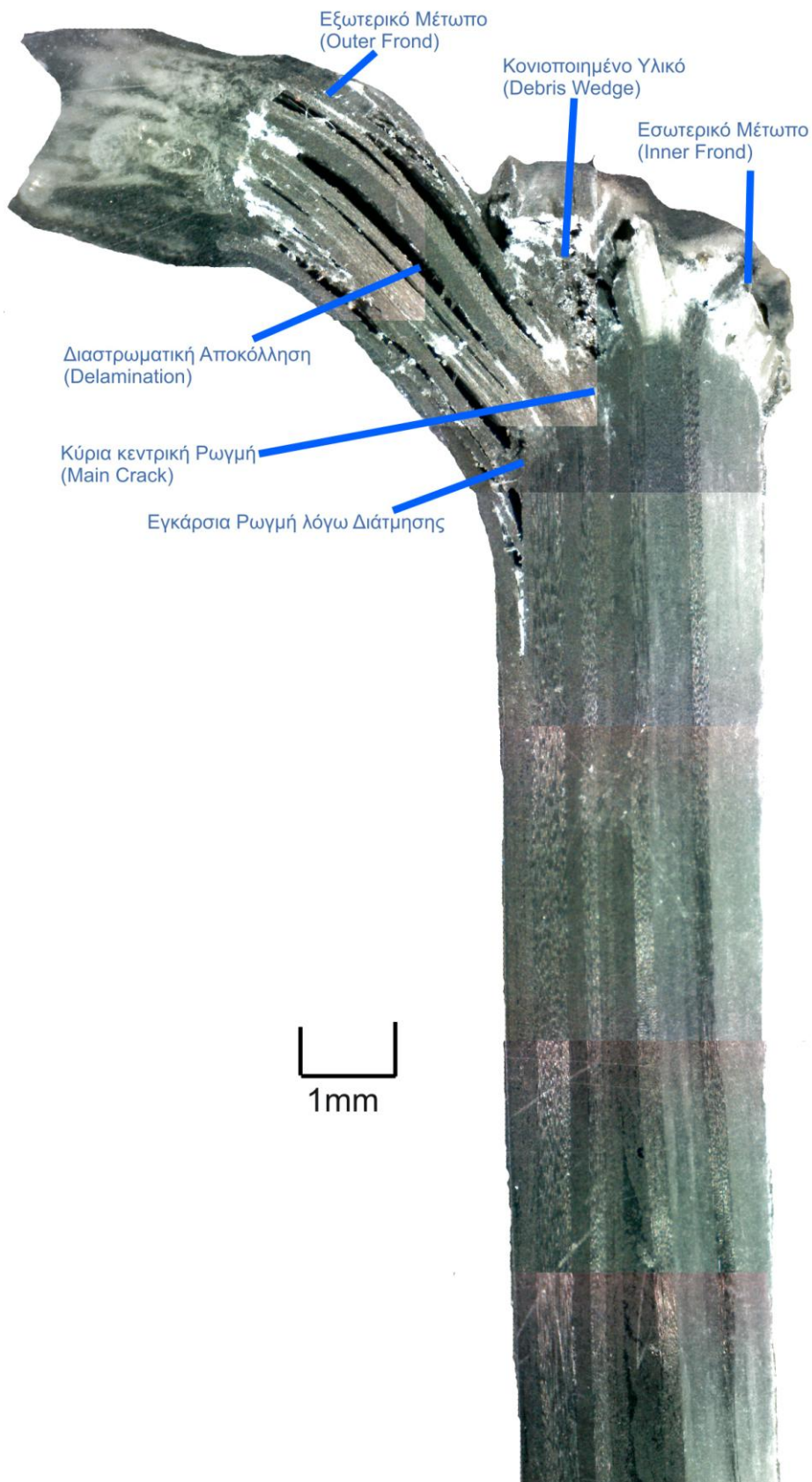
ΔΟΚΙΜΙΟ 5



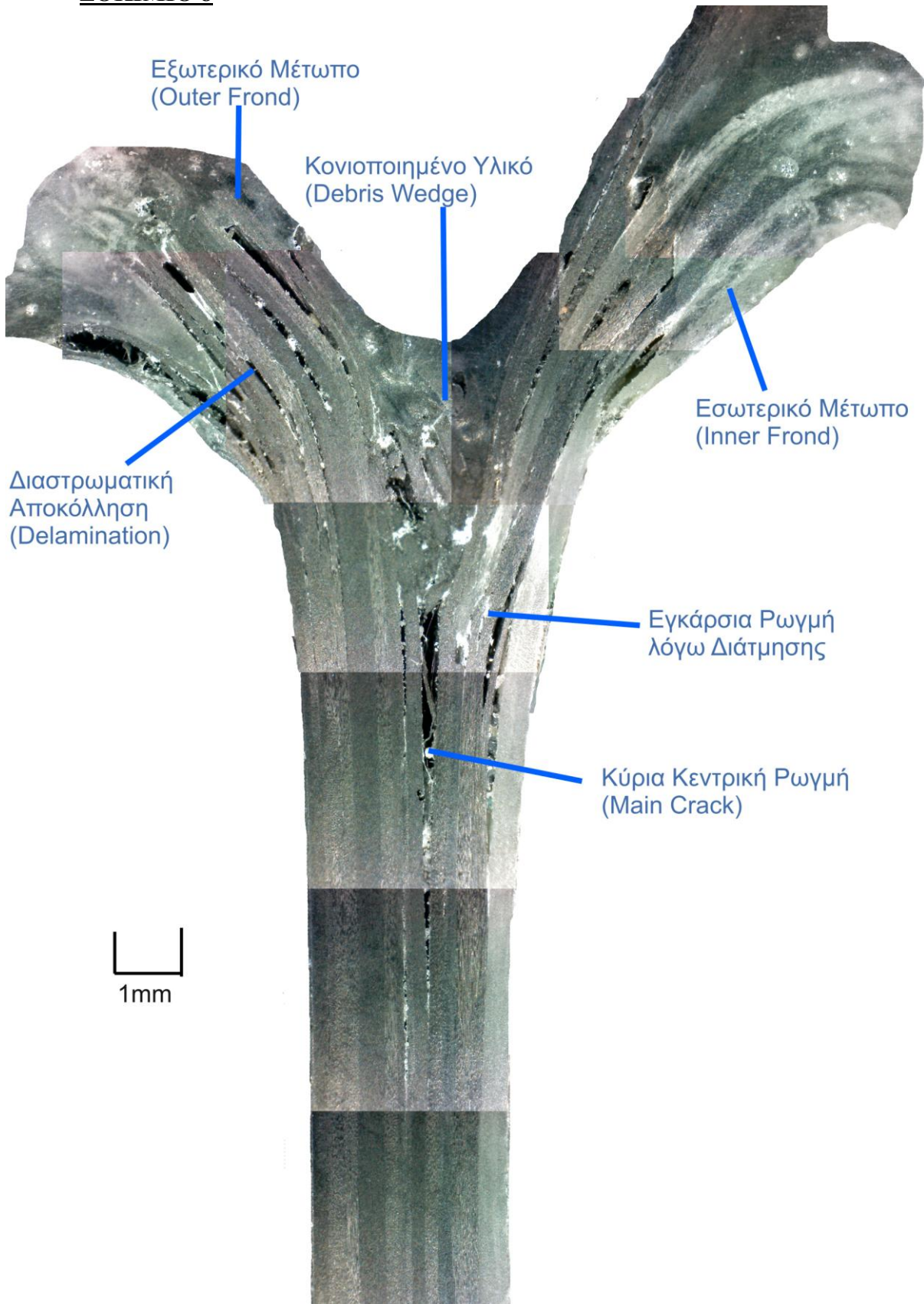
ΔΟΚΙΜΙΟ 6



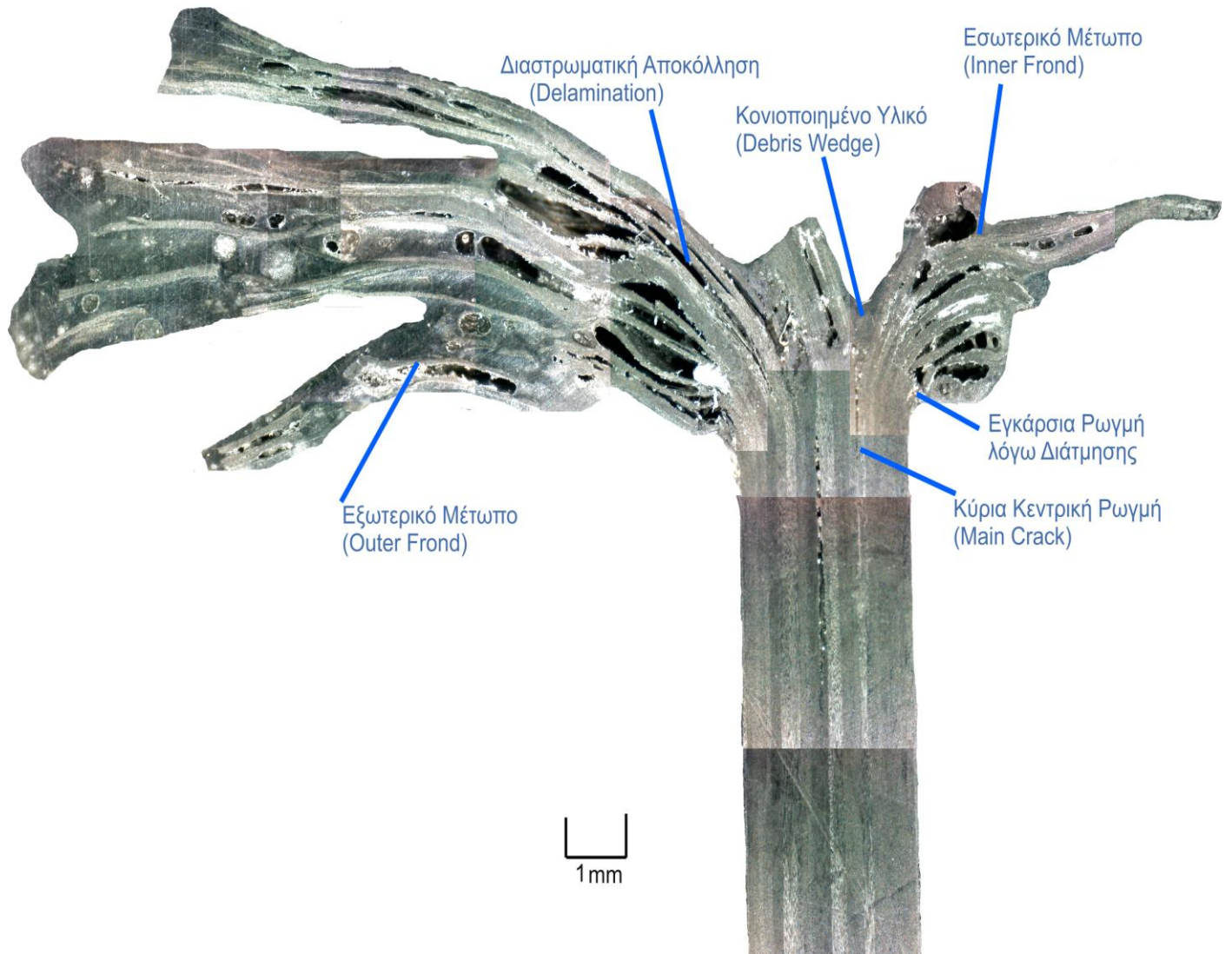
ΔΟΚΙΜΙΟ 7



ΔΟΚΙΜΙΟ 8



ΔΟΚΙΜΙΟ 9



7. ΤΕΛΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

7.1. Γενικά

Παρατηρώντας προσεκτικά τις καμπύλες φορτίου – μετατόπισης των κυλινδρικών δοκιμίων μας, εντοπίσαμε κάποια κοινά χαρακτηριστικά:

- Σε όλες τις καμπύλες το φορτίο αρχικά παρουσιάζει μια αύξουσα μεταβολή μέχρι μια τιμή P . Η τιμή αυτή εξαρτάται από το όριο θραύσης του υλικού και την γεωμετρία του κελύφους. όταν το φορτίο αρχίζει να προσεγγίζει την τιμή αυτή, το κέλυφος αρχίζει να παραμορφώνεται ελαστικά (ελαστική περιοχή).
- Στην συνέχεια, και όσο η φόρτιση εξακολουθεί, το φορτίο αρχίζει να αυξάνει και πάλι βαθμιαία για μια σχετικά μικρή περαιτέρω βράχυνση του κελύφους (μεταβατική περιοχή).
- Τέλος, το φορτίο αρχίζει να σταθεροποιείται ταλαντευόμενο περί ενός μέσου φορτίου (περιοχή σταδιακής κατάρρευσης).

Από την διεξαγωγή των πειραμάτων, αλλά και με την μελέτη και επεξεργασία των αποτελεσμάτων τους, μπορούμε να εντοπίσουμε τους ακόλουθους διαφορετικούς μηχανισμούς κατάρρευσης :

➤ Μηχανισμός κατάρρευσης 1

Πρόκειται για τον χαρακτηριστικό τρόπο προοδευτικής κατάρρευσης που παρατηρείται στους σωλήνες από σύνθετο υλικό. Το φορτίο ανέρχεται βαθμιαία σε μια σταθερή κατάσταση (με περίπου σταθερή κλίση), η οποία εξαρτάται από το όριο θραύσης του υλικού, τα γεωμετρικά στοιχεία του κελύφους, και ακολουθείται από την πριονωτή διακύμανση του φορτίου περί μια μέση τιμή στην περιοχή κατάρρευσης. Επίσης, το δοκίμιο του τύπου αυτού καταρρέει από το άκρο που έχει υποστεί την ειδική διαμόρφωση (δοκίμια 1, 3 , 4 , 5 , 7 , 8 , 9).

➤ Μηχανισμός κατάρρευσης 2

Ο συγκεκριμένος τύπος δοκιμίων μοιάζει αρκετά με τον προηγούμενο και στην μορφή των τελικών δοκιμίων, αλλά και στην μορφή των καμπύλων φορτίου. Η μοναδική διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι η κατάρρευση του δοκιμίου δεν ξεκινά από το άκρο που έχει διαμορφωθεί, αλλά από το άλλο (δοκίμιο 2).

➤ Μηχανισμός κατάρρευσης 3

Παρουσιάζει έναν προοδευτικό τρόπο κατάρρευσης, ο οποίος όμως συντελείται ταυτοχρόνως και στα 2 άκρα του δοκιμίου, διαδίδοντας την κατάρρευση προς το κέντρο. Όσον αφορά την μορφή της καμπύλης φορτίου, παρατηρήθηκαν 2 τοπικά μέγιστα στην τιμή του φορτίου (όρια θραύσης), και στην συνέχεια ομαλοποίηση (δοκίμιο 6).

7.2. Επίδραση των ατελειών

Στον πίνακα που ακολουθεί αναφέρονται συγκριτικά τα μεγέθη του μέγιστου φορτίου και της δύναμης συμπίεσης, που απαιτούνται για την αξιολόγηση της απόδοσης του κάθε δοκιμίου με φθίνουσα σειρά:

Αριθμός δοκιμίου	Μέγιστο φορτίο σε N	Δύναμη συμπίεσης σε MPa
1	59.140,19	245,36
4	557,86	2,31
5	537,99	2,23
9	532,89	2,21
3	478,66	1,99
6	477,32	1,98
2	457,59	1,90
7	396,92	1,65
8	359,87	1,49

Όπως παρατηρούμε και στον παραπάνω πίνακα, η επίδραση των διαμορφώσεων στην κατάρρευση και στην ανάπτυξη φορτίων είναι αρκετά μεγάλη. Ανεξαρτήτως τύπου διαμόρφωσης, το αρχικό δοκίμιο (1) απαιτεί σημαντικά μεγαλύτερο ποσό φορτίου για να καταρρεύσει, και συνεπώς απορροφά περισσότερη ενέργεια από τα υπόλοιπα δοκίμια. Ως αποτέλεσμα, οι ιδιότητες αυτών των δοκιμίων είναι πολύ διαφοροποιημένες συγκριτικά με το αρχικό δοκίμιο στο οποίο δεν είχε επέλθει ειδική διαμόρφωση, αφού η ενέργεια απορρόφησής τους είναι μικρότερη. Όσον αφορά την σειρά με την οποία τα δοκίμια αξιολογούνται με βάση τις ιδιότητές τους, όπως φαίνεται και από τον παραπάνω πίνακα, το αρχικό δοκίμιο είναι αναμφισβήτητα το βέλτιστο από την άποψη της μέγιστης απορρόφησης ενέργειας, προκαλώντας όμως μεγάλο ποσό φορτίου. Ακολουθούν τα δοκίμια που είχαν διαμορφωθεί με τρίγωνα και αυτά με τα ημικύκλια, τα οποία παρατηρούμε ότι και τα 2 δεν έχουν πλευρές κάθετες προς το στόμιο του δοκιμίου. Στην συνέχεια βρίσκεται το δοκίμιο με την κωνικότητα και προς το εσωτερικό και προς το εξωτερικό. Έπειτα, συναντούμε τα δοκίμια με τα τετράγωνα και τα τεταρτοκύκλια, τα οποία διαφέρουν ελάχιστα στην συμπεριφορά τους, και παρατηρούμε πως σαν σχήματα έχουν πλευρές που είναι κάθετες με το στόμιο του δοκιμίου. Ύστερα, είναι το δοκίμιο με τις οπές, οι οποίες βρίσκονται κάτω από την περιφέρεια του στομίου του δοκιμίου. Τέλος, συναντούμε τα δοκίμια με την κωνικότητα στο εξωτερικό, και με την κωνικότητα προς το εσωτερικό του δοκιμίου, ως τα τελευταία στην κατάταξη, και σαφώς ως τα δοκίμια με την μικρότερη απορρόφηση ενέργειας.

7.3. Μικροσκοπικά

Από μικρογραφικής πλευράς, οι μηχανισμοί κατάρρευσης συμφωνούν με τον τρόπο κατάρρευσης I από την βιβλιογραφία (σελ. 61) και φαίνεται να περιλαμβάνουν τα ακόλουθα στάδια. Κατ'αρχήν δημιουργείται μια κύρια κεντρική ρωγμή εσωτερικά του δοκιμίου και ένα μέρος των στρωμάτων λυγίζει και οδηγείται προς το εσωτερικό του δοκιμίου, ενώ το υπόλοιπο μέρος προς το εξωτερικό του. Κοντά στην περιοχή της ζώνης όπου βρίσκεται η κεντρική ρωγμή των δυο μετώπων εμφανίζονται δευτερεύουσες διαμήκεις ρωγμές οι οποίες διαδίδονται κατά προτίμηση μέσω των πιο αδύνατων περιοχών του υλικού. Είτε δηλαδή σε περιοχές πλούσιες σε ρητίνη, είτε μεταξύ των ορίων ρητίνης και ινών προκαλώντας λύσιμο του διεπιφανειακού δεσμού, είτε τέλος μεταξύ δυο γειτονικών στρώσεων, οδηγώντας σε διαστρωματική αποκόλληση (delamination). Είναι γνωστό ότι η συμπεριφορά των ενισχυτικών ινών εξαρτάται από την διευθέτησή τους στο κέλυφος. Οι ίνες οι οποίες έχουν προσανατολισμό παράλληλα προς τον άξονα του κελύφους (0°) κάμπτονται εσωτερικά και εξωτερικά με ή χωρίς θραύση ανάλογα με την ευκαμψία που εμφανίζουν και τους περιορισμούς που δέχονται από άλλες ίνες. Οι ίνες που βρίσκονται διατεταγμένες περιφερειακά και κάθετα προς τον άξονα του κελύφους μπορούν να εκταθούν εξωτερικά θραυόμενες (με ταυτόχρονη θραύση συνήθως και της ρητίνης) και εσωτερικά, είτε θραυόμενες είτε σχηματίζοντας πτυχώσεις (λυγισμός).

8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. A. G. Mamalis, D. E. Manolacos, 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.
2. A. G. Mamalis, D. E. Manolacos, M. B. Ioannidis, D. P. Papapostolou : “On the response of thin-walled CFRP composite tubular components subjected to static and dynamic axial compressive loading experimental”, *Composite Structures* 69 (2005), p.p. 407-420.
3. A. G. Mamalis, D. E. Manolacos, M. B. Ioannidis, D. P. Papapostolou : “The static and dynamic axial collapse of CFRP square tubes, finite element modelling”, *Composite Structures* 74 (2006), p.p. 213-225.
4. A. G. Mamalis, D. E. Manolacos, 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.
5. Jiancheng Huang, Xinwei Wang: “Numerical and experimental investigations on the axial crushing response of composite tubes”, *Composite Structures* 91 (2009), p.p. 222-228.
6. 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”, *Composites Science and Technology* 59 (1999), .p. 1789-1804.
7. H. Hamada, S. Ramakrishna, H. Satoh: “Crushing mechanism of carbon fibre/PEEK composite tubes”, *Composites* 26 (1995), p.p. 749-755.
8. Chiara Bisagni: “Dynamic buckling of fiber composite shells under impulsive axial compression”, *Thin-Walled Structures* 43 (2005), p.p. 499-514.
9. 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.
10. Stanislaw Ochelski, Pawel Gotowicki: “Experimental assessment of energy absorption capability of carbon-epoxy and glass-epoxy composites”, *Composite Structures* 87 (2009), pp. 215-224.
11. Chou S.C., Orringer O., Rainey J.H.: “Post-failure behavior of laminates I-No stress concentration”, *Composite Materials* 10 (1976), p.p. 371-381.
12. Chou S.C., Orringer O. and Rainey J.H.: “Post-failure behavior of laminates II-Stress concentration”, *Composite Materials* 11 (1976), p.p. 71-78.
13. Hashin Z.: “Failure criteria for unidirectional fibre composites”, *Applied Mechanics* 47 (1980), p.p. 329-334.
14. 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.
15. Tsai S.W. and Wu E.M.: “A general theory of strength for anisotropic materials”, *Composite Materials* 5 (1971), p.p. 58-80.
16. 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.

17. Chen W.H. and Lee S.S.: “Numerical and experimental failure analysis of composite laminates with bolted joints under bending loads”, *Journal of Composite Materials* 29 (1995), p.p. 15-36.
18. F. C. Campbell : “Manufacturing Processes for Advanced Composites”, Elsevier 2004, p.p. 3-103, 400-437.
19. Deborah D. L. Chung: “ Carbon Fiber Composites”, Butterworth – Heinemann 1994, p.p. 65-84, 145-176.
20. Peter Morgan: “Carbon Fibers and their Composites”, Taylor and Francis 2005, p.p. 1-59.
21. Valery V. Vasiliev, Evgeny V. Morozov: “ Advanced Mechanics of composite materials”, Elsevier 2007, p.p. 9-29, 133-252.
22. Tobias G. Wouters: “Leading – edge composite material research”, Nova science Publishers 2008, p.p. 25-72.
23. Daniel Gay, Suong V. Hoa, Stephen W. Tsai: “Composite materials, Design and applications”, CRC Press 2003, p.p. 14-76, 141-340.
24. Lawrence C. Bank: “Composites for construction, structural design with FRP materials”, Wiley 2006, p.p. 1-129.
25. Kirk, Othmer: “Encyclopedia of chemical technology, Carbon and Graphite fibers to chlorocarbons and chlorohydrocarbons”, Volume 5, Watcher, .p. 1-9.
26. A. Mortensen: “Concise encyclopedia of composite materials”, Elsevier 2007, p.p. 85-96, 111-126.
27. Isaac M. Daniel, Ori Ishai: “Engineering Mechanics of composite materials”, Oxford University Press 1994, p.p. 3-36.
28. P. K. Mallick: “Fiber – reinforced composites, materials, manufacturing and design”, CRC Press 2007, p.p. 47-376.
29. Γ. Κατσίρος : “Αξονική καταπόνηση κυλινδρικών σωλήνων σύνθετου υλικού με διάφορες ατέλειες (οπές) ”, 2006, Διπλωματική εργασία.
30. www.wikipedia.org
31. www.toray.com