



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

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μηχανισμοί κατάρρευσης σύνθετου κελύφους διατομής
«κλεψύδρα», με πυρήνα στερεού αφρού, σε στατική και
δυναμική καταπόνηση

ΣΤΑΥΡΟΣ ΓΕΡΟΝΤΑΚΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Δ. ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ

ΑΘΗΝΑ 2011

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Κατά κανόνα, η απαρχή, αλλά και το καταφύγιο για τον άνθρωπο βρίσκεται στην οικογένεια του. Ένα μεγάλο "ευχαριστώ" στη δική μου, το Δημήτρη, τη Ζωή και την Κατερίνα, αποτελεί ελάχιστη αναγνώριση για τη βοήθεια και την υποστήριξή τους κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω στον καθηγητή μου κ. Δημήτριο Μανωλάκο για την εμπιστοσύνη του στην ανάθεση της διπλωματικής και την καθοδήγησή του στα χρόνια της φοίτησής μου. Επίσης, στον κ. Πρωτεσίλαο Κωστάζο για την καταλυτική βοήθεια του στην πραγματοποίηση των πειραμάτων και τις εύστοχες παρατηρήσεις του.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	
ΠΡΟΟΙΜΙΟ	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	
ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ	3
2.1 Εισαγωγή	3
2.2 Ιστορική επισκόπηση	5
2.3 Ταξινόμηση των σύνθετων υλικών	9
2.3.1 Ταξινόμηση ινωδών συνθέτων	9
2.3.2 Ταξινόμηση κοκκωδών συνθέτων	12
2.4 Ίνες.....	13
2.4.1 Ίνες γυαλιού	13
2.4.2 Ίνες άνθρακα.....	19
2.4.3 Ίνες πολυμερούς	23
2.4.3.1 Ίνες αραμιδίου	23
2.4.3.2 Ίνες πολυαιθυλενίου	25
2.4.4 Μεταλλικές ίνες	27
2.4.5 Κεραμικές ίνες	29
2.4.6 Σύγκριση ινών.....	30
2.5 Μήτρες.....	32
2.5.1 Οργανικές μήτρες.....	33
2.5.1.1 Θερμοπλαστικές Μήτρες	33
2.5.1.2 Θερμοσκληρυνόμενες Μήτρες	34
2.5.2 Μεταλλικές μήτρες	35
2.5.3 Κεραμικές μήτρες	36
2.6 Εφαρμογές	37
2.6.1 Αεροναυπηγική – Αεροδιαστημική	39
2.6.1.1 Αεροσκάφη	39
2.6.1.2 Ελικόπτερα.....	44
2.6.1.3 Διαστημικές Εφαρμογές	44
2.6.2 Οδικές Μεταφορές.....	45
2.6.3 Καμπίνα τελεφερίκ	48
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	
ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΕΝΑΝΤΙ ΣΥΓΚΡΟΥΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ	
ΣΥΝΘΕΤΩΝ	49
3.1 Εισαγωγή	49
3.1.1 Η έννοια της προστασίας έναντι σύγκρουσης (crashworthiness).....	49
3.1.2 Τα σύνθετα κομμάτι των οχημάτων	49
3.2 Προστασία έναντι σύγκρουσης και σύνθετες κατασκευές	50
3.3 Απορρόφηση ενέργειας σε σύνθετες κατασκευές επίγειων οχημάτων.....	52
3.4 Παράγοντες που επηρεάζουν την απορρόφηση ενέργειας	58
3.4.1 Υλικό.....	58
3.4.1.1 Ίνα.....	58
3.4.1.2 Ρητίνη.....	59

3.4.1.3 Σχεδίαση στρώσεων.....	59
3.4.2 Ταχύτητα.....	59
3.4.3 Παραγωγική διαδικασία.....	60
3.4.4 Υποβάθμιση περιβάλλοντος.....	61
3.4.5 Συνδυασμένα αξονικά και καμπτικά φορτία.....	62
3.4.6 Επιδιορθώσεις.....	63
3.5 Εφαρμογές.....	64

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΣΤΗΝ ΑΞΟΝΙΚΗ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗ ΛΕΠΤΟΤΟΙΧΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΣΩΛΗΝΩΝ.....

68

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΚΕΛΥΦΗ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΤΥΠΟΥ ΚΛΕΨΥΔΡΑΣ.....

76

5.1 Γεωμετρία και δομή των κελυφών.....	76
5.2 Μηχανισμός κατάρρευσης.....	78
5.3 Χαρακτηριστικά απορρόφησης ενέργειας.....	80

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΑΦΡΟΙ ΠΟΛΥΟΥΡΕΘΑΝΗΣ.....

83

6.1 Εισαγωγή.....	83
6.2 Ιστορικά στοιχεία.....	83
6.3 Χημική θεμελίωση.....	85
6.4 Εφαρμογές.....	87
6.5 Ταυτοποίηση του αφρού πολυουρεθάνης.....	89
6.6 Πλήρωση κελυφών με αφρό.....	90

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ.....

94

7.1 Αντικείμενο των πειραμάτων.....	94
7.2 Προσδιορισμός των δοκιμών.....	95
7.2.1 Ονοματολογία.....	95
7.2.2 Ύψος.....	96
7.2.3 Μάζα.....	96
7.3 Έλεγχος των δοκιμών.....	97
7.4 Στατικές δοκιμές.....	97
7.4.1 Πειραματική διαδικασία.....	97
7.4.2 Δοκίμο SE1.....	98
7.4.3 Δοκίμο SE2.....	104
7.4.4 Δοκίμο SF1.....	109
7.4.5 Δοκίμο SF2.....	115
7.5 Δυναμικές δοκιμές.....	121
7.5.1 Πειραματική διαδικασία.....	121
7.5.2 Δοκίμο DE1.....	122
7.5.3 Δοκίμο DE2.....	127
7.5.4 Δοκίμο DE3.....	132
7.5.5 Δοκίμο DF1.....	140
7.5.6 Δοκίμο DF2.....	145
7.5.7 Δοκίμο DF3.....	150
7.6 Μικρογραφική διερεύνηση.....	156

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8	
ΣΥΝΟΨΗ	170
8.1 Αποτελέσματα.....	170
8.2 Παρατηρήσεις επί των στατικών δοκιμών.....	170
8.3 Παρατηρήσεις επί των δυναμικών δοκιμών	171
8.4 Μηχανισμοί κατάρρευσης	172
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	173
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	179

ΠΡΟΟΙΜΙΟ

Η προστασία έναντι σύγκρουσης των οχημάτων έχει βελτιωθεί τα τελευταία χρόνια, με την προσοχή να εστιάζεται κυρίως στον αντίκτυπο της κρούσης στους επιβάτες. Έχει γίνει προσπάθεια σε επίπεδο πειραματικής έρευνας και ανάπτυξης θεωρητικών κριτηρίων σχεδίασης για τη μηχανική της κατάρρευσης, ώστε να παρασχεθούν στο μηχανικό τα εργαλεία να σχεδιάζει κατασκευές οχημάτων τέτοιες ώστε να διασκορπίζεται το μέγιστο ποσό ενέργειας, ενώ το υλικό που περιβάλλει το διαμέρισμα των επιβατών παραμορφώνεται, προστατεύοντας έτσι τους ανθρώπους στο εσωτερικό.

Η πρόοδος των κατασκευών προστασίας έναντι σύγκρουσης πρέπει να επιτυγχάνεται υπό το πρίσμα ορισμένων περιορισμών, όπως όρια στη μετάδοση της δύναμης και / ή την παραμόρφωση. Οι μηχανισμοί για τη βελτίωση της αντίστασης των οχημάτων θα εξαρτώνται από τη φύση των επιβαλλόμενων περιορισμών. Εάν επιτρέπονται μόνο μικρές παραμορφώσεις, τότε πρέπει να αναμένονται μεγάλα ποσά μεταφοράς ροπής και επίπεδα φορτίου στον επιβαίνοντα, κάτι που μπορεί να είναι απαράδεκτο. Αντιστρόφως, εάν μεγάλες μόνιμες παραμορφώσεις είναι ανεκτές, μπορεί να τεθεί ένα όριο στο μέγεθος του φορτίου που δέχεται ο επιβαίνων, με την προϋπόθεση ότι η σύνθλιψη της καμπίνας διατηρεί ακόμα έναν ελάχιστο όγκο για την επιβίωση. Ένας βέλτιστος τρόπος που μπορεί να επιτευχθεί τούτο είναι μέσω αποκλειστικής χρήσης της παραμόρφωσης του σκελετού, συμπεριλαμβανομένων εφαρμογών κάποιων συσκευών απορρόφησης ενέργειας, όπως σωληνωτά στοιχεία τοποθετημένα σε στρατηγικές θέσεις.

Κατά τις τελευταίες δεκαετίες, οι δομές από σύνθετα υλικά έχουν προσελκύσει το ενδιαφέρον αναφορικά με την προστασία έναντι σύγκρουσης και τη διαχείριση ενέργειας κρούσης. Τα κύρια πλεονεκτήματα των ινωδών σύνθετων υλικών έναντι πιο συμβατικών ισोटροπικών υλικών είναι η πολύ υψηλή ειδική αντοχή και ειδική ακαμψία που μπορούν να εμφανίσουν. Επιπλέον, χρησιμοποιώντας τα σύνθετα, ο σχεδιαστής μπορεί να μεταβάλλει τον τύπο της ίνας, τη μήτρα και τον προσανατολισμό των ινών προκειμένου να παράγει υλικά με βελτιωμένες ιδιότητες. Εκτός από την προοπτική του μειωμένου βάρους, της ευελιξίας σχεδίασης και του μειωμένου κόστους κατασκευής, τα σύνθετα υλικά προσφέρουν μία δυναμική για την παραγωγή ελαφρών κατασκευών απορρόφησης ενέργειας. Τα δεδομένα τούτα έχουν επισύρει την προσοχή της αυτοκινητοβιομηχανίας και της αεροναυπηγικής βιομηχανίας με συνέπεια την αυξημένη χρήση των συνθέτων σε ποικίλες εφαρμογές, όπως τα κγκλιδώματα της κατασκευής της μετώπης (apron construction) ενός αυτοκινήτου ή το υποδάπεδο ενός αεροσκάφους, τα οποία αντικαθιστούν τα συμβατικά υλικά που χρησιμοποιούνταν.

Παλαιότερες έρευνες έδειξαν ότι τα σύνθετα κελύφη παραμορφώνονται με έναν τρόπο διαφορετικό από όμοια δομικά στοιχεία από συμβατικά υλικά, διότι οι κύριοι

τρόποι αστοχίας τους, όπως η ρωγμάτωση της μήτρας, η διαστρωματική αποκόλληση και η θραύση των ινών, είναι διαφορετικοί από των συμβατικών. Συνεπώς, ο περίπλοκος τούτος μηχανισμός θραύσης εγείρει δυσκολίες στη θεωρητική μοντελοποίηση της συμπεριφοράς κατάρρευσης των ινωδών σύνθετων κελυφών.

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο την εξέταση της συμπεριφοράς σύνθετων δοκιμίων σε αξονική στατική και δυναμική φόρτιση. Τα δοκίμια τούτα είναι κελύφη με βινυλεστερική μήτρα και ενίσχυση ινών γυαλιού, τα οποία προέρχονται από σωλήνες που είχε αναπτύξει η εταιρεία Ford. Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό των σωλήνων αυτών είναι η διατομή τους, η οποία είναι τύπου κλεψύδρας (hourglass). Παράμετρος στις διενεργηθείσες εργαστηριακές δοκιμές αποτέλεσε η ύπαρξη ή μη αφρού εντός των κελυφών. Για το λόγο αυτό, πριν τις δοκιμές, τα μισά κελύφη διατηρήθηκαν ως είχαν, ενώ τα υπόλοιπα μισά πληρώθηκαν με αφρό πολυουρεθάνης, προκειμένου να εξεταστεί η επίδρασή του. Σε κάθε περίπτωση, υπολογίστηκαν τα ποσά ενέργειας που απορροφήθηκαν από τα δοκίμια.

Στα πλαίσια του παρόντος πονήματος κρίθηκε απαραίτητο, πέραν των πειραματικών αποτελεσμάτων, να παρουσιαστούν βασικές αρχές που διέπουν τα σύνθετα κελύφη και τους αφρούς, καθώς και κάποια αποτελέσματα από παλαιότερες έρευνες. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στους μηχανισμούς κατάρρευσης και την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας.

ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

2.1 Εισαγωγή

Η επιτυχία και η πρόοδος της βιομηχανίας είναι άρρηκτα συνυφασμένη με την εξέλιξη της επιστήμης των υλικών και της τεχνολογίας των κατεργασιών τους. Είναι απαραίτητη η καλή γνώση των χρησιμοποιούμενων υλικών, προκειμένου να επιτύχει και να αυξηθεί η απόδοση της εκάστοτε εφαρμοζόμενης βιομηχανικής τεχνικής.

Η συνήθης κατάταξη των υλικών περιλαμβάνει τις ακόλουθες τρεις κατηγορίες:

- Μέταλλα και κράματα, τα οποία στην πλειονότητά τους έχουν βρει μεγάλες βιομηχανικές εφαρμογές
- Μη μεταλλικά ανόργανα υλικά, με κύριους εκπροσώπους τα κεραμικά υλικά και τα τεχνικά γυαλιά
- Οργανικά υλικά, με ιδιαίτερη αναφορά στα πλαστικά.

Η παραπάνω κατηγοριοποίηση βασίζεται στη χημική δομή, τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των υλικών. Εντούτοις, η διάκριση τούτη, αν και σαφής, είναι μάλλον ελλιπής διότι δεν καλύπτει τους συνδυασμούς των παραπάνω υλικών. Από αρχαιότατων χρόνων οι άνθρωποι χρησιμοποιούσαν τέτοια υλικά, προκειμένου να επιτύχουν βελτιωμένες ιδιότητες, τα οποία φυσικά δεν μπορούν να υπαχθούν σε καμία από τις παραπάνω κλασικές κατηγορίες. Για τα υλικά αυτά έχει υιοθετηθεί ο όρος σύνθετα υλικά (composites) και, παρά την πολύχρονη χρήση τους, τα τελευταία μόλις χρόνια η επιστήμη της Τεχνολογίας των Υλικών τα εξετάζει ως ξεχωριστό κεφάλαιο.

Εν γένει, για ένα υλικό ο χαρακτηρισμός του ως "σύνθετο" σημαίνει ότι τούτο αποτελείται από δύο ή περισσότερα διακριτά μέρη. Ως διακριτά μέρη νοούνται διαφορετικά υλικά ή φάσεις.

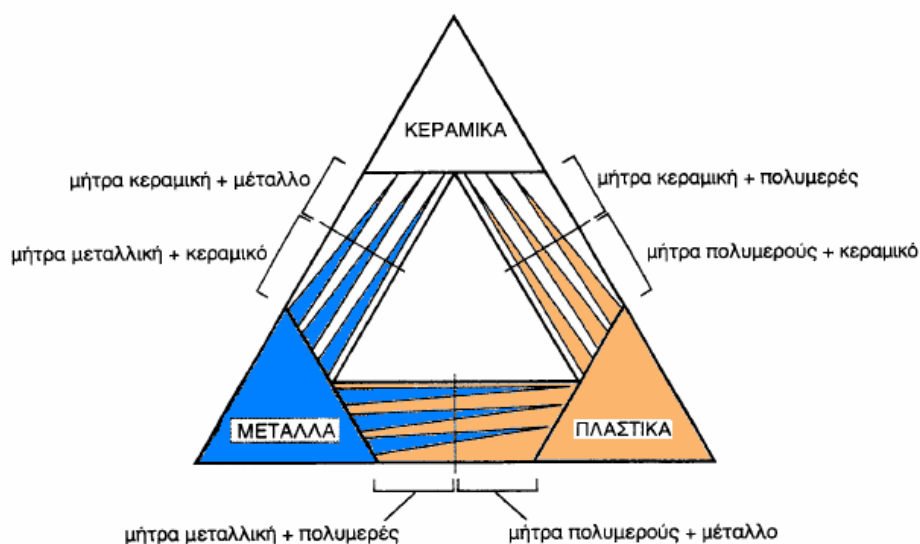
Στη βιβλιογραφία απαντώνται μία πλειάδα μελετών για τις ιδιότητες, τους τρόπους παραγωγής και τις εφαρμογές των σύνθετων υλικών, όμως δεν υπάρχει ένας σαφής και κοινά αποδεκτός ορισμός για το τι πραγματικά είναι ένα σύνθετο υλικό. Βασικά, το πρόβλημα εντοπίζεται στην απόφαση για το πότε ένα μονολιθικό ή απλό υλικό έχει γίνει σύνθετο ή ετεροφασικό. Οι περισσότεροι ορισμοί που είναι διαθέσιμοι, εντούτοις, φαίνονται τουλάχιστον να συμφωνούν στο ότι υπάρχει η βασική απαίτηση για το συνδυασμό διαφορετικών υλικών με έναν τρόπο ώστε να παραχθεί ένα νέο υλικό, συνθετότερης δομής, στο οποίο τα συστατικά μέρη διατηρούν ουσιαστικά την ταυτότητά τους. Κάποιοι σχολιαστές προσθέτουν ότι το νέο υλικό πρέπει να έχει σημαντικά βελτιωμένες ή διαφορετικές ιδιότητες από τα συστατικά μέρη. Άλλοι επισημαίνουν την ανάγκη για διαφοροποίηση μεταξύ ενός σύνθετου υλικού και μιας σύνθετης κατασκευής. Τοιουτοτρόπως, λαμβάνοντας έστω και τον πιο απλό και

γενικό ορισμό είναι σαφές ότι σε κάποιο βαθμό πρέπει να ληφθεί μία απόφαση για το πόσο μικρά πρέπει να είναι τα μέρη της διασκορπισμένης φάσης, προτού η έννοια του "σύνθετου" γίνει τόσο γενική ώστε σχεδόν κάθε υλικό να συμπεριληφθεί σε αυτήν την κατηγορία. Για παράδειγμα, προφανώς ομογενή πλαστικά περιέχουν μικροσκοπικά κενά $> 10^{-8}$ m σε διάμετρο μέσα στη δομή τους. Τότε, τίθεται το ερώτημα σε ποιο βαθμό το πλαστικό γίνεται ένα κυψελοειδές σύνθετο υλικό με πλήρωση από αέρα (οι αφροί βεβαίως πρέπει να εξεταστούν ξεχωριστά, διότι έχουν από μόνοι τους ειδικά χαρακτηριστικά).

Η πιο προφανής λύση για προβλήματα όπως το παραπάνω είναι να τεθεί για τη μεταβλητή, η οποία εμπλέκεται στην περιγραφή ενός σύνθετου υλικού, μία τιμή η οποία θα χρησιμεύει ως διαχωριστική γραμμή μεταξύ των κατηγοριών. Για να ταξινομηθεί ένα υλικό στην κατηγορία των συνθέτων, θα ακολουθείται ο εξής κανόνας: Το υλικό πρέπει να προκύπτει ως συνδυασμός συστατικών μερών, στα οποία οι ιδιότητες του ενός από αυτά τα μέρη να είναι σημαντικά μεγαλύτερες από του άλλου (τουλάχιστον πενταπλάσιες) και η κατ' όγκο περιεκτικότητα του ενός να μην είναι πολύ μικρή ($> 10\%$).

Κατόπιν τούτων, δίνεται ο ακόλουθος ορισμός (κατά Agarwal): "Σύνθετα είναι τα υλικά, τα οποία μακροσκοπικά αποτελούνται από δύο ή περισσότερα χημικά ευδιάκριτα συστατικά μέρη που έχουν μια συγκεκριμένη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ τους."

Από τα συστατικά μέρη, το ένα χαρακτηρίζεται ως συστατικό ενίσχυσης και προσδίδει στο σύνθετο βελτιωμένες μηχανικές, κυρίως, ιδιότητες. Το δεύτερο συστατικό καλείται μήτρα, είναι συνήθως χαμηλής πυκνότητας και η συμμετοχή του στο σύνθετο εξασφαλίζει τη μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση των ιδιοτήτων της ενίσχυσης. Στο Σχήμα 2.1 παρουσιάζεται ο συνδυασμός ανά δύο των τριών βασικών κατηγοριών υλικών και οι οικογένειες των συνθέτων που προκύπτουν.

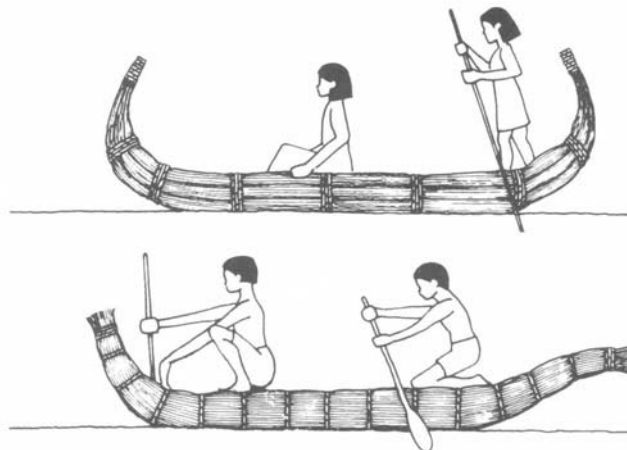


Σχήμα 2.1: Κατηγορίες σύνθετων υλικών

2.2 Ιστορική επισκόπηση

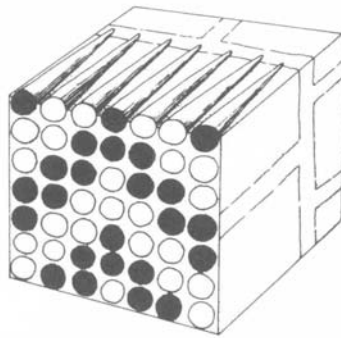
Ανιχνεύοντας κανείς την ιστορία των σύνθετων υλικών είναι σαν να ατενίζει την εξέλιξη της πολιτισμένης ζωής αυτής καθαυτής. Η τεχνολογική πρόοδος στον αρχαίο κόσμο είναι γενικώς αποδεκτό ότι στηρίχθηκε σε δύο βασικές αρχές, κατάλληλα υλικά και επαρκείς επικοινωνίες. Χωρίς κάποια από αυτές η πρόοδος σταμάτησε απότομα, όπως μαρτυρούν οι σημερινές νεολιθικές κοινωνίες της Νέας Γουινέας και του Αμαζονίου. Όπου, όμως, οι συνθήκες ήταν ευνοϊκές η ιστορία κύλησε διαφορετικά.

Ακόμα και τα πρώιμα τούβλα και η κεραμική των περίπου 5000 πΧ δείχνουν σημάδια περιπλοκότητας τα οποία μπορεί να μην είναι άμεσα εμφανή. Για παράδειγμα, θρυμματισμένη πέτρα και υλικά οργανικής προελεύσεως αναμειγνύονταν με πηλό αγγειοπλαστικής με διαφορετικούς τρόπους και σε διαφορετικές ποσότητες για να αποσιωπήσουν τη συρρίκνωση κατά τη διάρκεια του στεγνώματος και τη θραύση κατά τη διάρκεια του ψησίματος. Ομοίως, είναι εμφανές ότι οι πρώτοι αγγειοπλάστες ήταν ικανοί να διαχειριστούν το πορώδες των τελικών προϊόντων τους για να παράγουν δοχεία που θα διατηρούσαν τα περιεχόμενά τους δροσερά μέσω μιας διαδικασίας εξάτμισης. Τα πρώτα ενισχυμένα πολυμερή υλικά εμφανίζονται να χρησιμοποιούνται από το λαό της Βαβυλώνας περί τα 4000 – 2000 πΧ. Αυτά είναι καταγεγραμμένα σε βιβλία της αρχαιότητας όπως η Γένεσις και η Έξοδος της Βίβλου και τα υλικά αποτελούνταν από προϊόντα ενισχυμένης πίσσας. Γύρω στα 3000 πΧ αποδεικνύεται από ποικίλες πηγές ότι στην Αίγυπτο και τη Μεσοποταμία κατασκευάζονταν τύποι βάρκας ποταμιού από δέσμες από καλάμια παπύρου (Σχήμα 2.2) εγκλωβισμένα σε μια μήτρα από πίσσα. Αυτές οι βάρκες μπορούν να θεωρηθούν ο πρόδρομος της σύγχρονης πλαστικής βάρκας ενισχυμένης με ίνες γυαλιού.



Σχήμα 2.2: Αναπαράσταση που παραβάλλει Αιγυπτιακές και Μεσοποταμίες βάρκες στα 3000 πΧ

Στη Μεσοποταμία περί τα 2500 πΧ το πρόβλημα της φθοράς των τούβλων των ναών και άλλων κτισμάτων υπερνικήθηκε μέσω μιας νέας κατασκευής από σύνθετο υλικό. Αυτή απαρτιζόταν από κώνους από πέτρα ή ψημένο πηλό, οι οποίοι σφυροκοπούσαν μέσα στη μαλακή επιφάνεια των τοίχων σε στρατηγικές θέσεις (Σχήμα 2.3), προκειμένου να εξουδετερώνουν τοπικά τις τριβές και να προσφέρουν μία αίσθηση διακόσμησης.



Σχήμα 2.3: Διάγραμμα που δείχνει πως σφυροκοπούσαν οι κώνοι μέσα στο μαλακό, φτιαγμένο από τούβλα λάσπης, τοίχο. Κώνοι από ψημένο πηλό ή πέτρα σφυροκοπούσαν εντός των τοίχων για να παράγουν διακοσμητικά εφφέ. Οι τοίχοι που επεξεργάζονταν με αυτόν τον τρόπο ήταν εκ φύσεως πολύ λιγότερο επιρρεπείς στη φθορά και το ράγισμα.

Νωρίτερα από το 1000 πΧ είναι γνωστό ότι οι Ασσύριοι κατασκεύαζαν πλωτές γέφυρες χρησιμοποιώντας πλωτήρες από ψάθινες βάρκες διαποτισμένες με ένα αδιάβροχο υλικό από πίσσα. Αυτές οι βάρκες, γνωστές ως *gufas*, χρησιμοποιούνται ακόμα στην Εγγύς Ανατολή σήμερα. Στη δυτική Ασία και την Κίνα αυτήν την περίοδο αναπτύχθηκε ένα σύνθετο τόξο (Σχήμα 2.4) φτιαγμένο από λαμέλες ξύλου και κέρατου. Τούτο σχεδιάστηκε να είναι αρκετά μικρό και ισχυρό ώστε να είναι κατάλληλο για επίθεση από άρμα. Το τόξο των Μογγόλων λέγεται ότι συγκροτούταν από μία ακόμη μεγαλύτερη ποικιλία υλικών συμπεριλαμβανομένων τενόντων ζώων, ξύλου και μεταξιού ενωμένων με μια κολλώδη ουσία. Ομοίως, οι κάνες όπλου της Δαμασκού και τα τελετουργικά ξίφη της Ιαπωνίας είχαν κατασκευή διαστρωματώσεων.



Σχήμα 2.4: Αναπαράσταση του κινεζικού σύνθετου τόξου των περίπου 1000 πΧ βασισμένη σε διασωθέντα θραύσματα. Το σύνθετο τόξο, φτιαγμένο από λαμέλες ξύλου, ή ξύλου και κέρατου, φαίνεται να αναπτύχθηκε από Ασιάτες νομάδες. Ένα βραχύ όπλο, ωστόσο με ένα σημαντικό βεληνεκές, το σύνθετο τόξο ήταν ιδανικό για χρήση από άρμα ή τη ράχη αλόγου, όπου ένα μακρότερο τόξο θα ήταν δυσμετακίνητο.

Μέχρι το 500 πΧ οι Έλληνες κατασκεύαζαν τριήρεις, οι οποίες διέθεταν καρίνες πολύ μακρύτερες από ότι θα είχε επιτευχθεί χρησιμοποιώντας το μήκος ενός μόνο δένδρου. Χωρίς αμφιβολία, μέρη του πλοίου πρέπει να είχαν κατασκευαστεί με σύνθετα στοιχεία. Μεταξύ 500 πΧ και 500 μΧ δεν εμφανίζεται να χρησιμοποιείται κάποιο νέο υλικό ή νέα διαδικασία παραγωγής, με την εξέλιξη να επικεντρώνεται στο χώρο της μηχανικής. Με άλλα λόγια, ο άνθρωπος προσπαθούσε να κάνει καλύτερη τεχνική και οικονομική χρήση των υπαρχόντων πρώτων υλών συνδυάζοντάς τες με νέους τρόπους – μία κατάσταση όχι διαφορετική από αυτή που επικρατεί στη βιομηχανία πολυμερών σήμερα. Εν τούτοις, πολύ συχνά νέες εφευρέσεις απέτυχαν να διαδοθούν εξαιτίας της έλλειψης κατάλληλων υλικών. Ένα πρώτο παράδειγμα είναι τα επαναστατικά πολιορκητικά όπλα του Έλληνα μηχανικού Κτησίβιου (2^{ος} αιώνας πΧ). Ομοίως, οι πολυάριθμες αντλίες, τροχαλίες και μηχανές του Αρχιμήδη θα ήταν πιο αποδοτικές εάν είχαν κατασκευαστεί με καλύτερα υλικά.

Η σημαντικότερη ίσως συνεισφορά των Ρωμαίων στις κατασκευές ήταν η ανάπτυξη του σύνθετου τούβλου και της αψίδας από τσιμέντο. Κατά βάση πρόκειται για μια αψίδα από τούβλα ενισχυμένη με τσιμέντο (που από μόνο του είναι σύνθετο υλικό), η οποία ομογενοποιούταν όταν έπηζε. Περίπου αυτήν την περίοδο, ακόμα και μακριά από τα γνωστά κέντρα της μάθησης και του πολιτισμού, η εφευρετικότητα του ανθρώπινου μυαλού παρέμενε δραστήρια συνδυάζοντας υλικά με νέους τρόπους. Καλό παράδειγμα τούτου είναι τα Δανικά κάρα περί τα 100 πΧ, τα οποία ενσωμάτωναν ρουλεμάν από ξύλο και μπρούτζο.

Η σύγχρονη εποχή των συνθέτων σηματοδοτήθηκε τη δεκαετία του 1920, όταν και εμφανίστηκε το πρώτο πλήρως σύνθετο υλικό βασισμένο σε μήτρα πλαστικού. Επρόκειτο, για μείγμα ινιδίων ξύλου με φαινολική φορμαλδεΰδη, γνωστό αργότερα εμπορικά ως βακελίτης, προς τιμήν του Βέλγου επιστήμονα Leo H. Baekeland.

Η ίνα γυαλιού (fiberglass) παρασκευάστηκε, σχεδόν τυχαία στα 1930, όταν ένας μηχανικός παρατήρησε τη δημιουργία μιας ίνας κατά την εφαρμογή ετικέτας σε ένα γυάλινο μπουκάλι γάλακτος. Το 1935 η Owens Corning, η οποία προήλθε από την ένωση των Owens – Illinois και Corning Glass Works, εισήγαγε την πρώτη καθαρή ίνα γυαλιού. Μια εταιρεία, η Douglas Aircraft, αγόρασε τον πρώτο ρόλο ινών γυαλιού, προκειμένου να αντιμετωπίσει το πρόβλημα της εύκολης και φθηνής παραγωγής καλουπιών για την κατασκευή των εξαρτημάτων της. Σε συνεργασία με την Owens Corning, παράχθηκαν καλούπια με χρήση του νέου υλικού fiberglass και φαινολικής ρητίνης (της μόνης διαθέσιμης ρητίνης την περίοδο αυτή). Το αποτέλεσμα ήταν επιτυχές. Σύντομα, τα ενισχυμένα πλαστικά επεκτάθηκαν και σε άλλες εφαρμογές της αεροναυπηγικής.

Ο ρυθμός εξέλιξης των συνθέτων, ήδη ταχύς, επιταχύνθηκε κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου. Αναπτύχθηκαν ακόμα περισσότερα αεροσκάφη στα οποία πλέον χρησιμοποιούνται και δομικά μέρη από σύνθετα. Για παράδειγμα, στις ζοφερές μέρες του πολέμου, από τα τελευταία μέρη του αεροσκάφους που σχεδιάζονταν ήταν οι σωλήνες. Αφού όλα τα υπόλοιπα συστήματα ήταν ήδη ετοιμασμένα, οι σωληνώσεις απαιτούνταν να περάσουν από δύσκολες διαδρομές με γωνίες, συστροφές κ.τ.λ. Οι μεταλλικές σωλήνες ήταν δύσκολο να κατασκευαστούν σε αυτά τα απαιτητικά σχήματα. Τα σύνθετα ήταν η απάντηση. Άλλες εφαρμογές περιελάμβαναν ατρακτίδια κινητήρων (χρησιμοποιήθηκαν για την ελάφρυνση του αεροπλάνου A-20) και θόλους προστασίας εξοπλισμών ραντάρ (radomes), οι οποίοι

έδωσαν τόσο κατασκευαστική αντοχή όσο και διαπερατότητα ("διαφάνεια") στα ραντάρ.

Μετά το τέλος του πολέμου, η όλη δυναμική και τεχνογνωσία που είχε αναπτυχθεί κατευθύνθηκε σε εμπορικές εφαρμογές, όπως πολυεστερικές ενισχυμένες με ίνες γυαλιού βάρκες. Μέχρι το 1948 είχαν κατασκευαστεί πολλές χιλιάδες βάρκες που διατέθηκαν στο εμπόριο. Πολλές καινοτομικές μέθοδοι παραγωγής αναπτύχθηκαν στα τέλη της δεκαετίας του 1940 και στη δεκαετία του 1950, συμπεριλαμβανομένων της μορφοποίησης με εμβάπτιση (pultrusion) από τον Goldsworthy και της μεγάλης κλίμακας περιέλιξης νήματος (large-scale filament winding).

Το 1961 καταχωρήθηκε μία πατέντα για την πειραματική κατασκευή της πρώτης ίνας άνθρακα (γραφίτη), αλλά η Courtaulds Limited του Ηνωμένου Βασιλείου ήταν η πρώτη που παρήγαγε εμπορικά βιώσιμες ίνες άνθρακα μερικά χρόνια αργότερα. Οι ίνες αυτές βελτίωσαν το λόγο δυσκαμψίας προς βάρος και τυγχάνουν ευρείας χρήσης στις εφαρμογές αεροδιαστημικής.

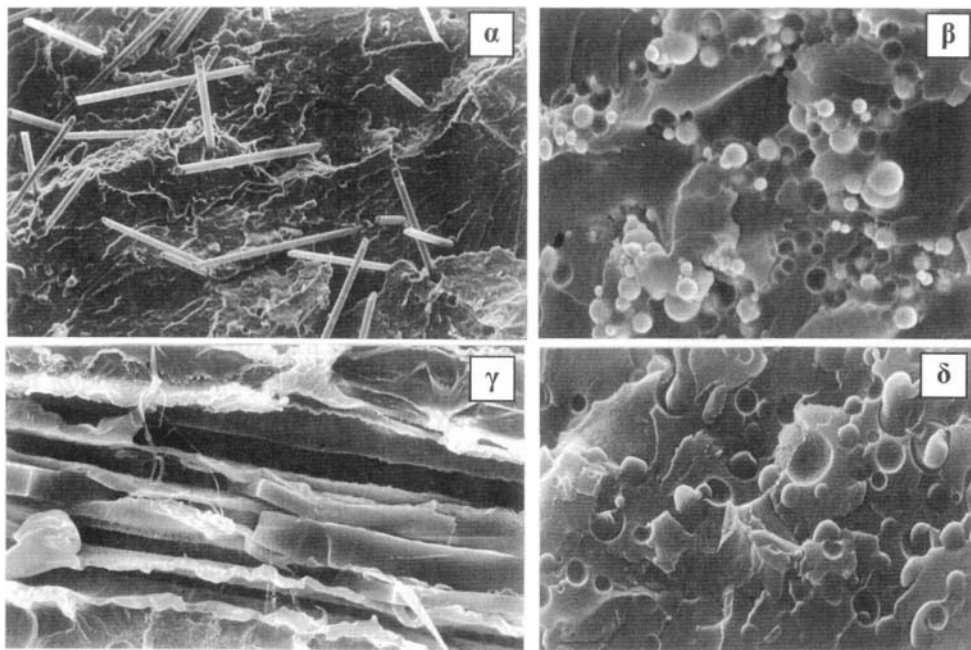
Οι ίνες αραμιδίου (Kevlar®) διατέθηκαν στο εμπόριο το 1971 από την DuPont. Ίνες από πολύ υψηλού μοριακού βάρους πολυαιθυλένιο (ultra high molecular weight polyethylene) κατασκευάστηκαν στις αρχές της δεκαετίας του 1970. Οι παραπάνω προηγμένης απόδοσης ίνες, μαζί με τις ίνες γυαλιού και άνθρακα, έχουν οδηγήσει σε τρομερές εξελίξεις στους τομείς της αεροδιαστημικής, της θωράκισης (δομικής και σωματικής), του εξοπλισμού αθλητισμού, των ιατρικών μηχανημάτων και πολλών άλλων εφαρμογών υψηλής απόδοσης.

Η ειδική αντοχή (λόγος αντοχής προς πυκνότητα) και η ειδική δυσκαμψία (λόγος δυσκαμψίας προς πυκνότητα) των ενισχυτικών ινών βαίνουν συνεχώς αυξανόμενες τα τελευταία 30 χρόνια, π.χ. η ειδική αντοχή και η ειδική δυσκαμψία των ινών γυαλιού, άνθρακα, αραμιδίου και βορίου έχουν φθάσει στο 10-14πλάσιο των αντίστοιχων τιμών του αλουμινίου (ελαφρό μέταλλο). Στην εποχή μας, η βιομηχανία των συνθέτων έχει εισέλθει σε μία ώριμη φάση. Τα προϊόντα, οι διεργασίες και οι εφαρμογές είναι καθορισμένα, με την πρόοδο να είναι μάλλον εξελικτική, παρά επαναστατική. Παρά ταύτα, συνεχώς εμφανίζονται νέοι τομείς της αγοράς για τα σύνθετα, επί παραδείγματι τα πτερύγια ανεμοστροβίλου – μία εφαρμογή αφάνταστη πριν από 20 χρόνια.

2.3 Ταξινόμηση των σύνθετων υλικών

Οι επιθυμητές ιδιότητες σε ένα σύνθετο υλικό προσδίδονται σε μεγάλο βαθμό από την ενίσχυση. Επομένως, ο πιο γενικός διαχωρισμός των συνθέτων γίνεται βάσει αυτής. Έτσι λοιπόν, ανάλογα με τη μορφή του συστατικού ενίσχυσης, τα σύνθετα κατατάσσονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες:

1. Ινώδη σύνθετα (fibrous composites): Συντίθενται από ίνες εμποτισμένες στο υλικό της μήτρας.
2. Κοκκώδη σύνθετα (particulate composites): Συντίθενται από σωματίδια διασκορπισμένα στο υλικό της μήτρας.
3. Στρωματικά σύνθετα (laminated composites): Συντίθενται από επάλληλες στρώσεις υλικών.

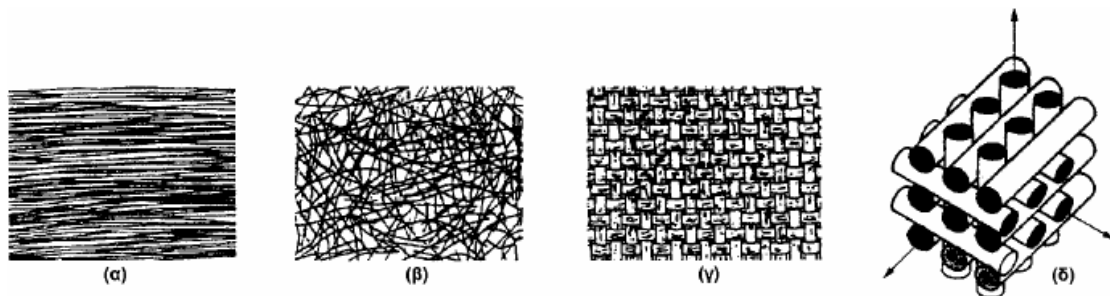


Εικόνα 2.1: Παραδείγματα τεσσάρων τύπων συνθέτων (μικρογραφική απεικόνιση): (α) Σύνθετο υλικό με ίνες γυαλιού, (β) Εποξειδική ρητίνη με κόκκους σιδήρου, (γ) Μικροπολύστρωτο θερμοπλαστικό, (δ) Ρητίνη PET με κόκκους ελαστομερούς.

2.3.1 Ταξινόμηση ινωδών συνθέτων

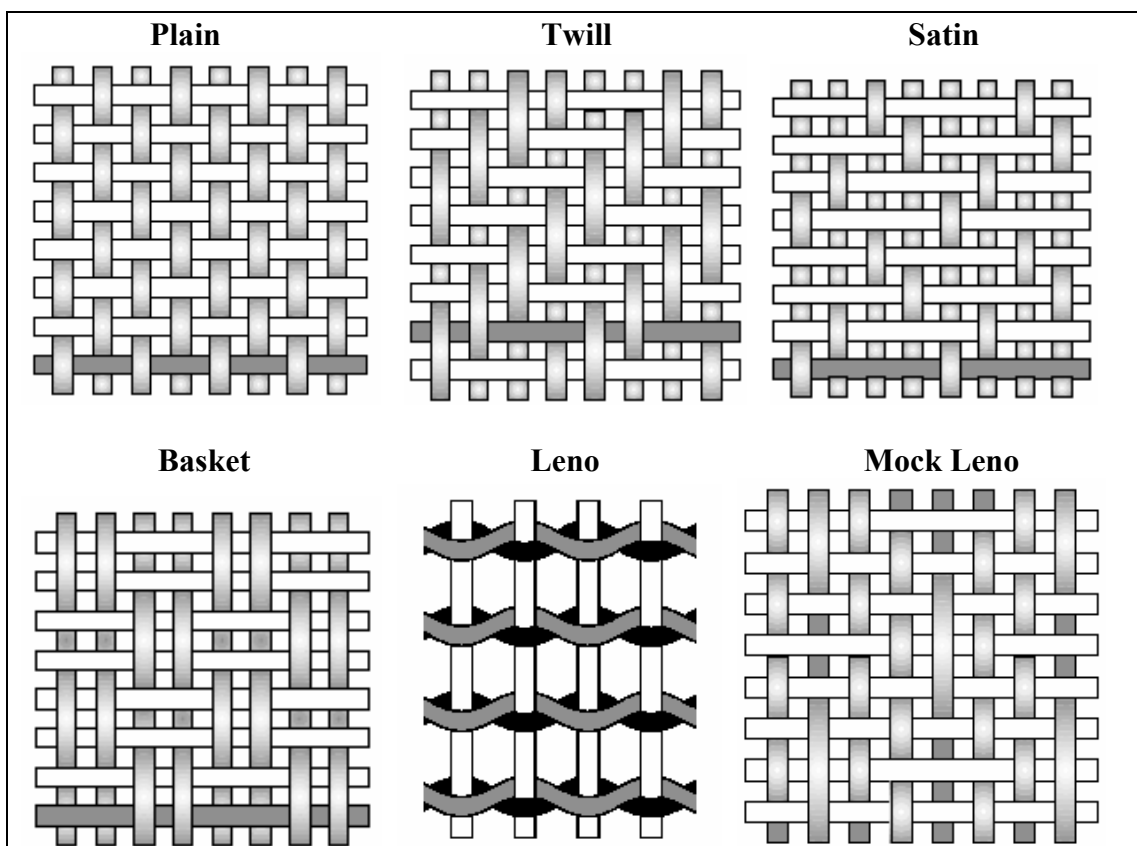
Κριτήριο για την ταξινόμηση των συνθέτων με ενίσχυση ινών αποτελεί ο προσανατολισμός και η διάταξη των ινών μέσα στη μάζα της μήτρας. Σύμφωνα με το κριτήριο τούτο, τα ινώδη σύνθετα υλικά διακρίνονται σε (Σχήμα 2.5):

- Μονοδιευθυντικά σύνθετα, οι ίνες των οποίων προσανατολίζονται προς την ίδια διεύθυνση, και
- Πολυδιευθυντικά σύνθετα, οι ίνες των οποίων έχουν διαφορετικές διευθύνσεις. Η ιδιότητα αυτή οδηγεί στην περαιτέρω διάκριση των πολυδιευθυντικών στα εξής:
 - Σύνθετα με ίνες τυχαίας διεύθυνσης
 - Σύνθετα με ίνες σε πλέξη ύφανσης
 - Σύνθετα με ίνες σε τρισσορθογώνια ύφανση.



Σχήμα 2.5: Τύποι διάταξης των ινών: (α) μονοδιευθυντικές ίνες, (β) ίνες τυχαίου προσανατολισμού, (γ) ίνες με πλέξη ύφανσης και (δ) ίνες σε τρισσορογώνια πλέξη

Ειδικότερα, η διάταξη πλέξης ύφανσης διαθέτει πολυάριθμα πρότυπα (μοτίβα) πλέξης. Σε αυτά παρατηρούνται οι ίνες οριζόντιας (κατά το μήκος) διεύθυνσης (warp) και κατακόρυφης διεύθυνσης (weft ή fill). Υπάρχουν και περιπτώσεις όπου οι δεύτερες ίνες είναι υπό γωνία όχι 90° (συνήθως $22,5^\circ$ ή 45°). Ο τύπος της πλέξης επηρεάζει την απόδοση του υφάσματος με πολλούς τρόπους, συμπεριλαμβανομένων της σταθερότητας, της προσαρμοστικότητας, του πορώδους, της αντοχής και της δυσκαμψίας. Σχεδόν κάθε δυνατή πλέξη μπορεί να πλεχθεί, αλλά για κατασκευαστικούς λόγους έχουν επικρατήσει οι εξής έξι (Σχήμα 2.6):



Σχήμα 2.6: Τυπικές πλέξεις ύφανσης

Plain: Κάθε οριζόντια ίνα περνά εναλλάξ κάτω και πάνω από κάθε κατακόρυφη. Το ύφασμα είναι συμμετρικό, με καλή σταθερότητα και λογικό πορώδες. Όμως, είναι το πιο δύσκολο να απλωθεί, και ο υψηλός βαθμός κυμάτωσης των ινών οδηγεί σε σχετικά χαμηλές μηχανικές ιδιότητες σε σύγκριση με άλλα πρότυπα πλέξης. Τείνει να μη χρησιμοποιείται για πολύ βαριές υφάνσεις, λόγω του υπέρμετρου πλισαρίσματος.

Twill: Μία ή περισσότερες οριζόντιες ίνες πλέκονται εναλλάξ πάνω και κάτω από δύο ή περισσότερες κατακόρυφες ίνες με έναν τακτικό επαναλαμβανόμενο τρόπο. Τούτο παράγει την οπτική εντύπωση μιας ευθείας ή τεθλασμένης διαγώνιας "ράβδωσης" στο ύφασμα. Σε σχέση με την plain πλέξη παρατηρείται καλύτερη δυνατότητα εμποτισμού και μικρότερη κυμάτωση, με μία μικρή μόνο μείωση της σταθερότητας. Με μειωμένο πλισάρισμα, το ύφασμα δίνει επίσης μία ομαλότερη επιφάνεια και ελαφρώς υψηλότερες μηχανικές ιδιότητες.

Satin: Οι πλέξεις satin είναι ουσιαστικά πλέξεις twill τροποποιημένες ώστε να παράγουν λιγότερες διασταυρώσεις οριζοντίων και κατακόρυφων ινών. Ο αριθμός "harness" που χαρακτηρίζει την πλέξη (τυπικά 4, 5 και 8) είναι ο συνολικός αριθμός των ινών που περνούν προτού το μοτίβο αρχίσει να επαναλαμβάνεται. Τα υφάσματα αυτών των πλέξεων είναι πολύ επίπεδα, επιδεικνύουν καλό εμποτισμό και, λόγω της μικρής κυμάτωσης, έχουν καλές μηχανικές ιδιότητες. Τα πρότυπα αυτά επιτρέπουν στις ίνες να πλέκονται με τη μεγαλύτερη εγγύτητα και παράγουν υφάσματα με μία "σφιχτή" πλέξη. Ωστόσο, η χαμηλή σταθερότητά τους και η ασυμμετρία τους πρέπει να ληφθεί υπόψη (η ασυμμετρία οδηγεί στη μία όψη του υφάσματος να δεσπόζουν οι ίνες οριζόντιας κατεύθυνσης, ενώ στην άλλη να δεσπόζουν οι κατακόρυφες κατεύθυνσης).

Basket: Η πλέξη τούτη είναι κατά βάση ίδια με την plain, μόνο που εδώ δύο ή περισσότερες οριζόντιες ίνες συνυφαίνονται εναλλάξ με δύο ή περισσότερες κατακόρυφες. Μια διάταξη δύο οριζοντίων που διασταυρώνονται με δύο κατακόρυφες ίνες καλείται 2×2 basket, αλλά οι διατάξεις των ινών δεν είναι απαραίτητο να είναι συμμετρικές. Συνεπώς, είναι πιθανό να έχουμε 8×2, 5×4, κ.τ.λ. Η πλέξη αυτή είναι πιο επίπεδη και, λόγω λιγότερου πλισαρίσματος, πιο δυνατή από την plain, αλλά λιγότερο σταθερή. Πρέπει να χρησιμοποιείται σε βαριές υφάνσεις.

Leno: Η πλέξη τούτη βελτιώνει τη σταθερότητα σε "ανοικτά" υφαντά, τα οποία έχουν μικρό περιεχόμενο σε ίνες. Αποτελεί μία μορφή plain πλέξης στην οποία οι γειτονικές οριζόντιες ίνες τυλίγονται γύρω από διαδοχικές κατακόρυφες ίνες για να σχηματίσουν ένα ελικοειδές ζεύγος, το οποίο σταθεροποιεί κάθε κατακόρυφη ίνα στη θέση της. Τα υφάσματα με πλέξη leno χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με άλλα πρότυπα πλέξης, διότι αν χρησιμοποιηθεί μόνη της η ανοικτή αυτή πλέξη δε θα μπορούσε να δώσει ένα αποτελεσματικό σύνθετο προϊόν.

Mock Leno: Μία εκδοχή της plain πλέξης στην οποία περιστασιακές οριζόντιες ίνες, σε τακτικά διαστήματα, παρεκκλίνουν από την τυπική κάτω – πάνω εναλλαγή και εναλλάσσονται κάθε δύο ή περισσότερες ίνες. Τούτο συμβαίνει με παρόμοια συχνότητα και στην κατακόρυφη διεύθυνση, και το συνολικό αποτέλεσμα είναι ένα ύφασμα με αυξημένο πάχος, πιο τραχεία επιφάνεια και πρόσθετο πορώδες.

Μία άλλη διάκριση των ινωδών συνθέτων αφορά τη σχέση μεταξύ του μήκους (l) και της διαμέτρου (d) των ινών, η οποία δίνει τα ακόλουθα είδη ινών:

- Συνεχείς ή μακριές ίνες (continuous fibers), στις οποίες είναι $l/d \geq 100$
- Ασυνεχείς ή κοντές ίνες (discontinuous fibers), στις οποίες είναι $l/d < 100$
- Νηματίδια ή τριχίτες (whiskers), όπου είναι $d < 1\mu\text{m}$ και $l \cong 100\mu\text{m}$ (αναφέρονται σε λεπτούς μονοκρυστάλλους κεραμικού υλικού).

Σημειωτέον ότι λόγω του μήκους τους, οι κοντές ίνες δεν μπορούν να αποτελέσουν μονοδιευθυντική ενίσχυση, αλλά συναντώνται συνήθως με τη μορφή πλέγματος ινών τυχαίας διεύθυνσης.

2.3.2 Ταξινόμηση κοκκωδών συνθέτων

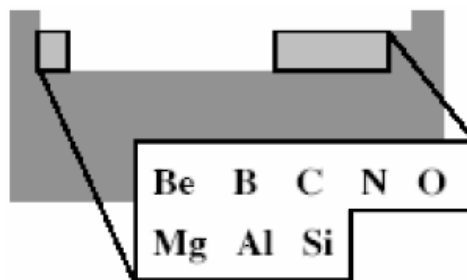
Τα σύνθετα υλικά με ενίσχυση σωματιδίων, σφαιρικού συνήθως σχήματος, βάσει του μεγέθους αυτών, κατατάσσονται στις εξής δύο κατηγορίες:

- Σύνθετα με ενίσχυση σωματιδίων μεγάλου μεγέθους: Τα σωματίδια έχουν διάμετρο κάποιων μm και περιέχονται σε ποσοστό μεγαλύτερο του 25%.
- Σύνθετα με ενίσχυση μικρών σωματιδίων σε διασπορά: Η ενισχυτική φάση – συνήθως πρόκειται για οξείδια – περιέχεται σε συγκεντρώσεις μικρότερες του 15%. Η διάμετρος των σωματιδίων κυμαίνεται μεταξύ 0,01 και 0,1 μm . Η ισχυροποίηση της μήτρας επιτυγχάνεται με την παρεμπόδιση της διάδοσης των διαταραχών, λόγω της παρουσίας των ενισχυτικών σωματιδίων.

2.4 Ίνες

Οι ίνες είναι το κύριο συστατικό σε ένα ινώδες σύνθετο υλικό. Επωμίζονται το σημαντικότερο μερίδιο της φόρτισης σε μία σύνθετη κατασκευή. Συνεπώς, προκειμένου να προσφέρουν ικανοποιητική ενίσχυση των ινών της μήτρας, το υλικό κατασκευής τους επιλέγεται έτσι ώστε να παρουσιάζει υψηλή στιβαρότητα (υψηλό μέτρο ελαστικότητας, E) και υψηλή τάση θραύσης. Επιπλέον ιδιότητες πολλών ινών, εξίσου σημαντικές με τις παραπάνω, είναι η υψηλή δυσθραυστότητα (toughness), η μικρή πυκνότητα (ρ), η ηλεκτρική αγωγιμότητα και η θερμική αντίσταση.

Ο πρώτος τύπος ίνας που χρησιμοποιήθηκε για την ενίσχυση πλαστικού υλικού σε αεροπορικές κατασκευές ήταν οι ίνες από λινάρι. Με την προσθήκη ρητίνης δημιουργήθηκε το κατασκευαστικό υλικό για τη ναυπήγηση του αεροσκάφους "Gordon Aerolite". Τα περισσότερα ενισχυτικά υλικά που χρησιμοποιούνται σήμερα βασίζονται κυρίως σε στοιχεία που ανήκουν στη 2^η και 3^η περίοδο του Περιοδικού Συστήματος (Σχήμα 2.7). Στα προηγμένα σύνθετα υλικά, οι ενισχυτικές ίνες είναι κατασκευασμένες από γυαλί, άνθρακα, πολυμερή, μέταλλα, κεραμικά και φυσικά ορυκτά.



Σχήμα 2.7

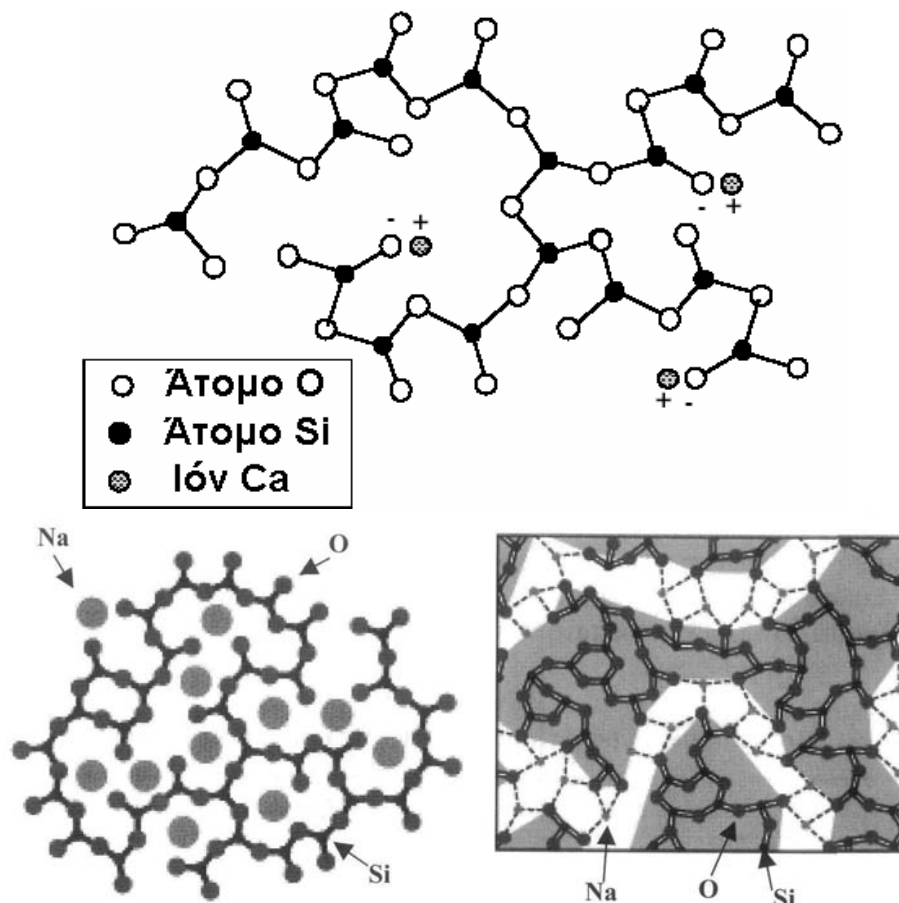
2.4.1 Ίνες γυαλιού

Στα σύνθετα υλικά πρώτης γενιάς (1940), χρησιμοποιήθηκαν ως ενισχυτικά ίνες γυαλιού. Η χρήση τους συνεχίζεται επιτυχώς έως και σήμερα, ενώ είναι οι πιο διαδεδομένες ίνες στα σύνθετα πολυμερικής μήτρας (Polymer matrix composite – PMC). Η σύστασή τους βασίζεται σε οξειδία πυριτίου, ασβεστίου, αλουμινίου κ.ά. με κυρίαρχο να είναι το διοξείδιο του πυριτίου (silica).

Υπάρχει ένας αριθμός διαφορετικών συνθέσεων γυαλιού που χρησιμοποιούνται λόγω των συγκεκριμένων διαφορετικών ιδιοτήτων τους. Ειδικότερα, ο τύπος γυαλιού A, υλικό που χρησιμοποιείται για παράθυρα, είναι τώρα απαρχαιωμένος για την κατασκευή ινών, αλλά ο τύπος αυτός ήταν φθηνός και είχε καλή αντίσταση στα οξέα. Η ανάγκη για ειδικές ηλεκτρικές ιδιότητες για εφαρμογές, όπως κελύφη ραντάρ, οδήγησε στην ανάπτυξη του γυαλιού τύπου E (E – glass), το οποίο είναι τώρα η ποικιλία που παράγεται σε μεγαλύτερη κλίμακα. Υπάρχουν διάφορες παραλλαγές, όπως συνθέσεις χωρίς μαγνήσιο ή φθόριο, οι οποίες παράγονται λόγω της διαθεσιμότητας των τοπικών ακατέργαστων υλικών ή λόγω περιορισμένης προμήθειας του φθορίου. Το γυαλί τύπου C (C – glass) αναπτύχθηκε λόγω της αντίστασής του στη χημική διάβρωση. Το γυαλί τύπου D (D – glass) δημιουργήθηκε ως ένας βελτιωμένος ηλεκτρικός τύπος για μοντέρνα κελύφη ραντάρ. Το γυαλί τύπου

S (S – glass), το οποίο αρχικά αναπτύχθηκε για δομικά στοιχεία αεροσκαφών και επενδύσεις πυραύλων, έχει την υψηλότερη αντοχή σε εφελκυσμό από όλες τις ίνες εν χρήσει. Εντούτοις, η διαφορά στη σύνθεση και το υψηλότερο κόστος κατασκευής το κάνουν ακριβότερο από τον τύπο E. Προσφάτως, είναι διαθέσιμη μία εκδοχή του τύπου S χαμηλότερου κόστους, η οποία καλείται γυαλί τύπου S – 2 (S – 2 glass). Παρόλο που το γυαλί τύπου S – 2 κατασκευάζεται με λιγότερο αυστηρές, μη στρατιωτικές, προδιαγραφές, η αντοχή του σε εφελκυσμό και το μέτρο ελαστικότητάς του είναι όμοια με αυτά του τύπου S. Το γυαλί τύπου S αναπτύχθηκε στην Αμερική και χρησιμοποιείται πολύ σε υβριδικά συστήματα, σε συνδυασμό με ίνες γραφίτη και αραμιδίου. Το γυαλί τύπου R (R – glass) είναι η ευρωπαϊκή εκδοχή του S (Γαλλία) και έχει ομοίως υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό και μέτρο ελαστικότητας. Η εταιρεία Nittobo Boseki παρουσίασε τον τύπο γυαλιού T (Texxes), το οποίο λέγεται ότι έχει 36% υψηλότερη αντοχή σε εφελκυσμό, 16% υψηλότερο μέτρο και 40% χαμηλότερο συντελεστή θερμικής διαστολής από τον τύπο γυαλιού E, αλλά δεν υπάρχουν αποτελέσματα από δοκιμές.

Η αντοχή και το μέτρο του γυαλιού καθορίζεται κατ' αρχήν από την τριδιάστατη δομή των οξειδίων από τα οποία συνίσταται. Χαρακτηριστικές δομές γυαλιού παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.8.



Σχήμα 2.8: Μοντέλα δομής γυαλιού

Τα συνήθη γυαλιά είναι άμορφα, ενώ αν θερμανθούν σε υψηλές θερμοκρασίες επί μακρόν, αποκτούν κάποια κρυσταλλικότητα. Αυτό τυπικά οδηγεί σε μείωση της

αντοχής τους. Η σύνθεση κάποιων συνήθων τύπων γυαλιού, καθώς και οι κύριες φυσικές και μηχανικές ιδιότητες τους δίδονται στον Πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1: Χημική σύσταση και ιδιότητες ινών γυαλιού

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΤΥΠΟΣ				
	E	C	R	S	SiO ₂ καθαρή
Σύσταση (%)					
SiO ₂	54,0	65,0	58,0	65,0	>99,5
Al ₂ O ₃	15,0	4,0	25,0	25,0	–
B ₂ O ₃	8,0	5,0	0,2	–	–
CaO	17,0	13,0	10,0	–	–
MgO	5,0	3,0	5,5	10,0	–
Na ₂ O	0,6	7,9	0,5	–	–
K ₂ O	–	1,7	0,5	–	–
Fe ₂ O ₃	0,4	0,4	0,3	–	–
Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	73	69	85	87	72
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	2100–3400	3300	2500–4400	2800–4800	3500–8800
Πυκνότητα (g/cm ³)	2,54	2,50	2,50	2,48	2,20
Θερμοκρασία τήξης (°C)	900–1200	800–1100	1400–1600	1400–1600	1720
Μέγιστη θερμοκρασία χρήσης (°C)	550	500	650	650	750

Οι τύποι ινών γυαλιού του παραπάνω Πίνακα έχουν τα εξής χαρακτηριστικά:

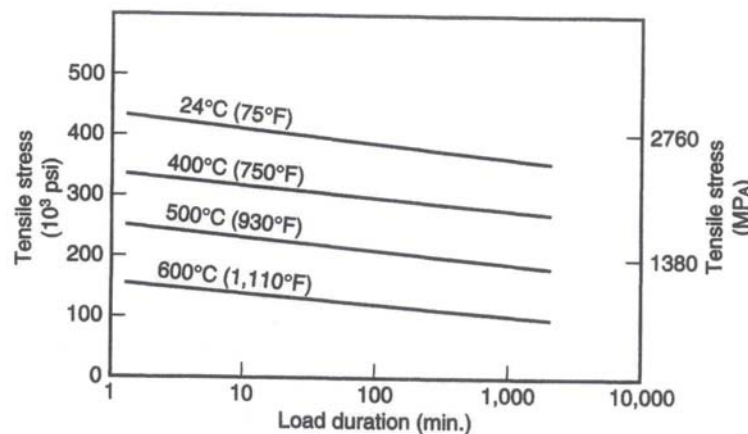
- Τύπος E – glass (E → electrical): Οι συχνότερα χρησιμοποιούμενες ίνες γυαλιού. Έχουν καλή αντοχή και δυσκαμψία, καλές ηλεκτρικές ιδιότητες και δεν επηρεάζονται από τις καιρικές συνθήκες. Όμως, έχουν μέτρια ανθεκτικότητα σε χημικά αντιδραστήρια.
- Τύπος C – glass (C → corrosion): Ίνες με υψηλή αντίσταση στη χημική διάβρωση από τις ίνες τύπου E. Ωστόσο, είναι ακριβότερες από τις ίνες τύπου E.
- Τύπος S – glass (S → stiffness): Ίνες με υψηλότερη δυσκαμψία και αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες, αλλά ακριβότερες από τις ίνες τύπου E.

Έχουν παρατηρηθεί αυξημένες μηχανικές ιδιότητες της ίνας, καθώς και της μέγιστης θερμοκρασίας του συνθέτου, όταν το περιεχόμενο των ινών σε SiO₂ είναι μεγάλο (>99,5%). Για το λόγο αυτό, σε ειδικές εφαρμογές όπου απαιτούνται υψηλές μηχανικές ιδιότητες κάτω από υψηλές θερμοκρασίες, χρησιμοποιούνται ίνες από 100% καθαρή πυριτία.

Η μέση αντοχή σε εφελκυσμό ινών γυαλιού που μόλις έχουν κατασκευαστεί μπορεί να υπερβαίνει τα 3,45 GPa. Εντούτοις, η επιφανειακή φθορά (ελαττώματα) που εμφανίζεται μέσω εκδορών και εγχαράξεων, είτε λόγω της μεταξύ τους τριβής, ή λόγω της επαφής τους με τον εξοπλισμό της κατεργασίας, τείνει να τη μειώσει σε τιμές στην περιοχή 1,72 – 2,07 GPa. Η υποβάθμιση της αντοχής αυξάνεται καθώς τα

ελαττώματα επιφανείας διευρύνονται κάτω από κυκλικές φορτίσεις, κάτι που συνιστά ένα από τα κύρια μειονεκτήματα της χρήσης ιών γυαλιού σε εφαρμογές κόπωσης. Επιφανειακές θλιπτικές τάσεις που προκαλούνται από ανταλλαγή ιόντων αλκαλίων ή η εξάλειψη των ελαττωμάτων επιφανείας μέσω χημικής εγχάραξης μπορούν να περιορίσουν το πρόβλημα. Όμως, οι ίνες γυαλιού του εμπορίου δε διατίθενται με τέτοιες επιφανειακές τροποποιήσεις.

Η αντοχή σε εφελκυσμό των ιών γυαλιού μειώνεται επίσης με την παρουσία νερού, ή υπό την επίδραση σταθερών φορτίων (στατική κόπωση). Το νερό "ξεπλένει" τα αλκάλια από την επιφάνεια και βαθιάει τα επιφανειακά ελαττώματα που ήδη υπάρχουν στις ίνες. Υπό την επίδραση διατηρούμενων φορτίων, η ανάπτυξη των επιφανειακών ελαττωμάτων επιταχύνεται εξαιτίας της διάβρωσης από την ατμοσφαιρική υγρασία. Ως αποτέλεσμα, η αντοχή σε εφελκυσμό των ιών γυαλιού μειώνεται αυξανόμενης της χρονικής διάρκειας της φόρτισης (Σχήμα 2.9).



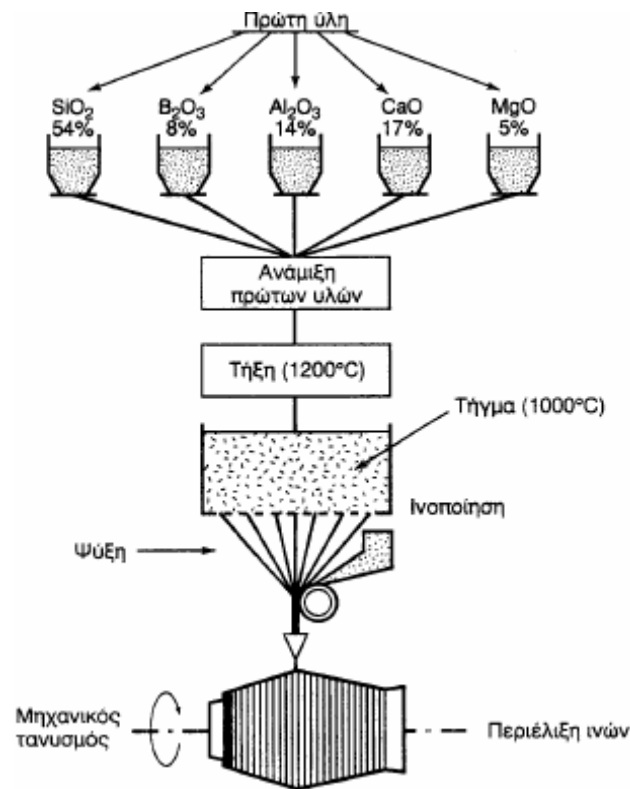
Σχήμα 2.9: Μείωση της αντοχής σε εφελκυσμό των ιών γυαλιού τύπου E, ως συνάρτηση του χρόνου επιβολής του φορτίου σε διάφορες θερμοκρασίες

Οι ίνες γυαλιού παρασκευάζονται με διάλαση τήγματος γυαλιού διαμέσου μήτρας με διάτρητο πυθμένα και περιλαμβάνει τα ακόλουθα στάδια (Σχήμα 2.10):

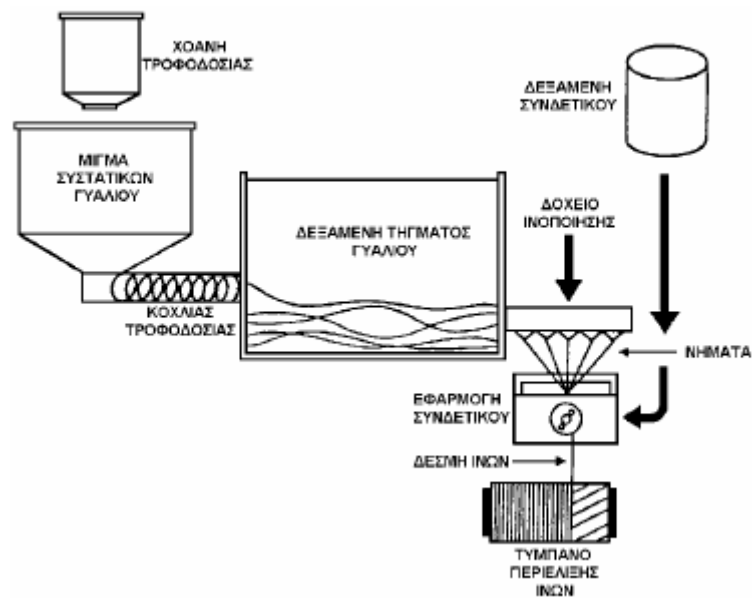
- Η πρώτη ύλη τοποθετείται σε δεξαμενή, όπου και τήκεται.
- Το τήγμα τροφοδοτείται σε σειρά κυλινδρικών δοχείων με διάτρητους πυθμένες (διάμετρος οπών 1 – 2 mm).
- Υπό την επίδραση του βάρους του, το γυαλί ρέει μέσα από τις οπές του πυθμένα (τυπικός αριθμός οπών: 204).
- Οι παραγόμενες ίνες εξολκεύονται μηχανικά μέχρις ότου αποκτήσουν την τελική τους διάμετρο (1 – 15 μm) και ακολουθεί ελαφρός ψεκασμός τους με νερό (ψύξη).
- Έπειτα, οι ίνες διέρχονται από ιμάντα που επιβάλλει σε αυτές προστατευτικό λιπαντικό συνδετικό υλικό (binder) ή ειδικά πρόσθετα (sizes) που δρουν ως προστατευτικές επικαλύψεις και συνεισφέρουν στην καλύτερη πρόσφυση ίνας – μήτρας.
- Οι ίνες περιτυλίσσονται ανά δεσμίδες (strands) γύρω από τύμπανο, το οποίο περιστρέφεται με υψηλή ταχύτητα (3 – 4 km/min ή 50 – 70 m/s).
- Οι ρόλοι υαλονήματος υφίστανται ξήρανση προτού υποβληθούν σε οποιαδήποτε περεταίρω επεξεργασία μορφής.

Ο έλεγχος της διαμέτρου των ινών γίνεται με ρύθμιση της στάθμης του τήγματος στη δεξαμενή, της πυκνότητάς του, της διαμέτρου των οπών, όπως επίσης και της ταχύτητας περιστροφής του τυμπάνου. Κατά τη διάρκεια της παραγωγής των ινών, θα πρέπει να αποφεύγεται η επαφή των ινών μεταξύ τους, καθώς και με άλλα αντικείμενα τα οποία πιθανόν να προκαλέσουν επιφανειακές κακώσεις στην ίνα.

(α)



(β)



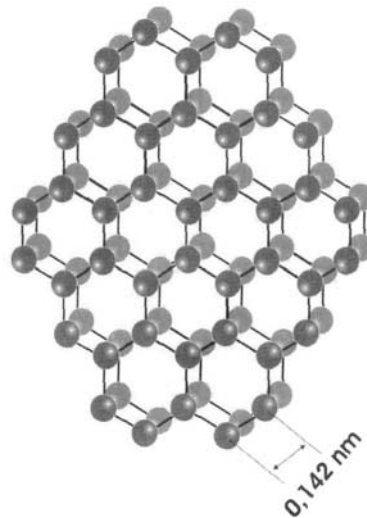
Σχήμα 2.10: Παραγωγή ενισχυτικών ινών γυαλιού: (α) Στάδια παραγωγής, (β) Απλοποιημένο διάγραμμα της εγκατάστασης παραγωγής

2.4.2 Ίνες άνθρακα

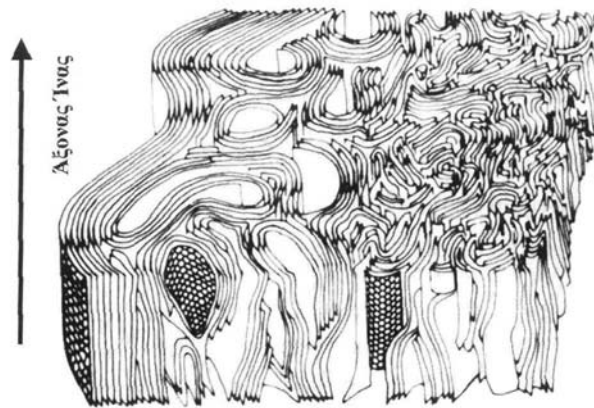
Οι ίνες άνθρακα, περισσότερο από όλες τις άλλες ινώδεις ενισχύσεις, παρέχουν τη βάση ανάπτυξης των PMC ως προηγμένων υλικών κατασκευής. Γενικά, όταν απαιτείται βέλτιστος συνδυασμός μηχανικής συμπεριφοράς και ελάττωσης βάρους, οι χρησιμοποιούμενες ίνες είναι, συνήθως, ίνες άνθρακα. Επίσης, προτιμώνται όταν για το προς χρήση σύνθετο υλικό απαιτείται χαμηλή θερμική διαστολή.

Οι ίνες άνθρακα διατίθενται στο εμπόριο σε μία ποικιλία από μέτρα ελαστικότητας, τα οποία κυμαίνονται μεταξύ 200 GPa και 800 GPa, ενώ υπάρχουν και περιπτώσεις όπου το μέτρο ελαστικότητας φθάνει τα 1035 GPa. Εν γένει, οι ίνες χαμηλού μέτρου ελαστικότητας έχουν ελαφρώς μικρότερη πυκνότητα, χαμηλότερο κόστος, παρουσιάζουν υψηλότερη αντοχή σε εφελκυσμό και θλίψη και υψηλότερη παραμόρφωση θραύσης από τις ίνες υψηλού μέτρου ελαστικότητας.

Ο γραφίτης αποτελείται από ανισότροπους πολυκρυσταλλίτες, των οποίων η ανισοτροπία εξαρτάται από τις συνθήκες παρασκευής τους. Αποτέλεσμα του ισχυρού προσανατολισμού των κρυσταλλιτών παράλληλα στο διαμήκη άξονα των ανθρακονημάτων (carbon fibers), είναι η υψηλή στιβαρότητα και αντοχή σε θραύση, καθώς και ο χαμηλός συντελεστής γραμμικής θερμικής διαστολής κατά τη διεύθυνση αυτή. Σε ένα μονοκρύσταλλο άνθρακα, τα άτομα του άνθρακα έχουν εξαγωνική διάταξη (Σχήμα 2.11) σε επίπεδα διατεταγμένα το ένα πάνω στο άλλο σε κανονική σειρά. Τα άτομα σε κάθε επίπεδη στρώση συνδέονται μεταξύ τους με ισχυρότατους ομοιοπολικούς δεσμούς, ενώ οι επίπεδες στρώσεις συγκρατούνται μεταξύ τους με ασθενείς δυνάμεις Van der Waals. Αυτό σημαίνει ότι βασικές κρυσταλλικές μονάδες είναι έντονα ανισότροπες. Έτσι, το μέτρο ελαστικότητας παράλληλα προς τον c-άξονα, δηλαδή κάθετα προς τις επίπεδες στρώσεις είναι της τάξης των 30 GPa. Η απόσταση μεταξύ των επίπεδων στρώσεων είναι περίπου 0,34 nm. Για να παρουσιάζουν οι ίνες του άνθρακα υψηλό μέτρο ελαστικότητας και αντοχή, πρέπει οι στρώσεις του γραφίτη να είναι διατεταγμένες κατά τη διεύθυνση του άξονα της ίνας. Στην πράξη, όμως, οι κρυσταλλικές μονάδες είναι πολύ μικρές, άτακτα διατεταγμένες και παρουσιάζουν ασυνέχειες δομής. Στο Σχήμα 2.12 φαίνεται η δομή ανθρακονήματος, όπως λαμβάνεται με τη μέθοδο X-ray small angle scattering.



Σχήμα 2.11: Διάταξη των ατόμων άνθρακα στον κρύσταλλο γραφίτη



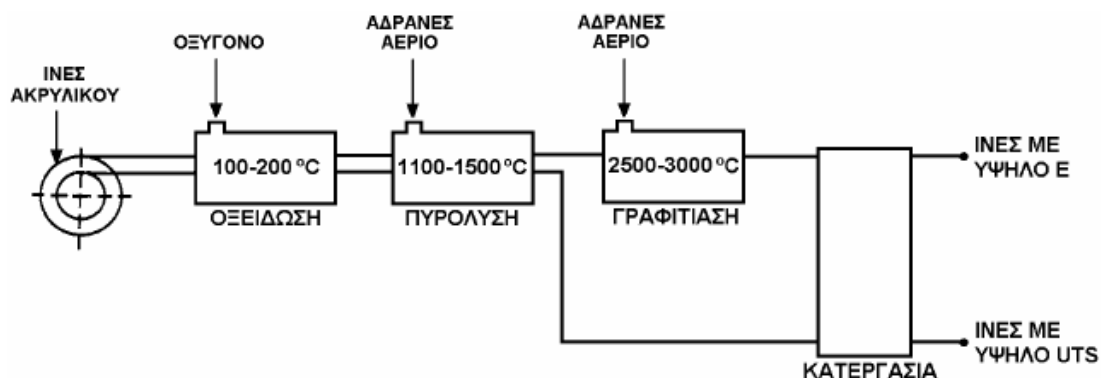
Σχήμα 2.12: Αναπαράσταση της δομής ινών άνθρακα

Οι ίνες άνθρακα κατασκευάζονται από κυρίως δύο προγονικά υλικά. Είναι πιθανόν να χρησιμοποιηθούν σαν πρώτες ύλες μία μεγάλη ποικιλία υλικών, όπως ρητίνη φανικού οξέος, διάφορα πολυμερή, ίνες τεχνητού μεταξιού (rayon) και υδρογονάνθρακες. Όμως, τα πλέον χρησιμοποιούμενα είναι το πολυακρυλονιτρίλιο (polyacrylonitrile – PAN) και η πίσσα από πετρέλαιο ή κάρβουνο.

Ίνες άνθρακα με βάση το πολυακρυλονιτρίλιο (PAN)

Το ειδικό PAN που χρειάζεται για τη συγκεκριμένη διαδικασία κατασκευάζεται κανονικά από μία από τις εταιρείες που κατασκευάζουν υφαντές ίνες, αφού οι εμπορικές ίνες PAN (διαφορετικής σύνθεσης από τις προηγούμενες) είναι η κοινή ακρυλική ίνα που χρησιμοποιείται για χαλιά και είδη ρουχισμού. Οι κατασκευαστές των ανθρακονημάτων αγοράζουν το παραπάνω ειδικό PAN από αυτές τις εταιρείες, αν και όλο και πιο πολύ δημιουργούνται ενωμένες επιχειρήσεις με σκοπό να δώσουν στους κατασκευαστές των ανθρακονημάτων περισσότερο έλεγχο στην ποιότητα του προγονικού τους υλικού. Η μετατροπή του PAN σε ίνα άνθρακα γίνεται σε δύο ή τρία στάδια (Σχήμα 2.13), ανάλογα με τον τύπο ίνας που κατασκευάζεται. Τα στάδια τούτα είναι τα εξής:

- Οξείδωση, υπό τάση, των ινών PAN στον αέρα και σε χαμηλή θερμοκρασία (100 – 200 °C). Η ταυτόχρονη εφαρμογή τάσης είναι απαραίτητη για την ευθυγράμμιση των αλυσίδων του πολυμερούς.
- Πυρόλυση, υπό τάση, σε ουδέτερη ή αναγωγική ατμόσφαιρα και σε θερμοκρασία 1100 – 1500 °C. Οι παραγόμενες ίνες στο στάδιο αυτό χαρακτηρίζονται ως ίνες άνθρακα υψηλής αντοχής (high strength carbon fibers) και η αντοχή τους φθάνει τα 5,5 GPa.
- Η θέρμανση σε ουδέτερη ή αναγωγική ατμόσφαιρα συνεχίζεται σε υψηλές θερμοκρασίες (2500 – 3000 °C), οπότε πραγματοποιείται γραφίτιωση με ταυτόχρονη ανακρυστάλλωση, η οποία οδηγεί σε ισχυρό προσανατολισμό των κρυσταλλιτών. Οι παραγόμενες ίνες στο στάδιο αυτό χαρακτηρίζονται ως ίνες άνθρακα υψηλού μέτρου ελαστικότητας (high modulus carbon fibers) και έχουν μέτρο ελαστικότητας περίπου 400 GPa.



Σχήμα 2.13: Παραγωγή ενισχυτικών ινών άνθρακα από PAN

Ίνες άνθρακα με βάση την πίσσα

Η πίσσα από πετρέλαιο ή κάρβουνο είναι η δεύτερη σημαντική πρώτη ύλη για την κατασκευή ινών άνθρακα. Η αρχική προσδοκία ήταν ότι η χρήση ενός παραπροϊόντος φθηνά διαθέσιμου, θα είχε ως αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση του κόστους κατασκευής των ινών. Η σημερινή άποψη είναι ότι το κόστος καθαρισμού και μετατροπής της πίσσας σε κατάλληλη μορφή για την κατασκευή ινών αντισταθμίζει το χαμηλότερο κόστος του ακατέργαστου υλικού, ώστε για ίνες της ίδιας ποιότητας και με τις ίδιες ιδιότητες, οι τιμές των ινών με βάση το PAN και αυτών με βάση την πίσσα να είναι όμοιες. Οπωσδήποτε, οι ίνες με βάση την πίσσα μπορεί να έχουν διαφορετικές ιδιότητες. Για παράδειγμα, μπορεί να έχουν υψηλότερα μέτρα ελαστικότητας και μεγαλύτερη ηλεκτρική αγωγιμότητα. Μέχρι πρότινος, οι παραπάνω ίνες ήταν πιο αδύναμες από τις ίνες με βάση το PAN για το ίδιο μέτρο ελαστικότητας, αλλά αυτό αλλάζει.

Η διαδικασία παραγωγής ινών άνθρακα βασισμένες στην πίσσα διαφέρει από τις βασισμένες στο PAN μόνο στην αρχική φάση. Η πίσσα θερμαίνεται σε θερμοκρασία μεγαλύτερη των 350 °C, όπου και γίνεται πολυμερισμός της (τα μόριά της μετατρέπονται σε μακριές διδιάστατες αλυσίδες). Η έντονα παχύρρευστη κατάσταση της πίσσας σε αυτό το στάδιο καλείται μεσοφασική πίσσα (mesophase). Η τηγμένη πίσσα νηματοποιείται αφού περάσει μέσα από μικρές οπές. Κατά τη φάση αυτή επιτυγχάνεται και ο προσανατολισμός των μορίων. Ανάλογα με τις συνθήκες νηματοποίησης επιτυγχάνεται και διαφορετικός βαθμός προσανατολισμού. Έπειτα,

κατά τα γνωστά, ακολουθεί η οξείδωση, η πυρόλυση και η περαιτέρω θέρμανση (γραφιτίαση). Οι ίνες που παράγονται με τη μέθοδο αυτή χαρακτηρίζονται από κρυστάλλους μεγαλύτερου μεγέθους από τους αντίστοιχους των ινών από PAN.

Στον Πίνακα 2.2 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των ινών που έχουν παραχθεί σε δύο στάδια (οξείδωση και πυρόλυση), ίνες υψηλής αντοχής, και σε τρία στάδια (οξείδωση, πυρόλυση και θέρμανση σε υψηλή θερμοκρασία), ίνες υψηλού μέτρου ελαστικότητας.

Πίνακας 2.2: Χαρακτηριστικές ιδιότητες ινών άνθρακα

Τύπος ίνας	Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	Πυκνότητα (g/cm ³)	Μέγιστη θερμοκρασία χρήσης (°C)	Πρώτη ύλη
Υψηλής Αντοχής	200 – 300	2700 – 5500	1,8	2000	PAN
Υψηλού Μέτρου Ελαστικότητας	350 – 420	2000 – 2700	1,9	2500	PAN, πίσσα
Πολύ Υψηλού Μέτρου Ελαστικότητας	450 – 800	1700 – 2600	1,9 – 2,1	2500	PAN, πίσσα

Σε οξειδωτική ατμόσφαιρα, η μέγιστη θερμοκρασία χρήσης των ανθρακονημάτων περιορίζεται στους 500 °C για κάθε τύπο ινών. Κατά το σχεδιασμό του συνθέτου, θα πρέπει οπωσδήποτε να λαμβάνεται υπόψη και η μέγιστη θερμοκρασία χρήσης της ίνας.

Οι ιδιότητες των χρησιμοποιούμενων ανθρακονημάτων εξαρτώνται σημαντικά από την αρχιτεκτονική των ινών της πρώτης ύλης (μονοδιευθυντικές ίνες, διδιάστατο πλέγμα, τριδιάστατο πλέγμα). Ο τρόπος διευθέτησης των ινών αυτών καθορίζει και τον βαθμό ανισοτροπίας των ανθρακονημάτων που προκύπτουν και μπορεί να ποικίλει από την πλήρη ισοτροπία έως την πλήρη ανισοτροπία. Η δυνατότητα επιλογής από ένα μεγάλο εύρος τιμών της θερμοκρασίας κάθε σταδίου παραγωγής ανθρακονημάτων δίνει τη δυνατότητα παραγωγής ινών διαφορετικού βαθμού γραφιτίασης και, κατά συνέπεια, διαφορετικών μηχανικών ιδιοτήτων. Οι μηχανικές και οι φυσικές ιδιότητες, όπως η θερμική και η ηλεκτρική αγωγιμότητα, εξαρτώνται από το βαθμό γραφιτίασης και το βαθμό ανισοτροπίας.

Οι ίνες άνθρακα είναι εμπορικά διαθέσιμες σε τρεις βασικές μορφές, ήτοι δεσμίδες μακρών, συνεχών ινών (long, continuous tow), κομμένες ίνες (μήκους 6 – 50 mm) και "αλεσμένες" ίνες (μήκους 30 – 3000 μm). Η δεσμίδα των μακρών, συνεχών ινών, η οποία είναι απλώς ένα δέμα από 1000 – 160000 παράλληλα νήματα, χρησιμοποιείται σε εφαρμογές υψηλής απόδοσης. Τέλος, το κόστος παραγωγής των ινών γραφίτη είναι δέκα φορές τουλάχιστον υψηλότερο από το κόστος παραγωγής των ινών γυαλιού.

2.4.3 Ίνες πολυμερούς

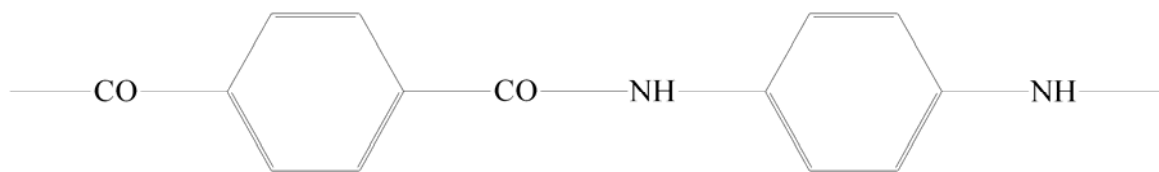
Οι πιο διαδεδομένες ίνες πολυμερούς είναι οι ίνες από Nylon, πολυαιθυλένιο και αραμίδιο (Kevlar).

2.4.3.1 Ίνες αραμιδίου

Οι ίνες αραμιδίου, οι οποίες αρχικά εισήχθησαν σε εμπορική βάση από την εταιρεία DuPont στις αρχές τις δεκαετίας του 1970, είναι βασισμένες σε γραμμικές, σταθερές πολυμερικές αλυσίδες που περιέχουν αρωματικά αμίδια. Κατά τη διαδικασία της περιδίνησης (spinning) που συμβαίνει κατά την παραγωγή ινών, οι μοριακές αλυσίδες προσανατολίζονται εντόνως κατά μήκος του άξονα της ίνας. Τούτο παράγει σαφώς ανισοτροπικές ιδιότητες.

Οι ίνες αυτές της DuPont έγιναν γνωστές με την εμπορική ονομασία Kevlar. Η ίνα Kevlar 49, ένα προϊόν των παραπάνω, ανήκει σε μία ομάδα ιδιαίτερα κρυσταλλικών ινών αρωματικού πολυαμιδίου ή αραμιδίου (aramid), οι οποίες έχουν χαμηλή πυκνότητα και υψηλή ειδική αντοχή (λόγος αντοχής σε εφελκυσμό προς πυκνότητα). Έχουν τυπικά μία πυκνότητα $1,45 \text{ g/cm}^3$, η οποία είναι χαμηλότερη και από αυτήν των ινών γυαλιού (κατά περίπου 40%) και από αυτήν των ινών άνθρακα (κατά περίπου 20%). Οι ίνες επιδεικνύουν επίσης αρκετά υψηλά επίπεδα επιμήκυνσης θραύσης. Όμως, η αντοχή σε θλίψη των ινών αραμιδίου είναι μόνο περί το 20% της αντοχής τους σε εφελκυσμό και τα σύνθετα που περιέχουν ενίσχυση ινών αραμιδίου δεν συνίστανται για εφαρμογές που σχετίζονται με υψηλά θλιπτικά φορτία. Τα σύνθετα αραμιδίου επιδεικνύουν όλκιμη συμπεριφορά στη θλίψη και την κάμψη, με σημαντική απορρόφηση ενέργειας. Η θερμοκρασία συνεχούς χρήσης για τις ίνες αραμιδίου ποικίλλει από 160 ως 200 °C και άλλες επωφελείς ιδιότητες είναι η εξαιρετική αντίσταση στην κόπωση και τη φθορά, καλές ηλεκτρικές ιδιότητες, η υψηλή δυσθραυστότητα (toughness) και καλή αντοχή στη χημική διάβρωση.

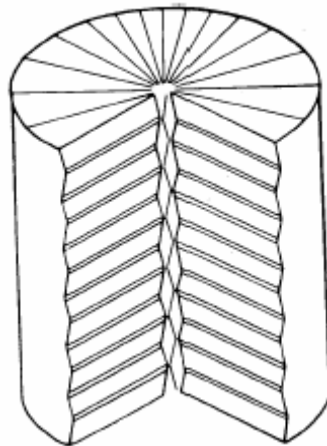
Το Kevlar είναι ένα αρωματικό πολύ(παραφαινυλ-τερεφθαλαμίδιο) (Σχήμα 2.14).



Σχήμα 2.14: Τύπος δομικής μονάδας αραμιδίου

Οι αρωματικοί δακτύλιοι έχουν σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία μακρομορίων με ιδιότητες ισχυρής αλυσίδας. Έτσι, οι υψηλές τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων του Kevlar οφείλονται στο γεγονός ότι οι πολυμερικές δομικές αλυσίδες του υλικού είναι αυτές καθ' αυτές πιο ισχυρές και συντάσσονται έτσι, ώστε να δημιουργούν ένα σταθερότερο πλέγμα, σε μορφή επίπεδης ταινίας. Ο κυλινδρικός φλοιός της ίνας περικλείει και συγκρατεί το υλικό του πυρήνα αποδίδοντας στο προϊόν ιδιαίτερα υψηλές επιδόσεις κατά την αξονική διεύθυνση, αλλά φτωχή συμπεριφορά κατά την εγκάρσια διεύθυνση. Επιπλέον, ενώ στην εφελκυστική καταπόνηση το υλικό συμπεριφέρεται ελαστικά με παραμόρφωση έως και 3%, η μεγάλη του αδυναμία εμφανίζεται στη θλίψη, όπου σε 0,3% θλιπτική παραμόρφωση αναπτύσσεται

πλαστικού τύπου αστοχία. Εντούτοις, είναι αξιοσημείωτο ότι η αστοχία αυτή δεν είναι καταστροφική, αλλά έχει τη μορφή πτυχώσεων (kink bands).



Σχήμα 2.15: Δομή ίνας αραμιδίου (Kevlar)

Υπάρχει μία σειρά τύπων ινών. Στην περίπτωση της DuPont, η σειρά Kevlar καλύπτει ένα φάσμα τιμών αντοχής και μέτρου ελαστικότητας, από τη χαμηλού μέτρου ελαστικότητας Kevlar 29, μέσω της υψηλού μέτρου ελαστικότητας Kevlar 49, μέχρι την πολύ υψηλού μέτρου ελαστικότητας Kevlar 149 και την πολύ υψηλής αντοχής Kevlar 129. Η Kevlar 49 είναι η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη κλάση σε μη-δομικά και ημι-δομικά μέρη εμπορικών αεροσκαφών και ελικοπτέρων, σε θήκες κινητήρα πυραύλων, δοχεία πίεσης και πλοία. Η Kevlar 149, η οποία προσφέρει χαμηλή προσρόφηση υγρασίας, εξετάζεται για εφαρμογές αεροσκάφους, ελικοπτέρου και ειδών άθλησης. Η τελευταία προσθήκη στη σειρά προϊόντος, η οποία ονομάζεται Kevlar Hp, αναφέρεται ότι χαρακτηρίζεται από μια πιο λεία επιφάνεια με ουσιαστικά καθόλου νηματίδια. Αν και οι ιδιότητες είναι συγκρίσιμες με αυτές των Kevlar 29 και 49, υποστηρίζεται ότι η νέα ίνα προσφέρει στα σύνθετα καλύτερη αντίσταση στην κρούση και αντοχή στη φθορά. Οι κύριες εφαρμογές για την Kevlar Hp εντοπίζονται στους τομείς των ειδών άθλησης και της ναυσιπλοΐας, της αγοράς συνθέτων υψηλής απόδοσης.

Πίνακας 2.3: Τυπικές ιδιότητες ινών Kevlar

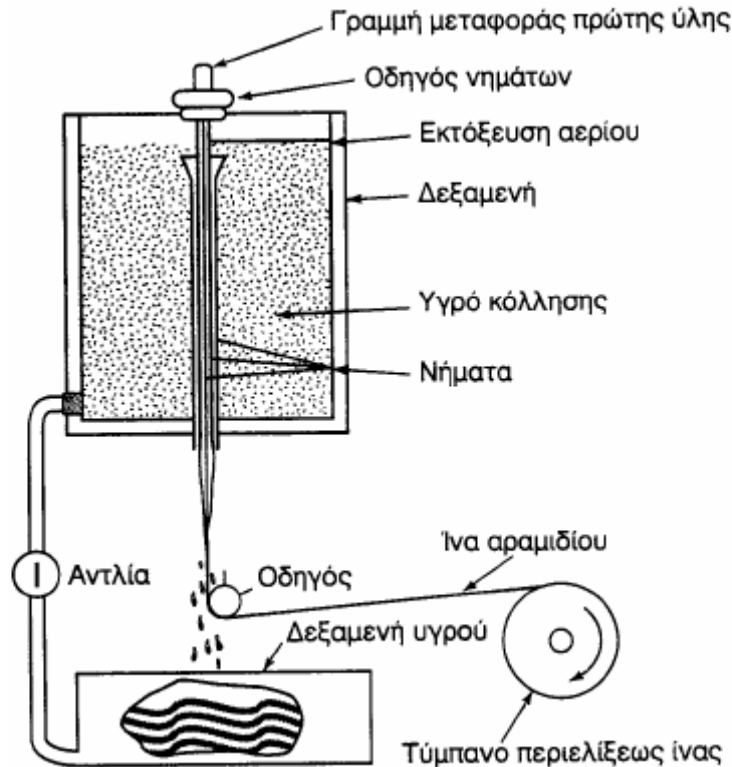
ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	Kevlar 29	Kevlar 49	Kevlar 149
Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	60	130	180
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	3600	3600–4100	3400
Επιμήκυνση θραύσης (%)	4	2,8	2
Πυκνότητα (g/cm ³)	1,45	1,45	1,47
Μέγιστη θερμοκρασία χρήσης (°C)	200	200	200

Άλλες ίνες αραμιδίου περιλαμβάνουν την Technora HM 50 των εταιρειών Teijin και Unitika στην Ιαπωνία, και τις Twaron και Twaron HM της εταιρείας Akzo-Enka στην Ολλανδία και τη Γερμανία.

Οι ίνες Kevlar 49 δε λιώνουν, ούτε υποβοηθούν την καύση, αλλά αρχίζουν να απανθρακώνονται περίπου στους 427 °C. Οι ίνες είναι αρκετά ευαίσθητες στο υπεριώδες φως. Παρατεταμένη άμεση έκθεση στο φως του ήλιου προκαλεί αποχρωματισμό και σημαντική πτώση της αντοχής σε εφελκυσμό. Το πρόβλημα είναι

λιγότερο έντονο σε στρώσεις συνθέτων, όπου οι ίνες καλύπτονται από τη μήτρα. Μπορούν να προστεθούν στη μήτρα υλικά πλήρωσης που απορροφούν την υπεριώδη ακτινοβολία για την επιπλέον μείωση του προβλήματος.

Στο Σχήμα 2.16 φαίνεται η διαδικασία παραγωγής ενισχυτικών ινών πολυαμιδίου.



Σχήμα 2.16: Διάταξη παραγωγής ινών πολυαμιδίου

2.4.3.2 Ίνες πολυαιθυλενίου

Οι ίνες πολυαιθυλενίου (polyethylene – PE) συνίστανται από μακρομόρια που είναι σχεδόν παράλληλα μεταξύ τους. Θεωρητικά, οι ίνες αυτές θα πρέπει να έχουν ένα μέτρο ελαστικότητας της τάξης των 220 GPa. Όμως, τεχνικά είναι αδύνατον να έχουμε πλήρη προσανατολισμό των ινών. Ο προσανατολισμός των μακρομορίων επιτυγχάνεται κατά τον εφελκυσμό του πολυαιθυλενίου. Οι ίνες πολυαιθυλενίου (PE), οι οποίες διατίθενται υπό την εμπορική ονομασία Spectra, παράγονται μέσω περιδίνησης διαλύματος (solution – spinning) ενός PE υψηλού μοριακού βάρους. Οι ίνες αυτές ξεπερνούν όλες τις άλλες αναφορικά με τη διαπερατότητα στα μικροκύματα, προκειμένου για εφαρμογές radome.

Οι ίνες PE Spectra έχουν την υψηλότερη ειδική αντοχή (λόγος αντοχής σε εφελκυσμό προς πυκνότητα) από όλες τις εμπορικά διαθέσιμες ίνες, μέχρι σήμερα. Τούτο οφείλεται στη χαμηλή τους πυκνότητα, $0,97 \text{ g/cm}^3$, η οποία είναι η χαμηλότερη όλων των διαθέσιμων ινών. Δύο άλλα εξαιρετικά χαρακτηριστικά των ινών Spectra είναι η χαμηλή τους απορρόφηση υγρασίας (1% σε σύγκριση με το 5 – 6% της Kevlar 49) και η υψηλή αντίσταση στις εκδορές, τα οποία τις καθιστούν πολύ χρήσιμες σε

σύνθετα θαλάσσιων εφαρμογών, όπως καρίνες πλοίου (boat hulls) και θαλάσσια σκι (water skis).

Ο κύριος περιορισμός των υλικών αυτών είναι το χαμηλό όριο μέγιστης θερμοκρασίας (περίπου 120 °C), πέραν του οποίου οι ίνες χάνουν την αντοχή τους. Ένα άλλο πρόβλημα με τις ίνες Spectra είναι η φτωχή προσκόλληση στις ρητινικές μήτρες, η οποία μπορεί να βελτιωθεί μερικώς μέσω επιφανειακής κατεργασίας με εφαρμογή αερίου πλάσματος.

Οι ίνες Spectra παρέχουν στις στρώσεις συνθέτου υψηλή αντίσταση στην κρούση, ακόμη και σε χαμηλές θερμοκρασίες, και βρίσκουν εφαρμογές σε σύνθετα βαλλιστικής, όπως θωράκιση και κράνη. Όμως, η χρήση τους σε σύνθετα της αεροδιαστημικής (aerospace composites) υψηλών θερμοκρασιών είναι περιορισμένη, εκτός αν χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με πιο δύσκαμπτες ίνες άνθρακα για να παράγουν υβριδικές στρώσεις με περισσότερη αντοχή στην κρούση από τις στρώσεις μόνο με άνθρακα.

2.4.4 Μεταλλικές ίνες

Διάφορα μέταλλα, κυρίως το βόριο (B), το βηρύλλιο (Be) και το βολφράμιο (W), θα μπορούσαν να αποτελέσουν εξαιρετικά ενισχυτικά των σύνθετων υλικών, αφού παρουσιάζουν υψηλή τιμή ακαμψίας σε σχέση με το ειδικό βάρος τους (ειδική ακαμψία). Ωστόσο, οι τεχνικές παραγωγής τέτοιων ινών είναι ακόμα πολύ δαπανηρές.

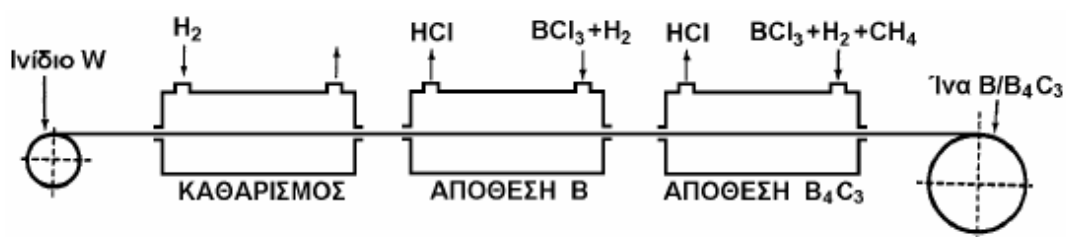
Το βόριο είναι το περισσότερο υποσχόμενο υλικό, για την κατασκευή ινών ενίσχυσης. Η ίνα από βόριο χρησιμοποιείται ως ενίσχυση πολυμερικών και μεταλλικών υλικών και είναι διαθέσιμη σε πολλές μορφές, διάφορες διαμέτρους και με πυρήνα βολφράμιο ή άνθρακα. Το βόριο και ο άνθρακας επιλέχθηκαν ως υλικά για την παραγωγή ινών, διότι είναι τα δύο πιο ελαφρά στερεά και είναι πρακτικά στη χρήση τους.

Ως συμπαγές υλικό, το βόριο είναι σκληρό και εύθραυστο. Συνεπώς, η κατασκευή ινών με μηχανουργική κατεργασία καθίσταται αδύνατη. Σήμερα, χρησιμοποιούνται δύο τεχνικές για την παραγωγή ινών βορίου:

- Αναγωγή από αλογονίδιο του βορίου

Αλογονίδιο του βορίου (συνήθως BCl_3) ανάγεται από υδρογόνο σε κλειστό θάλαμο υψηλής θερμοκρασίας ($1100\text{ }^\circ\text{C}$) και αποτίθεται σε πολύ λεπτό νήμα βολφραμίου, διαμέτρου $10 - 15\ \mu\text{m}$ (τυπική διάμετρος $12,7\ \mu\text{m}$). Το νήμα θερμαίνεται εξαιτίας του φαινομένου Joule που αναπτύσσεται κατά την απόθεση και απαιτείται αυστηρός έλεγχος της θερμοκρασίας, ώστε να ληφθεί επίστρωμα μικροσκοπικών κρυστάλλων βορίου, διαμέτρου $2 - 3\ \text{nm}$.

Η διάμετρος της παραγόμενης ίνας ελέγχεται μεταβάλλοντας την ταχύτητα έλξης της ίνας, όπως επίσης και τη θερμοκρασία απόθεσης. Σήμερα, οι εμπορικές ίνες βορίου παράγονται σε διαμέτρους των $100, 142$ και $203\ \mu\text{m}$ και παρουσιάζουν εξαιρετική δυσκαμψία και μηχανική αντοχή.



Σχήμα 2.17: Παραγωγή ινών βορίου με αναγωγή αλογονιδίου του βορίου

- Απόθεση με τεχνική CVD

Τελευταίως, χρησιμοποιείται και η τεχνική της χημικής εναπόθεσης ατμών (CVD). Το βόριο αποτίθεται σε νήμα άνθρακα ή βολφραμίου. Τούτη η τεχνική είναι οικονομικότερη από την προηγούμενη αλλά το προϊόν έχει χαμηλότερη μηχανική αντοχή.

Το βολφράμιο είναι ένα ακριβό και πυκνό υλικό πυρήνα. Χρησιμοποιώντας νήμα άνθρακα στη θέση του βολφραμίου είναι τόσο πρακτικότερο, όσο και οικονομικότερο. Όμως, το νήμα άνθρακα έχει μία διάμετρο 0,03 mm και οι μηχανικές ιδιότητες των ινών βορίου κατασκευασμένων από αυτό είναι κάπως μικρότερες από αυτές των ινών βορίου από βολφράμιο, αν και είναι ακόμα ανώτερες σε σχέση με άλλα κοινά υλικά ενίσχυσης. Επειδή το νήμα πυρήνα από άνθρακα έχει μεγαλύτερη διάμετρο από το αντίστοιχο του βολφραμίου, για μία δοσμένη τελική διάμετρο ίνας, μία ίνα βορίου με πυρήνα άνθρακα, περιέχει λιγότερο βόριο από την αντίστοιχη με πυρήνα βολφράμιο.

Τα σύνθετα με ίνες βορίου κοστίζουν περισσότερο από αυτά με ίνες άνθρακα και έχουν υψηλές μηχανικές ιδιότητες ($E = 300 - 420$ GPa, $UTS = 3000 - 3700$ MPa). Οι τιμές των ιδιοτήτων τους διατηρούνται σταθερές έως τους 500 °C. Για τη χρήση τους σε υψηλότερες θερμοκρασίες, θα πρέπει να χρησιμοποιείται προστατευτικό επίστρωμα καρβιδίου του πυριτίου (οι ονομαζόμενες ίνες Borsic) ή νιτριδίου του βορίου. Τα επιστρώματα αυτά αποτρέπουν την αντίδραση του υλικού ενίσχυσης με αυτό της μήτρας, δεδομένου ότι σε υψηλές θερμοκρασίες, κυρίως σε σύνθετα με μεταλλική μήτρα τιτανίου ή αλουμινίου, ευνοούνται η διάχυση μέσω της διεπιφάνειας ίνας – μήτρας και οι αντιδράσεις σε στερεά κατάσταση που οδηγούν στο σχηματισμό εύθραυστων μεσομεταλλικών ενώσεων και αστοχία του συνθέτου.

Αφού συνδέονται με σχετικά μεγάλη διάμετρο, οι ίνες βορίου προσφέρουν εξαιρετική αντίσταση στο λυγισμό, πράγμα το οποίο με τη σειρά του συνεισφέρει σε υψηλή αντοχή σε θλίψη για τα σύνθετα που τις περιέχουν. Το κύριο μειονέκτημα του βορίου είναι το υψηλό του κόστος, το οποίο είναι ακόμα υψηλότερο κι από πολλούς τύπους ινών άνθρακα. Για το λόγο αυτό, η χρήση του προς το παρόν περιορίζεται σε εφαρμογές αεροδιαστημικής.

2.4.5 Κεραμικές ίνες

Οι κεραμικές ίνες χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών. Χαρακτηρίζονται από υψηλή αντοχή, στιβαρότητα και θερμική ευστάθεια. Οι κεραμικές ίνες που χρησιμοποιούνται συνηθέστερα είναι οι ίνες καρβιδίου του πυριτίου (SiC) και αλουμίνας (Al₂O₃), ενώ σπανιότερα οι ίνες Si₃N₄, BeO, B₄C και ZrO₂.

Το SiC παρουσιάζει σταθερή μηχανική αντοχή ως τους 1400 °C, ωστόσο η μέγιστη επιτρεπτή θερμοκρασία χρήσης του περιορίζεται στους 900 °C, λόγω της σημαντικής δραστικότητάς του πάνω από τη θερμοκρασία αυτή. Καρβίδιο του πυριτίου χρησιμοποιείται επίσης και με τη μορφή φυλλιδίων. Όμως, οι μηχανικές τους ιδιότητες είναι κατώτερες εκείνων των ινών SiC.

Μέθοδοι παραγωγής

1. Με χημική εναπόθεση ατμών (CVD) χλωριούχου σιλανίου σε ίνες άνθρακα. Οι παραγόμενες ίνες έχουν πυρήνα διαμέτρου 10 ÷ 25 μm και εξωτερική διάμετρο 100 ÷ 150 μm.
2. Από πολυμερικές ίνες (Nicalon). Θέρμανση σε κενό σε θερμοκρασία 850 °C μετατρέπει την πολυμερική ίνα σε ανόργανο SiC, ενώ θέρμανση σε υψηλότερη θερμοκρασία (>1000 °C) προκαλεί κρυστάλλωση σε β-SiC. Οι παραγόμενες ίνες έχουν διάμετρο 10 ÷ 15 μm.
3. Τριχίτες SiC από φλοιό ρυζιού. Ο φλοιός του ρυζιού περιέχει ~15% κ.β. SiO₂. Θέρμανση σε θερμοκρασία 700 ÷ 900 °C οδηγεί σε υπόλειμμα SiO₂ και ελεύθερο άνθρακα. Θέρμανση του υπολείμματος σε θερμοκρασία ~1500 °C και σε περιβάλλον αζώτου ή αμμωνίας οδηγεί στο σχηματισμό SiC. Οι παραγόμενοι τριχίτες έχουν διάμετρο ~0,1 ÷ 1 μm και μήκος ~50 μm.

Γενικά, οι μέθοδοι παραγωγής των κεραμικών ινών είναι ιδιαίτερα δαπανηρές. Παρακάτω, γίνεται σύγκριση των ιδιοτήτων των ινών που παράγονται από κάθε μέθοδο (Πίνακας 2.4).

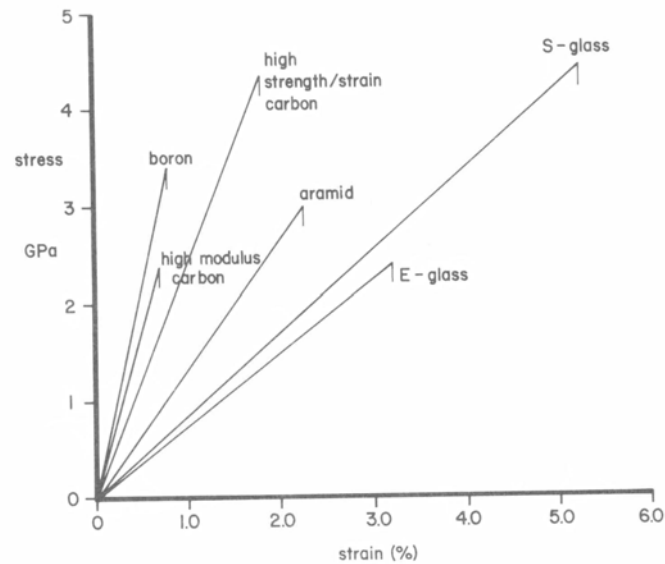
Πίνακας 2.4: Σύγκριση ιδιοτήτων ινών SiC (μέσες τιμές)

Μέθοδος	CVD	Nicalon	Τριχίτες
Ιδιότητα			
Πυκνότητα, ρ (g/cm ³)	3,3	2,6	–
Αντοχή, UTS (MPa)	3500	2000	7000
Μέτρο ελαστικότητας, E (GPa)	430	180	480
Διάμετρος ίνας, d (μm)	140	15	<1

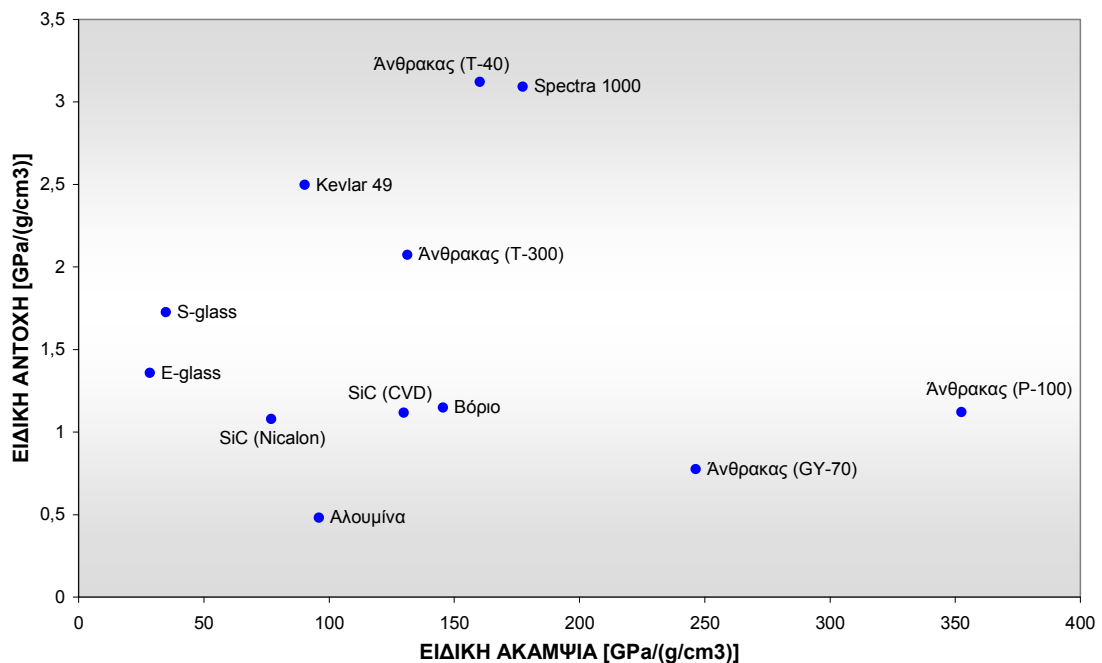
Είναι δυνατή η δημιουργία μονοκρυσταλλικών ινών αλουμίνας (Al₂O₃) διαμέτρου 250 μm, με εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες. Λόγω της ισχυρής φύσεως των χημικών δεσμών, η σταθερότητα των μηχανικών τους ιδιοτήτων διατηρείται ως τους 800 °C. Οι μονοκρυσταλλικές ίνες αλουμίνας είναι εξαιρετικά ευαίσθητες έναντι επιφανειακής φθοράς που οδηγεί ταχύτατα σε αστοχία.

2.4.6 Σύγκριση ινών

Στο Σχήμα 2.18 γίνεται σύγκριση των διάφορων τύπων ινών, ενώ το Σχήμα 2.19 παρουσιάζει τη συσχέτιση μεταξύ ειδικής αντοχής και ειδικής ακαμψίας των ινών. Είναι προφανές ότι κατά τη σχεδίαση νέων ινών ή κατά τη βελτίωση των υπαρχουσών, στόχος είναι η μεγιστοποίηση και των δύο ειδικών ιδιοτήτων.



Σχήμα 2.18: Καμπύλες τάσεων – παραμορφώσεων για κάποιες τυπικές ίνες ενίσχυσης



Σχήμα 2.19: Ειδικές ιδιότητες ενισχυτικών ινών

Ο Πίνακας 2.5 παραθέτει έναν αριθμό εμπορικά διαθέσιμων ινών και τις ιδιότητες τους.

Πίνακας 2.5: Ιδιότητες επιλεγμένων εμπορικών ινών ενίσχυσης

Ίνα	Τυπική διάμετρος (μm)	Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	Αντοχή σε εφελκυσμό (GPa)	Παραμόρφωση θραύσης (%)	Συντελεστής θερμικής διαστολής ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	Λόγος Poisson
Γυαλί						
E – glass	10	72,4	3,45	4,8	5	0,2
S – glass	10	86,9	4,30	5,0	2,9	0,22
Άνθρακας PAN						
T – 300	7	231	3,65	1,4	-0,6	0,2
AS – 1	8	228	3,10	1,32		
AS – 4	7	248	4,07	1,65		
T – 40	5,1	290	5,65	1,8	-0,75	
IM – 7	5	301	5,31	1,81		
HMS – 4	8	345	2,48	0,7		
GY – 70	8,4	483	1,52	0,38		
Άνθρακας πίσσας						
P – 55	10	380	1,90	0,5	-1,3	
P – 100	10	758	2,41	0,32	-1,45	
Αραμίδιο						
Kevlar 49	11,9	131	3,62	2,8	-2	0,35
Kevlar 149		179	3,45	1,9		
Technora		70	3,0	4,4	-6	
Πολυαιθυλένιο εκτεταμένης αλυσίδας						
Spectra 900	38	117	2,59	3,5		
Spectra 1000	27	172	3,0	2,7		
Βόριο	140	393	3,1	0,79	5	0,2
SiC						
Monofilament	140	400	3,44	0,86	1,5	
Nicalon (multifilament)	14,5	196	2,75	1,4		
Al₂O₃						
FiberFP	20	379	1,90	0,4	8,3	
Al₂O₃ – SiO₂						
Fiberfrax (ασυνεχής)	2–12	103	1,03–1,72			

2.5 Μήτρες

Αν οι ίνες συνεισφέρουν στην υψηλή αντοχή του σύνθετου υλικού, η μήτρα την εξασφαλίζει. Ο ρόλος της μήτρας είναι πολύπλευρος και συνίσταται στα εξής:

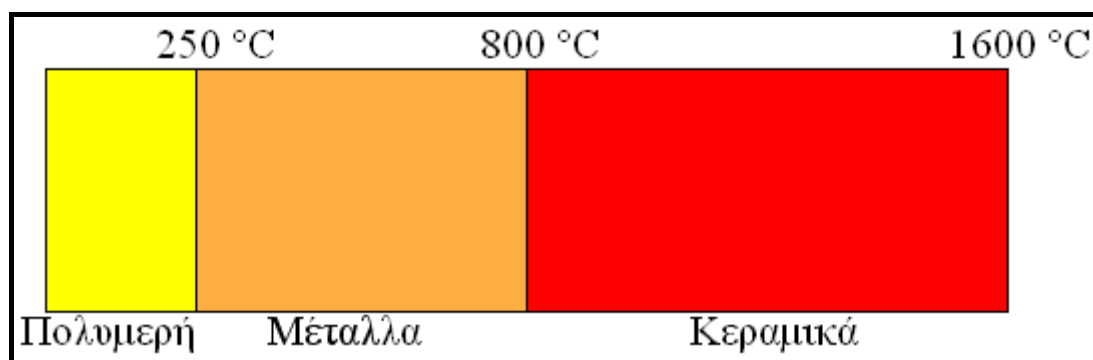
- Συγκράτηση των ινών μεταξύ τους
- Προστασία των ινών έναντι δυσμενούς περιβάλλοντος
- Μεταβίβαση ή διανομή των μηχανικών τάσεων που ασκούνται συνολικά στο σύνθετο υλικό προς τις ίνες
- Παραλαβή της διαστρωματικής διάτμησης (interlaminar shear)
- Ανακοπή της διάδοσης των ρωγμών που ξεκινούν από θραύση ινών
- Έλεγχος των ηλεκτρικών και χημικών ιδιοτήτων του συνθέτου

Για να εκπληρώνει το ρόλο με τον οποίο είναι επιφορτισμένη, η μήτρα πρέπει να χαρακτηρίζεται από ολκιμότητα, ανθεκτικότητα, σχετική ευκαμψία, διαστατική σταθερότητα (να διατηρεί το σχήμα της) και φυσικά θα πρέπει το σημείο τήξης της να είναι υψηλότερο της μέγιστης θερμοκρασίας λειτουργίας του σύνθετου υλικού. Οι ιδιότητες τούτες πρέπει να παρουσιάζουν "συμβατότητα" με αυτές των ενισχυτικών ινών. Συνήθως, το υλικό της μήτρας έχει χαμηλότερη πυκνότητα, αντοχή και δυσκαμψία από τις ίνες. Τέλος, για τη σωστή λειτουργία του σύνθετου υλικού, καθοριστικός παράγοντας είναι η καλή πρόσφυση ίνας – μήτρας.

Ανάλογα με το υλικό τους, οι μήτρες διακρίνονται στις ακόλουθες ομάδες:

- Οργανικές, με τα αντίστοιχα σύνθετα να καλούνται Πολυμερικής Μήτρας (Polymer Matrix Composite – PMC)
- Μεταλλικές, με τα αντίστοιχα σύνθετα να καλούνται Μεταλλικής Μήτρας (Metal Matrix Composite – MMC)
- Κεραμικές, με τα αντίστοιχα σύνθετα να καλούνται Κεραμικής Μήτρας (Ceramic Matrix Composite – CMC)

Η επιλογή της κατάλληλης μήτρας εξαρτάται από τη θερμοκρασία και το περιβάλλον χρήσης του συνθέτου. Μία γενική οδηγία σχετικά με τα θερμοκρασιακά όρια για κάθε ομάδα υλικών παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.20.



Σχήμα 2.20: Θερμοκρασιακά όρια χρήσης των υλικών

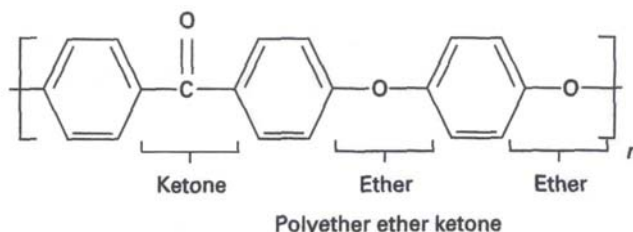
2.5.1 Οργανικές μήτρες

Οι οργανικές μήτρες διακρίνονται σε θερμοπλαστικές και θερμοσκληρυνόμενες.

2.5.1.1 Θερμοπλαστικές Μήτρες

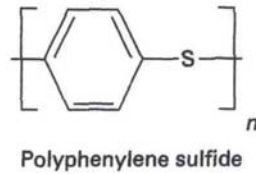
Πρόκειται για πολυμερή με γραμμικές αλυσίδες. Παρουσιάζουν δομή, κατά την οποία οι μοριακές αλυσίδες διασυνδέονται με ασθενείς δυνάμεις Van der Waals. Οι δυνάμεις αυτές λύνονται με την αύξηση της θερμοκρασίας με αντιστρεπτή, όμως, διαδικασία, καθιστώντας το υλικό μαλακότερο σε υψηλές θερμοκρασίες. Αντιπροσωπευτικά παραδείγματα αποτελούν οι μήτρες πολυαιθυλενίου (PE), πολυστυρενίου (PS), πολύ(αιθερ-αιθεροκετόνης) (PEEK) και πολυφαινυλενοσουλφιδίου (PPS).

PEEK. Η PEEK είναι ένα γραμμικό αρωματικό θερμοπλαστικό βασισμένο στην επαναλαμβανόμενη δομική μονάδα του Σχήματος 2.21. Είναι ημι-κρυσταλλικό και η παρουσία των ιών σε σύνθετα από PEEK τείνει να αυξήσει την κρυσταλλικότητά του. Αύξηση της κρυσταλλικότητας αυξάνει το μέτρο ελαστικότητας και την αντοχή του, αλλά μειώνει την παραμόρφωση θραύσης του. Η μέγιστη θερμοκρασία συνεχούς χρήσης της PEEK είναι 250 °C. Συνιστά την πρώτιστη θερμοπλαστική μήτρα που θα μπορούσε να αντικαταστήσει τις εποξειδικές ρητίνες σε πολλές αεροδιαστημικές κατασκευές. Ένα άλλο σημαντικό πλεονέκτημά της είναι η χαμηλή απορρόφηση νερού, η οποία είναι λιγότερο από 0,5% στους 23 °C, σε σύγκριση με το 4 – 5% των τυπικών εποξειδικών ρητινών. Όντας ημι-κρυσταλλικό υλικό, δε διαλύεται με τα κοινά διαλύματα.



Σχήμα 2.21: Δομή PEEK

PPS. Το PPS είναι ένα γραμμικό ημι-κρυσταλλικό πολυμερές με την επαναλαμβανόμενη δομική μονάδα του Σχήματος 2.22. Το PPS είναι κανονικά κατά 65% κρυσταλλικό. Η θερμοκρασία συνεχούς χρήσης του δεν ξεπερνά τους 240 °C. Έχει εξαιρετική αντοχή στη θερμότητα, τη φλόγα και τα χημικά, ενώ έχει και έξοχα ηλεκτρικά μονωτικά χαρακτηριστικά. Οι μηχανικές ιδιότητες μπορούν να βελτιωθούν σημαντικά με προσθήκη ενίσχυσης ιών γυαλιού. Το PPS είναι, κατ' εξαίρεση, ένα από τα ακριβά εμπορικά θερμοπλαστικά, και λόγω τούτου η χρήση του εξαρτάται από τον επιλεγμένο συνδυασμό ιδιοτήτων.



Σχήμα 2.22: Δομή PPS

Εν γένει, τα θερμοπλαστικά είναι χαμηλού κόστους και, κατά συνέπεια, χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές ευρείας κατανάλωσης. Ως ενισχυτικά θερμοπλαστικών μητρών χρησιμοποιούνται φθηνά υλικά (αμίαντος, μαρμαρυγίες, κ.ά.), ώστε και το τελικό προϊόν να είναι χαμηλής τιμής.

2.5.1.2 Θερμοσκληρυνόμενες Μήτρες

Χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου απαιτούνται καλύτερες μηχανικές ιδιότητες. Τα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή παρουσιάζουν τριδιάστατη δομή πλέγματος από πρωτογενείς ισχυρούς δεσμούς μεταξύ των μοριακών αλυσίδων. Αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνει το πλήθος των διαμοριακών δεσμών, καθιστώντας τα υλικά αυτά σκληρότερα και ψαθυρότερα. Οι κυριότεροι αντιπρόσωποι της συγκεκριμένης υποκατηγορίας σκιαγραφούνται στη συνέχεια.

Πολυεστερικές ρητίνες. Οι ιδιότητές τους εξαρτώνται έντονα από την πυκνότητα των διασταυρώσεων πλέγματος (cross – link density). Το μέτρο ελαστικότητας και η θερμική σταθερότητα βελτιώνονται με αύξηση της πυκνότητας των διασταυρώσεων, αλλά η παραμόρφωση θραύσης και η ενέργεια κρούσης μειώνονται. Οι πολυεστερικές ρητίνες μπορούν να τυποποιηθούν με μία ποικιλία ιδιοτήτων, οι οποίες κυμαίνονται από υψηλή σκληρότητα και ψαθυρότητα μέχρι καλή ολκιμότητα και ελαστικότητα. Τα πλεονεκτήματά τους είναι το χαμηλό ιξώδες, ο μικρός απαιτούμενος χρόνος για τη θερμική τους κατεργασία και το χαμηλό κόστος, αλλά οι ιδιότητές τους είναι γενικά χαμηλότερες από εκείνες των εποξειδικών ρητινών. Ενισχύονται κατά κανόνα με ίνες γυαλιού.

Βινυλεστερικές ρητίνες. Χαρακτηρίζονται από εξαιρετική αντίσταση στη χημική διάβρωση και αντοχή σε εφελκυσμό, αλλά και από χαμηλό ιξώδες και ταχεία θερμική κατεργασία. Όμως, η ογκομετρική συρρίκνωση των βινυλεστερικών ρητινών είναι στην περιοχή 5 – 10%, το οποίο είναι υψηλό σε σύγκριση με άλλες ρητίνες.

Εποξειδικές ρητίνες. Τα υλικά από τα οποία προέρχεται μία μήτρα από εποξύ είναι υγρές οργανικές ρητίνες χαμηλού μοριακού βάρους, οι οποίες περιέχουν έναν αριθμό ομάδων εποξειδίου (epoxide groups). Οι ομάδες αυτές είναι τριμελείς δακτύλιοι αποτελούμενοι από ένα άτομο οξυγόνου και δύο άνθρακα. Οι εποξειδικές μήτρες έχουν ως πλεονεκτήματα τη μεγάλη ποικιλία ιδιοτήτων, την απουσία πτητικών κατά την κατεργασία, τη χαμηλή συρρίκνωση κατά την κατεργασία, την εξαιρετική αντίσταση στη διάβρωση από χημικά και διαλύματα, την υψηλή (ή χαμηλή) αντοχή και ελαστικότητα, την αντίσταση στον ερπυσμό και την κόπωση και τις καλές ηλεκτρικές ιδιότητες. Τα κυριότερα μειονεκτήματα είναι το σχετικά υψηλό τους κόστος και ο μεγάλος χρόνος θερμικής τους κατεργασίας. Η μέγιστη θερμοκρασία χρήσης τους είναι 200 °C. Έχουν χρήση στην αεροναυπηγική.

Φαινολικές ρητίνες. Τούτες βρίσκουν ανάπτυξη εδώ και πάνω από 80 χρόνια. Έχουν χαμηλή πλαστικότητα και μέτριες μηχανικές ιδιότητες, ωστόσο η μέγιστη θερμοκρασία χρήσης τους φθάνει τους 400 °C.

2.5.2 Μεταλλικές μήτρες

Τα μέταλλα χρησιμοποιούνται ολοένα και περισσότερο ως υλικά μήτρες, με κυριότερους εκπροσώπους το αλουμίνιο, το νικέλιο, το μαγνήσιο και το τιτάνιο. Το πρώτιστο πλεονέκτημα των συνθέτων είναι η ικανότητά τους να παρέχουν υψηλές μηχανικές ιδιότητες και προσχεδιασμένες φυσικές ιδιότητες με λιγότερο βάρος από τα συμβατικά υλικά. Στην περίπτωση των συνθέτων MMC, το πλεονέκτημα αυτό διατίθεται σε εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών (> 300 °C), όπου ένα PMC είναι ανεπαρκές, ενώ οι ανθρακούχες μήτρες οξειδώνονται σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 500 °C. Επιπλέον, επειδή τα μέταλλα είναι καλύτεροι αγωγοί του ηλεκτρισμού και της θερμότητας, οι μεταλλικές μήτρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές διάχυσης θερμότητας και ηλεκτρονικής μετάδοσης.

Αν και υπάρχουν MMC με τελείως διαφορετικές ιδιότητες, μπορούν να παρατεθούν μερικά γενικά πλεονεκτήματα των υλικών αυτών σε σχέση με τα μονολιθικά (μη ενισχυμένα) μέταλλα και τα PMC. Συγκρινόμενα, λοιπόν, με τα μονολιθικά μέταλλα, τα σύνθετα μεταλλικής μήτρας παρουσιάζουν υψηλότερη ειδική αντοχή και ειδική δυσκαμψία, καλύτερη αντίσταση στην κόπωση και ανώτερες θερμοκρασιακές ιδιότητες, χαμηλότερους συντελεστές θερμικής διαστολής και καλύτερη αντοχή στη φθορά. Το πλεονέκτημα των μεταλλικών έναντι των οργανικών μητρών είναι η δυνατότητα χρήσης σε υψηλότερες θερμοκρασίες, η αντοχή στη φωτιά, η υψηλότερη δυσκαμψία και αντοχή κατά την εγκάρσια διεύθυνση, η μηδενική απορρόφηση υγρασίας, καλύτερη αντίσταση στην ακτινοβολία, υψηλότερη ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα, η μη αποβολή αερίων κατά τη συντήρηση και η κατεργασιμότητα με συμβατικό εξοπλισμό που χρησιμοποιείται για μέταλλα (π.χ. συγκόλληση).

Τα μειονεκτήματα των MMC είναι εκείνα που σχετίζονται με τη δημιουργία εύθραυστων μεσομεταλλικών ενώσεων στη διεπιφάνεια μετάλλου – ίνας που συμβάλλουν στην αποκόλληση των ινών από τη μήτρα, το υψηλότερο κόστος υλικού και κατασκευής και την έλλειψη εμπειρίας και δεδομένων σχετικά με τα υλικά αυτά και τις διαδικασίες τους. Επιπρόσθετα, λόγω της πολυπλοκότητας αυτών των πολυφασικών υλικών και της λιγότερο ώριμης τεχνολογίας τους, τα κόστη της σχεδίασης, της ανάλυσης και του ποιοτικού ελέγχου είναι υψηλότερα. Ωστόσο, εξαιτίας των μοναδικών τους ιδιοτήτων, η χρήση τους φαίνεται να επιταχύνεται με γοργό ρυθμό. Όσο συμβαίνει αυτό, οι παράγοντες του κόστους και της εμπειρίας θα βελτιωθούν.

2.5.3 Κεραμικές μήτρες

Τα κεραμικά υλικά είναι σκληρά, δύστηκτα, μεγάλης στιβαρότητας και μεγάλης αντοχής στη διάβρωση και την χημική προσβολή. Στην περίπτωση της κεραμικής μήτρας, οι ίνες αποβλέπουν αφενός στη βελτίωση της αντοχής του κεραμικού στους θερμικούς αιφνιδιασμούς και αφετέρου στην αύξηση της μηχανικής του αντοχής. Η ολκιμότητα και το ποσοστό των ινών επιδρούν ευνοϊκά στη βελτίωση της αντοχής της μήτρας.

Το σημαντικότερο πρόβλημα στη χρήση κεραμικών μητρών εντοπίζεται στη συνάφεια ινών – μήτρας και οφείλεται στη μεγάλη διαφορά μεταξύ των συντελεστών γραμμικής διαστολής της κεραμικής μήτρας και των συνήθων ενισχυτικών ινών.

Τα υλικά ενδιαφέροντος αυτών των μητρών μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τέσσερις κύριες ομάδες: υάλινα κεραμικά όπως το λίθιο – αλουμίνιο – πυρίτιο (LAS), οξείδια όπως η αλουμίνα και ο μουλίτης, νιτρίδια όπως το νιτρίδιο του πυριτίου (Si_3N_4) και καρβίδια όπως το καρβίδιο του πυριτίου (SiC). Μεγάλη εφαρμογή βρίσκουν, επίσης, οι μήτρες άνθρακα, ενώ ειδική περίπτωση κεραμικής μήτρας αποτελεί το τσιμέντο. Είναι γνωστές οι οικοδομικές κατασκευές τσιμέντου με ενίσχυση χάλυβα (οπλισμένο σκυρόδεμα), ινών αμιάντου (ελενίτ), ινών γυαλιού, καθώς επίσης και οι κατασκευές από γύψο με ενίσχυση ινών γυαλιού ή αμιάντου.

2.6 Εφαρμογές

Το πεδίο των εφαρμογών των συνθέτων είναι πολύ ευρύ. Μερικά παραδείγματα παρουσιάζονται παρακάτω.

- Ηλεκτρικά, Ηλεκτρονικά
 - Μόνωση για ηλεκτρικές κατασκευές
 - Στηρίξεις για διακόπτες κυκλωμάτων
 - Στηρίξεις για τυπωμένα κυκλώματα
 - Κουτιά, προστατευτικά καλύμματα
 - Κεραίες, radomes
 - Κορυφές τηλεοπτικών πύργων
 - Τροχιές καλωδίων
 - Ανεμόμυλοι
- Κτίρια και Δημόσια Έργα
 - Στεγαστικές μονάδες
 - Καπνοδόχοι
 - Καλούπια τσιμέντου
 - Διάφορα επικαλύμματα (θόλοι, παράθυρα, κ.τ.λ.)
 - Πισίνες
 - Πάνελ πρόσοψης
 - Κατατομές
 - Μεσότοιχοι, πόρτες, έπιπλα, μπάνια
- Οδικές Μεταφορές
 - Δομικά μέρη του σώματος
 - Πλήρες σώμα
 - Τροχοί, προστατευτικά καλύμματα, ψυγείο
 - Άξονες μετάδοσης
 - Ελατήρια ανάρτησης
 - Φιάλες πεπιεσμένου αερίου
 - Σασί
 - Βραχίονες ανάρτησης
 - Επενδύσεις
 - Καμπίνες, καθίσματα
 - Βυτιοφόρα, ισοθερμικά φορτηγά
 - Τρέιλερ
- Σιδηροδρομικές Μεταφορές
 - Μπροστινό μέρος μονάδων ενέργειας
 - Βαγόνια
 - Πόρτες, καθίσματα, εσωτερικά πάνελ
 - Περικαλύμματα εξαερισμού

- Θαλάσσιες Μεταφορές
 - Αερόστρωμα οχήματα (hovercrafts)
 - Διασωστικά σκάφη
 - Βάρκες περιπόλου
 - Αλιευτικά πλοιάρια (trawlers)
 - Συστήματα προσέγγισης στεριάς
 - Αντιτορπλικά πλοία
 - Αγωνιστικά σκάφη
 - Θαλαμηγοί
 - Κανό
- Καλωδιακές Μεταφορές
 - Καμπίνες τηλεφερίκ
- Αερομεταφορές
 - Πλήρως σύνθετα επιβατηγά αεροσκάφη
 - Πλήρως σύνθετα ανεμοπλάνα
 - Πολλά μέρη αεροσκάφους (π.χ. radomes, πτερύγια, κατακόρυφοι σταθεροποιητές)
 - Πτερύγια ελικοπτέρου, προπέλες
 - Άξονες μετάδοσης
 - Δίσκοι φρένων αεροσκάφους
- Διαστημικές εφαρμογές
 - Προωθητήρες πυραύλων
 - Δεξαμενές καυσίμου
 - Ακροφύσια
 - Προστατευτικά καλύμματα για την επανείσοδο της ατμόσφαιρας
- Γενικές μηχανολογικές εφαρμογές
 - Γρανάζια
 - Ρουλεμάν
 - Καλύμματα
 - Ρομποτικοί βραχίονες
 - Σφόνδυλοι
 - Ράβδοι μηχανής ύφανσης
 - Σωλήνες
 - Στοιχεία τράπεζας σχεδιάσεως
 - Φιάλες πεπιεσμένου αερίου
 - Σωλήνες για παράκτιες πλατφόρμες
- Ιατρική
 - Εμφυτεύματα οδοντιατρικής
 - Τεχνητά μέλη
- Άθληση και ψυχαγωγία
 - Ρακέτες τένις και σκούς
 - Καλάμια ψαρέματος
 - Χιονοπέδιλα (skis)
 - Κοντάρια χρησιμοποιούμενα σε άλματα
 - Ιστιοπλοϊκά
 - Σανίδες κυματοδρομίας (surf boards)
 - Τροχοπέδιλα (roller skates)
 - Τόξα και βέλη
 - Ακόντια (javelins)

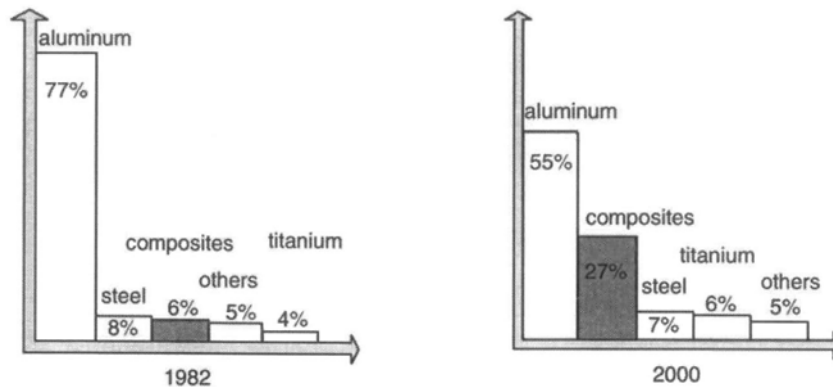
- Προστατευτικά κράνη
- Σκελετοί ποδήλατου
- Μπαστούνια του γκολφ
- Κουπιά

Από το παραπάνω ευρύ φάσμα εφαρμογών θα εστιάσουμε στις μεταφορές, τομέας που έχουν εισχωρήσει ιδιαίτερος τα σύνθετα υλικά. Θα δοθούν μερικά παραδείγματα πραγματικών τεχνολογικών λύσεων.

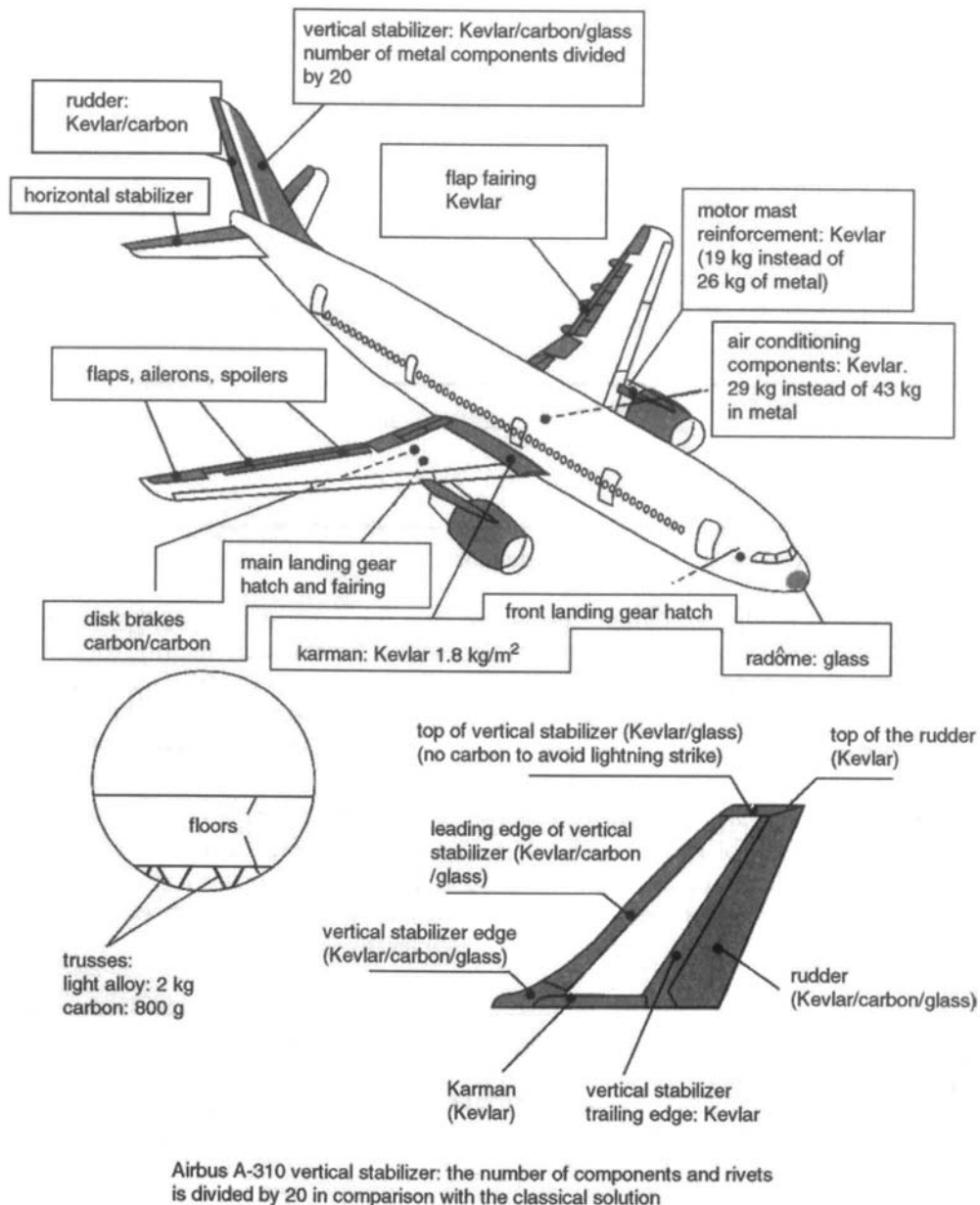
2.6.1 Αεροναυπηγική – Αεροδιαστημική

2.6.1.1 Αεροσκάφη

Το Σχήμα 2.23 παρουσιάζει την παρατηρούμενη εξέλιξη στο ποσοστό μάζας των κυριότερων υλικών που χρησιμοποιούνται για κατασκευές του αεροσκάφους. Είναι φανερή η ολοένα σημαντικότερη συνεισφορά των συνθέτων.



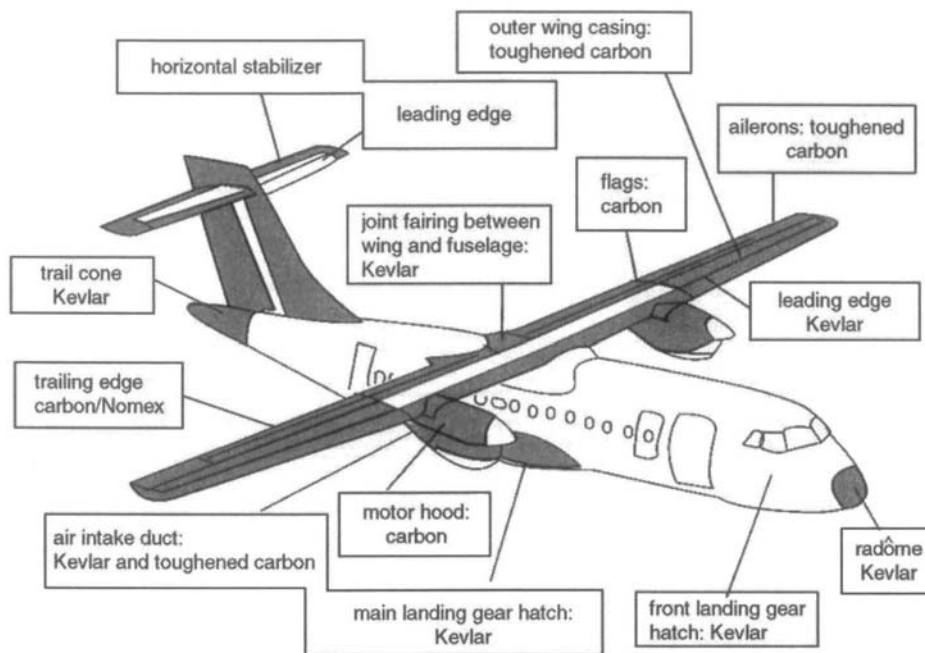
Σχήμα 2.23: Κατανομή μάζας των κυριότερων χρησιμοποιούμενων υλικών στο αεροσκάφος



Σχήμα 2.24: Σύνθετα δομικά στοιχεία σε ένα Airbus A – 310

Παράδειγμα: Ευρωπαϊκό αεροσκάφος Airbus A – 310 – 300 (Σχήμα 2.24)

- Συνολική μάζα: 180 tons
- Μάζα κατασκευής: 44,7 tons
- Μάζα συνθέτων: 6,2 tons
- Μάζα συνθέτων υψηλής απόδοσης: 1,1 tons
- Ποσοστό των συνθέτων: 13,9% της μάζας της κατασκευής. Μία μείωση στη μάζα της κατασκευής κατά 1 kg αυξάνει το βεληνεκές του αεροσκάφους κατά 1 naut. mile.



Σχήμα 2.25: Σύνθετα δομικά μέρη στο αεροσκάφος τοπικών μεταφορών ATR 72

Παράδειγμα: Αεροσκάφος τοπικών μεταφορών ATR 72, ATR (Γαλλία – Ιταλία) (Σχήμα 2.25)

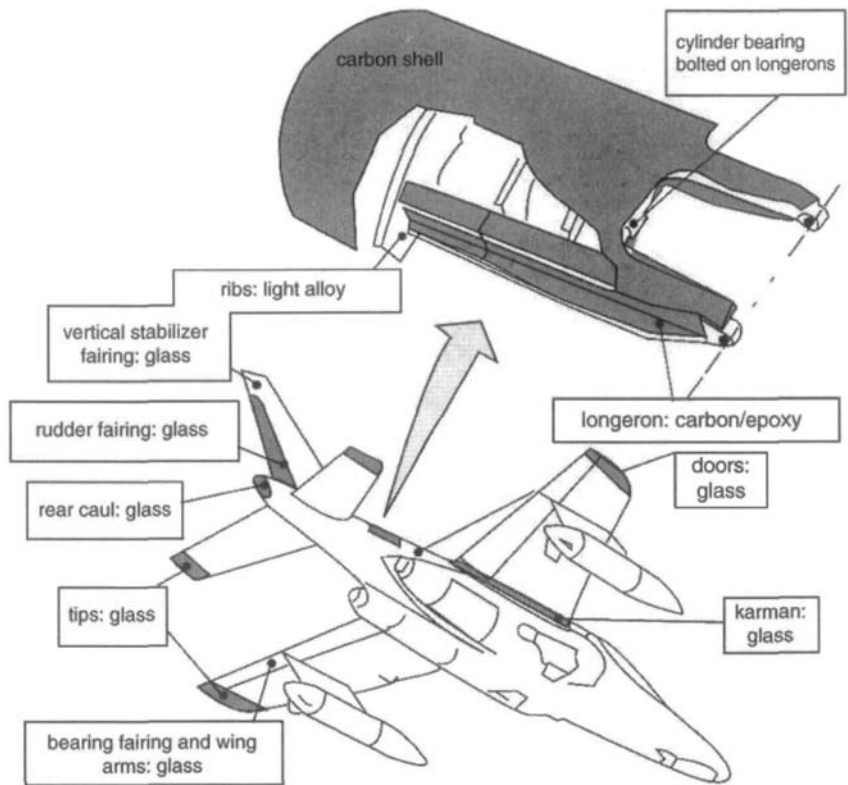
- Συνολική μάζα: 20 tons
- Ποσοστό των σύνθετων υλικών: Πάνω από 25% της μάζας της κατασκευής
- Μεταφέρει 66 επιβάτες σε μία απόσταση 2600 km
- Εσωτερικός εξοπλισμός: Επικαλύψεις των πάνελ των φινιστρινιών και της οροφής, διαμέρισμα αποσκευών, διαφράγματα, τουαλέτες κ.λπ. από γυαλί – άνθρακα / φαινολικές ρητίνες / NOMEX

Σημαντικότερη είναι η συνεισφορά των συνθέτων, πέραν των πολιτικών, και στα μαχητικά αεροσκάφη.

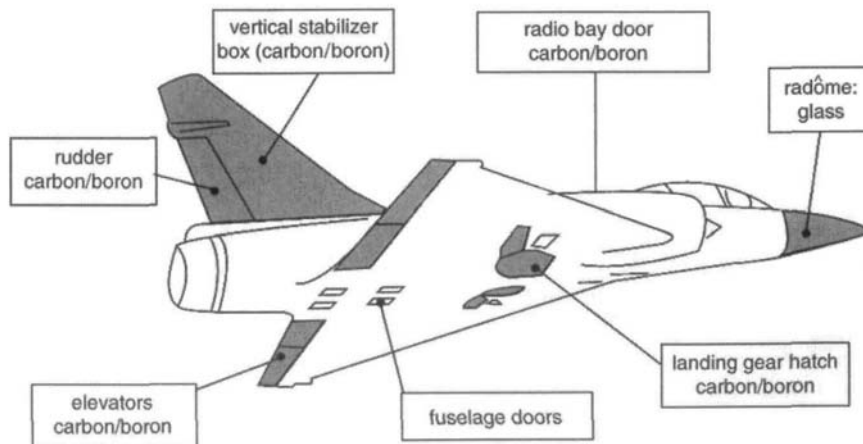
Παράδειγμα: Ευρωπαϊκό αεροπλάνο Alphajet (Σχήμα 2.26)

Παράδειγμα: Αεροπλάνο Mirage 2000 A.M.D. – B.A. (Γαλλία) (Σχήμα 2.27)

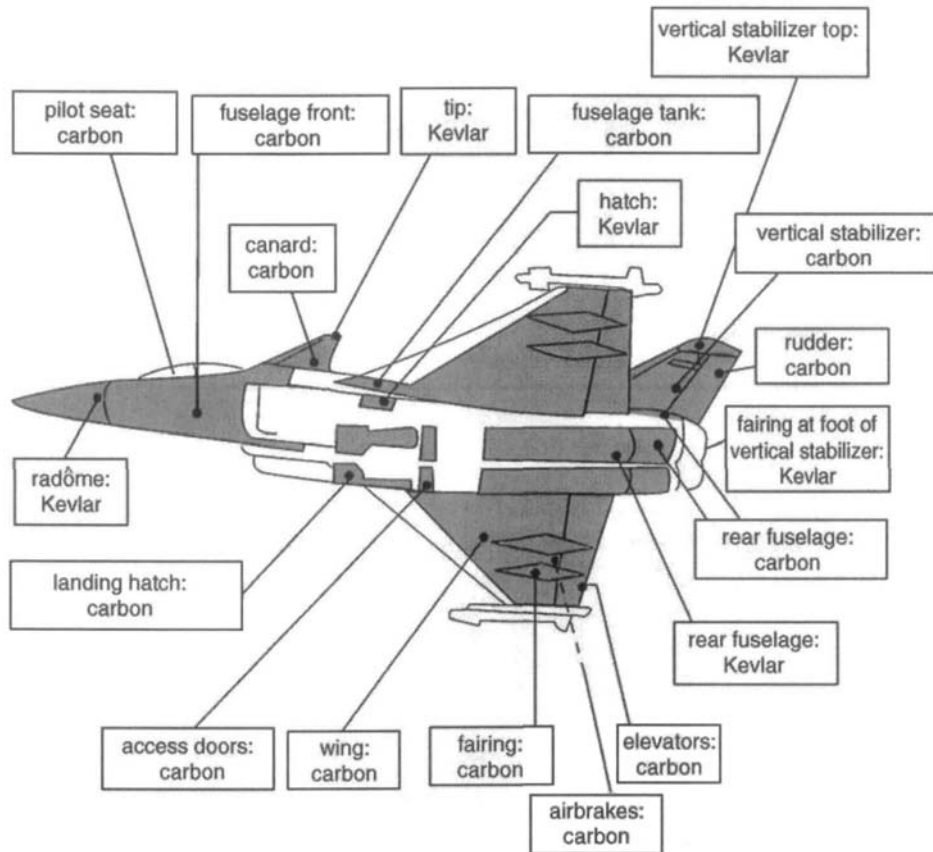
- Μάζα των σύνθετων υλικών: 65 kg
- Σε αυτό το αεροσκάφος υπάρχουν μέρη από βόριο / εποξειδική μήτρα
- Χαρακτηριστικά του βορίου: Η διάμετρος της ίνας ποικίλλει μεταξύ 0,1 mm και 0,2 mm ανάλογα με την απαίτηση του πελάτη.
- Για τα φύλλα ενίσχυσης: Πλάτος 1 m, 80 νήματα/cm, Μήκος 3,5 m



Σχήμα 2.26: Αεροπλάνο Alphajet



Σχήμα 2.27: Αεροπλάνο Mirage



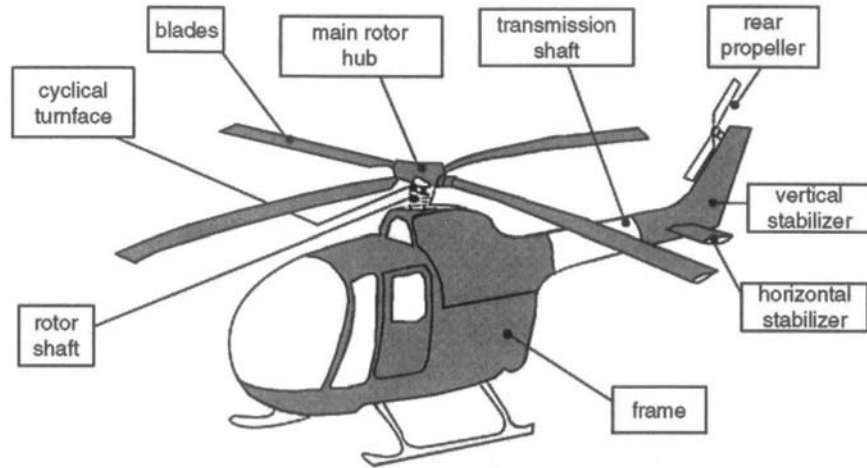
Σχήμα 2.28: Αεροπλάνο Rafale

Παράδειγμα: Αεροπλάνο Rafale A.M.D. – B.A. (Γαλλία) (Σχήμα 2.28)

- Μεγάλη χρησιμοποίηση σύνθετων υλικών υψηλής απόδοσης (άνθρακας / εποξειδική μήτρα και Kevlar / εποξειδική μήτρα)
- Η μάζα των συνθέτων είναι 1110 kg, η οποία οδηγεί σε μία μείωση 25% στη μάζα της κατασκευής (συγκρινόμενη με το Mirage 2000).

2.6.1.2 Ελικόπτερα

Το Σχήμα 2.29 δείχνει τα σύνθετα μέρη σε ένα ελικόπτερο.



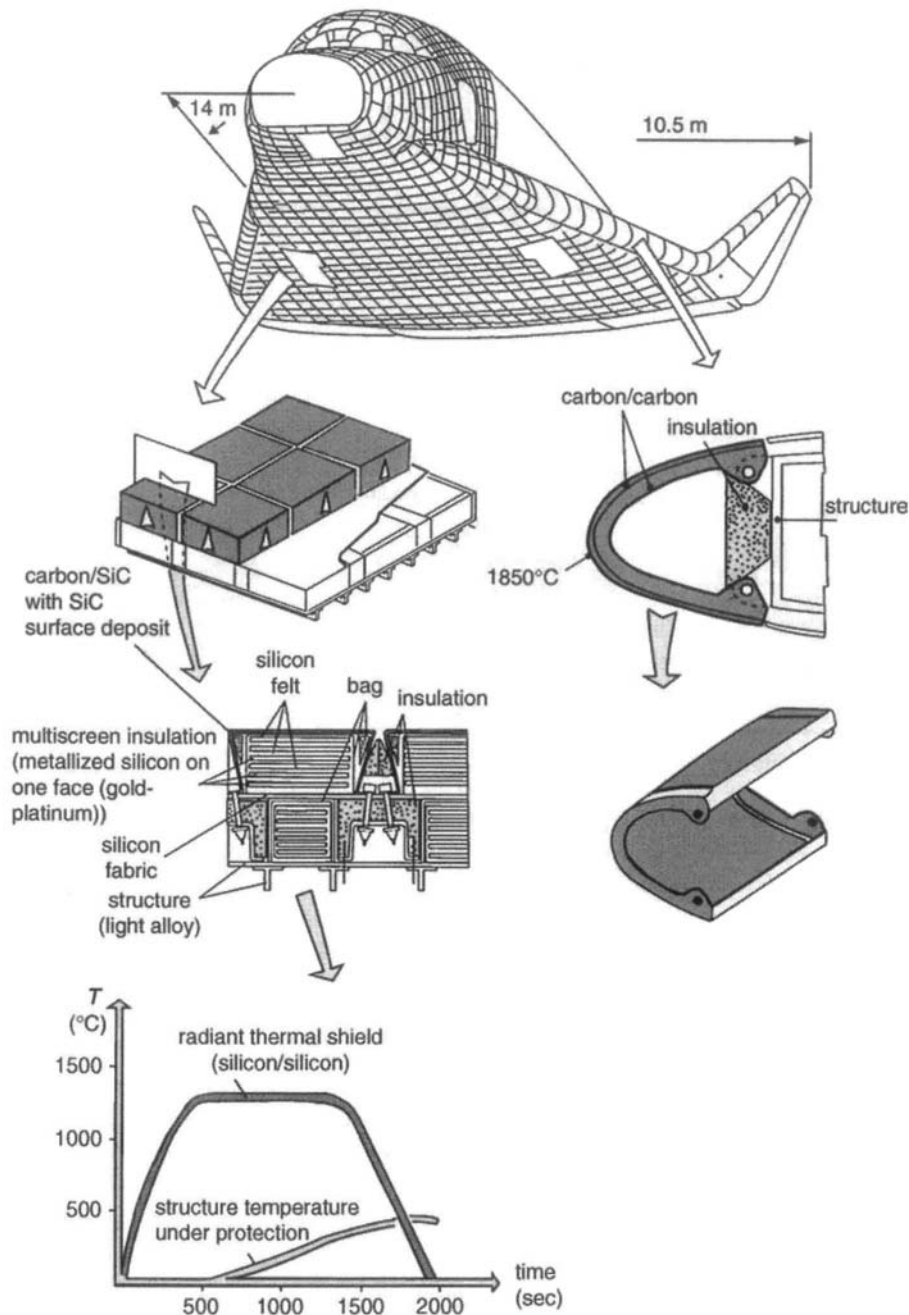
Σχήμα 2.29: Σύνθετα δομικά μέρη σε ένα ελικόπτερο

2.6.1.3 Διαστημικές Εφαρμογές

Αναμφίβολα η μείωση του βάρους αποτελεί παράγοντα κρίσιμης σημασίας για τους προωθητικούς μηχανισμούς, τα διαστημικά λεωφορεία και τους δορυφόρους. Η μείωση κάθε ενός κιλού για τον προωθητικό μηχανισμό του Ευρωπαϊκού πυραύλου Ariane E.S.A. αποφέρει κέρδος 30000 δολαρίων.

Παράδειγμα: Ευρωπαϊκό διαστημικό λεωφορείο Hermes (Σχήμα 2.30)

- Όταν είναι κενό έχει μάζα 8,5 tons.
- Φέρει χιλιάδες κομμάτια φτιαγμένα από άνθρακα / άνθρακα, πυρίτιο / πυρίτιο.
- Τα κομμάτια θα πρέπει να επαναχρησιμοποιηθούν για 30 προσγειώσεις.

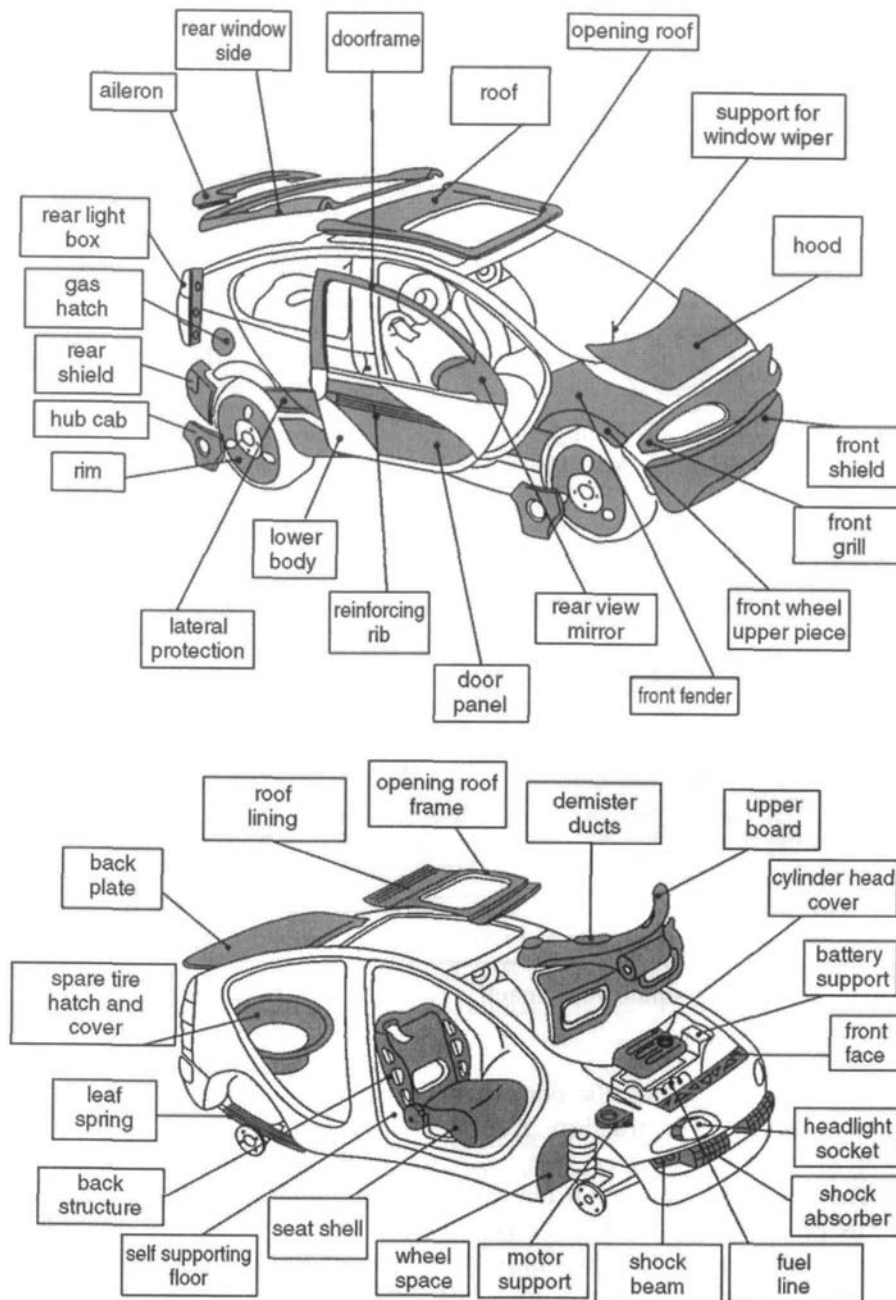


Σχήμα 2.30: Διαστημικό λεωφορείο Hermes

2.6.2 Οδικές Μεταφορές

Κατά τα τελευταία χρόνια ένας αυξανόμενος αριθμός τεμαχίων από σύνθετα υλικά έχουν εισαχθεί στο αυτοκίνητο. Τα τεμάχια τούτα σχετίζονται με μέρη του σώματος του οχήματος (καπάκι κινητήρα, καπό, πόρτα hatchback, προφυλακτήρες, πτυσσόμενη οροφή, απορροφητές κρούσης κ.ά.), με εσωτερικά στοιχεία (βάσεις καθισμάτων, πάνελ οργάνων κ.ά.), με μέρη υπό το καπό (δεξαμενές λαδιού, κάλυμμα για τις κυλινδροκεφαλές, άξονες μετάδοσης, στοιχεία του κινητήρα και του κιβωτίου

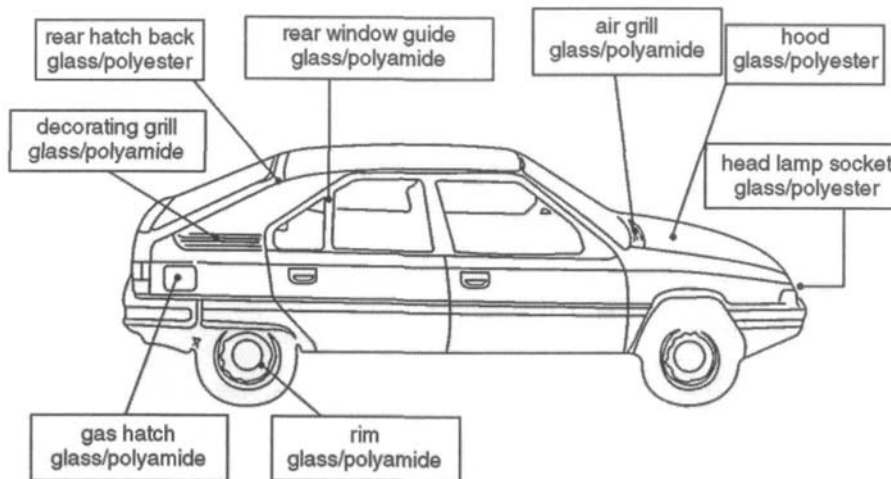
ταχυτήτων κ.ά.) και με στοιχεία της κατασκευής (τμήματα σασί, στοιχεία δαπέδου κ.ά.). Το Σχήμα 2.31 καταδεικνύει τη σημασία των συνθέτων για ένα αυτοκίνητο.



Σχήμα 2.31: Σύνθετα μέρη σε ένα αυτοκίνητο

Παράδειγμα: Αυτοκίνητο BX Citroen (Γαλλία – 1983) (Σχήμα 2.32)

- Συνολική μάζα: 885 kg
- Πολλά από τα κομμάτια είναι φτιαγμένα από σύνθετα γυαλιού / ρητίνης και στις μέρες μας χρησιμοποιούνται (εξελιγμένα) αρκετά.



Σχήμα 2.32: Σύνθετα τμήματα στο BX Citroen

Παράδειγμα: Αγωνιστικό αυτοκίνητο F.1 της Ferrari (Ιταλία – 2008) (Εικόνα 2.2)

- Συνολικό βάρος (με καύσιμα, λίπανση και οδηγό): 605 kg
- Σασί από ανθρακονήματα και κυβελοειδή σύνθετη κατασκευή
- Δισκόφρενα από ανθρακονήματα

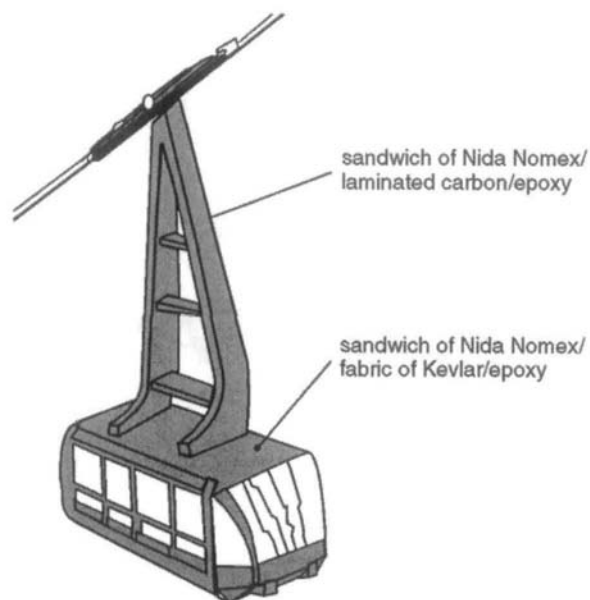


Εικόνα 2.2: Αγωνιστικό αυτοκίνητο F.1 της Ferrari (2008)

2.6.3 Καμπίνα τελεφερίκ

Παράδειγμα: Εταιρεία Ingenex / τελεφερίκ της περιοχής Argentieres (Γαλλία)

- Αύξηση της χωρητικότητας με διατήρηση των υπαρχουσών εγκαταστάσεων (καλώδια – πυλώνες – κινητήρες)
- Προηγούμενο μεταλλικό τελεφερίκ: ωφέλιμο φορτίο → 45 επιβάτες
- Νέο σύνθετο τελεφερίκ, από άνθρακα / Kevlar / εποξειδική μήτρα (Σχήμα 2.33): ωφέλιμο φορτίο → 70 επιβάτες (με την ίδια μάζα με την προηγούμενη κατασκευή)
- Αύξηση της χωρητικότητας: 55,6%
- Σύγκριση κόστους:
 - Ανανέωση όλης της εγκατάστασης με μεταλλική λύση → 11 εκατομμύρια δολάρια.
 - Ανανέωση δύο καμπινών τελεφερίκ με τη σύνθετη λύση → 1,1 εκατομμύρια δολάρια. Το κόστος είναι διαιρεμένο με το 10.



Σχήμα 2.33: Καμπίνα Τελεφερίκ

ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΕΝΑΝΤΙ ΣΥΓΚΡΟΥΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ

3.1 Εισαγωγή

3.1.1 Η έννοια της προστασίας έναντι σύγκρουσης (crashworthiness)

Ο όρος "crashworthiness", όπως ίσως είναι κατανοητό, δηλώνει την ικανότητα των επίγειων, θαλάσσιων και εναέριων οχημάτων να επιζούν μίας σύγκρουσης, χωρίς το μέρος της κατασκευής που περιέχει το ωφέλιμο φορτίο να υποστεί ανεπίτρεπτη παραμόρφωση ή επιβράδυνση. Το πρόβλημα επομένως είναι να μετριαστεί η ταχύτητα και το συνολικό ποσό της απορροφούμενης ενέργειας είναι μία μείζονος σημασίας παράμετρος, μαζί με τα λεπτομερή στοιχεία της κατασκευής που ελέγχουν την επιβράδυνση και την αστοχία.

Παραδοσιακά, μπορεί να θεωρηθεί ότι η προστασία έναντι σύγκρουσης (crashworthiness) των αυτοκινήτων, των πλοίων και των τρένων έχει σχέση με κατασκευές μαλακού χάλυβα, στις οποίες απορροφάται ενέργεια με έναν οιονεί στατικό τρόπο με διακριτές ζώνες παραμόρφωσης και ότι αντικειμενικός σκοπός μιας καλής σχεδίασης των διατάξεων προστασίας είναι να εκμεταλλευτούν αυτές τις τοπικά πλαστικά περιοχές. Εντούτοις, σύνθετα υλικά υψηλής αντοχής και ακαμψίας – μέχρι τούδε κατά κύριο λόγο αρμοδιότητα του τομέα της αεροδιαστημικής (aerospace) – θα είναι σύντομα κοινοτοπία στις επίγειες μεταφορές, λόγω της ανάγκης να μειωθεί το βάρος, να εξοικονομηθεί καύσιμο και να περιοριστούν τα έξοδα συντήρησης. Οι μηχανισμοί απορρόφησης ενέργειας στα σύνθετα είναι αρκετά διαφορετικοί.

3.1.2 Τα σύνθετα κομμάτι των οχημάτων

Στα προηγμένα ενισχυμένα με ίνες σύνθετα υλικά τα υψηλά φορτία φέρονται κυρίως από τις ίνες. Έτσι, απαιτείται ένα μεγάλο ποσοστό ελαφρών, άκαμπτων και ανθεκτικών ινών (για παράδειγμα ίνες άνθρακα, βορίου, γυαλιού ή αραμιδίου) και πρέπει να διατηρούνται σχετικά ευθείες και ευθυγραμμισμένες με τις κύριες τάσεις. Οι ίνες συγκρατούνται σε ένα συγκριτικά χαμηλής απόδοσης υλικό μήτρας, το οποίο μπορεί να διαμορφωθεί με καλούπι και όντας ακόμα υγρό να σχηματίσει ισχυρούς δεσμούς με τις ίνες. Παραδοσιακά, ως υλικά μήτρας λαμβάνονται είτε θερμοσκληρυνόμενες είτε θερμοπλαστικές ρητίνες, αλλά υπάρχει ένα αυξανόμενο ενδιαφέρον για μεταλλικές μήτρες για εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών σε (ή κοντά σε) μηχανές, ή όπου απαιτείται υψηλή θερμική αγωγιμότητα προκειμένου να μειωθούν οι κλίσεις της θερμοκρασίας, όπως στις διαστημικές κατασκευές.

Μέσω της χρήσης προηγμένων σύνθετων υλικών, μπορούν να επιτευχθούν σημαντικές μειώσεις βάρους στις αεροπορικές κατασκευές, συγκρινόμενες με παραδοσιακές ελαφρές κατασκευές κραμάτων, για να παραχθεί αυξημένο τάχος στα μαχητικά αεροσκάφη ή για να βελτιωθεί η κατανάλωση καυσίμου στα πολιτικά αεροσκάφη. Οι εν λόγω μειώσεις βάρους είναι μεταξύ 10% και 30% για αντικατάσταση εξαρτημάτων, αλλά μπορούν να είναι μέχρι 50% για πλήρεις κατασκευές. Τα σύνθετα υλικά μπορούν επίσης να εγχυθούν σχηματίζοντας περίπλοκες μορφές με αποτέλεσμα να απαιτείται μικρότερος αριθμός ξεχωριστών μερών και λιγότερες εφαρμογές σύνδεσης. Έτσι, μειώνεται το κόστος της κατασκευής των εξαρτημάτων του αεροσκάφους. Η ικανότητά τους να μορφοποιούνται σε σύνθετες μορφές έχει χρησιμοποιηθεί για τη μείωση της αντίστασης στις ατράκτους ελικοπτέρων με αποτέλεσμα την αύξηση της αποδοτικότητας καυσίμου και του βεληνεκούς για μεταφορές σε θαλάσσιες πετρελαϊκές εγκαταστάσεις. Η βελτιωμένη αντοχή στη φθορά έχει οδηγήσει στην εισαγωγή των ενισχυμένων με ίνες γυαλιού συνθέτων στα πτερύγια ρότορα ελικοπτέρων.

3.2 Προστασία έναντι σύγκρουσης και σύνθετες κατασκευές

Η προστασία έναντι σύγκρουσης των οχημάτων (crashworthiness) αφορά στη διατήρηση της καλής κατάστασης τόσο του πληρώματος, όσο των επιβατών κατά τη διάρκεια συγκρούσεων, όπως μία επίγεια σύγκρουση ή μία προσθαλάσσιωση αεροσκάφους, και ει δυνατόν τη διαφύλαξη του οχήματος. Έχει εφαρμογές και στις μεταφορές και σε μαχητικά οχήματα. Αφού πραγματεύεται εν δυνάμει βιώσιμες συγκρούσεις, οι ταχύτητες πρόσκρουσης είναι σχετικά μικρές, έως 15 m/s.

Η καμπίνα του πιλότου και των επιβατών θα πρέπει να είναι επαρκώς άκαμπτη, ώστε να διατηρήσει αρκετό χώρο επιβίωσης για τους επιβαίνοντες. Οι επιβαίνοντες, το φορτίο και ο εξοπλισμός θα πρέπει να παραμένουν προσδεμένα. Η ένταση και η διάρκεια των επιταχύνσεων που υφίστανται οι επιβαίνοντες πρέπει να είναι τέτοιες ώστε να προφυλάσσεται η ζωή και να ελαχιστοποιούνται οι τραυματισμοί. Οι κύριες απαιτήσεις της κατασκευής είναι να διατηρεί ένα προστατευτικό κέλυφος για τους επιβαίνοντες και να μειώσει τις επιταχύνσεις τους.

Τα δομικά μέρη του χώρου των επιβαινόντων πρέπει να είναι άκαμπτα και ανθεκτικά, ώστε να μην θραύονται ή λυγίζουν υπερβολικά υπό τη σύνθετη φόρτιση των συνθηκών σύγκρουσης. Οι συνδέσεις πρέπει επίσης να παραμένουν σε μεγάλο βαθμό άθικτες. Μπορεί να υπάρξει κάποια μη αντιστρεπτή παραμόρφωση στην κατασκευή, αλλά δεν πρέπει να υπάρξει σημαντική κατάρρευση. Πράγματι, είναι μάλλον προτιμότερο να υφίσταται κάποια παραμόρφωση με τη διατήρηση της ικανότητας της κατασκευής να φέρει ένα υψηλό φορτίο, παρά ένα μεγαλύτερο φορτίο ακολουθούμενο από ολική αστοχία. Αντικείμενα μεγάλης μάζας, όπως μηχανές και κιβώτια ταχυτήτων, πρέπει να αποτρέπονται από το να εισχωρούν στο χώρο των επιβαινόντων.

Οι επιταχύνσεις που υφίστανται οι επιβαίνοντες μπορούν να μειωθούν παρέχοντας μία κατασκευή απορρόφησης ενέργειας έξω από το χώρο των επιβατών. Αυτή μπορεί να είναι το σύστημα προσγείωσης ή μια υποδαπέδια κατασκευή για αεροσκάφος ή μια έμπροσθεν κατασκευή για επίγεια οχήματα. Επιπρόσθετη προστασία μπορεί να

παρασχεθεί στο χώρο των επιβατών, στα καθίσματα, μεταξύ επιβατών και κατασκευής.

Η ανθρώπινη ικανότητα για αντοχή σε κρουστικό φορτίο εξαρτάται έντονα από τη διάρκεια του παλμού, με εγκάρσια φορτία πάνω από 100 g να είναι βιώσιμα για 1 ms, αλλά για πάνω από 10 ms το βιώσιμο όριο θα ήταν μόνο περί τα 25 g. Τούτο έχει οδηγήσει στην απαίτηση ότι οι επιταχύνσεις (ή επιβραδύνσεις) στη βάση της σπονδυλικής στήλης οποιουδήποτε επιβάτη δε θα πρέπει να ξεπερνούν τιμές, όπως αυτές του Πίνακα 3.1. Ένα σώμα με αρχική ταχύτητα 12,5 m/s και με ομοιόμορφη επιβράδυνση 25 g, θα ακινητοποιηθεί σε μια απόσταση περίπου 0,3 m. Ένα ελικόπτερο με μάζα 5000 kg που κινείται στα 12,5 m/s έχει κινητική ενέργεια 400 kJ και μία επιβράδυνση των 25 g συνεπάγεται δύναμη 1,2 MN. Συνεπώς, τα συστήματα απορρόφησης ενέργειας θα πρέπει να σχεδιάζονται προσεκτικά, διότι μεγαλύτερες δυνάμεις σύγκρουσης θα είχαν ως αποτέλεσμα πολύ μεγάλη επιβράδυνση και μικρότερες δυνάμεις σύγκρουσης θα απαιτούσαν μεγαλύτερες αποστάσεις για να απορροφηθεί η απαραίτητη ενέργεια.

Πίνακας 3.1: Τυπικά όρια επιταχύνσεων (ή επιβραδύνσεων)

Διεύθυνση	Διάρκεια	
	100 ms	200 ms
Διαμήκης – εμπρός και πίσω	45 g	25 g
Πλευρική – δεξιά και αριστερά	20 g	15 g
Κατακόρυφη – κάτω	25 g	25 g
Κατακόρυφη – πάνω	15 g	7½ g

Τα σύνθετα υλικά μπορούν να δώσουν πλεονεκτήματα με διάφορους τρόπους. Εξαιτίας των καλών ιδιοτήτων τους, μπορούν να παρέχουν αντοχή και ακαμψία στο χώρο των επιβατών, με εξοικονόμηση στη μάζα. Η εξοικονόμηση μάζας αλλού στην κατασκευή επίσης έχει σαν αποτέλεσμα μικρές ενέργειες και μικρά φορτία κατά τη διάρκεια συγκρούσεων. Πολλή από την εργασία που έχει γίνει για την απορρόφηση ενέργειας των υλικών αφορά στη σύνθλιψη σωλήνων. Οι σωλήνες, όταν υπόκεινται σε αξονικό θλιπτικό φορτίο, μπορούν να συνθλιβούν με διάφορους τρόπους ανάλογα με το υλικό, τη γεωμετρία του σωλήνα, ειδικά το λόγο πάχους τοιχώματος προς την εσωτερική διάμετρο. Ο μαλακός χάλυβας και τα κράματα αλουμινίου καταρρέουν μέσω τοπικού πλαστικού λυγισμού σε μορφή ακορντεόν, απορροφώντας τυπικά ενέργεια 15 – 30 kJ/kg. Εποξειδικοί σωλήνες ενισχυμένοι με Kevlar μπορούν επίσης να επιδείξουν ένα σταθερό τύπο κατάρρευσης με λυγισμό στο ένα άκρο για λεπτούς κυλινδρικούς σωλήνες, ενώ για αυτούς μεγαλύτερου πάχους υπάρχουν λιγότερες πτυχωσεις που δε διαδίδονται με σταθερό τρόπο. Σε εποξειδικούς σωλήνες με ενίσχυση ινών άνθρακα και γυαλιού, οι κύλινδροι με παχύτερα τοιχώματα επιδεικνύουν σταθερότερη κατάρρευση με μία προοδευτική θραύση από το ένα άκρο. Θραύση σε ενδιάμεση τομή οδηγεί σε ασταθή κατάρρευση.

Οι κυλινδρικοί σωλήνες τείνουν να δώσουν μια πιο σταθερή κατάρρευση από τους σωλήνες ορθογωνικής ή τετραγωνικής διατομής. Σωλήνες με ίνες ευθυγραμμισμένες σε 0° και 90° στον άξονα του σωλήνα απορροφούν ελαφρώς περισσότερη ενέργεια από τις ίνες σε ±45° και αυξάνοντας το ποσοστό των ινών με 0° αυξάνει η απορρόφηση ενέργειας, αλλά αυξάνει και το ενδεχόμενο ασταθούς κατάρρευσης. Μία πιο λεπτομερής εξέταση των επιδράσεων της κατεύθυνσης των ινών σε διαστρωματώσεις τύπου (0 ±θ) έχει δείξει ότι μεταβολή της γωνίας θ έχει μικρή

επίδραση σε σωλήνες με ενίσχυση ινών γυαλιού ή Kevlar, αλλά σε σωλήνες με ίνες άνθρακα η απορρόφηση ενέργειας αυξάνει καθώς η θ μειώνεται και διαστρωματώσεις (0 ± 15) μπορούν να απορροφήσουν διπλάσια ενέργεια από διαστρωματώσεις (0 ± 45). Έχει επίσης βρεθεί ότι στους σύνθετους σωλήνες μπορεί να προκληθεί σταθερή κατάρρευση μέσω μηχανισμών σκανδάλης (triggering), όπως η λοξοτομή (chamfering) και η εγκοπή σχήματος 'V' (notching). Τούτο μειώνει το αρχικό μέγιστο φορτίο και δίνει έναν πιο σταθερό μηχανισμό κατάρρευσης. Οι σωλήνες που καταρρέουν μέσω μιας ελεγχόμενης θραύσης εμφανίζουν όμοια συμπεριφορά, είτε φορτίζονται αργά, είτε με ρυθμούς που προσομοιώνουν τις συνθήκες σύγκρουσης.

Η απορρόφηση ενέργειας από σύνθλιψη κυλίνδρων σύνθετων υλικών εντοπίζεται στην περιοχή $10 - 75$ kJ/kg εξαρτώμενη από το υλικό και τη γεωμετρία, με τις τιμές να ανέρχονται και στα 100 kJ/kg για κάποιους σωλήνες ενισχυμένους με ίνες άνθρακα.

Στο παράδειγμα που δόθηκε νωρίτερα, ένα ελικόπτερο μάζας 5000 kg έχει 400 kJ κινητική ενέργεια στα $12,5$ m/s. Για να απορροφηθεί όλο αυτό το ποσό ενέργειας, με σύνθετα υλικά που έχουν απορρόφηση ειδικής ενέργειας 40 kJ/kg, θα απαιτούνταν 10 kg από τα υλικά αυτά ($0,2\%$ του συνολικού βάρους). Όμως, οφείλεται να παρέχεται προστασία για μια ποικιλία διευθύνσεων και συνθηκών σύγκρουσης. Αλλά, εάν η προστασία έναντι σύγκρουσης (crashworthiness) εισαχθεί σε ένα πρώιμο στάδιο της σχεδίασης, το προστιθέμενο βάρος στο σκελετό του οχήματος είναι ακόμη μόνο της τάξης του 1% του συνολικού βάρους. Το συνολικό βάρος που προστέθηκε για σκελετό, σύστημα προσγείωσης, καθίσματα και σύστημα καυσίμου προστασίας για τα ελικόπτερα UTTAS και AAH ήταν μεταξύ $2,5\%$ και $4,8\%$ του βάρους του αεροσκάφους.

3.3 Απορρόφηση ενέργειας σε σύνθετες κατασκευές επίγειων οχημάτων

Υπάρχει ένας αριθμός οικονομικών και λειτουργικών εν δυνάμει οφελών τόσο για τον καταναλωτή, όσο και για τον κατασκευαστή που προέρχονται από τη χρήση πλαστικών ενισχυμένων με ίνες (fiber reinforced plastic – FRP) σύνθετων υλικών στην κατασκευή αυτοκινήτων. Τα κέρδη προκύπτουν από τη μείωση του βάρους, την ποιότητα κατασκευής, την αύξηση της κομψότητας και τη βελτιωμένη αντίσταση στη διάβρωση και τα χτυπήματα. Οι βασικές χρήσεις των σύνθετων FRP είναι σε πάνελ του σώματος του οχήματος, σε καπό και πόρτες, δηλαδή κυρίως σε ημι-κατασκευαστικές εφαρμογές. Σημαντική προσπάθεια γίνεται να επεκταθεί το εύρος των χρήσεων σε κατασκευές που θα φέρουν περισσότερο φορτίο, όπως διασταυρούμενα μέρη, κοιλότητες του δαπέδου και κιγκλιδώματα του σκελετού.

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή δομών που φέρουν φορτία πρέπει να αποδίδουν σε σύνθετες καταστάσεις φόρτισης, αλλά και να υπόκεινται σε υψηλής παραγωγικότητας διαδικασίες κατασκευής. Οι απαιτήσεις σχεδίασης περιλαμβάνουν τον ήχο, τις δονήσεις και τη σκληρότητα (noise, vibration, harshness – NVH), την κόπωση και άλλα θέματα ανθεκτικότητας και τη διαχείριση ενέργειας σύγκρουσης. Ο παράγων NVH, ο οποίος επηρεάζει την ποιότητα οδήγησης, εξαρτάται από την ελαστική ακαμψία και τα χαρακτηριστικά απόσβεσης, ενώ είναι σημαντικό ότι μπορεί να γίνει αποδεκτό ένα αυξημένο κόστος, εάν πραγματοποιηθεί μία σημαντική βελτίωση. Για το λόγο αυτό υπάρχει ένα ανανεωμένο ενδιαφέρον σε μέρη της

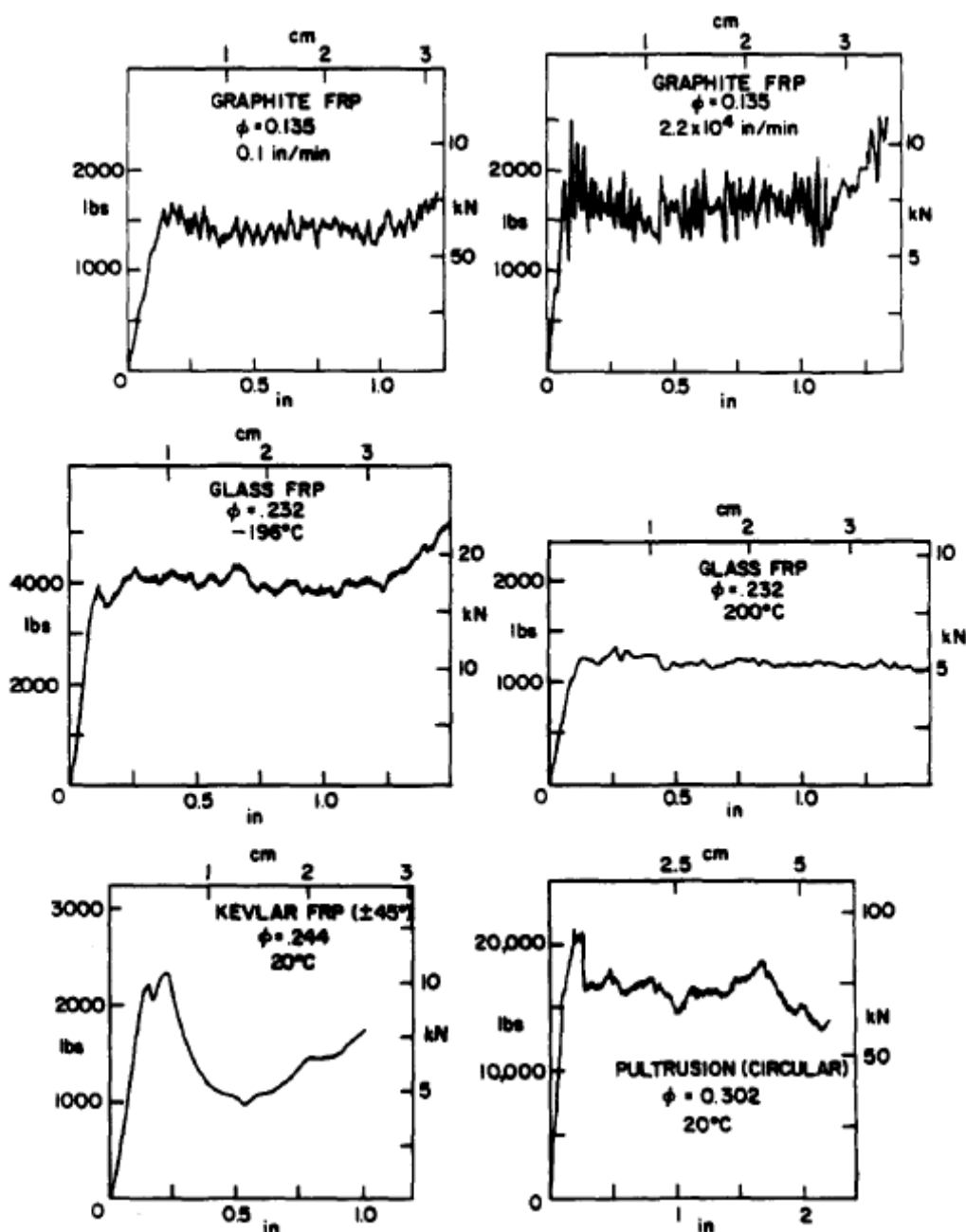
μετάδοσης φτιαγμένα από FRP. Η αντίσταση στην κόπωση διέπεται από την ικανότητα της κατασκευής να αντιστέκεται στην έναρξη και την ανάπτυξη της ρωγμής και μολονότι οι ευαίσθητες στην κόπωση εφαρμογές στο αυτοκίνητο γενικά σχετίζονται με εξαρτήματα της μηχανής και της μετάδοσης κίνησης, υπάρχει πιθανότητα θραύσης από κόπωση σε εξαρτήματα του σώματος και του σασί, π.χ. σε ελατήρια της ανάρτησης, και σε τμήματα συνδέσεων.

Η διαχείριση ενέργειας σύγκρουσης συνιστά μία από τις πρωταρχικές απαιτήσεις σχεδίασης που πρέπει να ικανοποιεί η κατασκευή του σώματος, ειδικά η κατασκευή του μπροστινού άκρου. Αρκετές σπουδές έχουν δείξει ότι οι σύνθετες κατασκευές μπορούν να παρουσιάζουν μια απορρόφηση ενέργειας συγκρίσιμη με, και σε κάποιες περιπτώσεις καλύτερη από, αυτήν των μεταλλικών κατασκευών. Η διαφορά μεταξύ μεταλλικών και FRP κατασκευών (αυτών που είναι βασισμένες σε ίνες γυαλιού ή γραφίτη) είναι ότι οι πρώτες καταρρέουν μέσω πλαστικού λυγισμού, ενώ οι δεύτερες καταρρέουν με ένα συνδυασμό διαδικασιών θραύσης. Οι παραδοσιακές μέθοδοι σχεδίασης απορρόφησης ενέργειας οχημάτων συνδύαζαν αναλυτικές μεθόδους με εκτενή πειραματική ανάπτυξη – οι ασυνέχειες που προκαλούνται από τη διάδοση ρωγμών εισάγουν σημαντικές δυσκολίες στην ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. Ποικίλες μέθοδοι, αναλυτικές και πεπερασμένων στοιχείων, υπάρχουν για την μοντελοποίηση τοπικής σύνθλιψης μετάλλου, αλλά η συμπεριφορά ολόκληρου του οχήματος κατά τη σύγκρουση είναι δύσκολο να μοντελοποιηθεί. Για τις μεταλλικές και σύνθετες κατασκευές, πρέπει να χρησιμοποιηθούν εμπειρικές ή ημιαναλυτικές μέθοδοι για να υπολογιστούν τα φορτία της σύνθλιψης.

Η σύγκρουση μιας κατασκευής αυτοκινήτου συνεπάγεται πολλές περιπλοκότητες, όπως για παράδειγμα την κατανομή των δρόμων του φορτίου μεταξύ των κάτω και των ανώτερων πλευρικών κιγκλιδωμάτων, τη σχεδίαση των βάσεων του προφυλακτήρα και της μηχανής, προκειμένου να διασφαλιστεί βέλτιστη αλληλουχία κατάρρευσης, έλεγχος της διάτρησης και κατάρρευσης της καμπίνας των επιβατών (ιδιαίτερα στις πλευρικές συγκρούσεις) και επίσχεση του καυσίμου σε συγκρούσεις του οπίσθιου μέρους του αυτοκινήτου. Άλλα φορτία που μπορούν να παραμορφώσουν την κατασκευή απορρόφησης ενέργειας πρέπει επίσης να εξεταστούν, όπως αυτά που επιβάλλονται κατά του σηκώματος του αυτοκινήτου με γρύλο, του φορτώματος και της ρυμούλκησης. Σε μελέτες σύνθλιψης οχημάτων, η διαφορά μεταξύ οιονεί στατικής και δυναμικής κατάρρευσης είναι σημαντική επειδή πολύ συχνά παρατηρούνται διαφορετικοί τρόποι κατάρρευσης. Η αλληλουχία με την οποία τα διάφορα στοιχεία καταρρέουν και προσκρούουν το ένα στο άλλο μπορούν να επηρεάσουν την απόκριση της κούκλας του τεστ σύγκρουσης (crash test dummy) από την οποία καθορίζονται οι μετρήσεις για την ασφάλεια ενός συγκεκριμένου οχήματος και, ως εκ τούτου, τα αποτελέσματα του τεστ. Επί παραδείγματι, οι σχετικές οριζόντιες και κατακόρυφες μετατοπίσεις της κολόνας του τιμονιού και ο χρόνος στον οποίο συμβαίνουν μετά την έναρξη της σύγκρουσης, μαζί με το χρόνο αντίδρασης του συστήματος συγκράτησης, μπορούν να έχουν μία σημαντική επίδραση στις παρατηρούμενες τιμές του τραυματισμού του κρανίου. Έτσι, πρέπει να αναγνωρισθεί ότι οι απλές εργαστηριακές δοκιμές για το χαρακτηρισμό της απόκρισης σε σύνθλιψη των συνθέτων είναι μία χονδροειδής απλοποίηση της κατάστασης του αληθινού οχήματος.

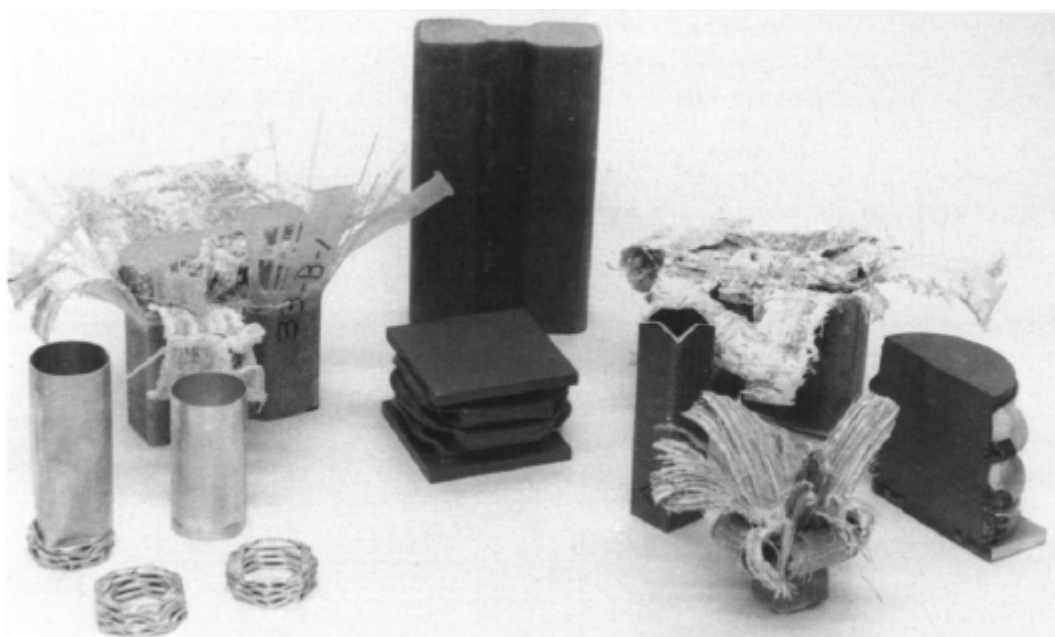
Η κατάρρευση FRP κατασκευών μπορούν να επιδείξουν τα περισσότερα χαρακτηριστικά που παρατηρούνται σε αυτήν των μεταλλικών κατασκευών,

εξαρτώμενη από τον τύπο ίνας που χρησιμοποιείται. Για σωλήνες με γραφίτη και γυαλί, οι οποίοι καταρρέουν μέσω διαδικασιών θραύσης και αποσύνδεσης, η καμπύλη φορτίου / συμπίεσης έχει μία μορφή σχεδόν ιδανικού τετραγωνικού παλμού, για μια διάταξη απορρόφησης ενέργειας (Σχήμα 3.1). Οι σωλήνες από Kevlar γενικά καταρρέουν μέσω διαδικασιών λυγισμού και πτυχώσεων, με έναν όμοιο τρόπο με τους μεταλλικούς σωλήνες και η καμπύλη φορτίου / συμπίεσης δείχνει αντίστοιχους κυματισμούς. Η διαφορά μπορεί να αποδοθεί στη χαμηλότερη επέκταση στην αστοχία των ινών γραφίτη και γυαλιού, συγκριτικά με τις ίνες Kevlar. Προς το παρόν, οι ίνες γυαλιού είναι η μόνη οικονομική και γενική ενίσχυση για χρήση σε αυτοκίνητα και οι σχεδιαστές θα πρέπει να αντιμετωπίσουν ένα υλικό που συμπεριφέρεται εντελώς διαφορετικά από το χάλυβα.



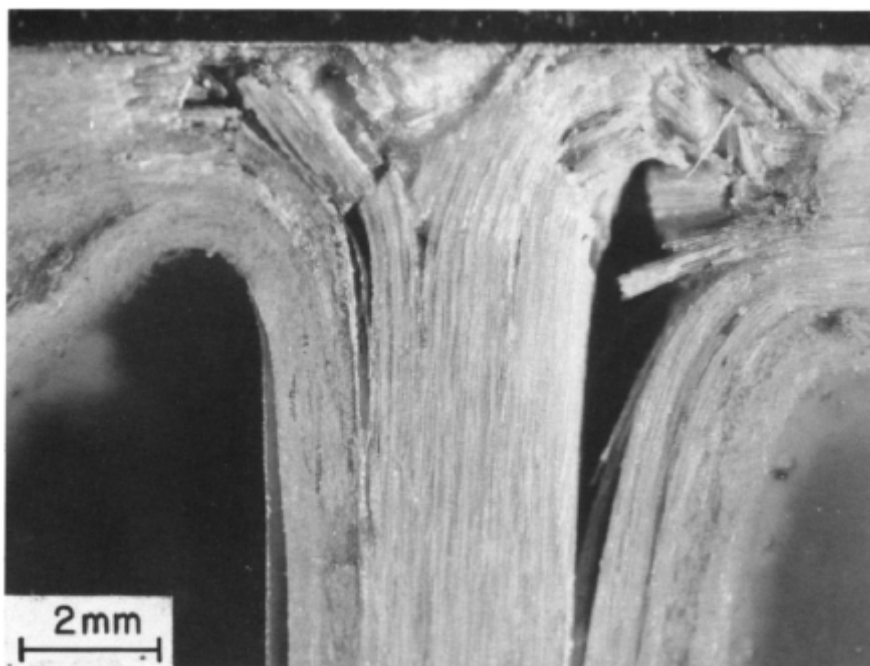
Σχήμα 3.1: Καμπύλες δύναμης / μετατόπισης για διάφορους FRP σωλήνες που υπόκεινται σε αξονική θλίψη. Η ϕ είναι η σχετική πυκνότητα (περίπου ίση προς $4t/D$).

Αν και ένας αριθμός διατριβών έχουν εκδοθεί στην απορρόφηση ενέργειας των FRP σύνθετων υλικών, τα ποσοτικά δεδομένα είναι σχετικά περιορισμένα. Τούτο συμβαίνει κυρίως λόγω του μεγάλου αριθμού των μεταβλητών που εμπλέκονται. Η περισσότερη εργασία που έχει γίνει στα υλικά αυτά, έχει εκτελεστεί σε υλικά για εφαρμογές αεροδιαστημικής χρησιμοποιώντας σωλήνες απλής γεωμετρίας σε αξονική θλίψη (Σχήμα 3.2). Έτσι, χρησιμοποιώντας αυτήν την πολύ μικρή βάση δεδομένων για την πρόβλεψη της απόκρισης ενός πλευρικού κικλιδώματος για μία κατασκευή του μπροστινού άκρου αυτοκινήτου θα συνεπαγόταν πολυάριθμες υποθέσεις. Αρκετές μέθοδοι είναι διαθέσιμες για την εκτίμηση της απόκρισης σε θλίψη μεταλλικών κολόνων, αλλά λίγες διατίθενται για την πρόβλεψη της θλίψης σύνθετων υλικών. Σε σταθερή σύνθλιψη, η κατάρρευση συμβαίνει ουσιαστικά σε σταθερή τάση για δοθείσες διαστρωματώσεις. Ακόμα, όμως, χρειάζονται μοντέλα της διαδικασίας διαστρωματικής αποκόλλησης (delamination) καθώς η κατασκευή καταρρέει.



Σχήμα 3.2: Μεταλλικοί και FRP σύνθετοι σωλήνες με μορφές πριν και μετά την κατάρρευση

Η τάση στην οποία εμφανίζεται σταθερή σύνθλιψη εξαρτάται από το επίπεδο στο οποίο διάφοροι παράγοντες, όπως διαστρωματική αποκόλληση (delamination), bending, kinking, θραύση των ινών και θραύση της ρητίνης, είναι ενεργοί. Παρατηρήσεις της απόκρισης της σύνθλιψης απλών διατομών έχουν δείξει ότι η περιοχή θλίψης μπορεί να εξετασθεί σε δύο μέρη: Μία ζώνη στην οποία οι στρώσεις έχουν χωριστεί και μία αρκετά μικρότερη στην οποία η δομή είναι ουσιαστικά κονιορτοποιημένη (Εικόνα 3.1). Οι αποκολλώμενες στρώσεις, οι οποίες μπορούν να θεωρηθούν ως λεπτές, φορτιζόμενες στο άκρο πλάκες, μπορούν να είναι ικανές να συγκρατήσουν χαμηλά μόνο φορτία. Δομικά σχήματα που υποκαθιστούν τις καμπύλες με επίπεδες επιφάνειες μειώνουν την έκταση της διαστρωματικής αποκόλλησης και παράγουν σημαντικές αυξήσεις στην τάση θλίψης και, ως εκ τούτου, στην ικανότητα απορρόφησης ενέργειας για αυτήν τη διατομή.



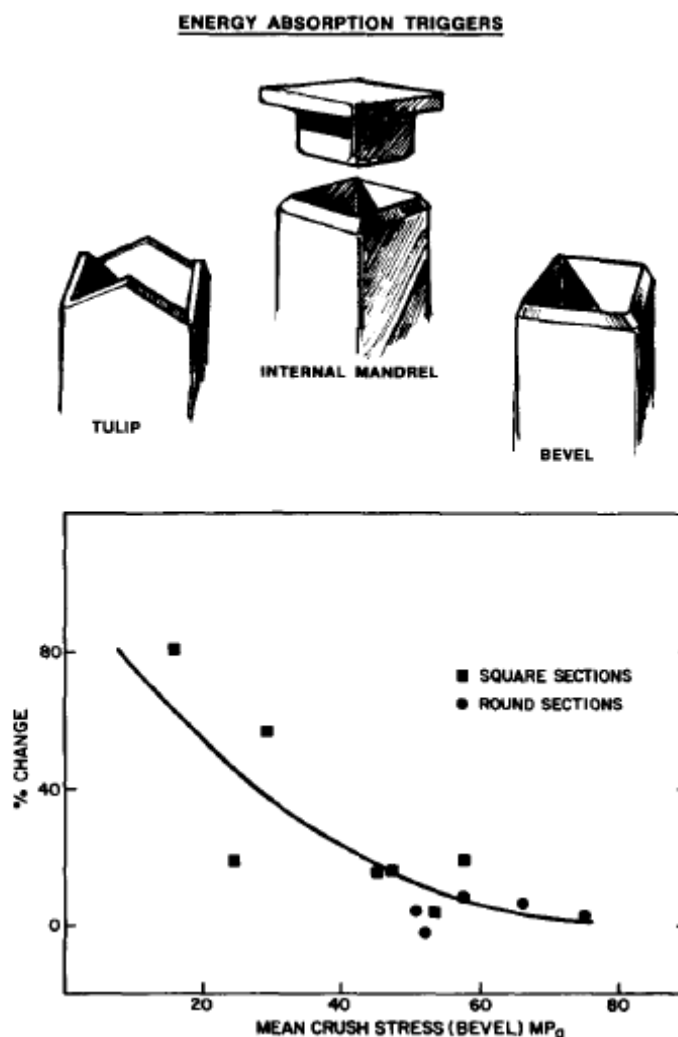
Εικόνα 3.1: Περιοχή θλίψης σύνθετου σωλήνα υπό αξονική συμπίεση

Μία άλλη διαφορά στη συμπεριφορά μεταξύ σύνθετων και μεταλλικών κατασκευών απορρόφησης ενέργειας έγκειται στην επίδραση της τριβής. Σε εργαστηριακές δοκιμές, στις οποίες τα δείγματα συνθλίβονται πάνω σε σκληρές πλάκες των μηχανών δοκιμής, η τριβή μπορεί να παρέχει ένα μεγάλο ποσοστό (π.χ. 50%) της αντίστασης στη σύνθλιψη για τα σύνθετα εξαιτίας της σχετικής κίνησης μεταξύ του υλικού του σωλήνα και της πλάκας στη διεπιφάνεια. Η σκληρότητα της εντυπωμένης επιφάνειας δε φαίνεται να είναι πολύ σημαντική, εφόσον η κατασκευή του συνθέτου δεν εισδύει σε κάποιο βάθος. Τοιουτοτρόπως, αλλάζοντας την επιφάνεια επαφής από μαλακό ορείχαλκο σε γυαλί δεν αλλάζει την παρατηρούμενη τάση θλίψης για ένα σύνθετο σωλήνα, αλλά η χρησιμοποίηση μαλακού ξύλου θα επιτρέψει την είσδυση και θα προκαλέσει ασταθή κατάρρευση. Η αναγνώριση και ο έλεγχος των αποτελεσμάτων της τριβής στην εφαρμογή πραγματικού οχήματος απαιτεί πρόσθετη έρευνα και ανάπτυξη. Άλλες βασικές καταβόθρες για διασκόρπιση ενέργειας είναι ακόμα αβέβαιες. Εκτιμήσεις της ενέργειας θραύσης έχουν υποδείξει ότι λιγότερο από 5% διασκορπίζεται κατά τη γένεση των επιφανειών θραύσης. Μία σημαντική καταβόθρα μπορεί να είναι η πλαστική παραμόρφωση της ρητίνης.

Μία πρόσθετη δυσκολία στην παραγωγή μεθόδων πρόβλεψης είναι ότι οι FRP κατασκευές που κατασκευάζονται από μη-διαστρωματωμένα σύνθετα, π.χ. σύνθετα παραχθέντα με συνεχή μορφοποίηση ελάσματος (sheet molding compounds – SMC), μπορούν να επιδεικνύουν υψηλή ικανότητα απορρόφησης ενέργειας. Πιθανώς, τούτο συμβαίνει διότι η τυχαία κατανομή των ινών περιορίζει την εκτεταμένη εύκολη ανάπτυξη της ρωγμής. Η γεωμετρία του μηχανισμού σκανδάλης (trigger) έχει επίσης δείξει να είναι σημαντική για διατομές χαμηλής δομικής αντίστασης. Για αυτές τις διατομές, μία απλή αλλαγή στη γεωμετρία του trigger παρήγαγε μία έως και 80% αύξηση στην τάση θραύσης (Σχήμα 3.3 (β)), πιθανώς λόγω της ενισχυμένης έναρξης της ρωγμής και της μειωμένης τάσης για αποκόλληση των στρώσεων.

Όλες αυτές οι πολυπλοκότητες υποδηλώνουν ότι οι προβλέψεις της απόκρισης σε θλίψη των σύνθετων κατασκευών θα βασίζονται εν πολλοίς σε εμπειρικά μέσα στο

εγγύς μέλλον. Στη σχεδίαση οχημάτων, η εφαρμογή μηχανισμών σκανδάλης περιπλέκεται από την ανάγκη να χρησιμοποιηθούν για να συνδέσουν τον προφυλακτήρα στην κατασκευή απορρόφηση ενέργειας. Αυστηροί περιορισμοί συσκευασίας μπορεί να περιορίσουν το διαθέσιμο χώρο και γεωμετρία για έναν μηχανισμό σκανδάλης παραγωγής (production trigger). Για τον τομέα των κιγκλιδωμάτων, ασάβινα ενθέματα όπως του Σχήματος 3.3 (α), στα οποία μπορεί να συνδεθεί η δοκός του προφυλακτήρα, έχει βρεθεί ότι λειτουργούν ικανοποιητικά.



Σχήμα 3.3: (α) Διατάξεις trigger σε σύνθετο FRP σωλήνα (β) Αύξηση στην ειδική ενέργεια για διάταξη τύπου τουλίπας (tulip trigger) συγκριτικά με τη διάταξη κεκλιμένης εξοχής (bevel trigger) για σύνθετα γυαλιού – πολυεστέρα μορφοποιημένα με εμβάπτιση (pultrusions)

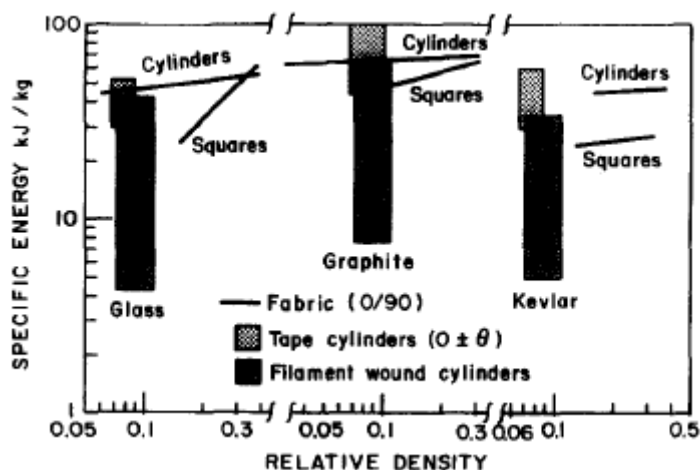
3.4 Παράγοντες που επηρεάζουν την απορρόφηση ενέργειας

3.4.1 Υλικό

3.4.1.1 Ίνας

Παρότι ο τύπος της ίνας επηρεάζει την ενέργεια κρούσης σε ένα σημαντικό βαθμό, το πράττει με έναν τρόπο που δεν απορρέει άμεσα από της ιδιότητες των ινών. Οι ίνες γραφίτη έχουν σημαντικά υψηλότερο μέτρο ελαστικότητας και εκτατές ιδιότητες από τις ίνες γυαλιού, όμως η ειδική ενέργεια απορρόφησης των σωλήνων γραφίτη FRP δεν είναι αντιστοίχως μεγαλύτερη από αυτήν των σωλήνων γυαλιού FRP όμοιων διαστρωματώσεων. Η διαφορά μεταξύ των δύο είναι μόνο της τάξης του 25% (Σχήμα 3.4). Έρευνες έχουν δείξει ότι για τις ίνες γραφίτη η ειδική ενέργεια μειώνεται έντονα για ίνες υψηλού μέτρου ελαστικότητας και έχει προταθεί ότι η ειδική ενέργεια μπορεί να σχετίζεται με τη μέγιστη παραμόρφωση των ινών. Για χρήση στην αυτοκίνηση, το γυαλί είναι πιθανώς το πιο προσιτό υλικό ίνας για οικονομικούς λόγους. Επομένως, για την απορρόφηση ενέργειας, ο μείζων παράγοντας είναι η μορφή και η κατανομή των ινών, παρότι υπό το φως των αποτελεσμάτων με γραφίτη, υπάρχουν κάποιες διαφορές στην απόκριση της απορρόφησης ενέργειας μεταξύ συνθέτων από γυαλί τύπου E και γυαλί τύπου S. Μειωμένη περιεκτικότητα σε ίνες, όπως επίσης και μικρότερη διάμετρος ίνας, μειώνει τη δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας. Σε πραγματικές σχεδιάσεις, τα συνεχή νήματα πρέπει να ενσωματώνονται στην κατασκευή. Αυτά τα νήματα δεν παρέχουν μόνο κατασκευαστική ακαμψία και αντίσταση στην κόπωση όπως υπαγορεύεται από τον παράγοντα NVH, ανθεκτικότητα και άλλα κατασκευαστικά προτερήματα, αλλά συνεισφέρουν και στην ακεραιότητα της κατασκευής κατά τη διάρκεια σύγκρουσης, αφού οι συνεχείς ίνες συχνά υφίστανται διαχωρισμό χωρίς θραύση.

Ο βέλτιστος συνδυασμός κομμένων (κοντών) και συνεχών ινών είναι ακόμα ανοιχτός προς συζήτηση, όπως επίσης η καλύτερη μορφή κομμένων ινών γυαλιού. Υπάρχουν κάποιες αποδείξεις ότι οι μακριές ίνες, 5 cm (2 in.), παρέχουν υψηλότερη ειδική ενέργεια από τις κοντύτερες, 2,5 cm (1 in.), αλλά προσπάθειες για αύξηση της ειδικής ενέργειας με αύξηση της περιεκτικότητας σε γυαλί δεν ήταν επιτυχείς, εξαιτίας προβλημάτων διείσδυσης της ρητίνης (wetting problems) σε πολύ υψηλές περιεκτικότητες γυαλιού. Υπάρχει ένα διαδεδομένο ενδιαφέρον στη χρήση του Kevlar στην αεροδιαστημική βιομηχανία για τη βελτίωση της προστασίας έναντι σύγκρουσης (crashworthiness) των ελικοπτέρων. Τούτο προκύπτει μερικώς επειδή οι κατασκευές από Kevlar συμπεριφέρονται αρκετά όμοια με τις μεταλλικές κατασκευές κατά τη συμπίεση, λόγω των εύπλαστων χαρακτηριστικών της ίνας. Για εφαρμογές αυτοκίνησης η χρήση του Kevlar σε συνδυασμό με ίνες άλλων τύπων μπορεί να είναι εφικτή για κάποιες εφαρμογές, μολονότι οι παρατηρήσεις στη διατήρηση της ακεραιότητας συντεθλιμμένων κατασκευών με τέτοια υβριδικά είναι μάλλον διφορούμενες.



Σχήμα 3.4: Ειδικές ενέργειες για μία ποικιλία σύνθετων FRP σωλήνων

3.4.1.2 Ρητίνη

Ζητήματα οικονομικά και κατεργασιών πιθανώς θα περιορίζουν τις επιλογές ρητινών σε ρητίνες πολυεστέρα και βινυλ-εστέρα. Ο ρόλος της ρητίνης στην απορρόφηση ενέργειας δεν είναι πλήρως σαφής, αλλά η πλαστική παραμόρφωση κατά τη διάρκεια της διαδικασίας σύνθλιψης μπορεί να είναι ένας σημαντικός παράγοντας στο ενεργειακό ισοζύγιο. Έχειδειχθεί ότι η ειδική ενέργεια αυξάνει με τη σειρά των ρητινών φαινόλες < πολυεστέρες < εποξειδικές για σωλήνες FRP γυαλιού και ότι η ειδική ενέργεια απορρόφησης δεν εξαρτάται από τη σκληρότητα της ρητίνης, αλλά εξαρτάται με ένα γραμμικό τρόπο από την αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας της ρητίνης. Έχουν επίσης βρεθεί αντικρουόμενες τάσεις σχετικά με την επίδραση της παραμόρφωσης αστοχίας της μήτρας στην ειδική ενέργεια. Για ίνες γραφίτη, η αλλαγή της μήτρας από μία ρητίνη χαμηλής σε μία ρητίνη υψηλής παραμόρφωσης αστοχίας με χαμηλής παραμορφωσιμότητας ίνες συνοδεύεται από μία αύξηση στην ειδική ενέργεια, αλλά αυτή η αλλαγή μήτρας με υψηλής παραμορφωσιμότητας ίνες παράγει μία μείωση στην ειδική ενέργεια. Με ίνες Kevlar, παρατηρήθηκαν μόνο μειώσεις στην ειδική ενέργεια αλλάζοντας τη ρητίνη της μήτρας με αυτόν τον τρόπο.

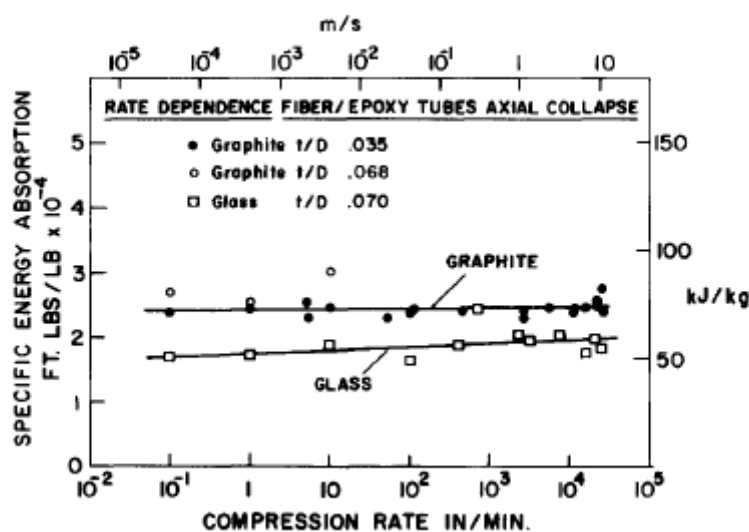
3.4.1.3 Σχεδίαση στρώσεων

Ενώ η ανάλυση της αντοχής διαστρωμάτωσης για δοσμένη κατάσταση φόρτισης είναι περίπλοκη, δεν υπάρχει, προς το παρόν, άλλος τρόπος για τον προσδιορισμό του βέλτιστου προσανατολισμού και διεύθυνσης των ινών για μία δοσμένη περίπτωση απορρόφησης ενέργειας. Τούτο συμβαίνει λόγω της έλλειψης θεωρητικής ανάλυσης της διαδικασίας αστοχίας στη σχεδίαση των FRP. Τα πειραματικά αποτελέσματα είναι επίσης κάπως διφορούμενα. Η τάση στην αλλαγή της ειδικής ενέργειας με αύξηση της περιεκτικότητας σε ίνες 90° μπορεί να είναι αυξητική ή μειωτική, εξαρτώμενη από το μηχανισμό trigger. Σύνθετα υλικά με ίνες γυαλιού ή γραφίτη με προσανατολισμό (0/90) έχουν μεγαλύτερη ειδική ενέργεια από αυτά με προσανατολισμό (45/45).

3.4.2 Ταχύτητα

Οι σύνθετες κατασκευές μπορούν να απορροφήσουν σημαντικά ποσά ενέργειας υπό συνθήκες δυναμικής φόρτισης αν η διαδικασία σύνθλιψης έχει κατάλληλη έναρξη

(trigger) για να αποφευχθεί συνολική αστοχία. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.5, σε μια περιοχή ταχυτήτων θλίψης $10^{-4} - 10$ m/s, η ειδική ενέργεια ινωδών FRP σωλήνων εποξειδικής μήτρας / γυαλιού με διαστρωμάτωση 0/90 βρέθηκε ότι αυξάνεται έως 20%, ενώ αυτή όμοιων FRP σωλήνων γραφίτη αυξήθηκε μόνο έως 2%. Αντιθέτως, έχουν παρατηρηθεί σημαντικές μειώσεις έως 30% σε δυναμικές δοκιμές για διαστρωμάτωση $(0_2/+45)_n$ σωλήνων γυαλιού, γραφίτη και Kevlar. Σε σωλήνες εποξειδικής μήτρας / Kevlar παρατηρήθηκε μικρή διαφορά μεταξύ οιονεί στατικής και δυναμικής απορρόφησης ενέργειας. Μία μείωση του ~30% στην ειδική ενέργεια έχει επίσης διαπιστωθεί με FRP σωλήνες πολυεστέρα / γυαλιού, μολονότι αυτοί οι σωλήνες διαφορετικά έχουν αποδώσει ικανοποιητικά σε δυναμικές δοκιμές. Η κατάρρευση εδώ εμφανίζεται να σχετίζεται με το διαχωρισμό των πλευρών των σωλήνων στις γωνίες, αφού το φαινόμενο δε σημειώθηκε σε σωλήνες κυκλικής διατομής.



Σχήμα 3.5: Εξάρτηση της ειδικής ενέργειας από την ταχύτητα για σωλήνες FRP γυαλιού και γραφίτη

3.4.3 Παραγωγική διαδικασία

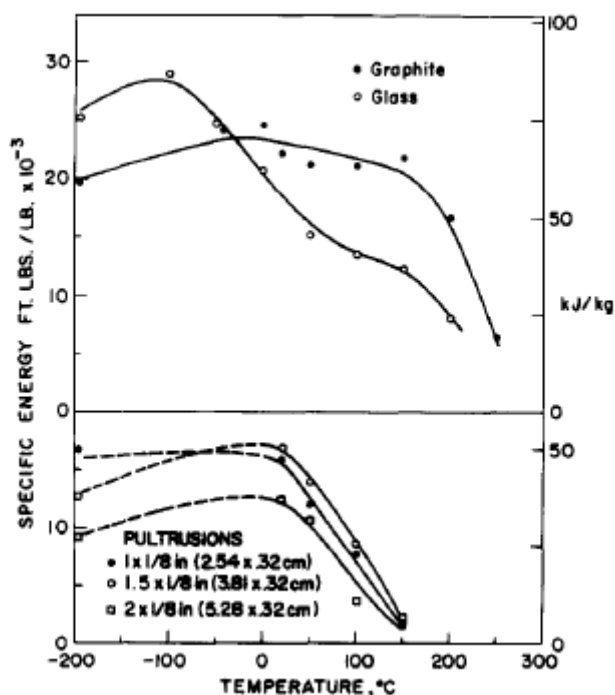
Υψηλός όγκος παραγωγής σημαίνει ότι τα δομικά μέρη θα κατασκευάζονται με μία ταχεία διαδικασία παραγωγής με δυνατότητα τεταμένου ποιοτικού ελέγχου. Για μεγάλα δομικά στοιχεία, οι πιθανοί υποψήφιοι είναι η μορφοποίηση συμπίεσης με συνεχή μορφοποίηση ελάσματος (sheet molding compounds – SMC) και η μορφοποίηση μεταφοράς ρητίνης (resin transfer molding – RTM). Ένα μεγάλο ενδιαφέρον έχει εκδηλωθεί για την SMC, και έχουν εξασφαλιστεί ειδικές ενέργειες που προσεγγίζουν τα 60 kJ/kg. Η ανάπτυξη ελαττωμάτων εξαιτίας της ανεπαρκούς διείσδυσης της ρητίνης στις ίνες (wetting of the fibers) και του εγκλωβισμένου αέρα παρατηρήθηκε με υψηλού περιεχομένου σε γυαλί σύνθετες κατασκευές προκαλώντας διαφορές στα αποτελέσματα. Οι κοντές δεσμίδες ινών (chopped strand mat) προκάλεσαν λιγότερο εγκλωβισμό αέρα από τα κοντά προνήματα (chopped rovings). Έχει επίσης βρεθεί ότι η μέθοδος παραγωγής θα μπορούσε να επηρεάσει τα αποτελέσματα και μέσω του βαθμού διείσδυσης της ρητίνης στις ίνες: χειροποίητα SMC υλικά με χαμηλότερες περιεκτικότητες σε γυαλί από τα παραγόμενα από μηχανές παρείχαν υψηλότερες ειδικές ενέργειες εξαιτίας καλύτερης διείσδυσης της ρητίνης.

3.4.4 Υποβάθμιση περιβάλλοντος

Το περιβάλλον κάτω από το καπό του αυτοκινήτου είναι πολύ σκληρό για πολλά υλικά, ιδιαίτερα σε σχέση με τη θερμοκρασία. Οι υψηλές θερμοκρασίες επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά σύνθλιψης των συνθέτων, πρωταρχικώς μέσω αλλαγών στις ιδιότητες της ρητίνης. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.6, αυτές οι αλλαγές προκαλούν μειώσεις στην ειδική ενέργεια, οι οποίες γίνονται έκδηλες σε θερμοκρασίες πάνω από 150 – 200 °C για μήτρες εποξειδικής ρητίνης και 50 °C για πολυεστερικές μήτρες. Οι χαμηλές θερμοκρασίες δεν προκαλούν κάποια υποβάθμιση στις ιδιότητες και, στην πραγματικότητα, για σωλήνες γυαλιού / εποξειδικής ρητίνης διακρίθηκε μία σημαντική αύξηση στην απορρόφηση ενέργειας. Δεν υπάρχουν αποτελέσματα για συστήματα βινύλ-εστέρα ή SMC.

Η υποβάθμιση του περιβάλλοντος μπορεί να προέλθει και από την απορρόφηση νερού. Ο συνδυασμός υψηλής υγρασίας και υψηλής θερμοκρασίας μπορεί να είναι ιδιαίτερα επιβλαβής, με μείωση της αντοχής σε εφελκυσμό και της αντοχής σε κόπωση. Προς το παρόν, δεν υπάρχουν πληροφορίες στην επίδραση που έχουν τέτοια περιβάλλοντα στην απορρόφηση ενέργειας. Η δυναμική της υποβάθμισης περιβάλλοντος να προκαλέσει αποσύνδεση ίνας και ρητίνης, και κατά συνέπεια μείωση της ικανότητας απορρόφησης ενέργειας, πρέπει να εξεταστεί.

Όμοιες έρευνες πρέπει να εφαρμοστούν σε απλές συνδέσεις με κολλήσεις, οι οποίες μπορούν να παρέχουν μία ικανοποιητική τεχνική συναρμολόγησης για έναν αριθμό δομικών στοιχείων. Δοκιμές αντοχής έχουν δείξει ότι η ζωή των συγκολλημένων ατσάλινων στοιχείων μπορεί να υπερβεί σημαντικά τη ζωή μερών με σημειακή συγκόλληση (spot-welded). Ένα σημαντικό πρόβλημα θα μπορούσε να ανακύψει με την αντίσταση σε σύγκρουση τέτοιων συνδέσμων, αφού σε εργαστηριακές δυναμικές δοκιμές πειραματικοί συνδεδεμένοι σωλήνες έχουν δείξει μια τάση να σχίζονται το δεσμό, μειώνοντας πολύ την απορρόφηση ενέργειας. Το μηχανικό στερέωμα, επιπροσθέτως της κόλλησης, μπορεί να είναι μία λύση για την αποφυγή του διαχωρισμού των ξεχωριστών εξαρτημάτων των σωλήνων υπό συνθήκες κρούσης.



Σχήμα 3.6: Εξάρτηση της ειδικής ενέργειας από τη θερμοκρασία για σωλήνες FRP γυαλιού και γραφίτη

3.4.5 Συνδυασμένα αξονικά και καμπτικά φορτία

Το μπροστινό άκρο ενός αυτοκινήτου είναι ένα σύνθετο σύνολο από στοιχεία, τα οποία αλληλεπιδρούν κατά τη διάρκεια μιας σύγκρουσης. Μία απλή, ιδανική κατάρρευση των δομικών μερών δε θα συμβεί ακόμη και σε μία μετωπική σύγκρουση. Σε μία δοκιμή σύγκρουσης αυτοκινήτου (car crash test), η κατασκευή πρέπει να είναι ικανή να λειτουργεί αποτελεσματικά σε γωνιακές συγκρούσεις. Οι γωνιακές συγκρούσεις είναι γενικά λιγότερο απαιτητικές από άποψη κατασκευαστικών δυνατοτήτων σε μία σύγκρουση, επειδή το αυτοκίνητο τείνει να περιστραφεί μακριά από το σημείο της κρούσης και η ενέργεια διασκορπίζεται κατά την περιστροφή, μέσω της τριβής με το οδόστρωμα. Μία μη αξονική σύνθλιψη σημαίνει ότι τα στοιχεία της κατασκευής υπόκεινται σε συνδυασμένα αξονικά (axial) και καμπτικά (bending) φορτία. Προκαταρκτικές μη αξονικές δοκιμές σε γωνίες μέχρι 15° σε σωληνοειδή στοιχεία δεν έδειξαν κάποια σημαντική μείωση στην ειδική ενέργεια. Οι κωνικές διατομές παρέχουν μία γεωμετρία αυτόματης έναρξης της κατάρρευσης (self-triggering) η οποία είναι σταθερή για μη αξονική σύνθλιψη.

Η κατάρρευση κάμψης συχνά παρατηρείται, ιδιαίτερα σε τμήματα που δεν είναι ευθεία αρχικά, π.χ. σε τμήματα του σκελετού. Έχειδειχθεί ότι όταν τέτοια τμήματα φορτίζονται αξονικά, το αρχικό φορτίο κατάρρευσης για σύνθετα FRP είναι υψηλό και συγκρίσιμο με αυτό των μεταλλικών τμημάτων. Εντούτοις, τα επίπεδα του επακόλουθου φορτίου, και συνεπώς η απορρόφηση ενέργειας, είναι χαμηλά σαν αποτέλεσμα της θραύσης, η οποία συνέβη ιδιαίτερα στην πλευρά θλίψης των δοκών ενώ οι αντίστοιχες μεταλλικές κατασκευές υφίστανται λυγισμό. Σε άλλες έρευνες έχει βρεθεί ότι η φτωγή απόκριση δοκών Kevlar, λόγω κατάρρευσης με μορφή bending, προκαλείται λόγω διαστρωματικής αποκόλλησης στη θλιπτικά φορτισμένη επιφάνεια της δοκού. Αλλά με αλλαγή στη διαστρωμάτωση από $(\pm 22)_{2n}$ σε $(\pm 45)_{2n}$ και με

αύξηση της αντίστασης σε κάμψη με αύξηση του τοπικού πάχους, μπορούσε να επιτευχθεί απορρόφηση ενέργειας μεγαλύτερη από αυτή των αντίστοιχων χαλύβδινων δοκών.

Η κατάρρευση κάμψης είναι ιδιαίτερα σημαντική για τις πλευρικές δοκούς των θυρών και τα καμπυλωτά τμήματα του σώματος, τα οποία δρουν ως δοκοί κατά τη διάρκεια πλευρικής κρούσης. Ενώ η εφελκυστική επιφάνεια της δοκού μπορεί να διατηρήσει την ακεραιότητά της, η θραύση στην άλλη επιφάνεια προκαλεί μία σημαντική πτώση στην αντοχή σε κάμψη κι έτσι στην αντίσταση σε περεταίρω διείδυση.

3.4.6 Επιδιορθώσεις

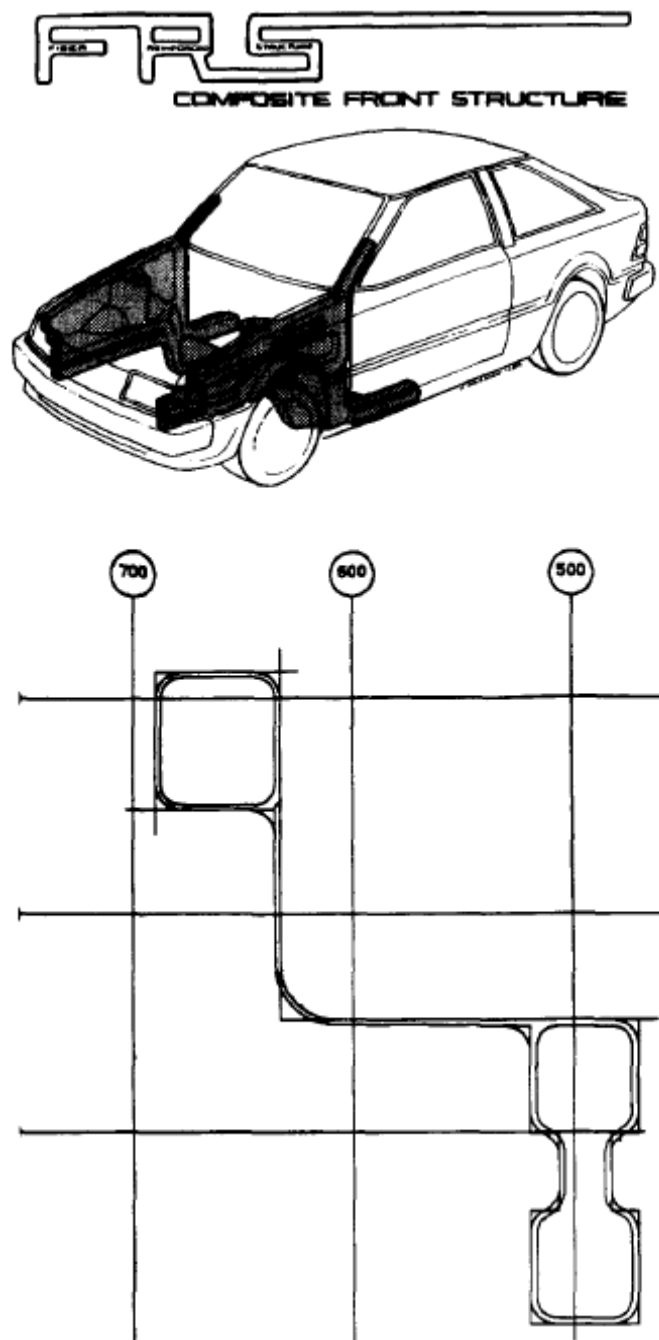
Παραδοσιακά, η επισκευή ενός χαλασμένου αυτοκινήτου είναι μια ειδική διαδικασία κατά την οποία τα πλήρως κατεστραμμένα μέρη αποκόπτονται και καινούργια μέρη συνδέονται είτε μέσω καρφώματος ή μέσω συγκόλλησης. Σχετικά πρόσφατα, ο χάλυβας χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα έχει αντικατασταθεί από χάλυβες HSLA διαφόρων τύπων. Ως αποτέλεσμα, η τοπική θέρμανση μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τις ιδιότητες των παρακείμενων δομών και έχουν εκδοθεί οδηγίες για να διασφαλιστεί ότι οι επισκευές του σώματος του οχήματος δεν έχουν δυσμενή επίδραση στην όλη κατασκευή.

Ενώ υπάρχουν διαδικασίες για την επισκευή των σύνθετων κατασκευών για στρατιωτικά οχήματα, λίγη εργασία έχει γίνει στην εκτίμηση της ζημιάς και της επακόλουθης επιδιόρθωσης. Έχει βρεθεί ότι η τάση για ζημιά λόγω σύγκρουσης ποικίλλει με διαφορετικά σύνθετα υλικά με ενίσχυση ινών γυαλιού και η έκταση της ορατούς ζημιάς δε συσχετίζεται απαραίτητα με αλλαγή στις ιδιότητες της κόπωσης. Μπορούν να γίνουν ικανοποιητικές επιδιορθώσεις, επανάγοντας τις ιδιότητες της κόπωσης στις αρχικές τους τιμές, εάν δοθεί προσοχή στη διασφάλιση της διείδυσης της ρητίνης διόρθωσης μέσα στη φθαρμένη ζώνη.

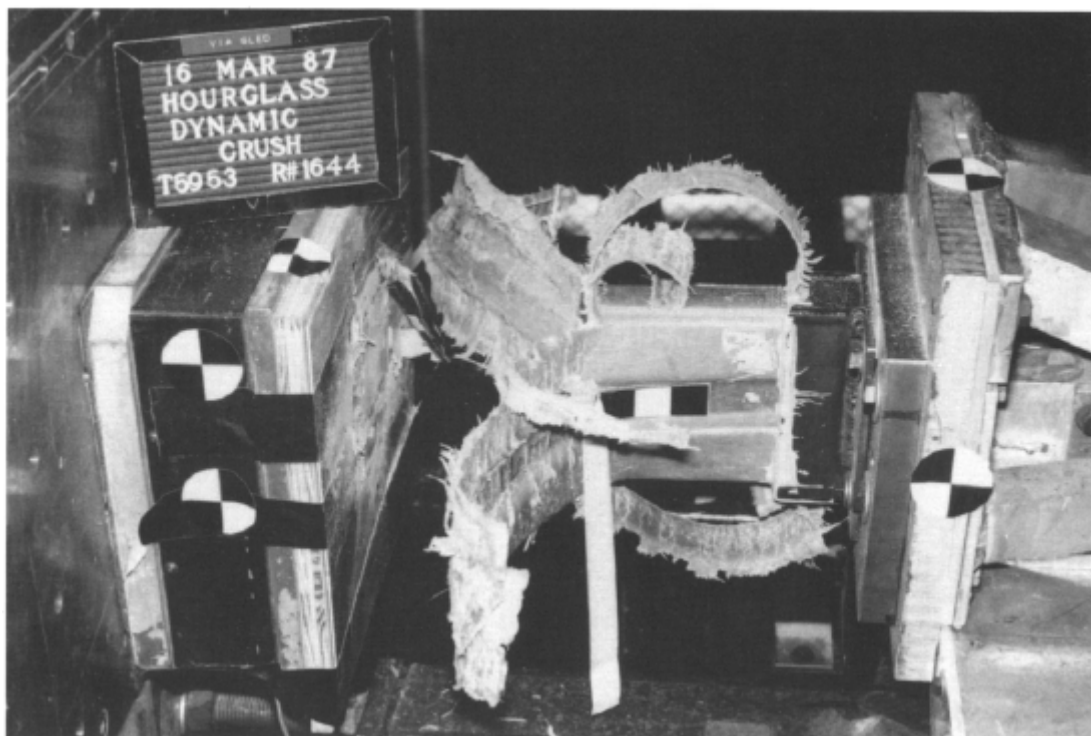
Δεν υπάρχουν δεδομένα για την επίδραση των επιδιορθώσεων σε κατασκευές FRP από κατασκευαστικής σκοπιάς, δηλαδή απορρόφηση ενέργειας, μολονότι τέτοιες επιδιορθώσεις εφαρμόζονται σε βάρκες με ίνες γυαλιού εδώ και πολλά χρόνια. Η επιδιόρθωση θα μπορούσε να αυξήσει την αντοχή σε σύνθλιψη της κατασκευής απορρόφησης ενέργειας κι έτσι να δημιουργήσει πρόβλημα υψηλότερης φόρτισης στο χώρο των επιβατών. Το ζήτημα τούτο είναι ιδιαίτερος έντονο, διότι η ενοποίηση μεγάλης κλίμακας στοιχείων μπορεί να προκαλέσει εκτενέστερη διάδοση της ζημιάς από αυτή που επέρχεται με συναρμολογημένα ατσάλινα στοιχεία, στα οποία η ασυνέχεια μεταξύ των μερών μπορεί να επιδράσει ως περιορισμός της διάδοσης της ζημιάς. Επιπροσθέτως, η αντικατάσταση σύνθετων στοιχείων σχεδόν συνεχώς γίνεται με σύνδεση μέσω κόλλησης στην παλιά κατασκευή και πρέπει να διασφαλίζεται η απόδοση σε κρούση του συνδέσμου. Συνεπώς, είναι απαραίτητο να αναπτυχθούν οδηγίες για την επιδιόρθωση των δομικών σύνθετων στοιχείων.

3.5 Εφαρμογές

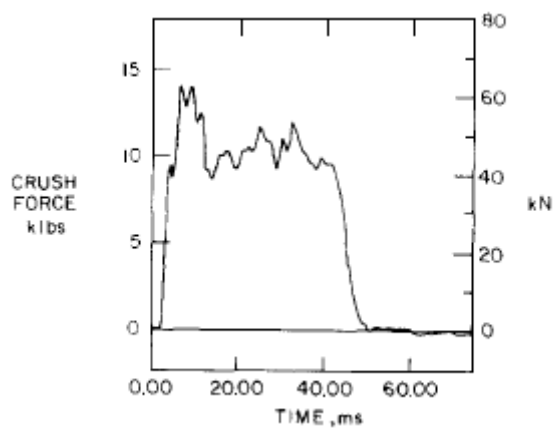
Η υψηλής ταχύτητας μορφοποίηση μεταφοράς ρητίνης αναπτύσσεται σαν μια πιθανή κατασκευαστική διαδικασία παραγωγής. Η συμπεριφορά σύνθλιψης σχεδιάσεων απορρόφησης ενέργειας παρασκευασμένες με RTM έχει ερευνηθεί με εργαστηριακά δείγματα, δομικά σύνολα και μια πλήρης δοκιμή πρωτότυπου Escort (Σχήμα 3.7 (α)). Η αντοχή σε σύνθλιψη και οι θέσεις των δρόμων φόρτισης του οχήματος καθορίζονται από τις απαιτήσεις επιβράδυνσης λόγω σύγκρουσης και την επιθυμητή κινηματική του οχήματος. Το σχήμα των δομικών στοιχείων και το πάχος των διαστρωματώσεων επιβάλλονται από τη γεωμετρία του συνόλου του οχήματος και από εμπειρικές μεθόδους, οι οποίες εκτιμούν την αντοχή σύνθλιψης. Η πραγματική απόκριση θλίψης και ο τρόπος κατάρρευσης καθορίζονται από οιονεί στατικές και δυναμικές εργαστηριακές δοκιμές. Μία τυπική διάταξη για την εκτίμηση ενός απλοποιημένου σωλήνα που αντιπροσωπεύει το κάτω κιγκλιδώμα της δομής που φαίνεται στο Σχήμα 3.7 (β) σε μία δοκιμή σύγκρουσης 35 mph (15,6 m/s) φαίνεται στην Εικόνα 3.2 (μια τέτοια μορφή απλοποιημένου σωλήνα θα εξεταστεί και στην παρούσα διπλωματική εργασία, τόσο στατικά όσο και δυναμικά). Το Σχήμα 3.8 δείχνει την ιστορία του φορτίου θλίψης της σύγκρουσης. Η μέση δύναμη θλίψης ανέρχεται σε 46,7 kN με μία μετατόπιση 33 cm, με σταθερή και προοδευτική συμπεριφορά σύνθλιψης. Η διάταξη δοκιμών για μία δοκιμή σύγκρουσης (crash test) 35 mph του μπροστινού μέρους της πλήρους σύνθετης κατασκευής που φαίνεται στο Σχήμα 3.7 προβάλλεται στην Εικόνα 3.3. Στην καμπύλη δυναμικής φόρτισης / μετατόπισης (Σχήμα 3.9), η αρχική σύνθλιψη είναι αυτή του κάτω κιγκλιδώματος, το οποίο θλίβεται για 10 cm με μία μέση δύναμη 44 kN. Αυτή ακολουθείται από τη σύνθλιψη και του ανώτερου και του κάτω κιγκλιδώματος με μία συνολική δύναμη 107 kN. Η συμπεριφορά κατάρρευσης ολόκληρης της συναρμολογημένης κατασκευής ήταν επίσης σταθερή και προοδευτική, με μία ειδική απορρόφηση ενέργειας 24 kJ/kg. Έχουν επίσης διεξαχθεί δοκιμές συγκρούσεων με πλήρεις κατασκευές οχημάτων. Μολονότι έχει επιδειχθεί σημαντική απορρόφηση ενέργειας από αυτές τις σύνθετες κατασκευές, είναι απαραίτητη η περαιτέρω ανάπτυξη προκειμένου να εμφανιστούν οι επιθυμητοί τρόποι κατάρρευσης και κατανομές φορτίου σε πραγματικές συνθήκες σύγκρουσης.



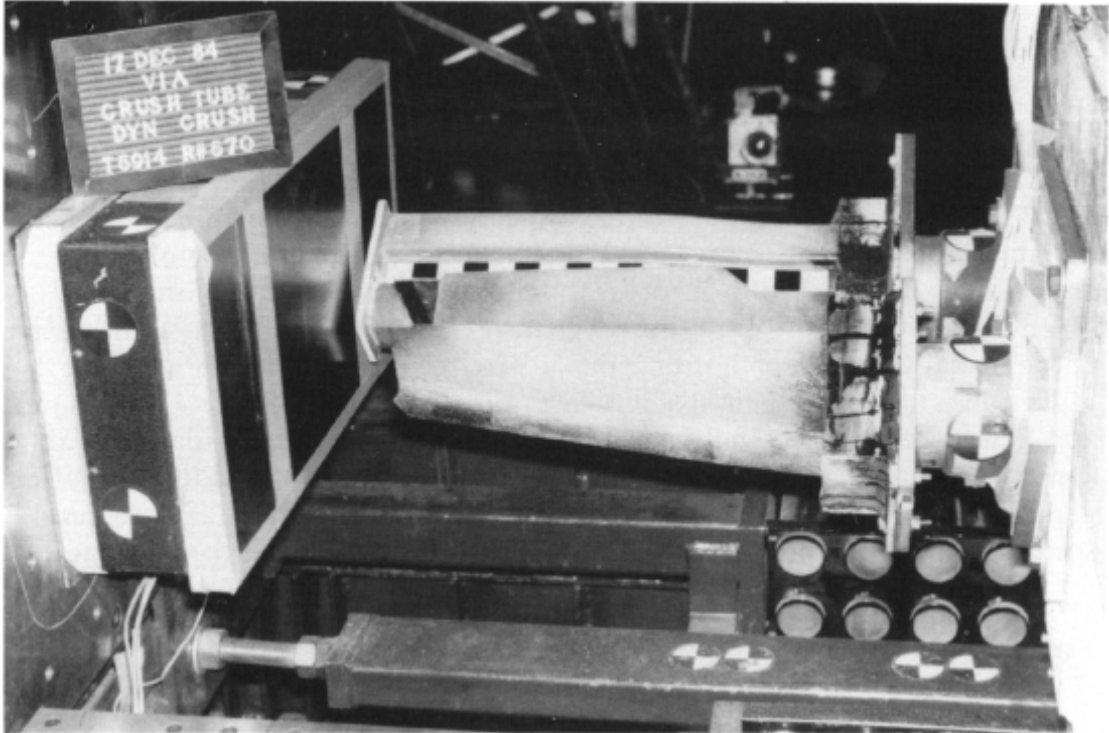
Σχήμα 3.7: (α) Σύνθετη κατασκευή του μπροστινού άκρου του αυτοκινήτου (β) Τομή της κατασκευής του μπροστινού άκρου



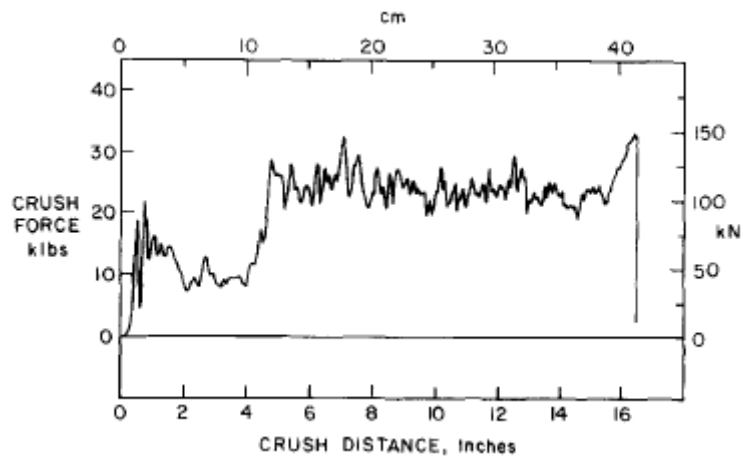
Εικόνα 3.2: Μία δυναμική σύνθλιψη 35 mph του τμήματος του κάτω κιγκλιδώματος



Σχήμα 3.8: Ιστορία του φορτίου θλίψης του κάτω κιγκλιδώματος



Εικόνα 3.3: Μία δυναμική σύνθλιψη 35 mρη σύνθετου απορροφητή ενέργειας της μετώπης (apron)



Σχήμα 3.9: Χαρακτηριστικά δύναμης / μετατόπισης για σύνθετο απορροφητή ενέργειας της μετώπης (apron)

ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΣΤΗΝ ΑΞΟΝΙΚΗ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗ ΛΕΠΤΟΤΟΙΧΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΣΩΛΗΝΩΝ

Διεξοδικές πειραματικές μελέτες σχετιζόμενες με την αξονική κατάρρευση λεπτότοιχων σύνθετων κελυφών, ποικίλων γεωμετριών και υλικών, υπό διάφορες συνθήκες φόρτισης, έχουν καταδείξει την υψηλή ικανότητα απορρόφησης ενέργειας των υλικών αυτών. Παλαιότερες έρευνες που αναφέρονται στην αξονική συμπίεση λεπτότοιχων σύνθετων κατασκευών, σε μορφή κυλινδρικών ή πρισματικών σωλήνων, υπέδειξαν ότι αυτά τα σύνθετα κελύφη παραμορφώνονται με έναν τρόπο διαφορετικό από αυτόν όμοιων δομικών μερών από συμβατικά υλικά, δηλαδή μέταλλα ή πολυμερή. Ο κυρίαρχος μηχανισμός δεν είναι η πλαστική παραμόρφωση, αλλά η ανάπτυξη εκτεταμένης μικρορωγμάτωσης (microcracking), η οποία μπορεί εύκολα να ελεγχθεί μέσω των ιδιοτήτων των ινών και ρητινών, όπως επίσης του προσανατολισμού των ινών.

Κατ' επέκταση, ο τρόπος αστοχίας λεπτότοιχων σύνθετων σωλήνων σε αξονική κατάρρευση εξαρτάται από ένα μεγάλο αριθμό παραμέτρων σχετικών με το υλικό, τη δομή και τις συνθήκες δοκιμών των σωλήνων αυτών. Τέτοιες παράμετροι είναι η διάταξη των ινών, οι ιδιότητες των υλικών συστατικών (μήτρας και ινών), η γεωμετρία και οι διαστάσεις των σωλήνων, ο ρυθμός παραμόρφωσης κλπ. Από την ευρύτερη πειραματική εμπειρία σε αξονοσυμμετρικούς σωλήνες από πολυμερή ενισχυμένα με ίνες (FRP), παρατηρήθηκαν οι ακόλουθοι τρόποι κατάρρευσης κατά τη διάρκεια αξονικής συμπίεσης:

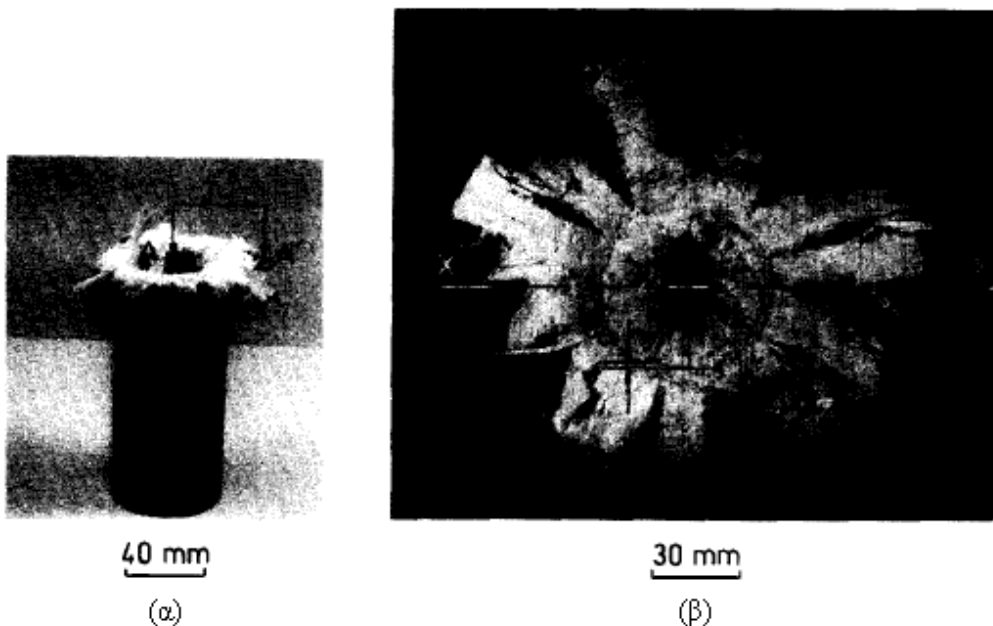
1. Προοδευτική σύνθλιψη με μικρορωγμάτωση του σύνθετου υλικού, σχετιζόμενη με μεγάλα ποσά ενέργειας θλίψης (Τρόπος κατάρρευσης I (Mode I))
2. Ψαθυρή θραύση του στοιχείου, με αποτέλεσμα την καταστροφική αστοχία με μικρή απορρόφηση ενέργειας (Τρόπος κατάρρευσης II (Mode II))
3. Προοδευτική πτύχωση όμοια με τη συμπεριφορά σε θλίψη των λεπτότοιχων μεταλλικών και πλαστικών σωλήνων, με εκδήλωση μέτριας ικανότητας απορρόφησης ενέργειας (Τρόπος κατάρρευσης III (Mode III))

Κατά συνέπεια, το πειραματικό ενδιαφέρον επικεντρώθηκε στον τρόπο κατάρρευσης I, ο οποίος συνιστά τον πιο αποδοτικό τρόπο απορρόφησης ενέργειας. Η προσοχή εστιάστηκε στην εξερεύνηση των μηχανισμών σύνθλιψης και την επίδραση που έχουν στην απορροφούμενη ενέργεια κατά τη διάρκεια της όλης διεργασίας, παρέχοντας έτσι μία καλύτερη εικόνα της μηχανικής απόκρισης του σωλήνα.

Ο τρόπος κατάρρευσης I σχετίζεται με την προοδευτική κατάρρευση του κελύφους και το σχηματισμό συνεχών μετώπων, τα οποία διαδίδονται ακτινικά προς τα έξω και

προς τα μέσα υπό τη μορφή μανιταριού, εξού και η συγκεκριμένη κατάρρευση ονομάζεται αστοχία τύπου "μανιταριού" (Εικόνα 4.1).

Η αστοχία τύπου "μανιταριού" συχνά αναφέρεται και ως τρόπος κατάρρευσης Ια, διότι έχουν παρατηρηθεί άλλες δύο μορφές αστοχίας που υπάγονται στον τρόπο κατάρρευσης Ι. Ο τρόπος κατάρρευσης Ιβ (Mode Ib) χαρακτηρίζεται από τη στροφή του τοιχώματος του κελύφους προς τα μέσα και σχετίζεται με την αξονική φόρτιση κωνικών (ή και τετραγωνικής διατομής) δοκιμίων μεγάλης ημι-γωνίας. Ο τρόπος κατάρρευσης Ιγ (Mode Ic) χαρακτηρίζεται από τη στροφή του τοιχώματος προς τα έξω και παρατηρείται κατά τη διάρκεια αξονικής κατάρρευσης κωνικών δοκιμίων με μικρή ημι-γωνία (π.χ. 15°).

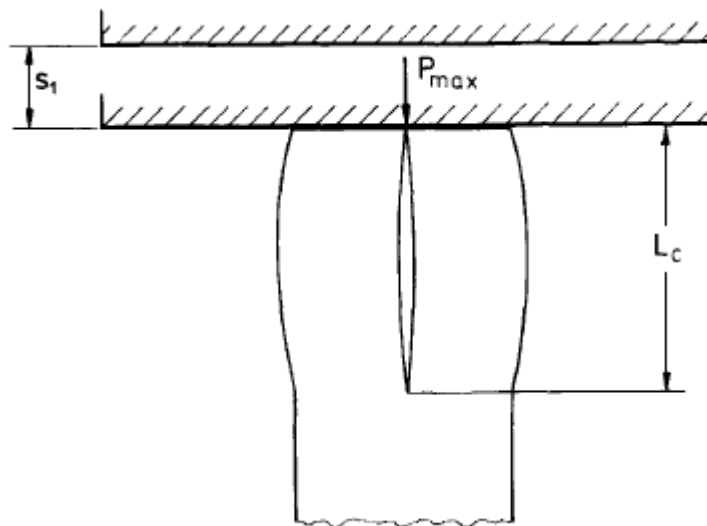


Εικόνα 4.1: Αστοχία τύπου μανιταριού σε δοκίμιο συνθέτου (FRP): (α) Γενική άποψη (β) Κάτοψη

Στην αστοχία τύπου "μανιταριού", καθώς η διαδικασία της παραμόρφωσης προχωράει, τα εξωτερικά διαμορφούμενα μέτωπα κάμπτονται προς τα κάτω με την ταυτόχρονη ανάπτυξη ενός αριθμού αξονικών ρωγμών (axial splits), λόγω της αναπτυσσόμενης τάσης στην περιφερειακή κατεύθυνση του κελύφους, ακολουθούμενη από διεύρυνση των λωρίδων του υλικού (Εικόνα 4.1 (β)). Οι λωρίδες αυτές εξαρτώνται κυρίως από το υλικό του κελύφους και τις συνθήκες διαστρωμάτωσης. Το μήκος των ρωγμών πιθανώς εκπορεύεται από το ενεργό μήκος των λωρίδων του υλικού που υφίστανται φόρτιση.

Τυπικές καμπύλες φορτίου – μετατόπισης, δηλαδή η μεταβολή του φορτίου θλίψης, P , με τη βράχυνση του κελύφους, για τον τρόπο κατάρρευσης Ι φαίνονται στο Σχήμα 4.4. Αρχικά, το κέλυφος συμπεριφέρεται ελαστικά και το φορτίο αυξάνεται με σταθερό ρυθμό μέχρι μία τιμή αιχμής, P_{max} , η οποία εξαρτάται από τη γεωμετρία του κελύφους και τα χαρακτηριστικά του υλικού, κι έπειτα μειώνεται απότομα. Σε αυτό το στάδιο, σχηματίζεται μία κεντρική εσωτερική ρωγμή μήκους L_C στο άκρο του κελύφους που είναι προσκείμενο στην περιοχή φόρτισης (Σχήμα 4.1). Σημειωτέον ότι

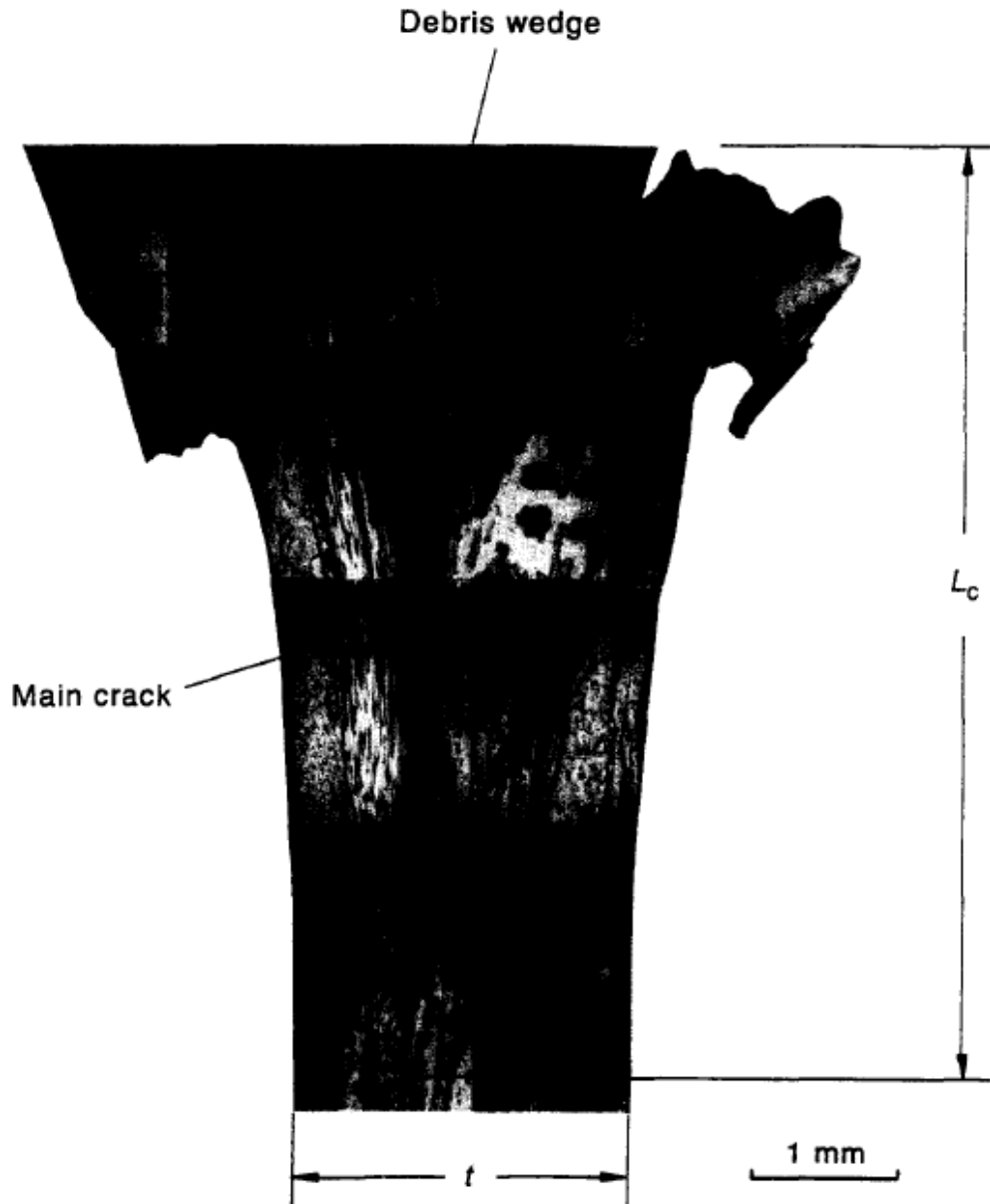
ο σχηματισμός πρόσθετων διαμηκών ενδοστρωματικών ρωγμών, και στις δύο πλευρές της κεντρικής ρωγμής, μπορεί να αποδοθεί στην κάμψη εξαιτίας της μη παραλληλότητας μεταξύ του σωλήνα και της πλάκας της πρέσας. Λόγω ελαστικής παραμόρφωσης του κελύφους, σχηματίζεται μία διόγκωση του άκρου που είναι προσκείμενο στην περιοχή φόρτισης.



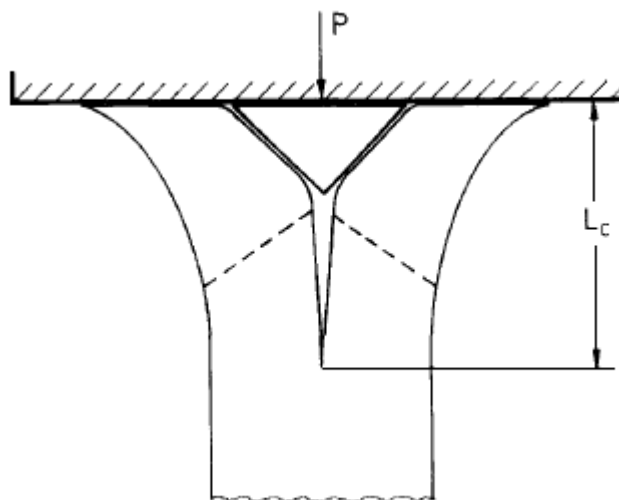
Σχήμα 4.1: Διάταξη της κεντρικής εσωτερικής ρωγμής

Στο στάδιο μετά την πρώτη αυτή ρωγή το φορτίο αυξάνεται πάλι με αυξανόμενη τη μετατόπιση και τότε αρχίζει να ταλαντώνεται γύρω από ένα μέσο φορτίο θλίψης, \bar{P} . Ο σχηματισμός της πρώτης κορυφής και πτώσης του φορτίου (Σχήμα 4.4) μπορεί να σχετίζεται με το σχηματισμό δύο όμοιων δεσμών από στρώσεις οι οποίες έχουν καμφθεί προς τα μέσα και προς τα έξω, λόγω φθοράς κάμψης η οποία λαμβάνει χώρα μετά την απότομη πτώση του φορτίου σε μία απόσταση από την επιφάνεια επαφής ίση προς το πάχος του τοιχώματος.

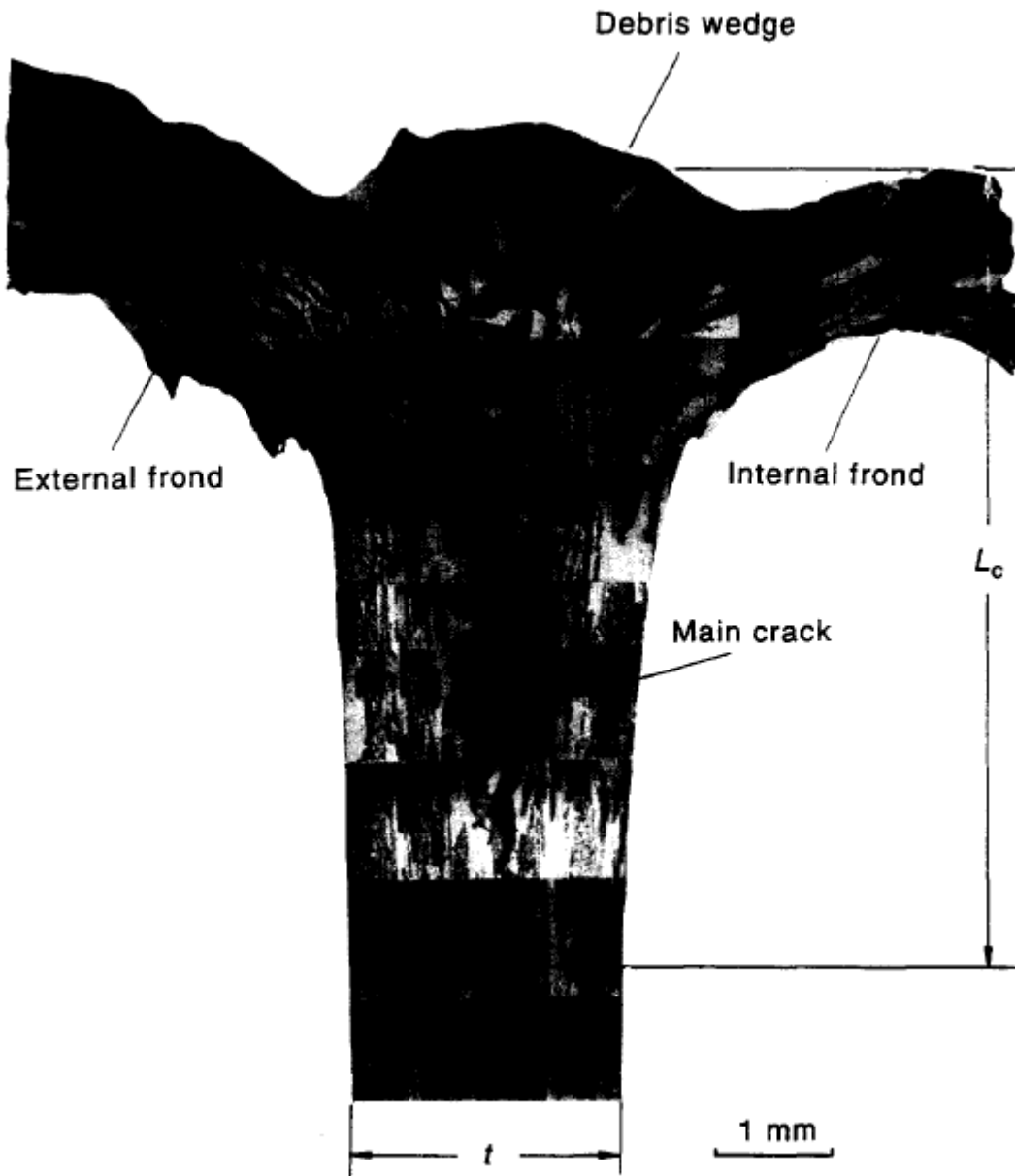
Σε αυτό το στάδιο, εκκινεί ο σχηματισμός μιας τριγωνικής σφήνας θραυσμάτων (debris wedge), η οποία αποτελείται από κονιορτοποιημένο υλικό. Ο σχηματισμός της μπορεί να αποδοθεί στην τριβή μεταξύ των καμπτόμενων δεσμών και της πλάκας της πρέσας. Στην Εικόνα 4.2 και το Σχήμα 4.2 φαίνεται ο σχηματισμός της σφήνας αυτής. Σημειωτέον ότι η σφήνα ολοκληρώνεται όταν το φορτίο θλίψης αρχίζει να ταλαντώνεται και ακολούθως το μέγεθός της παραμένει σταθερό σε όλη την υπόλοιπη διαδικασία παραμόρφωσης. Η ολοκληρωμένη πλέον σφήνα θραυσμάτων (debris wedge) παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.3 και το Σχήμα 4.3.



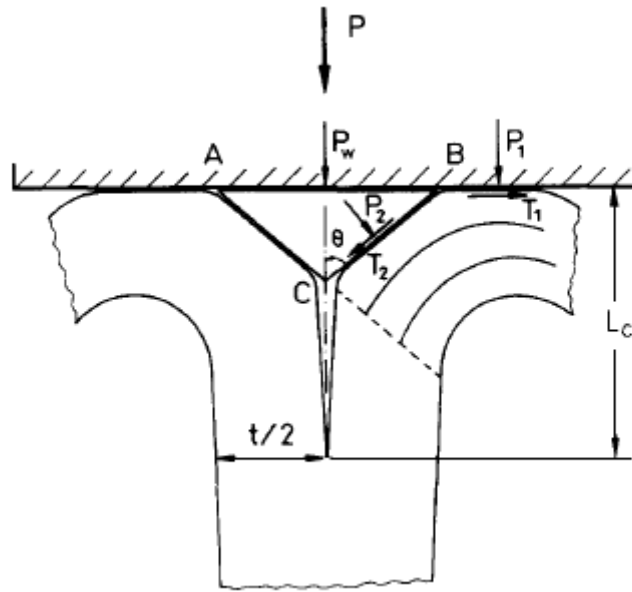
Εικόνα 4.2: Μικρογραφική απεικόνιση που καταδεικνύει μικροαστοχίες της ζώνης θλίψης που αντιστοιχεί στο σημείο 2 της καμπύλης φορτίου – μετατόπισης του Σχήματος 4.4. Εδώ φαίνεται και η μορφοποίηση της σφήνας κονιοποιημένου υλικού (debris wedge).



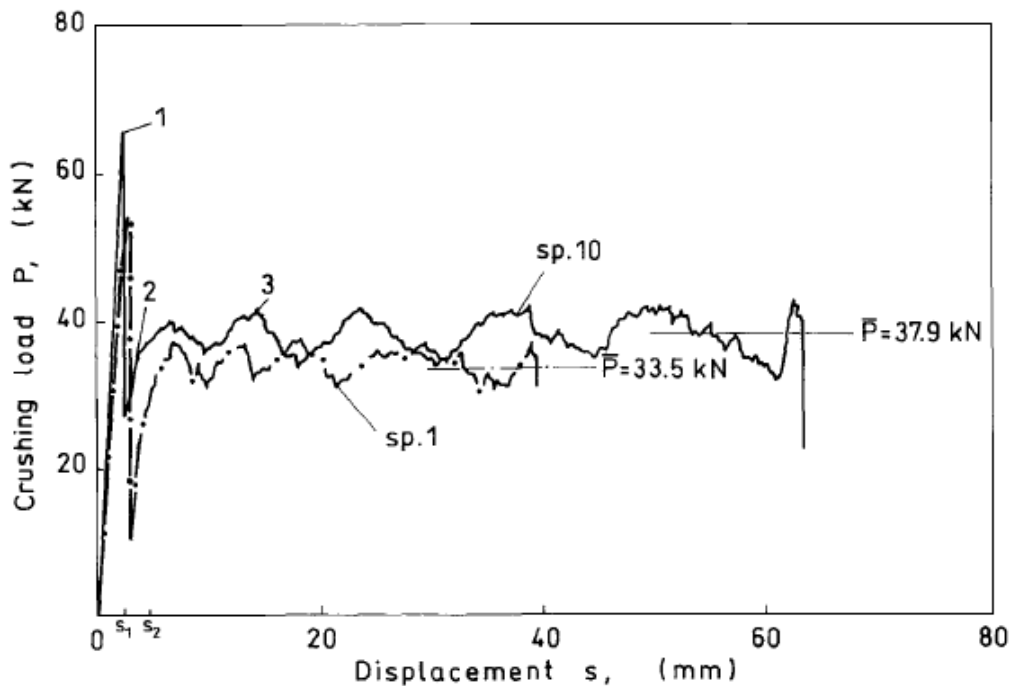
Σχήμα 4.2: Διάταξη του μηχανισμού εσωτερικής θραύσης στη ζώνη θλίψης της Εικόνας 4.2



Εικόνα 4.3: Μικρογραφική απεικόνιση που καταδεικνύει μικροαστοχίες της ζώνης θλίψης που αντιστοιχεί στο σημείο 3 της καμπύλης φορτίου – μετατόπισης του Σχήματος 4.4.



Σχήμα 4.3: Διάταξη του μηχανισμού εσωτερικής θραύσης στη ζώνη θλίψης της Εικόνας 4.3



Σχήμα 4.4: Τυπικές καμπύλες φορτίου – μετατόπισης για σύνθετα κελύφη

Η συμπεριφορά των ενισχυτικών ινών εξαρτάται από τον προσανατολισμό τους. Οι ίνες που είναι ευθυγραμμισμένες με τον άξονα του κελύφους κάμπτονται προς τα μέσα ή προς τα έξω με ή χωρίς θραύση ανάλογα με την ελαστικότητά τους και τους περιορισμούς που εισάγονται από άλλες ίνες. Η αποτελεσματική ελαστικότητά τους εξαρτάται από τη δομή των ινών μέσα στο σύνθετο. Οι ίνες που είναι ευθυγραμμισμένες με την εγκάρσια διεύθυνση μπορούν να επεκταθούν προς τα έξω μέσω θραύσης και προς τα μέσα είτε μέσω θραύσης ή μέσω λυγισμού.

Η διαστρωματική αποκόλληση συμβαίνει ως αποτέλεσμα διάτμησης και εφελκυσμού μεταξύ των στρώσεων. Οι αξονικές στρώσεις διαχωρίζονται διαδοχικά σε λεπτότερα στρώματα, σχηματίζοντας έτσι διαστρωματικές ρωγμές κάθετες προς τη διεύθυνση των ινών, κυρίως λόγω λυγισμού των ινών, ο οποίος καταλήγει εν τέλει είτε σε θραύση των ινών ή σε διαστρωματική διάτμηση που χωρίζει τη διαστρωμάτωση σε πολλές λεπτές στρώσεις χωρίς θραύση των ινών. Οι ρωγμές διαδίδονται κατά προτίμηση μέσω των πλέον αδύναμων περιοχών της δομής του σύνθετου υλικού, δηλαδή περιοχές πλούσιες σε ρητίνη ή όρια μεταξύ των εγκάρσιων ινών με αποτέλεσμα τη διάλυση του δεσμού ίνας και ρητίνης, ή στη διεπιφάνεια εγκάρσιων και αξονικών ινών προκαλώντας διαστρωματική αποκόλληση.

Παρακάτω αναφέρονται οι κυριότερες πηγές διάχυσης ενέργειας σε μικροσκοπική κλίμακα, οι οποίες συνεισφέρουν στη συνολική απορρόφηση ενέργειας:

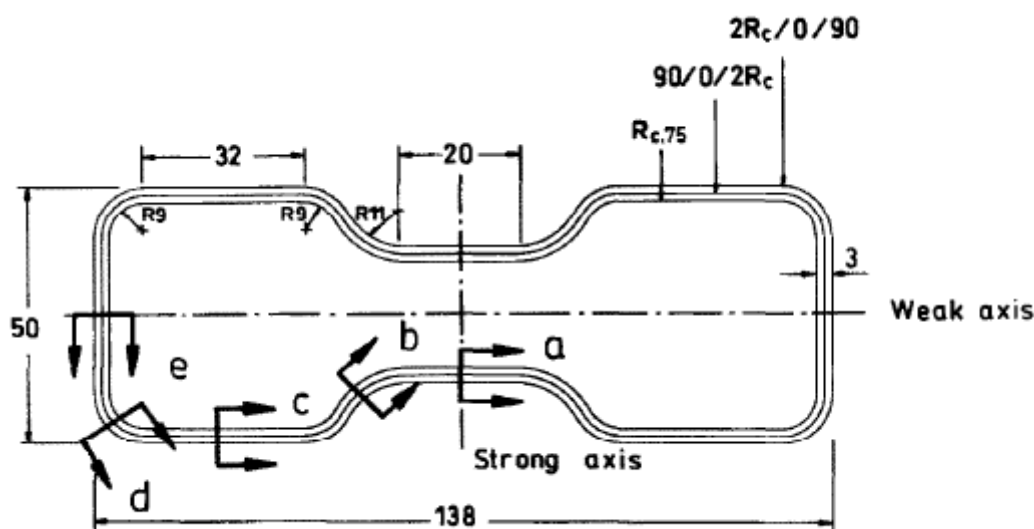
- Εσωτερική διάδοση ρωγμών
- Κάμψη μετώπων λόγω διαστρωματικής αποκόλλησης
- Αξονικός διαχωρισμός μεταξύ των μετώπων
- Καμπτική φθορά ξεχωριστών στρώσεων λόγω μικρής ακτίνας καμπυλότητας στα όρια της διαστρωματικής αποκόλλησης
- Αντίσταση μέσω τριβής στην αξονική ολίσθηση μεταξύ παρακείμενων στρώσεων
- Αντίσταση μέσω τριβής στη διείδυση της δακτυλιοειδούς σφήνας κονιοποιημένου υλικού (debris wedge)
- Αντίσταση μέσω τριβής στην ολίσθηση των μετώπων στην επιφάνεια της πλάκας της πρέσας.

ΚΕΛΥΦΗ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΤΥΠΟΥ ΚΛΕΨΥΔΡΑΣ

Τα δοκίμια τα οποία εξετάστηκαν στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν όλα διατομής τύπου κλεψύδρας (hourglass). Η διατομή αυτή εμφανίζεται να είναι αποδοτικότερη, όσον αφορά την απορρόφηση ενέργειας, από τα συμβατικά κυλινδρικά κελύφη. Για τους λόγους αυτούς κρίνεται απαραίτητο να περιγραφεί η δομή των κελυφών που εξετάστηκαν, αλλά και να παρατεθούν κάποια αποτελέσματα από παλαιότερες δημοσιεύσεις.

5.1 Γεωμετρία και δομή των κελυφών

Όπως ίσως γίνεται αντιληπτό, η διατομή "κλεψύδρα" πήρε την ονομασία της από τη μορφή της, η οποία ομοιάζει με τη συγκεκριμένη συσκευή μέτρησης χρόνου. Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε – στις δημοσιεύσεις αναφέρεται ως υλικό A (material A) – ήταν ένα σύνθετο εμπορικών ινών γυαλιού και βινυλεστέρα. Το τοίχωμα του σωλήνα συγκροτούταν από εννέα στρώσεις με ένα συνολικό πάχος 3,3 mm. Ξεκινώντας από το εξωτερικό του κελύφους, οι στρώσεις τοποθετήθηκαν με τη σειρά $[(90/0/2R_c)/(2R_c/0/90)/R_{c.75}]$, όπου η διεύθυνση των 0° συμπίπτει με τον άξονα του σωλήνα, η R_c αντιστοιχεί σε στρώσεις κομμένων ινών τυχαίας διεύθυνσης (random chopped strand mat) και η $R_{c.75}$ αναπαριστά μία όμοια στρώση, αλλά λεπτότερη. Η αναλυτική γεωμετρία φαίνεται στο Σχήμα 5.1. Ο συνδυασμός των παραπάνω στρώσεων δίνει ένα σύνθετο υλικό με κατ' όγκο περιεκτικότητα σε ίνες 33,9% και πυκνότητα $1,55 \text{ g/cm}^3$.



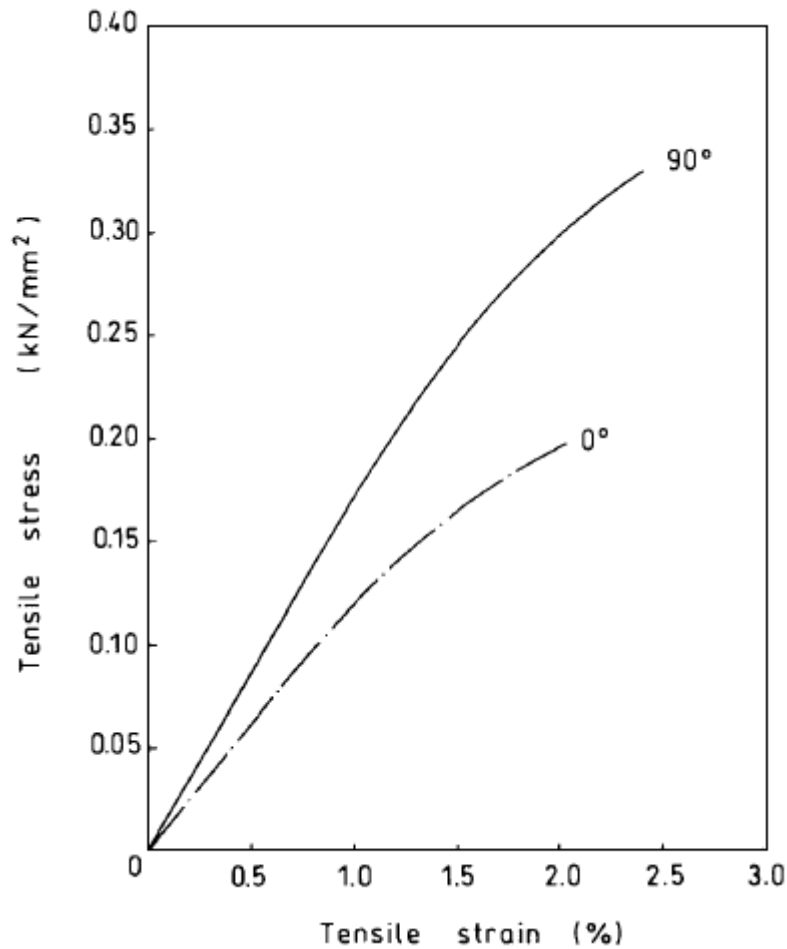
Σχήμα 5.1: Διατομή του σύνθετου κελύφους τύπου κλεψύδρας

Εκτός από το προαναφερθέν υλικό Α, σε παλαιότερα πειράματα έγιναν στατικές δοκιμές και με ένα άλλο υλικό – αναφερόμενο ως υλικό Β (material Β) – παρεμφερές με το υλικό Α. Το υλικό Β είχε τρεις παραπάνω στρώσεις και συνολικά από την εξωτερική προς την εσωτερική επιφάνεια οι στρώσεις ήταν τοποθετημένες με σειρά $[(90/0/2R_c)/(- + - 45)/(2R_c/0/90)/R_{c.75}]$, ενώ το συνολικό πάχος τοιχώματος ήταν 4,3 mm. Εδώ, πρέπει να σημειωθεί ότι, εξαιτίας της διαδικασίας κατασκευής, τα δοκίμια και των δύο υλικών ήταν ελαφρώς παχύτερα στα καμπυλωμένα τμήματά τους, βλ. περιοχή b στο Σχήμα 5.1, λόγω υπερβολικού ποσού ρητίνης. Παρά ταύτα, η απόκλιση του πάχους ήταν μικρή και, συνεπώς, στα παρακάτω θα θεωρηθεί ένα σταθερό πάχος σε όλη την περίμετρο των κελυφών. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, οι πειραματικές δοκιμές της παρούσας αναφέρονται μόνο στο υλικό Α. Περισσότερες λεπτομέρειες για τη σύνθεση του υλικού δίνονται στον Πίνακα 5.1.

Πίνακας 5.1: Ιδιότητες διαστρωμάτωσης, ινών και ρητίνης

Προσανατολισμός ινών διαστρωμάτωσης	$[(90/0/2R_c)/(2R_c/0/90)/R_{c.75}]$
Περιεκτικότητα σε γυαλί (κατ' όγκο %)	33,9
Πυκνότητα υλικού (kg/m^3)	1550
Υλικά ινών	
(90/0/ R_c)	Διαξονική ίνα γυαλιού με 502 g/m^2 , κομμένη ίνα γυαλιού συνενωμένη με νήμα πολυεστέρα
	Πάχος: 1,65 mm (ξηρή, ασυμπίεστη μορφή)
	Βάρος: $1,17 \text{ kg/m}^2$
$R_{c.75}$	Κομμένες ίνες τυχαίας διεύθυνσης (Random chopped strand mat)
	Πάχος: 0,41 mm (ξηρή, ασυμπίεστη μορφή)
	Βάρος: $0,25 \text{ kg/m}^2$
Τυποποίηση ρητίνης	
Dow Derakane 411 – C – 50 (βινυλεστέρας)	
MEKP	1,5 – 60 %
Conar (Κοβάλτιο)	0,3 – 6 %
DMA	0,2 %
Ιξώδες	100 cP
Συρρίκνωση	10 % του όγκου

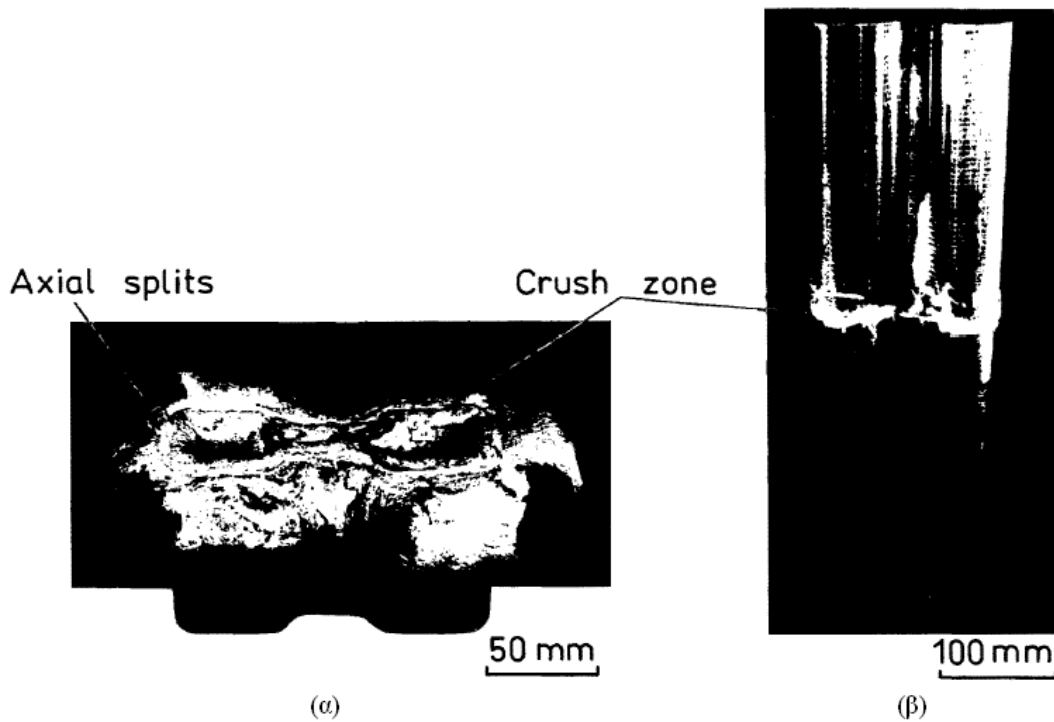
Στο Σχήμα 5.2 παρουσιάζονται καμπύλες τάσεων – παραμορφώσεων που ελήφθησαν από οιονεί στατικές δοκιμές εφελκυσμού στις διευθύνσεις των 0° και 90° .



Σχήμα 5.2: Καμπύλες τάσεων – παραμορφώσεων από στρώσεις συνθέτου

5.2 Μηχανισμός κατάρρευσης

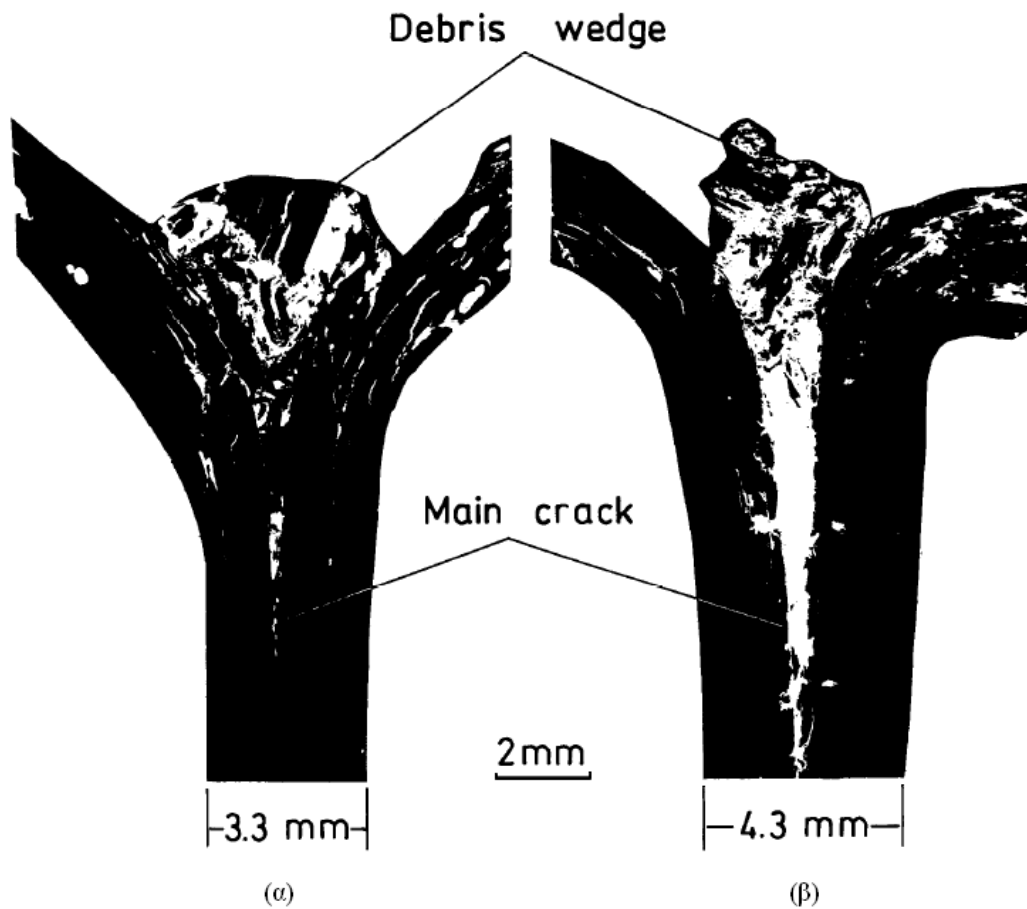
Δύο διακριτοί τρόποι κατάρρευσης έχουν παρατηρηθεί κατά τη διάρκεια στατικών και δυναμικών δοκιμών, για τα παραπάνω κελύφη. Τούτοι ταξινομούνται ως Τρόπος κατάρρευσης I και II, αντίστοιχα (βλ. Κεφάλαιο 4). Τα κοντά δοκίμια μέχρι ένα συγκεκριμένο μήκος ακολούθησαν τον Τρόπο I (προοδευτική κατάρρευση), ενώ τα σχετικά μακριά δοκίμια χαρακτηρίζονται από τον Τρόπο II (λυγισμός σωλήνα). Φωτογραφίες που δείχνουν τη χαρακτηριστική τελική εικόνα των παραμορφωμένων δοκιμίων κάθε περίπτωσης προβάλλονται στην Εικόνα 5.1.



Εικόνα 5.1: Μακροσκοπική όψη (α) του Τρόπου κατάρρευσης I (Mode I) και (β) του Τρόπου κατάρρευσης II (ModeII)

Ο Τρόπος κατάρρευσης I (Mode I) συνιστά αστοχία τύπου μανιταριού. Χαρακτηρίζεται από προοδευτική κατάρρευση μέσω σχηματισμού συνεχών μετώπων, τα οποία διαδίδονται εσωτερικά και εξωτερικά του κελύφους. Καθώς η διαδικασία της παραμόρφωσης προχωράει, τα εξωτερικά διαμορφούμενα μέτωπα κάμπτονται προς τα κάτω με την ταυτόχρονη ανάπτυξη ενός αριθμού αξονικών ρωγμών (axial splits) περιφερειακά του κελύφους και σε θέσεις όπου υπάρχει ευδιάκριτη αλλαγή στην καμπυλότητα λόγω συγκέντρωσης τάσεων, βλ. Εικόνα 5.1(α). Πρέπει να σημειωθεί ότι ο σχηματισμός αυτών των ρωγμών ήταν πιο σαφής επί των γωνιών του κελύφους. Αξονικά σχισίματα δεν ήταν φανερά στα εσωτερικά μέτωπα, τα οποία ήταν περισσότερο συνεχή από τα αντίστοιχα εξωτερικά.

Σχετικά μακριά δοκίμια επέδειξαν εκτεταμένη ψαθυρή θραύση, η οποία καλείται Τρόπος κατάρρευσης II (Mode II), βλ. Εικόνα 5.1(β). Η θραύση εκκίνησε σε μία απόσταση από το φορτιζόμενο άκρο των δοκιμίων περίπου ίση με το μισό ύψος του κελύφους και συνεπαγόταν καταστροφική αστοχία μέσω ρωγμάτωσης και διαχωρισμού του κελύφους σε ακανόνιστες μορφές, πιθανώς λόγω σφοδρών διατμητικών παραμορφώσεων του τοιχώματος του κελύφους. Αυτός ο τρόπος αστοχίας είναι όμοιος με το λυγισμό Euler πολύ λεπτών μεταλλικών και PVC σωλήνων, οι οποίοι υπόκεινται σε αξονική φόρτιση.



Εικόνα 5.2: Μικρογραφική απεικόνιση της ζώνης θλίψης στατικά φορισμένων κελυφών διατομής τύπου κλεψύδρας με πάχος τοιχώματος (α) 3,3 mm και (β) 4,3 mm

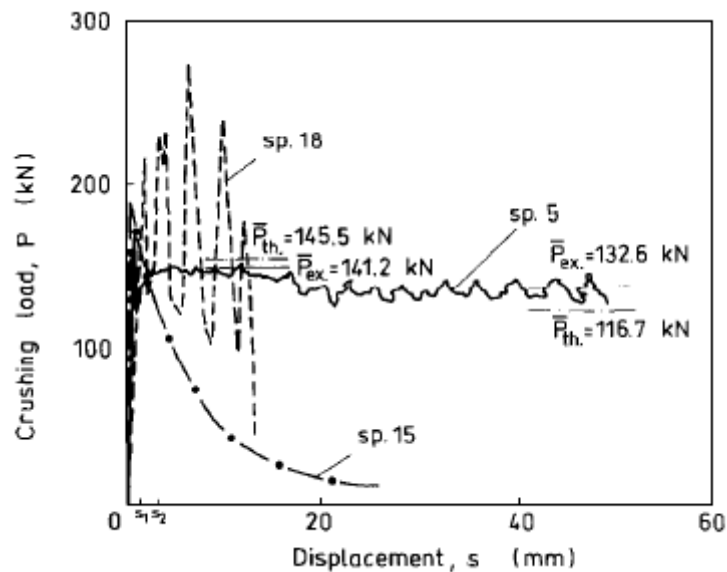
5.3 Χαρακτηριστικά απορρόφησης ενέργειας

Έχουν γίνει πειράματα στο παρελθόν σε σύνθετα δοκίμια διατομής τύπου κλεψύδρας (hourglass), με τη δομή που περιγράφηκε παραπάνω. Έτσι, έγιναν στατικές δοκιμές θλίψης με κελύφη υλικού A και B και δυναμικές δοκιμές θλίψης με κελύφη υλικού A. Βασική παράμετρος που εξετάστηκε, πέραν του υλικού (A ή B), ήταν το ύψος των δοκιμίων. Οι τιμές του μέγιστου φορτίου P_{max} και της απορροφημένης ενέργειας W από τα δοκίμια, η οποία εκτιμήθηκε από τη μέτρηση της επιφάνειας κάτω από την καμπύλη φορτίου – μετατόπισης, όπως επίσης το μέσο θλιπτικό φορτίο \bar{P} (οριζόμενο ως ο λόγος της απορροφημένης ενέργειας προς τη συνολική βράχυνση του κελύφους) και η ειδική ενέργεια W_s (ίση προς την απορροφημένη ενέργεια ανά μονάδα συντεθλιμμένης μάζας, υπολογιζόμενη από τον όγκο της θλίψης επί την πυκνότητα του υλικού) συνοψίζονται στον Πίνακα 5.2.

Πίνακας 5.2: Χαρακτηριστικά της σύνθλιψης

Sp. no.	Type of laying up	Axial length, L (mm)	Collapse mode	Crush length, s (mm)	Crushing load, P (kN)		Total energy absorbed, W (kJ)		Specific energy, W_s (kJ/kg)		
					Initial peak, P_{max}	Mean post-crushing, \bar{P}	Exper.	Theor.	Exper.	Theor.	
											Exper.
<i>(a) Static</i>											
1	A	25.4	I	17.8	196.5	115.3	116.7	2.046	2.077	54.1	54.9
2	B	25.4	I	18.0	250.6	132.6	141.9	2.386	2.554	47.8	51.2
3	A	50.8	I	32.5	183.7	119.5	116.7	3.882	3.783	56.1	54.9
4	B	50.8	I	34.3	221.5	124.5	141.9	4.262	4.857	44.9	51.2
5	A	76.2	I	48.5	173.5	132.6	116.7	6.431	5.660	62.2	54.9
6	B	76.2	I	50.0	195.6	141.0	141.9	7.052	7.095	50.8	51.2
7	A	101.6	I	65.0	191.4	118.7	116.7	7.715	7.586	55.8	54.9
8	B	101.6	I	65.0	288.9	120.6	141.9	7.838	9.224	43.5	51.2
9	A	152.4	I	64.5	195.4	117.7	116.7	7.592	7.527	55.2	54.9
10	B	152.4	I	65.0	249.9	144.0	141.9	9.357	9.224	51.9	51.2
11	A	203.2	I	64.3	193.2	129.0	116.7	8.289	7.504	60.6	54.9
12	B	203.2	I	65.3	212.9	140.5	141.9	9.166	9.226	50.6	51.2
13	A	304.8	I	64.2	188.1	109.6	116.7	7.030	7.492	51.4	54.9
14	B	304.8	II	63.8	232.9	—	—	2.345	—	—	—
15	A	508.0	II	24.3	183.2	—	—	0.963	—	—	—
16	B	508.0	II	62.5	239.9	—	—	6.633	—	—	—
<i>(b) Dynamic</i>											
17	A	50.8	I	11.0	251.6	153.6	145.5	1.690	1.600	69.7	66.2
18	A	76.2	I	12.9	212.8	141.2	145.5	1.822	1.877	66.3	66.2
19	A	101.6	I	11.3	281.0	151.7	145.5	1.714	1.644	68.4	66.2
20	A	152.4	II	25.9	255.2	—	—	1.724	—	—	—

Τυπικές καμπύλες φορτίου – μετατόπισης για κάθε τρόπο κατάρρευσης για στατική και δυναμική φόρτιση φαίνονται στο Σχήμα 5.3. Αρχικά, το κέλυφος συμπεριφέρεται ελαστικά και το φορτίο αυξάνεται με σταθερό ρυθμό μέχρι μία τιμή αιχμής, P_{max} , κι έπειτα πέφτει απότομα. Σε αυτό το στάδιο, και για τρόπο κατάρρευσης I, εμφανίζονται ρωγμές σε κάθε μία από τις τέσσερις γωνίες, συνοδευόμενες από το σχηματισμό μιας περιφερειακής, κεντρικής εσωτερικής ρωγμής, στο άκρο του κελύφους που είναι παρακείμενο στην περιοχή φόρτισης. Η περιοχή μετά από την εμφάνιση της πρώτης κεντρικής εσωτερικής ρωγμής χαρακτηρίζεται από ταλαντώσεις γύρω από ένα μέσο θλιπτικό φορτίο, \bar{P} . Οι καμπύλες φορτίου – μετατόπισης που ελήφθησαν με δυναμική καταπόνηση επιδεικνύουν περισσότερο οξείες διακυμάνσεις με κοιλάδες και κορυφές, οι οποίες οδηγούν σε υψηλότερη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας. Μία εποπτική σύγκριση μεταξύ των στατικών και δυναμικών αποτελεσμάτων μπορεί να γίνει μέσω του Πίνακα 5.2. Επίσης, είναι αξιοσημείωτο ότι η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας του τρόπου κατάρρευσης II είναι αρκετά μικρότερη από αυτήν του τρόπου I, εξαιτίας του λυγισμού του κελύφους και της σχετιζόμενης ψαθυρής θραύσης.



Σχήμα 5.3: Καμπύλες φορτίου – μετατόπισης για κελύφη διατομής τύπου κλεψύδρας που υπόκεινται σε στατική και δυναμική φόρτιση, για διάφορους τρόπους κατάρρευσης [— Τρόπος I, στατική (sp.5) | — · — · — Τρόπος II, στατική (sp.15) | ----- Τρόπος I, δυναμική (sp.18)]

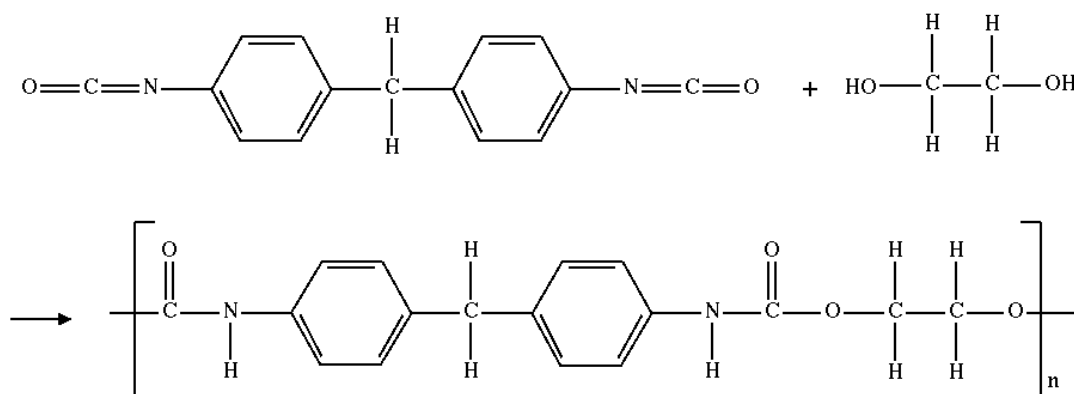
Παρατηρήθηκε ότι για λεπτότοιχα σύνθετα κελύφη που υπόκεινται σε αξονική φόρτιση η συμπεριφορά στη θραύση του κελύφους εμφανίζεται να επηρεάζει τη σταθερότητα φόρτισης, όπως επίσης το μέγεθος του φορτίου θλίψης και την απορρόφηση ενέργειας κατά τη διαδικασία σύνθλιψης. Μπορεί να υποθεθεί ότι οποιαδήποτε στιγμή το φορτίο θλίψης πρέπει να στηρίζεται από περισσότερα του ενός δομικά στοιχεία του κελύφους κι επιπροσθέτως, ένα συγκεκριμένο στοιχείο συνεισφέρει πολλά στη στήριξη του φορτίου. Όταν αυτό το δομικό στοιχείο αστοχεί, ένα επακόλουθο δομικό στοιχείο πρέπει τότε να αναλάβει το ρόλο του στη στήριξη του φορτίου, διαφορετικά η όλη κατασκευή θα αστοχήσει με έναν τρόπο καταστροφικό και μη ενδεικτικό για απορρόφηση ενέργειας. Τιοιουτοτρόπως, κατά τη σύνθλιψη, η στήριξη του αρχικού φορτίου περνάει από το ένα δομικό στοιχείο στο άλλο. Η συμπεριφορά αυτή αντικατοπτρίζεται στις καμπύλες φορτίου – μετατόπισης, όπου το φορτίο ταλαντώνεται ως αποτέλεσμα της φόρτισης και της ξαφνικής αποφόρτισης, λόγω της αστοχίας διαφορετικών στοιχείων που στηρίζουν το φορτίο σε διαφορετικές στιγμές, κατά τη διάρκεια της σύνθλιψης.

Έχει καταδειχθεί ότι για επίπεδα φορτιζόμενες επίπεδες πλάκες το περισσότερο φορτίο φέρεται από τα άκρα τις πλάκας, ενώ στην περίπτωση των τετραγωνικών σωλήνων φέρεται από τις γωνίες. Με όμοιο τρόπο, θα αναμενόταν οι παρούσες διατομές τύπου κλεψύδρας να στηρίζουν το περισσότερο φορτίο σε θέσεις περιμετρικά του κελύφους όπου υπάρχει σαφής αλλαγή στην καμπυλότητα. Επομένως, η στήριξη που προσφέρουν οι επιφάνειες των δοκιμίων εξαρτάται από την ακεραιότητα των γωνιών και των καμπυλωτών τμημάτων και συνακόλουθα θα καταρρεύσουν προτού η αντοχή του υλικού σε ευθεία διατομή προσεγγίσει μία κρίσιμη τάση θλίψης.

ΑΦΡΟΙ ΠΟΛΥΟΥΡΕΘΑΝΗΣ

6.1 Εισαγωγή

Πολυουρεθάνη (η συντομογραφία κατά IUPAC είναι PUR, αλλά συχνά συντέμνεται και ως PU) είναι οποιοδήποτε πολυμερές απαρτίζεται από μια αλυσίδα από οργανικές ομάδες οι οποίες συνενώνονται μέσω συνδέσμων ουρεθάνης (καρβαμικά / carbamates). Τα πολυμερή πολυουρεθάνης σχηματίζονται μέσω σταδιακού πολυμερισμού, με την αντίδραση ενός μονομερούς που περιέχει τουλάχιστον δύο ισοκυανικές λειτουργικές ομάδες με ένα άλλο μονομερές που περιέχει τουλάχιστον δύο ομάδες υδροξυλίου (αλκοόλες) παρουσία ενός καταλύτη.



Σχήμα 6.1: Παράδειγμα σύνθεσης πολυουρεθάνης

Οι πολυουρεθάνες χρησιμοποιούνται ευρέως σε υψηλής ελαστικότητας, εύκαμπτα αφρώδη καθίσματα, σε άκαμπτα αφρώδη μονωτικά πάνελ, σε μικροπορώδη αφρώδη παρεμβύσματα και φλάντζες, σε ανθεκτικούς ελαστομερείς τροχούς, σε δακτυλίους ανάρτησης αυτοκινήτων, σε υψηλής απόδοσης κόλλες, σε επιστρώσεις πατωμάτων, σε υποστρώματα ταπήτων και σε σκληρά πλαστικά μέρη (όπως αυτά των ηλεκτρονικών οργάνων).

Τα προϊόντα πολυουρεθάνης συχνά καλούνται "ουρεθάνες". Δε θα πρέπει, όμως, να συγχέονται με την ειδική ουσία ουρεθάνη. Οι πολυουρεθάνες δεν παράγονται από την ουρεθάνη.

6.2 Ιστορικά στοιχεία

Η πρωτοποριακή εργασία στα πολυμερή πολυουρεθάνης διεξήχθη από τον Otto Bayer και τους συνεργάτες του το 1937 στα εργαστήρια I. G. Farben στο Leverkusen της Γερμανίας. Αυτοί συνειδητοποίησαν ότι χρησιμοποιώντας την αρχή του

πολυμερισμού προσθήκης για να παράγουν πολυουρεθάνες από υγρά δισοκυανικά και υγρές διόλες πολυεθέρα ή πολυεστέρα φάνηκε να σηματοδοτούν ιδιαίτερες ευκαιρίες, ειδικά αν συγκριθούν με τα υπάρχοντα πλαστικά που κατασκευάζονταν με πολυμερισμό ολεφινών ή με πολυμερισμό συμπύκνωσης. Ο νέος συνδυασμός μονομερών υποσκέλιζε επίσης πατέντες που είχε εξασφαλίσει ο Wallace Carothers στους πολυεστέρες. Αρχικώς, η εργασία επικεντρώθηκε στην παραγωγή ινών και ελαστικών αφρών. Με την εξέλιξη να περιορίστηκε από τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο (τότε πολυουρεθάνες χρησιμοποιούνταν σε περιορισμένη κλίμακα σαν επίστρωση αεροσκαφών), τα πολυισοκυανικά έγιναν εμπορικά διαθέσιμα το 1952. Η εμπορική παραγωγή ελαστικού αφρού πολυουρεθάνης ξεκίνησε το 1954, βασισμένη στο δισοκυανικό τολουολίου (TDI) και σε πολυόλες πολυεστέρα. Η εφεύρεση αυτών των αφρών έγινε χάρη στην τυχαία εισαγωγή νερού στο μίγμα της αντίδρασης.

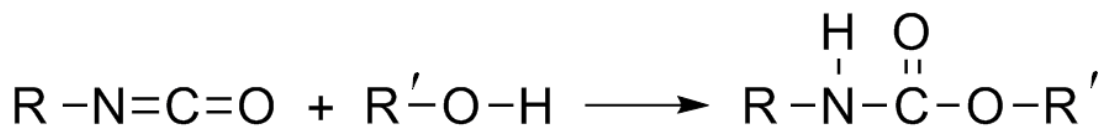
Το 1969, η Bayer εξέθεσε ένα εξ ολοκλήρου πλαστικό αυτοκίνητο στο Düsseldorf της Γερμανίας. Μέρη αυτού του αυτοκινήτου κατασκευάστηκαν με χρήση μιας νέας κατεργασίας που ονομάστηκε RIM (Reaction Injection Molding). Η τεχνολογία RIM χρησιμοποιεί πρόσκρουση υψηλής πίεσης των υγρών αντιδρώντων συστατικών, ακολουθούμενη από την ορμητική ροή του μίγματος της αντίδρασης σε μία κοιλότητα διαμόρφωσης. Μεγάλα μέρη, όπως το ταμπλώ και πάνελ του σώματος του αυτοκινήτου, μπορούν να διαμορφωθούν με αυτόν τον τρόπο. Η RIM πολυουρεθάνης αναπτύχθηκε σε έναν αριθμό διαφορετικών προϊόντων και διεργασιών. Η πρόσθεση υλικών πληρώσεως, όπως κονιορτοποιημένο γυαλί, μίκα και κατεργασμένες μεταλλικές ίνες δημιούργησαν την ενισχυμένη RIM (RRIM), η οποία παρείχε βελτιώσεις στο μέτρο ελαστικότητας, μείωση του συντελεστή θερμικής διαστολής και θερμική σταθερότητα. Αυτή η τεχνολογία επέτρεψε την παραγωγή του πρώτου αυτοκινήτου με πλαστικό σώμα στις Ηνωμένες Πολιτείες, την Pontiac Fiero, το 1983. Περεταίρω αύξηση στο μέτρο ελαστικότητας εξασφαλίστηκε με ενσωμάτωση γυαλιού τοποθετημένου από πριν στην κοιλότητα διαμόρφωσης, μία διαδικασία που είναι γνωστή στα συστήματα πολυουρεθάνης ως SRIM.

Ο αφρός πολυουρεθάνης (συμπεριλαμβανομένου και του λάστιχου από αφρό) συχνά παράγεται με πρόσθεση μικρών ποσών πτητικών υλικών στο μίγμα της αντίδρασης. Αυτά τα πτητικά χημικά προσδίδουν σημαντικά χαρακτηριστικά απόδοσης, πρωταρχικώς μείωση της πυκνότητας, προστασία / απορρόφηση ενέργειας και θερμική μόνωση. Στις αρχές της δεκαετίας του 1990, εξαιτίας της επίδρασης τους στη μείωση του όζοντος, το Πρωτόκολλο του Montreal οδήγησε σε μεγάλη μείωση της χρήσης πολλών πτητικών που περιείχαν χλώριο, όπως το τριχλωροφθορομεθάνιο (CFC – 11). Μέχρι τα τέλη της δεκαετίας του 1990, η χρήση πτητικών όπως το διοξείδιο του άνθρακα, το πεντάνιο, το 1,1,1,2 – τετραφθοροαιθάνιο (HFC – 134a) και το 1,1,1,3,3 – πενταφθοροπροπάνιο (HFC – 245fa) διαδόθηκαν περισσότερο σε Βόρειο Αμερική και Ευρωπαϊκή Ένωση, αν και πτητικά με βάση το χλώριο παρέμειναν σε χρήση σε πολλές αναπτυσσόμενες χώρες.

Η τάση για τις πολυόλες που προέρχονται από φυτικά έλαια να αντικαταστήσουν τις πετροχημικές πολυόλες ξεκίνησε να προσελκύει την προσοχή το 2004, εξαιτίας των αυξανόμενων κοστών των πετροχημικών αποθεμάτων, αλλά και μιας επαυξανόμενης επιθυμίας του κοινού για περιβαλλοντικά φιλικά "πράσινα" προϊόντα. Ένας από τους υποστηρικτές αυτών των πολυουρεθάνων από φυτικές πολυόλες είναι η εταιρεία Ford Motor Co.

6.3 Χημική θεμελίωση

Ένας δεσμός ουρεθάνης παράγεται μέσω της αντίδρασης μίας ισοκυανικής ομάδας, $-N=C=O$, με μία ομάδα υδροξυλίου (αλκοόλης), $-OH$. Οι πολυουρεθάνες παράγονται με την αντίδραση ενός πολυισοκυανικού με μία πολυαλκοόλη (πολυόλη) παρουσία ενός καταλύτη και άλλων προσθέτων. Σε αυτήν την περίπτωση, ένα πολυισοκυανικό είναι ένα μόριο με δύο ή παραπάνω ισοκυανικές λειτουργικές ομάδες, $R-(N=C=O)_{n \geq 2}$ και μία πολυόλη είναι ένα μόριο με δύο ή παραπάνω λειτουργικές ομάδες υδροξυλίου, $R'-(OH)_{n \geq 2}$. Το παράγωγο της αντίδρασης είναι ένα πολυμερές που περιέχει το δεσμό της ουρεθάνης, $-RNHCOOR'-$ (Σχήμα 6.2). Τα ισοκυανικά θα αντιδράσουν με οποιοδήποτε μόριο περιέχει ένα ενεργό υδρογόνο. Είναι σημαντικό ότι τα ισοκυανικά αντιδρούν με το νερό για να σχηματίσουν ένα δεσμό ουρίας και αέριο διοξείδιο του άνθρακα· επίσης αντιδρούν με πολυεθεραμίμες προς σχηματισμό πολουρίας.



Σχήμα 6.2: Γενικευμένη αντίδραση πολυουρεθάνης

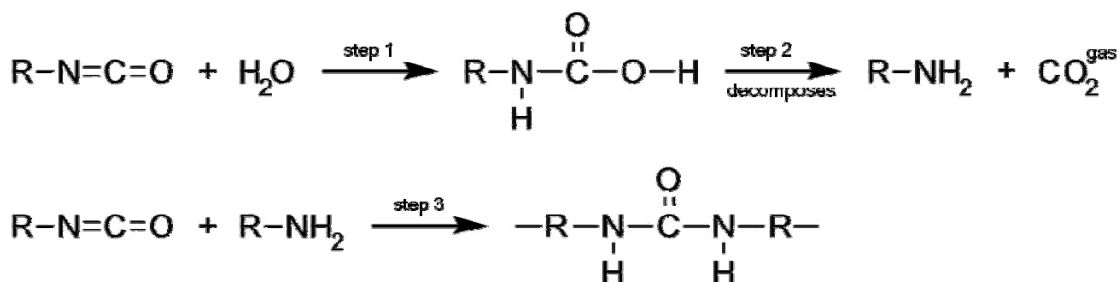
Εμπορικά, οι πολυουρεθάνες παράγονται με αντίδραση ενός υγρού ισοκυανικού με ένα υγρό μίγμα από πολυόλες, καταλύτη και άλλα πρόσθετα. Αυτά τα δύο συστατικά αναφέρονται ως ένα σύστημα πολυουρεθάνης ή απλώς ως ένα σύστημα. Το ισοκυανικό συνήθως αναφέρεται στη Βόρεια Αμερική ως η "πλευρά - Α" ή απλά ως "ισο". Το μίγμα των πολυολών και άλλων προσθέτων συνήθως αναφέρεται ως η "πλευρά - Β" ή απλά ως "πολυ". Αυτό το μίγμα μπορεί επίσης να δηλώνεται ως "ρητίνη" ή "μίγμα ρητίνης". Στην Ευρώπη, οι σημασίες για την "πλευρά - Α" και την "πλευρά - Β" είναι αντίστροφες. Τα πρόσθετα του μίγματος ρητίνης μπορεί να περιλαμβάνουν επεκτατικά αλυσίδας, ουσίες για τη σύνδεση μορίων, επιβραδυντές φλόγας, πτητικά, χρωστικές ουσίες και υλικό πληρώσεως.

Το πρώτο απαραίτητο συστατικό ενός πολυμερούς πολυουρεθάνης είναι το ισοκυανικό. Μόρια που περιέχουν δύο ισοκυανικές ομάδες ονομάζονται δισοκυανικά. Τα μόρια αυτά επίσης αναφέρονται ως μονομερή, διότι αυτά από μόνα τους χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ισοκυανικών πολυμερών που περιέχουν τρεις ή περισσότερες λειτουργικές ομάδες. Οι ισοκυανικές ομάδες μπορούν να ταξινομηθούν σε αρωματικές, όπως το δισοκυανικό τολουολίου (TDI), ή σε αλειφατικές, όπως το δισοκυανικό εξαμεθυλένιο (HDI). Ένα παράδειγμα ισοκυανικού πολυμερούς είναι το πολυμερές δισοκυανικό διφενυλμεθάνιο, το οποίο είναι ένα μίγμα μορίων με δύο, τρεις και τέσσερις, ή περισσότερες, ισοκυανικές ομάδες με μία μέση λειτουργικότητα 2,7. Σημαντικά χαρακτηριστικά των ισοκυανικών είναι η αλληλουχία των μορίων, το ποσοστό σε NCO, η λειτουργικότητα και το ιξώδες.

Το δεύτερο απαραίτητο συστατικό ενός πολυμερούς πολυουρεθάνης είναι η πολυόλη. Μόρια που περιέχουν δύο υδροξύλια ονομάζονται διόλες, αυτά με τρία υδροξύλια ονομάζονται τριόλες, κ.ο.κ.. Στην πράξη, οι πολυόλες διακρίνονται από κοντές αλυσίδες ή μικρού μοριακού βάρους επεκτατικά αλυσίδας και ουσίες για τη σύνδεση

μορίων από γλυκόλες, όπως η γλυκόλη αιθυλενίου (EG), η 1,4 – βουτανεδιόλη (BDO), η γλυκόλη διαιθυλενίου (DEG), η γλυκερίνη και το τριμεθυλοπροπάνιο (TMP). Οι πολυόλες είναι πολυμερή από μόνες τους. Σχηματίζονται με πολυμερισμό προσθήκης οξειδίου προπυλενίου (PO), οξειδίου αιθυλενίου (EO) σε ένα διεγέρτη υδροξυλίου ή αμίνης. Η επιλογή του διεγέρτη, του επεκτατικού και του μοριακού βάρους της πολυόλης επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τη φυσική της κατάσταση και τις φυσικές ιδιότητες του πολυμερούς πολυουρεθάνης. Σημαντικά χαρακτηριστικά των πολυόλων είναι η αλληλουχία των μορίων, ο διεγέρτης, το μοριακό βάρος, το ποσοστό των ομάδων υδροξυλίου, η λειτουργικότητα και το ιζώδες.

Μία από τις πιο επιθυμητές ιδιότητες των πολυουρεθάνων είναι η ικανότητά τους να μετατρέπονται σε αφρό. Πτητικά, όπως το νερό, κάποιοι αλογονάνθρακες όπως το HFC – 245fa (1,1,1,3,3 – πενταφθοροπροπάνιο) και το HFC – 134a (1,1,1,2 – τετραφθοροαιθάνιο) και υδρογονάνθρακες όπως το πεντάνιο, μπορούν να ενσωματωθούν στην πλευρά των πολυόλων ή να προστεθούν σαν μια βοηθητική ροή. Το νερό αντιδρά με το ισοκυανικό προς σχηματισμό αερίου διοξειδίου του άνθρακα, το οποίο γεμίζει και διογκώνει τα κελιά που έχουν δημιουργηθεί κατά τη διαδικασία ανάμιξης. Η αντίδραση είναι μία διαδικασία τριών βημάτων. Ένα μόριο νερού αντιδρά με μία ισοκυανική ομάδα για να σχηματίσει ένα καρβαμικό οξύ. Τα καρβαμικά οξέα είναι ασταθή και αποσυντίθενται δημιουργώντας διοξείδιο του άνθρακα και μία αμίνη. Η αμίνη αντιδρά με περισσότερο ισοκυανικό για να δώσει μία υποκαθιστάμενη ουρία. Το νερό έχει ένα πολύ χαμηλό μοριακό βάρος. Έτσι, ακόμα και εάν το κατά βάρος ποσοστό του νερού μπορεί να είναι μικρό, η μοριακή αναλογία του νερού ενδέχεται να είναι μεγάλη και να παραχθούν σημαντικά ποσά ουρίας. Η ουρία δεν είναι πολύ διαλυτή στο μίγμα της αντίδρασης και τείνει να σχηματίζει ξεχωριστές φάσεις αποτελούμενες ως επί το πλείστον από πολυουρία. Η συγκέντρωση και η οργάνωση αυτών των φάσεων πολυουρίας μπορεί να έχει σημαντική επίδραση στις ιδιότητες του αφρού πολυουρεθάνης. Οι αλογονάνθρακες και οι υδρογονάνθρακες επιλέγονται έτσι ώστε να έχουν σημείο βρασμού στην (ή κοντά στη) θερμοκρασία δωματίου. Αφού η αντίδραση πολυμερισμού είναι εξωθερμική, αυτά τα πτητικά ατμοποιούνται κατά τη διαδικασία της αντίδρασης. Έτσι, αυτά γεμίζουν και διογκώνουν την κυψελωτή πολυμερική μήτρα, δημιουργώντας έναν αφρό.



Σχήμα 6.3: Αντίδραση νερού και ισοκυανικού προς παραγωγή αερίου διοξειδίου του άνθρακα

Υπάρχουν δύο κύριες παραλλαγές αφρού. Στην πρώτη, τα περισσότερα κελιά του αφρού παραμένουν κλειστά και τα αέρια παραμένουν παγιδευμένα. Η δεύτερη αποτελείται από συστήματα, τα οποία έχουν κατά κύριο λόγο ανοιχτά κελιά, ως αποτέλεσμα ενός κρίσιμου σταδίου κατά τη διαδικασία ανάπτυξης του αφρού (εάν τα κελιά δε σχηματιστούν ή ανοίξουν πολύ νωρίς, δε θα σχηματιστεί ο αφρός). Τούτο είναι μία ζωτικής σημασίας εξέλιξη: εάν οι ελαστικοί αφροί έχουν κλειστά κελιά, η

απαλότητα τους τίθεται σε κίνδυνο. Συνεπώς, σε γενικές γραμμές, οι ελαστικοί αφροί απαιτούνται να έχουν ανοιχτά κελιά. Το αντίθετο ισχύει στην περίπτωση των περισσότερων άκαμπτων αφρών. Εδώ, είναι επιθυμητή η διατήρηση του αερίου στα κελιά, αφού το αέριο αυτό δίνει στους αφρούς το σημαντικό χαρακτηριστικό τους, υψηλή θερμική μόνωση. Μία τρίτη παραλλαγή αφρού, η οποία καλείται μικροπορώδης αφρός, αποφέρει τα ανθεκτικά ελαστομερή υλικά που τυπικά συναντώνται στις επικαλύψεις των τιμονιών και άλλων εσωτερικών εξαρτημάτων των αυτοκινήτων.

6.4 Εφαρμογές

Τα προϊόντα πολυουρεθάνης έχουν πολλές εφαρμογές. Πάνω από τα τρία τέταρτα της παγκόσμιας κατανάλωσης των προϊόντων αυτών είναι στη μορφή αφρών, με τους ελαστικούς και τους άκαμπτους τύπους να έχουν περίπου ίσα μερίδια στην αγορά. Και στις δύο περιπτώσεις ο αφρός βρίσκεται πίσω από άλλα υλικά. Για παράδειγμα, ελαστικοί αφροί βρίσκονται πίσω από υφάσματα ταπετσαρίας σε έπιπλα, ενώ άκαμπτοι αφροί βρίσκονται μέσα στα μεταλλικά και πλαστικά τοιχώματα των περισσότερων ψυγείων και καταψυκτών και πίσω από χάρτινες, μεταλλικές ή άλλες επιφάνειες στην περίπτωση των θερμομονωτικών πάνελ που χρησιμοποιούνται στον τομέα της οικοδομής. Οι πολυουρεθάνες χρησιμοποιούνται ευρέως και στην κατασκευή αυτοκινήτων, όπου προσφέρουν οφέλη από την άποψη της άνεσης, της προστασίας και της διατήρησης της ενέργειας.

Στην Εικόνα 6.1 προβάλλονται οι βασικοί τομείς χρήσης της πολυουρεθάνης. Σε αυτήν καταδεικνύεται πόσο πολύπλευρη είναι η χρησιμότητα του υλικού αυτού και πόσο βοηθάει στην προστασία του περιβάλλοντος μέσω της διατήρησης της ενέργειας που παρέχει.



Έπιπλα & Δάπεδα



Ψυγεία



Αυτοκίνητα



Μόνωση κτιρίων



Υπόδηση



Επιστρώματα & Κόλλες



Στεγανωτικά



Ελαστομερή

Εικόνα 6.1: Εφαρμογές πολυουρεθάνης

6.5 Ταυτοποίηση του αφρού πολυουρεθάνης

Προκειμένου να παραχθούν τα γεμάτα με αφρό δοκίμια, χρησιμοποιήθηκε διογκούμενος αφρός πολυουρεθάνης της εταιρείας Bayer. Οι εμπορικές ονομασίες των επιμέρους συστατικών του αφρού είναι για τη μεν πολυόλη BAYTHERM-BOF, ενώ για το ισοκυανικό άλας DESMODUR 44 V 20 L.

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου αφρού, καθώς και οι ιδιότητές του φαίνονται στους πίνακες που ακολουθούν.

Πίνακας 6.1

ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ		
ΑΝΑΛΟΓΙΑ ΠΡΟΣΜΙΞΗΣ	100:100	
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΑΚΑΤΕΡΓΑΣΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	24 ± 2 °C	
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΦΟΡΜΑΣ	40 ± 2 °C	
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΙ ΧΡΟΝΟΙ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ (22 °C)	Χρόνος κρεμοποίησης	43 ± 4"
	Χρόνος πήξεως	105 ± 5"
	Χρόνος πλήρους λειτουργικότητας	142 ± 10"
ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΕΛΕΥΘΕΡΗΣ ΕΚΤΟΝΩΣΗΣ	170 ± 10 kg/m ³	
ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΑΦΡΟΥ	400 ± 20 kg/m ³	
ΣΤΑΘΕΡΟΤΗΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ	Σε σκιερό δωμάτιο στους 20 ± 5 °C για τουλάχιστον 6 μήνες	
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ	Παραγωγή τεχνικών μερών και μερών απομίμησης ξύλου	

Πίνακας 6.2

ΦΥΣΙΚΕΣ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ		
ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΑΦΡΟΥ	DIN 53420	400 kg/m ³
ΣΥΡΡΙΚΝΩΣΗ	DIN 53464	0,5 %
ΑΝΤΟΧΗ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ ΣΕ 10 % ΣΥΜΠΙΕΣΗ	DIN 53421	1,5 MPa
ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ (24 °C)	DIN 18164	0,040 W/mK
ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ	DIN 53431	100×10 ⁻⁶ /K
ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΣΤΗ ΦΩΤΙΑ	DIN 4102	B3

6.6 Πλήρωση κελυφών με αφρό

Η διαδικασία παραγωγής του αφρού έλαβε χώρα στο Εργαστήριο Τεχνολογίας των Κατεργασιών του Ε.Μ.Π.. Πέραν των δοχείων που περιελάμβαναν τις απαιτούμενες ποσότητες πολυόλης και ισοκυανικού, κρίθηκε απαραίτητη η χρήση διάφορων εργαλείων, δοχείων κλπ.

Ο εξοπλισμός που συνολικά χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή των γεμάτων με αφρό δοκιμίων περιλαμβάνει τα εξής.

- Δοχείο πολυόλης
- Δοχείο ισοκυανικού
- Ζυγαριά ακριβείας 0,1 g
- Μονωτική ταινία
- Κοπίδι
- Πριόνι λεπίδας μήκους 15 cm
- Ελάσματα χαλύβδινα και φύλλα χαρτιού
- Πλαστικά ποτήρια γενικής χρήσης
- Προστατευτικές μάσκες



Εικόνα 6.2: Πολυόλη (αριστερά) και ισοκυανικό (δεξιά)



Εικόνα 6.3: Ζυγαριά ακριβείας



Εικόνα 6.4: Μονωτική ταινία, κοπίδι και πρίονι

Το πρώτο στάδιο της διαδικασίας ήταν ο υπολογισμός των ποσοτήτων πολυόλης και ισοκυανικού που χρειάζονταν για την πλήρωση κάθε ενός κελύφους (βλ. Παράρτημα). Η μάζα που απαιτούνταν και για τα δύο συστατικά ήταν 45 g.

Με γνωστές πλέον τις απαιτούμενες ποσότητες πολυόλης και ισοκυανικού, προχωρήσαμε σε μηδενισμό της ζυγαριάς με ένα προστατευτικό φύλλο χαρτιού και ένα πλαστικό ποτήρι (Εικόνα 6.5), ώστε η ένδειξη της ζυγαριάς να αναφέρεται μόνο στη μάζα του εκάστοτε συστατικού.



Εικόνα 6.5: Μηδενισμός ζυγαριάς

Τα κενά κελύφη καλύφθηκαν με μονωτική ταινία στη βάση τους, ώστε να αποφευχθεί η εκροή υλικού τόσο κατά την έγχυση του μίγματος, όσο και κατά τη διόγκωση του αφρού.

Στη συνέχεια, ζυγίστηκε η απαιτούμενη ποσότητα πολυόλης κι έπειτα σε ένα δεύτερο ποτήρι αυτή του ισοκυανικού άλατος. Ακολούθησε η ανάμιξη των δύο υλικών, η οποία πραγματοποιήθηκε με προσθήκη του ισοκυανικού, το οποίο παρουσίαζε μεγαλύτερη ρευστότητα, στην πολυόλη. Η ανάδευση του μίγματος ήταν το επόμενο στάδιο της διαδικασίας προκειμένου να ομογενοποιηθεί και να παραχθεί η πολυουρεθάνη· στάδιο που διήρκεσε μερικά μόλις δευτερόλεπτα.

Το μίγμα εγχέοταν στο κέλυφος άμεσα, καθώς ο σχηματισμός του αφρού ξεκινούσε σχεδόν ακαριαία. Το δοκίμιο καλυπτόταν με το έλασμα χάλυβα, όταν η διόγκωση του αφρού έφθανε να καλύψει σχεδόν το ύψος του, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η ποσότητα εγκλείστου αέρα. Τα ελάσματα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ιδανικά για

την κάλυψη του παραγόμενου αφρού, διότι διέθεταν πολύ μικρή τραχύτητα. Έτσι, η αφαίρεσή τους σε επόμενη φάση ήταν εύκολη.

Η συγκράτηση της συνεχόμενης διόγκωσης του αφρού έγινε με εφαρμογή μυϊκής δύναμης (μέσω των χεριών) στο έλασμα που μόλις είχε τοποθετηθεί. Επιλέχθηκε αυτός ο τρόπος συγκράτησης – και όχι η προσθήκη κάποιου βάρους – διότι εξασφάλιζε τη μικρότερη διαρροή υλικού. Η συγκράτηση των δοκιμίων τερμάτιζε μετά από δύο λεπτά, όταν και η πήξη του αφρού σταματούσε.

Μετά την παρέλευση ενός χρόνου ασφαλείας (ενδεικτικά 10 min), προκειμένου να έχουν σταθεροποιηθεί πλήρως όλες οι περιοχές του αφρού, απομακρύνονταν το έλασμα και η μονωτική ταινία από τις δύο ελεύθερες επιφάνειες των κελυφών. Με τη βοήθεια ενός πριονιού και του κοπιδιού αφαιρούταν το μέρος εκείνο του αφρού που ενδεχομένως προεξείχε πέραν του ύψους του κελύφους. Τα τελικά δοκίμια αποθηκεύτηκαν σε σκιερό μέρος μέχρι τη διεξαγωγή των πειραμάτων (Εικόνα 6.6).



Εικόνα 6.6: Τελικά δοκίμια με αφρό

ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ

7.1 Αντικείμενο των πειραμάτων

Οι δοκιμές, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Τεχνολογίας των Κατεργασιών του Ε.Μ.Π., έχουν ως σκοπό την κατανόηση των μηχανισμών κατάρρευσης, καθώς και τον υπολογισμό της απορροφούμενης ενέργειας των σύνθετων δοκιμών διατομής κλεψύδρας (hourglass) που περιγράφονται στο Κεφάλαιο 5. Βασική παράμετρος των πειραμάτων ήταν η πλήρωση ή μη των κελυφών με αφρό.

Εκτελέστηκαν τόσο στατικές (ή σωστότερα οιονεί στατικές), όσο και δυναμικές δοκιμές. Πιο συγκεκριμένα, η στατική αξονική καταπόνηση των κελυφών έγινε σε υδραυλική πρέσα διπλής ενέργειας SMG 100 τόνων, στην οποία χρησιμοποιείται πολύ χαμηλή ταχύτητα κίνησης εμβόλου για προσομοίωση στατικής καταπόνησης. Η δε δυναμική αξονική καταπόνηση των κελυφών έγινε σε σφύρα πίπτουσας μάζας, μέσω της οποίας μελετάται, εκτός των άλλων, η επίδραση της ταχύτητας παραμόρφωσης στο μηχανισμό κατάρρευσης. Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για τα δύο είδη δοκιμών περιγράφεται αναλυτικά στο Παράρτημα.

7.2 Προσδιορισμός των δοκιμίων

Τα προς εξέταση κελύφη προήλθαν από υπολείμματα (ρετάλια) σωλήνων που είχαν παρασκευαστεί για τη διενέργεια κάποιων παλαιότερων πειραμάτων. Μάλιστα, οι σωλήνες αυτοί είχαν κατασκευαστεί από τη Ford για λογαριασμό του Εργαστηρίου Τεχνολογίας των Κατεργασιών του Ε.Μ.Π.. Οι αρχικοί αυτοί σωλήνες κόπηκαν σε μικρότερα ίσα (κατά το δυνατόν) μεταξύ τους κελύφη, ώστε να αποτελέσουν τα αντικείμενα των τρεχόντων πειραμάτων. Το ύψος που επιλέχθηκε για τα κελύφη είναι τα 51 mm και αυτά κόπηκαν με τη βοήθεια μηχανήματος πριονοταινίας. Αξιοσημείωτο είναι ότι δεν ήταν εφικτό να έχουμε ακρίβεια σε επίπεδο μη κατά την κοπή των κελυφών, διότι η ακρίβεια του συγκεκριμένου μηχανήματος κοπής είναι το 1 mm.

Μετά την ολοκλήρωση της κοπής, τα μισά από τα παραχθέντα κελύφη προορίζονταν για τα πειράματα ως είχαν. Τα άλλα μισά χρειάστηκε να περάσουν και από τη διαδικασία της πλήρωσης με αφρό πολυουρεθάνης (βλ. εδάφιο 6.6), προκειμένου να εξεταστεί και η επίδραση του αφρού στα κελύφη. Η Εικόνα 7.1 αναπαριστά τα τελικά δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα.



Εικόνα 7.1: Τελικά δοκίμια

7.2.1 Ονοματολογία

Με σκοπό τον εύκολο και σαφή προσδιορισμό του καθενός κελύφους, δε χρησιμοποιήθηκε μία απλή αύξουσα αρίθμηση των κελυφών (#1, #2, #3 κ.ο.κ.). Αλλά, η ονομασία τους περιελάμβανε μια κωδικοποίηση αποτελούμενη από τρεις χαρακτήρες:

- Ο πρώτος αναφέρεται στο είδος της καταστροφικής καταπόνησης στην οποία επρόκειτο να υποβληθεί το σχετικό κέλυφος. Έτσι, με S συμβολίζεται η

στατική δοκιμή, η οποία γίνεται στην υδραυλική πρέσα, και με D συμβολίζεται η δυναμική δοκιμή, η οποία γίνεται μέσω της σφύρας.

- Ο δεύτερος δηλώνει εάν το κέλυφος είναι κενό ή γεμάτο με αφρό. Έτσι, το E συμβολίζει το κενό (empty) κέλυφος, ενώ το F συμβολίζει το γεμάτο με αφρό (foam) κέλυφος.
- Ο τρίτος είναι ένας αριθμός, όπου για τις μεν στατικές δοκιμές είναι 1 ή 2 για την πρώτη ή την επαναληπτική δοκιμή, αντίστοιχα. Ενώ για τις δυναμικές δοκιμές είναι 1, 2 ή 3 για το 1^ο, 2^ο ή 3^ο ύψος από το οποίο απελευθερώνεται η μάζα της σφύρας, αντίστοιχα.

Όπως γίνεται αντιληπτό, από τους δυνατούς συνδυασμούς των παραπάνω περιπτώσεων, ο συνολικός αριθμός των δοκιμών που εξετάστηκαν είναι 10. Για παράδειγμα, το δοκίμιο SE1 είναι εκείνο το οποίο καταπονήθηκε στατικά (S), ήταν κενό (E) και συνιστούσε την πρώτη (1) δοκιμή του αντίστοιχου συνδυασμού.

7.2.2 Ύψος

Σε κάθε δοκίμιο μετρήθηκε το αρχικό ύψος του, με τη βοήθεια του παχύμετρου (η ακρίβεια είναι σε εκατοστά του χιλιοστού (0,01 mm)). Τα ύψη των 10 δοκιμών φαίνονται στον Πίνακα 7.1.

Πίνακας 7.1: Ύψη δοκιμών (mm)

SE1	SE2	SF1	SF2	DE1	DE2	DE3	DF1	DF2	DF3
51,05	51,14	51,33	51,30	51,2	51,4	51,0	51,0	51,1	50,9

7.2.3 Μάζα

Πριν την εκτέλεση των πειραμάτων, μετρήθηκε η μάζα όλων των δοκιμών. Η διαδικασία τούτη έγινε μέσω ζυγού (ακριβείας 0,1 g) και τα αποτελέσματα αυτής παρατίθενται στον Πίνακα 7.2.

Πίνακας 7.2: Μάζα δοκιμών σε γραμμάρια (g)

SE1	SE2	DE1	DE2	DE3	SF1	SF2	DF1	DF2	DF3
94,7	94,7	93,6	93,5	95,8	135,7	135,1	128,3	129,5	140,6

Παρατηρούνται κάποιες μικρές διαφορές στα κενά δοκίμια, οι οποίες δε φαίνονται να είναι σημαντικές (η μέση τιμή της μάζας των κενών δοκιμών είναι 94,5 g και η μέγιστη διαφορά είναι στο 1,4% της τιμής αυτής). Αυτές οι διαφορές οφείλονται στη διαδικασία παραγωγής των σωλήνων (fabrication), η οποία δε δύναται να δώσει απόλυτη ομοιόμορφη πυκνότητα καθ' όλο το ύψος των σωλήνων. Οι παρατηρούμενες διαφορές στα γεμισμένα με αφρό δοκίμια είναι μεγαλύτερες (η μέση τιμή της μάζας των γεμάτων δοκιμών είναι 133,8 g και η μέγιστη διαφορά είναι στο 5% της τιμής αυτής). Τούτο οφείλεται, πέραν της διαδικασίας παραγωγής των σωλήνων (fabrication), και στη διαδικασία πλήρωσης των δοκιμών με τον αφρό. Πρόκειται περί ενός χειρωνακτικού τρόπου παραγωγής αφρού σε συνθήκες εργαστηρίου.

7.3 Έλεγχος των δοκιμίων

Πριν την εκτέλεση οποιουδήποτε πειράματος κρίθηκε σκόπιμο να γίνει έλεγχος της διαστατικής αξιοπιστίας των δοκιμίων. Αυτό που κυρίως ενδιέφερε ήταν όχι τόσο η δογματική ακρίβεια του ύψους των δοκιμίων, όσο η διατήρηση του ορθού σχήματός τους. Ήταν σημαντικό, κατά την πρόοψη των δοκιμίων, να διατηρείται το ορθογωνικό τους σχήμα. Ο έλεγχος αυτός έγινε με μεταλλικές ορθές γωνιές, αλλά και με εξέταση της επιπεδότητας των ακραίων διατομών. Η επιπεδότητα εξετάστηκε με απόθεση των δοκιμίων σε μία μεταλλική απόλυτα επίπεδη επιφάνεια, στην οποία παρατηρήθηκε η εφαρμογή του δοκιμίου μέσω διαδοχικών πιέσεων (με το χέρι) σε διάφορα σημεία της διατομής. Εάν κατά την εφαρμογή αυτών των πιέσεων το δοκίμιο παρέμενε εφαρμοσμένο πάνω στη μεταλλική επιφάνεια, θα σήμαινε ότι το δοκίμιο αυτό σε αυτή τη βάση του ήταν ικανοποιητικά επίπεδο. Η ίδια διαδικασία εκτελούνταν και για την άλλη βάση. Εάν, όμως, κατά την εφαρμογή μιας πίεσης παρατηρούταν ανασήκωμα της βάσης – και μάλιστα στην απέναντι περιοχή του σημείου εφαρμογής της πίεσης – θα σήμαινε ότι υπάρχει κάποια ατέλεια. Όσο πιο μεγάλο ήταν αυτό το ανασήκωμα, τόσο εντονότερη θα ήταν και η ατέλεια. Οι παρατηρούμενες ατέλειες διορθώνονταν μέσω τριψίματος της ατελούς βάσης πάνω σε ένα γυαλόχαρτο. Έπειτα, επαναλαμβάνονταν η διαδικασία του ελέγχου κ.ο.κ..

Ο παραπάνω έλεγχος δεν ήταν καθόλου τυπικής φύσης. Απώτερος σκοπός του ήταν η κατά το δυνατόν καλύτερη εφαρμογή των δοκιμίων στις βάσεις των μηχανών δοκιμών. Έτσι, αποφεύγονται τοπικές ανωμαλίες στην κατανομή του φορτίου με αποτέλεσμα μια πιο ομοιόμορφη κατάρρευση και καλύτερη απορρόφηση ενέργειας.

7.4 Στατικές δοκιμές

7.4.1 Πειραματική διαδικασία

Για την υλοποίηση των στατικών δοκιμών χρησιμοποιήθηκε υδραυλική πρέσα. Τα δοκίμια, αφού μετρήθηκαν τα ύψη τους, τοποθετούνταν μεταξύ των δύο παράλληλων χαλύβδινων πλακών της πρέσας, με τρόπο ώστε να βρίσκονται κατά το δυνατόν στο κέντρο αυτών. Η σωστή τοποθέτηση, σε συνδυασμό με τον πρότερο έλεγχο δοκιμίων (βλ. εδάφιο 7.3), έχει ως αποτέλεσμα το εκάστοτε δοκίμιο να μη μετακινηθεί όταν οι δύο πλάκες της πρέσας λάβουν την αρχική τους θέση, κατά την έναρξη του πειράματος. Έτσι, δεν εισάγονται σφάλματα λόγω στρέψης, πάνω στην πλάκα βάσης.

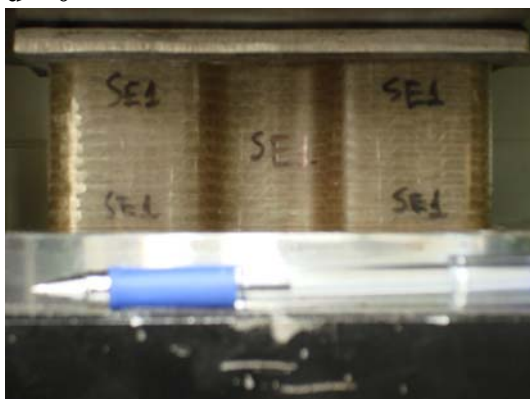
Το άνω έμβολο της πρέσας κατεβαίνει εωσότου έρθει σε επαφή με την πάνω επιφάνεια του εκάστοτε δοκιμίου και από το χρησιμοποιούμενο ηλεκτρονικό υπολογιστή καθορίζεται η θέση αυτή με βάση την ένδειξη του LVDT. Στον υπολογιστή εισάγεται η διάρκεια της δοκιμής, η οποία έχει επιλεγεί να είναι 5 λεπτά (300 s) για όλες τις δοκιμές. Επίσης εισάγεται η συχνότητα δειγματοληψίας των μετρήσεων, η οποία είναι 5 Hz. Έτσι, προκύπτει ο συνολικός αριθμός μετρήσεων που είναι 1500. Η έναρξη της συμπίεσης από το έμβολο έγινε ταυτόχρονα (ή ελάχιστα μετά) με την έναρξη της δειγματοληψίας από τον υπολογιστή. Η κάθοδος του εμβόλου της πρέσας ελεγχόταν χειροκίνητα. Οι μετρήσεις της μετατόπισης και του φορτίου αποθηκεύονταν σε αρχεία LVM.

7.4.2 Δοκίμιο SE1

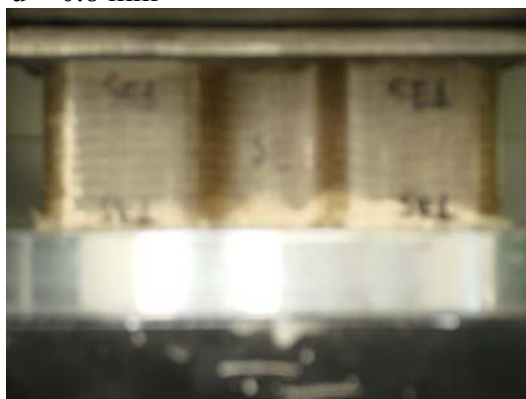
Το δοκίμιο SE1 είναι ένα κενό κέλυφος με μετρημένο αρχικό ύψος 51,05 mm. Η μέση ταχύτητα καθόδου του εμβόλου της πρέσας ήταν 6,5 mm/min.

Στη συνέχεια παρατίθεται σειρά φωτογραφιών από την εξέλιξη της κατάρρευσης του δοκιμίου. Με d συμβολίζεται η εκάστοτε βράχυνση του δοκιμίου.

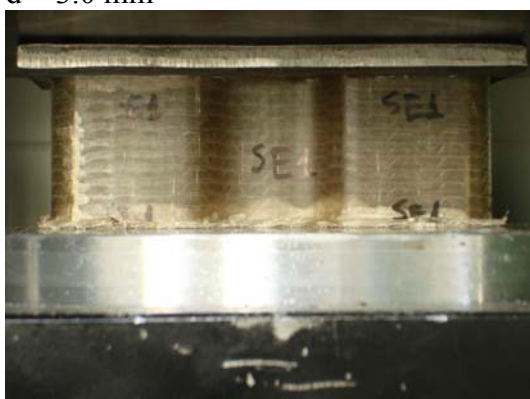
d = 0



d = 0.8 mm



d = 3.0 mm



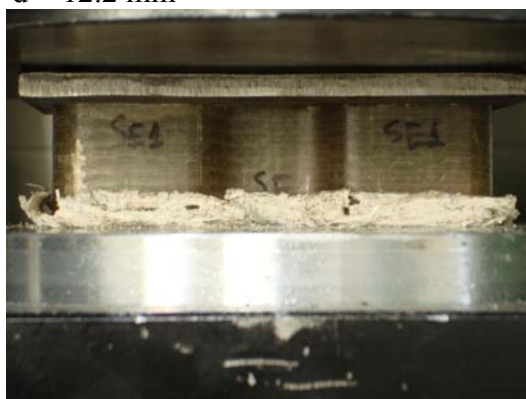
d = 4.1 mm



d = 6.8 mm

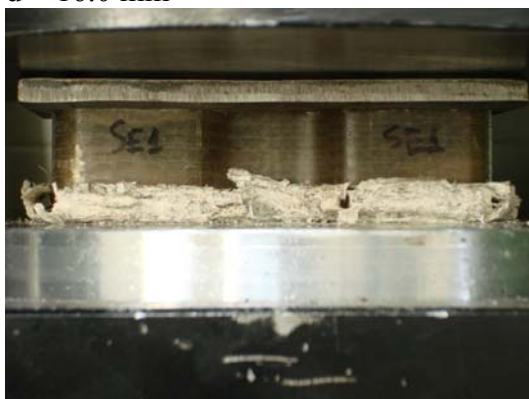


d = 12.2 mm

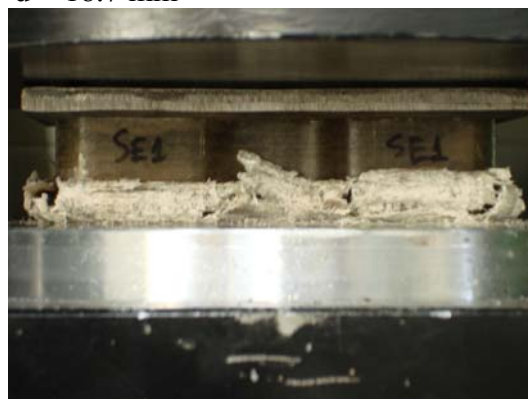


Εικόνα 7.2: Αλληλουχία φωτογραφιών της κατάρρευσης του δοκιμίου SE1

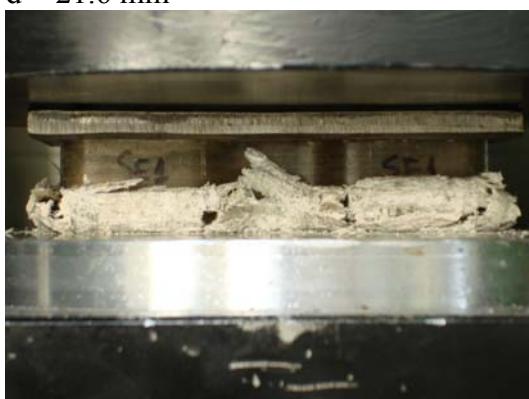
d = 16.0 mm



d = 18.7 mm



d = 21.6 mm



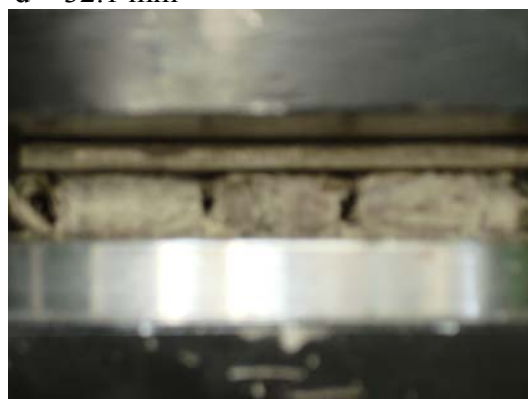
d = 24.5 mm



d = 28.2 mm

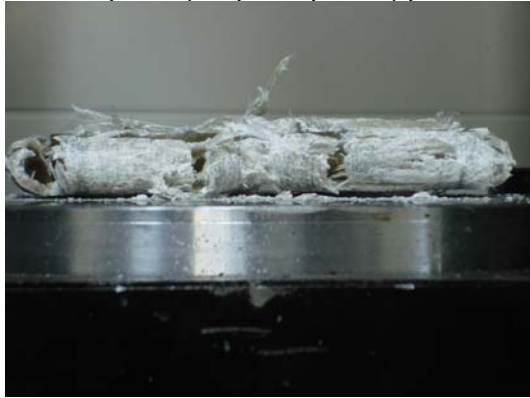


d = 32.1 mm



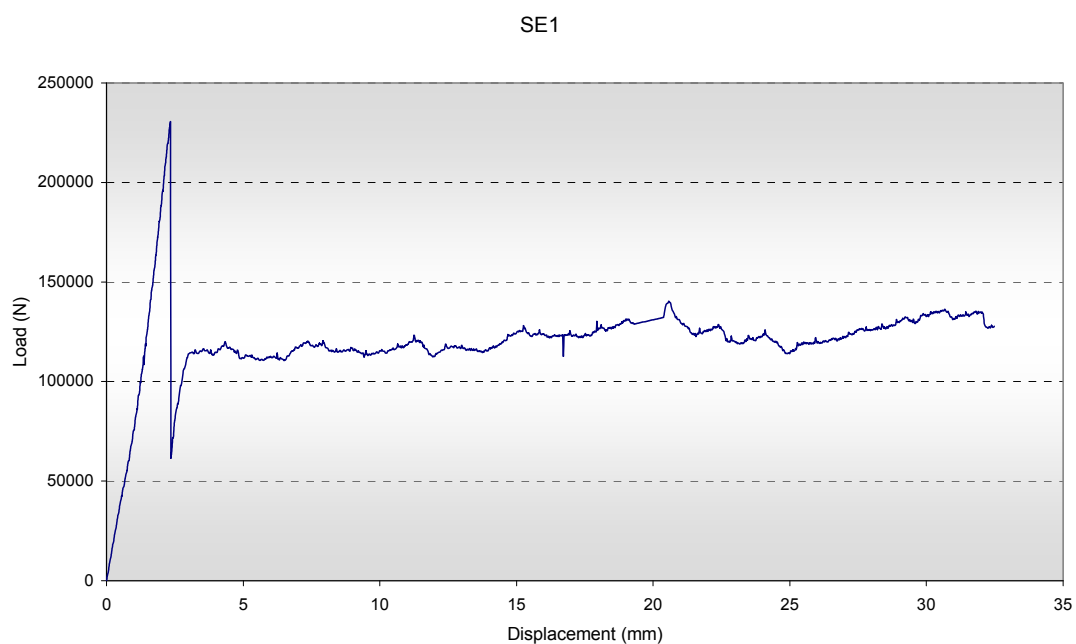
Εικόνα 7.2 – συνέχεια

Μετά την απομάκρυνση του εμβόλου



Εικόνα 7.2 – συνέχεια

Μετά την απομάκρυνση από την πρέσα, το τελικό ύψος του δοκιμίου ήταν 19,25 mm. Ωστόσο, η συνολική βράχυνση δεν είναι η διαφορά αυτής της τιμής από την τιμή του αρχικού ύψους (31,8 mm), διότι το κέλυφος μετά την αφαίρεση της φόρτισης έχει την τάση να επανέρχεται (φυσικά για μικρό διάστημα). Έτσι, η συνολική βράχυνση είναι αυτή που σημειώνεται λίγο πριν την απομάκρυνση του εμβόλου της πρέσας και είναι 32,5 mm. Ακολουθεί το διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης της δοκιμής.



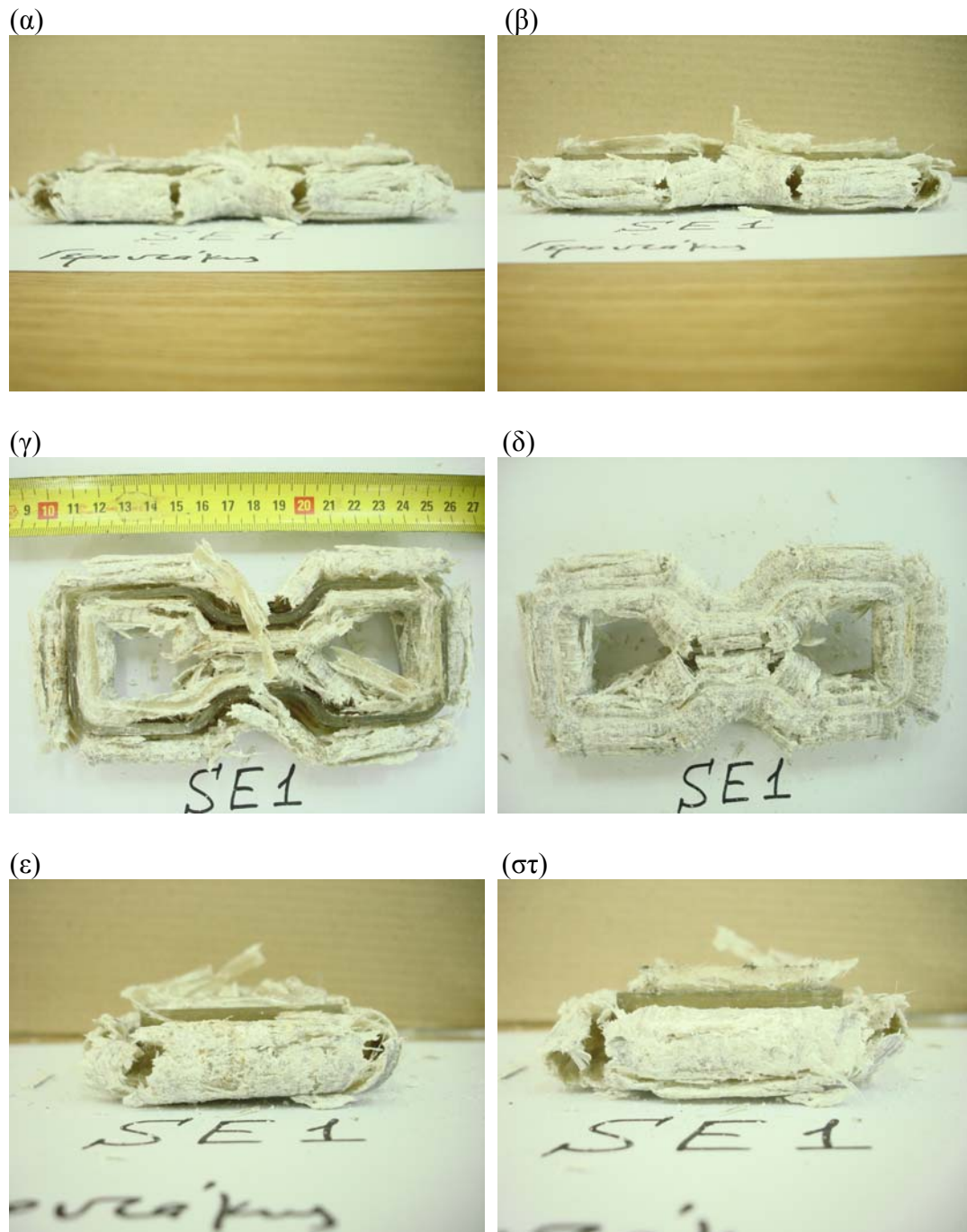
Σχήμα 7.1: Καμπύλη φορτίου – μετατόπισης του δοκιμίου SE1

Σχολιασμός επί της διαδικασίας κατάρρευσης

- Κατά την πρώτη φάση της συμπίεσης, παρατηρείται ραγδαία αύξηση του φορτίου, το οποίο φθάνει τα 230488 N για βράχυνση περίπου 2,3 mm. Αρχικά, το δοκίμιο, όντας αέριο, προβάλλει τη μεγαλύτερη αντίσταση στην εφαρμοζόμενη θλιπτική δύναμη και υφίσταται μικρή παραμόρφωση.
- Αμέσως μετά την εμφάνιση του μέγιστου φορτίου, ακολουθεί μία απότομη πτώση του φορτίου σε ένα τοπικό ελάχιστο των 61631 N. Η πρώτη θραύση είναι γεγονός. Η σταδιακή κατάρρευση του δοκιμίου ξεκινά.
- Στη συνέχεια, ένα μέρος του φορτίου ανακτάται και, μέχρι το τέλος της κατάρρευσης, σχεδόν ομαλοποιείται, ταλαντευόμενο γύρω από μία μέση τιμή των (περίπου) 122000 N.
- Κατά την καταστροφική αυτή καταπόνηση, οι στρώσεις του συνθέτου αποκολλήθηκαν (delamination) και οι μισές κάμφθηκαν προς το εξωτερικό του δοκιμίου, ενώ οι υπόλοιπες συμπίεστηκαν στο εσωτερικό του.
- Πρέπει να σημειωθεί ότι η κατάρρευση εκκίνησε – και διαδόθηκε – στο κάτω άκρο του δοκιμίου, δηλαδή σε αυτό που ήταν σε επαφή με τη βάση της πρέσας.

Χαρακτηριστικά απορρόφησης ενέργειας

- Συνολική απορροφούμενη ενέργεια: 3901,15 J
- Συντεθλιμμένη μάζα: 60,29 g
- Ειδική ενέργεια απορρόφησης: 64,71 kJ/kg



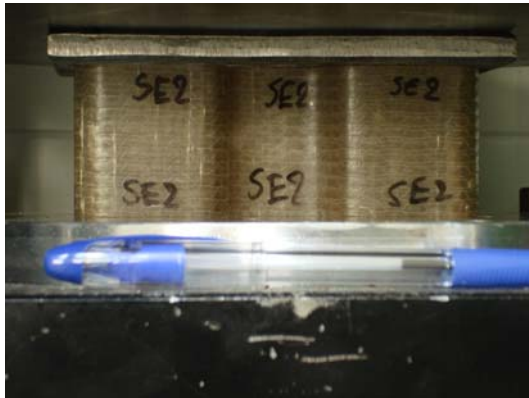
Εικόνα 7.3: Το δοκίμιο SE1 μετά την κατάρρευση: (α) πρόοψη, (β) οπίσθια όψη, (γ) κάτωψη, (δ) άνωψη, (ε) πλάγια από αριστερά όψη, (στ) πλάγια από δεξιά όψη

7.4.3 Δοκίμιο SE2

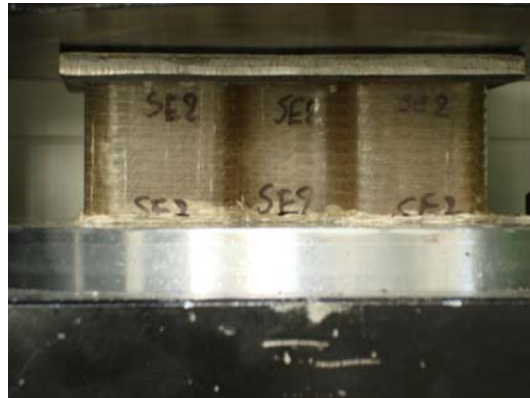
Το δοκίμιο SE2 είναι ένα κενό κέλυφος με μετρημένο αρχικό ύψος 51,14 mm. Σε αυτήν τη δοκιμή, η κατάρρευση του κελύφους διήρκησε λιγότερο από 5 λεπτά. Στην πραγματικότητα, διήρκησε περίπου 230 δευτερόλεπτα. Στο διάστημα αυτό, η μέση ταχύτητα καθόδου του εμβόλου της πρέσας ήταν περίπου 9,2 mm/min. Έπειτα, και μέχρι τη συμπλήρωση των 5 λεπτών, η ταχύτητα του εμβόλου μηδενίστηκε, γεγονός που συνοδεύτηκε από απότομη μείωση του φορτίου θλίψης της πρέσας (από περίπου 130 kN στα 47 kN κι έπειτα στα 30 kN).

Στη συνέχεια παρατίθεται σειρά φωτογραφιών από την εξέλιξη της κατάρρευσης του δοκιμίου. Με d συμβολίζεται η εκάστοτε βράχυνση του δοκιμίου.

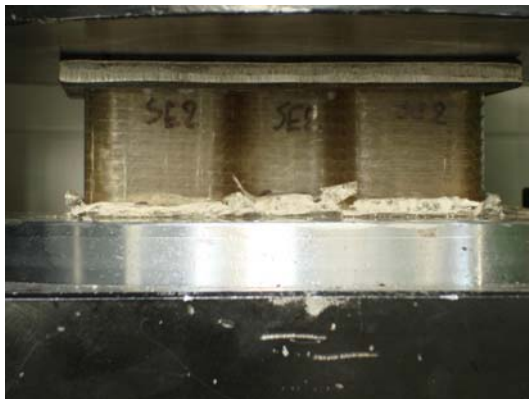
d = 0



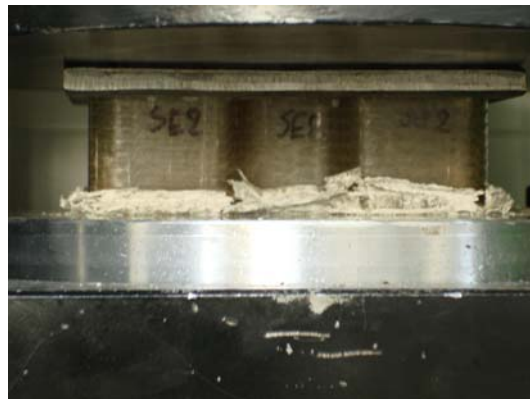
d = 4.1 mm



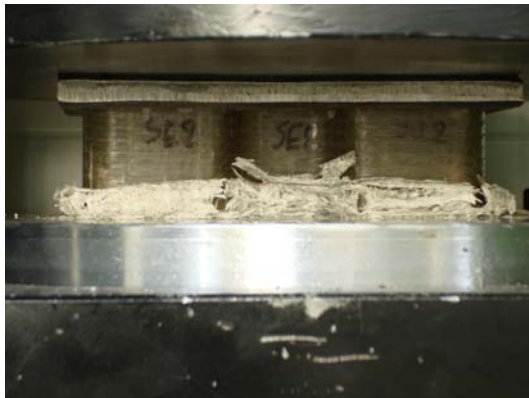
d = 8.3 mm



d = 11.6 mm



d = 14.4 mm



d = 22.2 mm

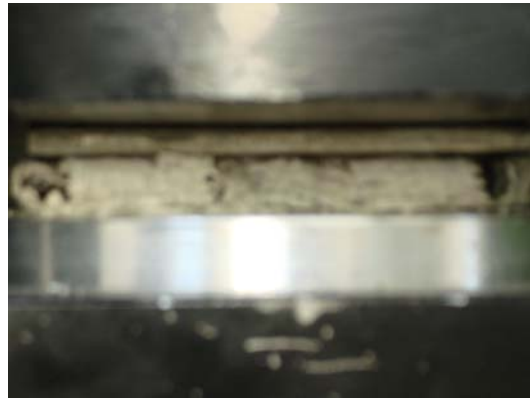


Εικόνα 7.4: Αλληλουχία φωτογραφιών της κατάρρευσης του δοκιμίου SE2

$d = 29.8 \text{ mm}$



$d = 34.3 \text{ mm}$

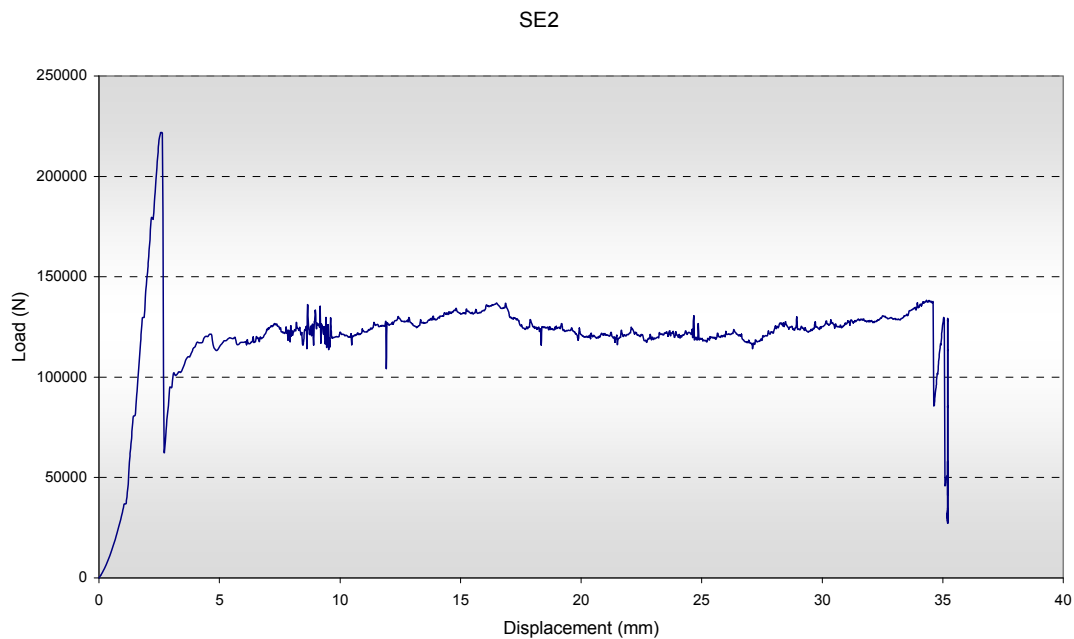


Μετά την απομάκρυνση του εμβόλου



Εικόνα 7.4 – συνέχεια

Η συνολική βράχυνση είναι 35,3 mm. Ακολουθεί το διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης της δοκιμής.



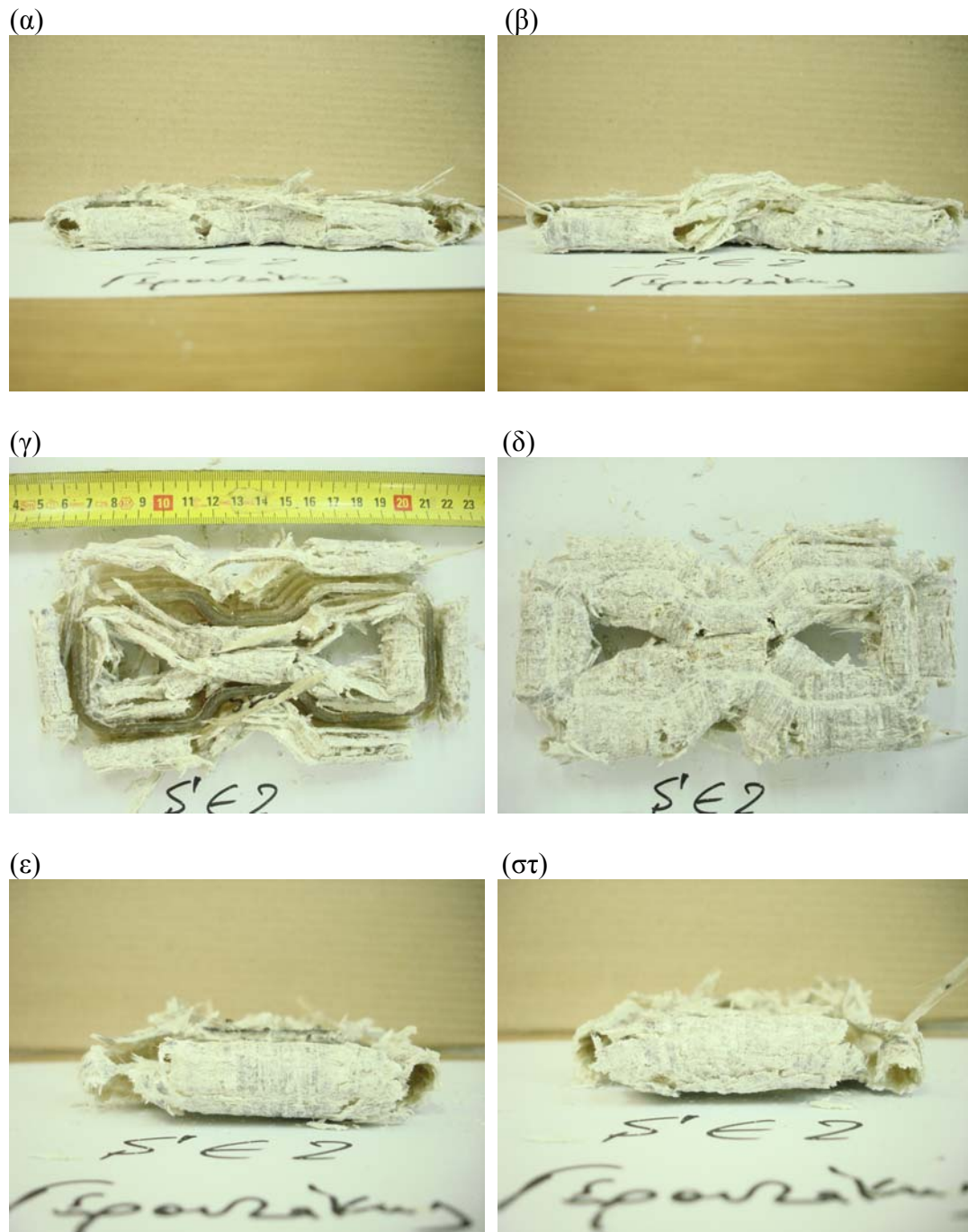
Σχήμα 7.2: Καμπύλη φορτίου – μετατόπισης του δοκιμίου SE2

Σχολιασμός επί της διαδικασίας κατάρρευσης

- Κατά την έναρξη της δοκιμής συμπίεσης, το φορτίο αυξάνει ταχέως μέχρι μία κορυφή των 221868 N, η οποία εμφανίζεται για βράχυνση 2,6 mm.
- Ακολουθεί απότομη πτώση του φορτίου μέχρι τα 63418 N. Η προοδευτική κατάρρευση ξεκινά.
- Εν συνεχεία, ένα μέρος του φορτίου ανακτάται. Για όσο η ταχύτητα παραμόρφωσης παραμένει σταθερή (δε μηδενίζεται), το φορτίο ταλαντώνεται γύρω από μία μέση τιμή, περίπου στα 125000 N.
- Στο τελικό τμήμα της δοκιμής, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η ταχύτητα παραμόρφωσης μηδενίζεται, η βράχυνση ουσιαστικά σταματά και το φορτίο κάνει κάποιες μικροταλαντώσεις μέχρι την τελική του τιμή (περί τα 30 kN).
- Κατά την καταστροφική αυτή καταπόνηση, οι στρώσεις του συνθέτου αποκολλήθηκαν (delamination) και οι μισές κάμφθηκαν προς το εξωτερικό του δοκιμίου, ενώ οι υπόλοιπες συμπίεστηκαν στο εσωτερικό του.
- Αξίζει να σημειωθεί ότι η κατάρρευση εκκίνησε – και διαδόθηκε – στο κάτω άκρο του δοκιμίου, δηλαδή σε αυτό που ήταν σε επαφή με τη βάση της πρέσας.

Χαρακτηριστικά απορρόφησης ενέργειας

- Συνολική απορροφούμενη ενέργεια: 4251,73 J
- Συντεθλιμμένη μάζα: 65,37 g
- Ειδική ενέργεια απορρόφησης: 65,04 kJ/kg



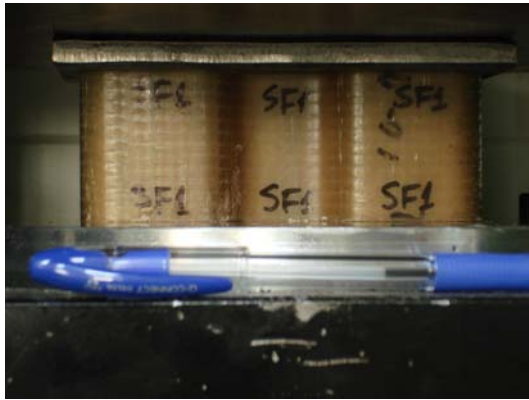
Εικόνα 7.5: Το δοκίμιο SE2 μετά την κατάρρευση: (α) πρόοψη, (β) οπίσθια όψη, (γ) κάτωψη, (δ) άνωψη, (ε) πλάγια από αριστερά όψη, (στ) πλάγια από δεξιά όψη

7.4.4 Δοκίμιο SF1

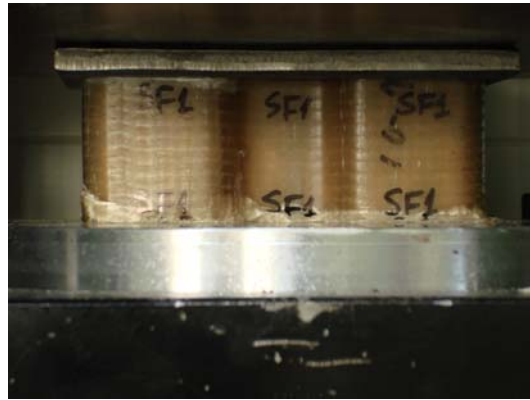
Το δοκίμιο SF1 είναι ένα κέλυφος γεμισμένο με αφρό, με μετρημένο αρχικό ύψος 51,33 mm. Η μέση ταχύτητα καθόδου του εμβόλου της πρέσας ήταν 7,6 mm/min.

Στη συνέχεια παρατίθεται σειρά φωτογραφιών από την εξέλιξη της κατάρρευσης του δοκιμίου. Με d συμβολίζεται η εκάστοτε βράχυνση του δοκιμίου.

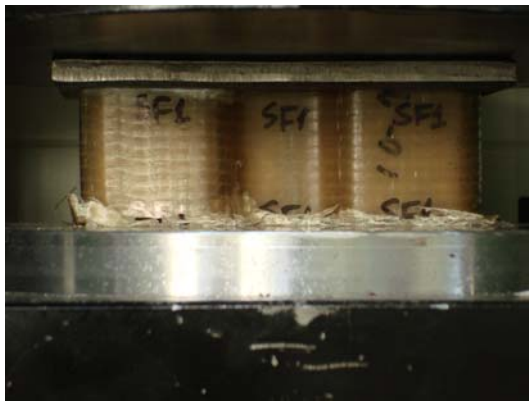
d = 0



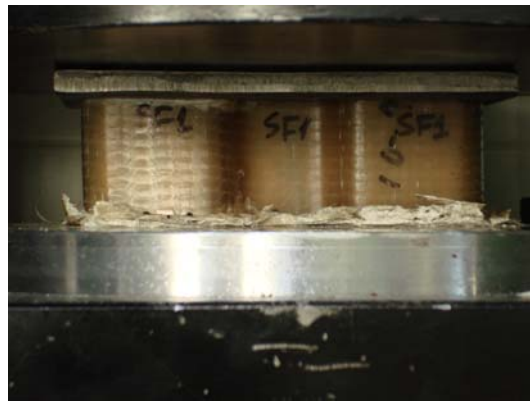
d = 2.6 mm



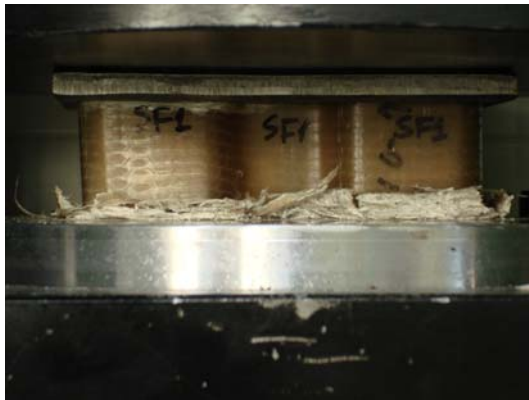
d = 5.1 mm



d = 8.4 mm



d = 11.8 mm



d = 16.2 mm



Εικόνα 7.6: Αλληλουχία φωτογραφιών της κατάρρευσης του δοκιμίου SF1

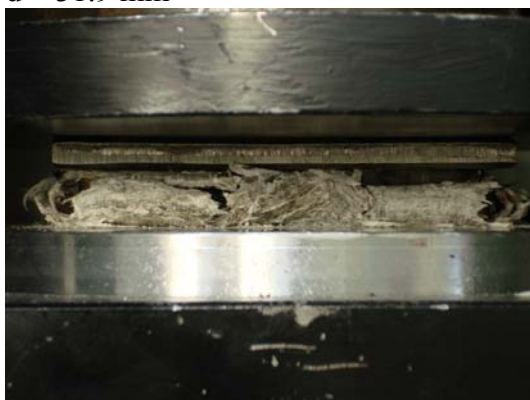
d = 19.6 mm



d = 25.9 mm



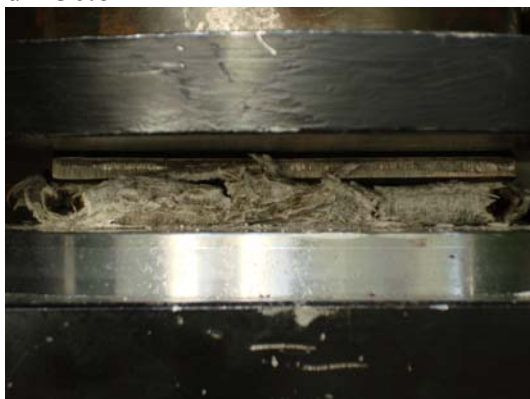
d = 31.9 mm



d = 35.2 mm



d = 36.8 mm



d = 38.4 mm



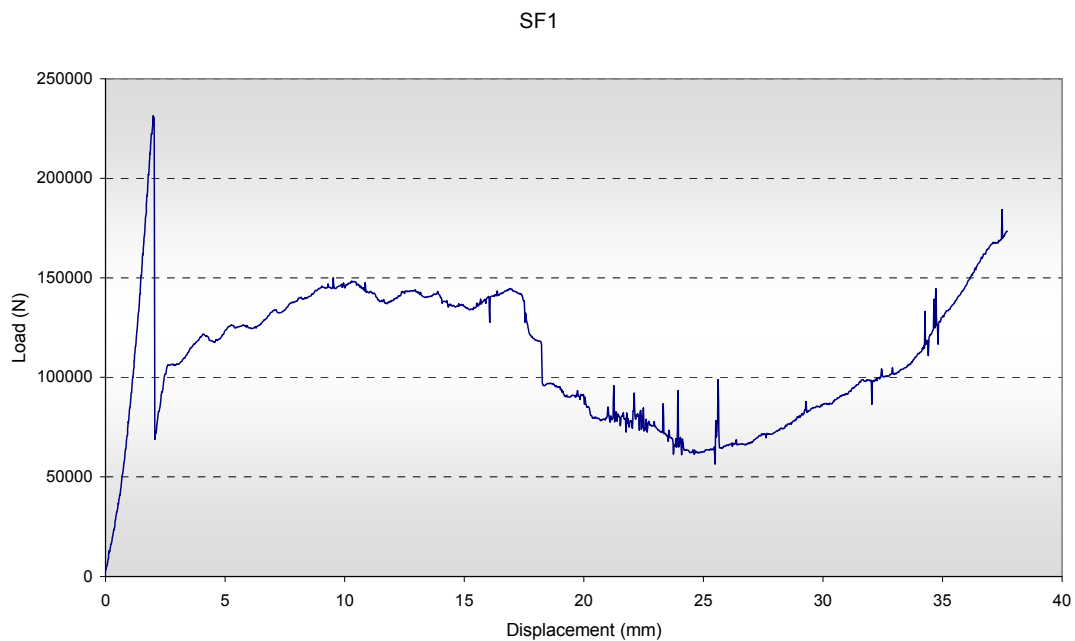
Εικόνα 7.6 – συνέχεια

Μετά την απομάκρυνση του εμβόλου



Εικόνα 7.6 – συνέχεια

Μετά την απομάκρυνση από την πρέσα, το τελικό ύψος του κελύφους ήταν 13,77 mm (ο αφρός έφτασε τα 24 mm). Ωστόσο, η συνολική βράχυνση δεν είναι η διαφορά αυτής της τιμής από την τιμή του αρχικού ύψους (37,56 mm), διότι το κέλυφος μετά την αφαίρεση της φόρτισης έχει την τάση να επανέρχεται (φυσικά για μικρό διάστημα). Έτσι, η συνολική βράχυνση είναι αυτή που σημειώνεται λίγο πριν την απομάκρυνση του εμβόλου της πρέσας και είναι 38,4 mm. Ακολουθεί το διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης της δοκιμής.



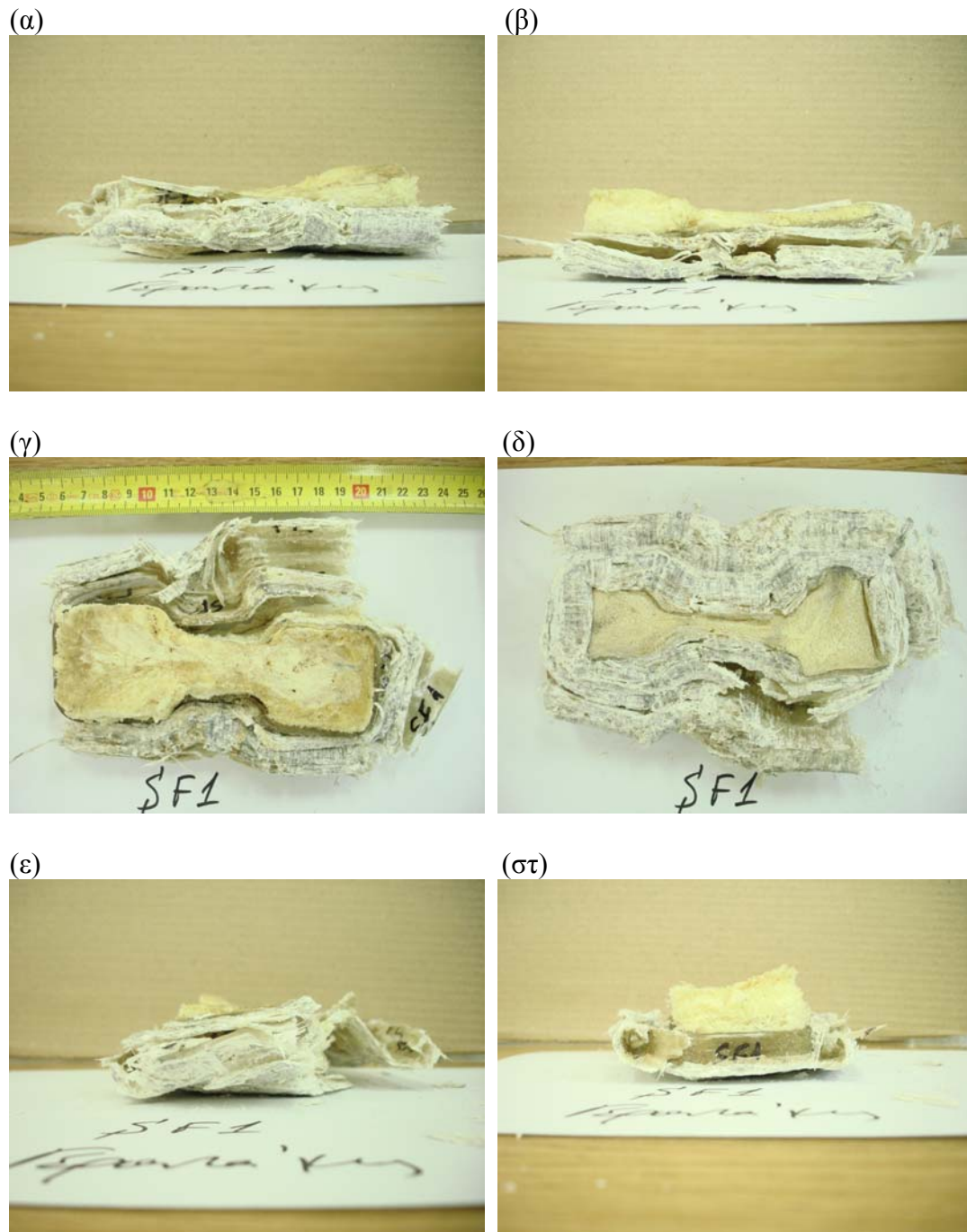
Σχήμα 7.3: Καμπύλη φορτίου – μετατόπισης του δοκιμίου SF1

Σχολιασμός επί της διαδικασίας κατάρρευσης

- Κατά την πρώτη φάση της εφαρμογής πίεσης από την πρέσα στο δοκίμιο, παρατηρείται ταχεία ανύψωση του φορτίου μέχρι την τιμή 231399 N, η οποία σημειώνεται για βράχυνση περίπου 2 mm. Σε τούτη την αρχική φάση, το δοκίμιο, κατά τα γνωστά, προβάλλει τη μεγαλύτερη αντίσταση στην εφαρμοζόμενη θλιπτική δύναμη και υφίσταται μικρή παραμόρφωση.
- Έπεται κατακόρυφη πτώση του φορτίου μέχρι τα 69357 N. Αρχίζει η διαδικασία της κατάρρευσης.
- Στην αμέσως επόμενη φάση το φορτίο ανακτάται μερικώς και φθάνει στην περιοχή των 145000 N. Η διατήρηση αυτή του φορτίου δε διαρκεί πολύ και τη διαδέχεται μία έντονη πτώση του. Η πτώση αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι το κέλυφος έσπασε, λόγω του συμπιεζόμενου αφρού, ο οποίος βρήκε διέξοδο πιθανώς σε κάποια ατέλεια του κελύφους. Το φορτίο σε αυτήν την πτώση έφτασε περί τα 62000 N.
- Στην τελική φάση της φόρτισης, φαίνεται ότι το δοκίμιο δεν έχει απαξιωθεί πλήρως, διότι το φορτίο συμπίεσης αυξάνεται και πάλι. Μάλιστα, βαίνει αυξανόμενο μέχρι το τέλος της δοκιμής και όταν αυτή ολοκληρώνεται, το φορτίο έχει τιμή 173338 N.
- Οι στρώσεις του συνθέτου αποκολλήθηκαν (delamination) και οι μισές κάμφθηκαν προς το εξωτερικό του δοκιμίου, ενώ οι υπόλοιπες συμπίεστηκαν στο εσωτερικό του. Σημαντικό ρόλο στην κατάρρευση έπαιξε, όπως αναφέρθηκε, και η καθ' ύψος θραύση της μήτρας.
- Η κατάρρευση ξεκίνησε και διαδόθηκε κατά κύριο λόγο στο κάτω άκρο του δοκιμίου, δηλαδή σε αυτό που ήταν σε επαφή με τη βάση της πρέσας, ενώ ένα μικρό μέρος της διαστρωματικής αποκόλλησης έλαβε χώρα και στο άνω άκρο του.

Χαρακτηριστικά απορρόφησης ενέργειας

- Συνολική απορροφούμενη ενέργεια: 4174,26 J
- Συντεθλιμμένη μάζα: 101,52 g
- Ειδική ενέργεια απορρόφησης: 41,12 kJ/kg



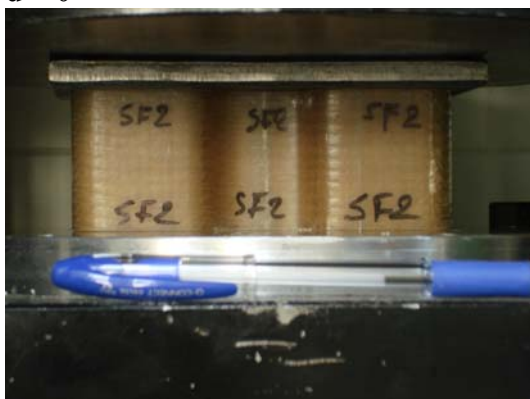
Εικόνα 7.7: Το δοκίμιο SF1 μετά την κατάρρευση: (α) πρόοψη, (β) οπίσθια όψη, (γ) κάτωψη, (δ) άνωψη, (ε) πλάγια από αριστερά όψη, (στ) πλάγια από δεξιά όψη

7.4.5 Δοκίμιο SF2

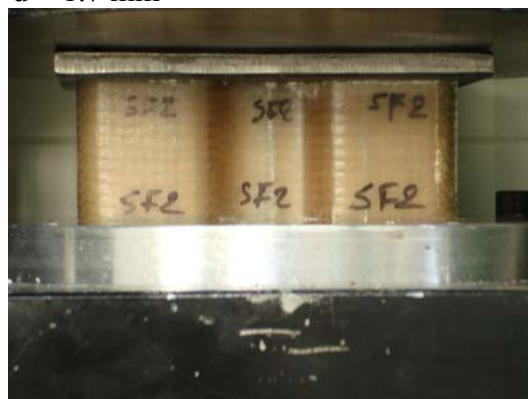
Το δοκίμιο SF2 είναι ένα κέλυφος γεμισμένο με αφρό, με μετρημένο αρχικό ύψος 51,30 mm. Η μέση ταχύτητα καθόδου του εμβόλου της πρέσας ήταν 7,8 mm/min.

Στη συνέχεια παρατίθεται σειρά φωτογραφιών από την εξέλιξη της κατάρρευσης του δοκιμίου. Όπως και στα προηγούμενα, με d συμβολίζεται η εκάστοτε βράχυνση του δοκιμίου.

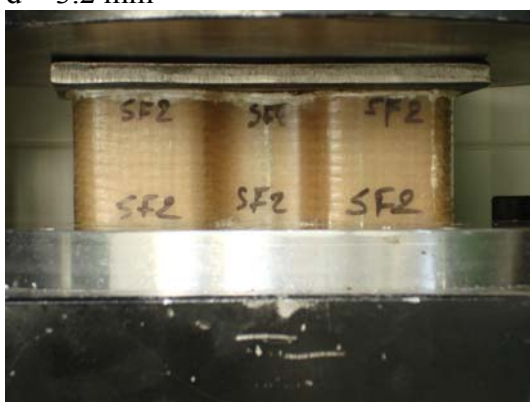
d = 0



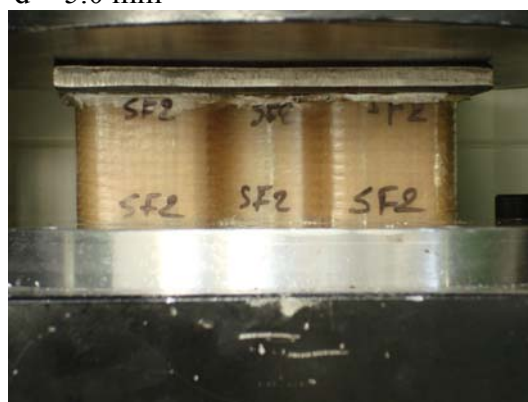
d = 1.7 mm



d = 3.2 mm



d = 5.0 mm



d = 8.3 mm

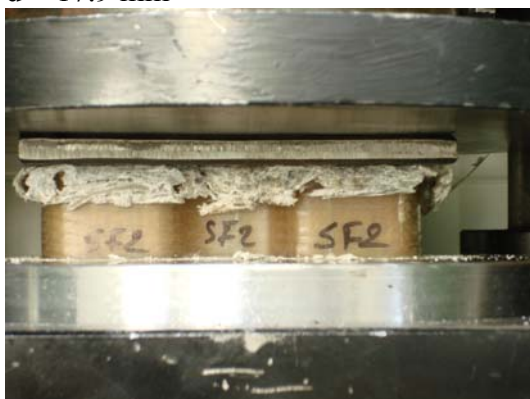


d = 13.9 mm



Εικόνα 7.8: Αλληλοχία φωτογραφιών της κατάρρευσης του δοκιμίου SF2

d = 17.9 mm



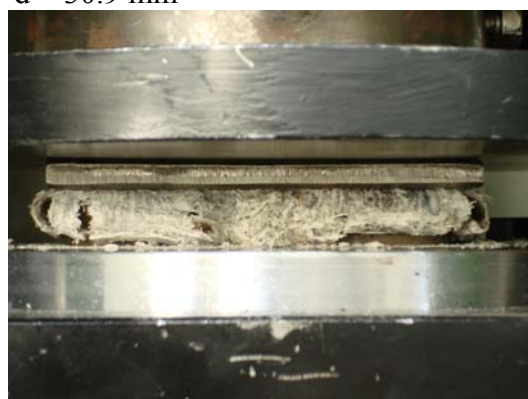
d = 21.9 mm



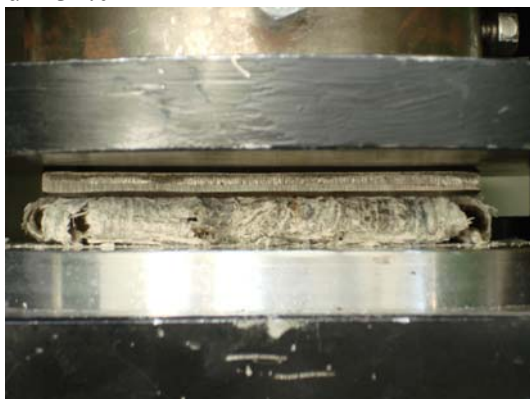
d = 25.0 mm



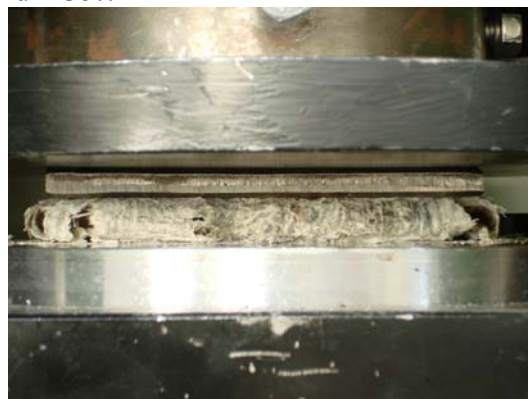
d = 30.9 mm



d = 34.0 mm



d = 35.7 mm

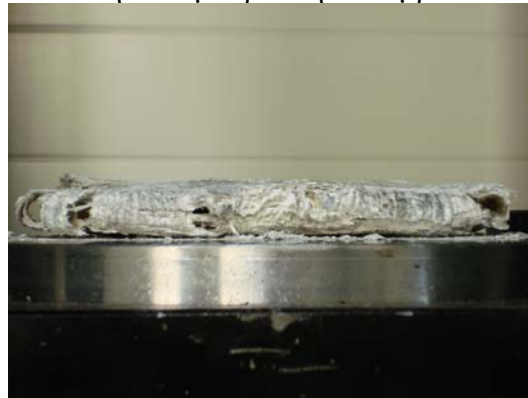


Εικόνα 7.8 – συνέχεια

$d = 39.0 \text{ mm}$

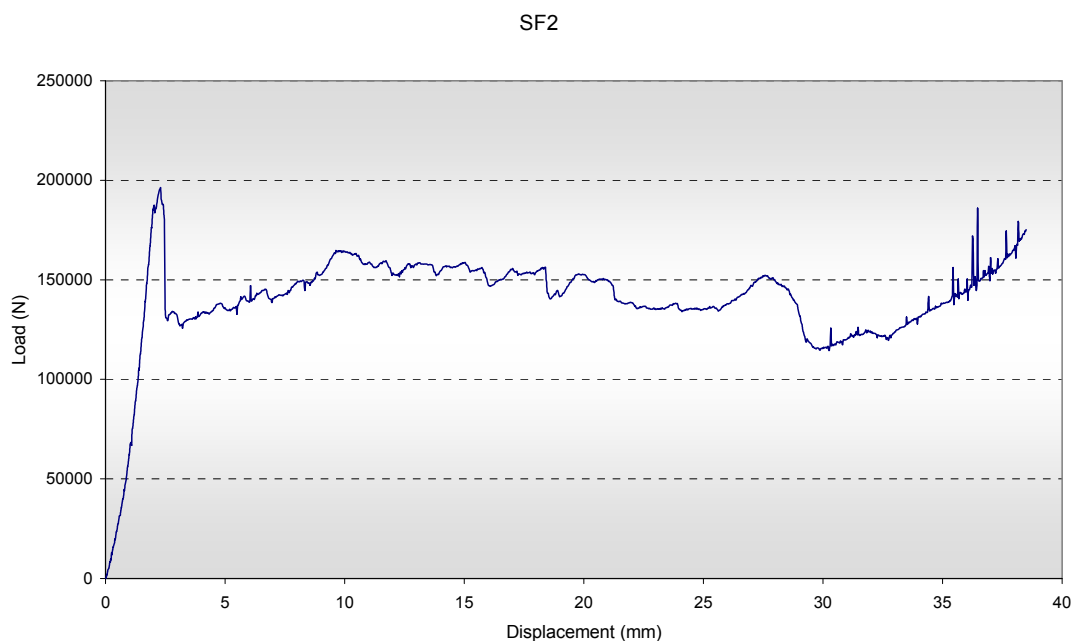


Μετά την απομάκρυνση του εμβόλου



Εικόνα 7.8 – συνέχεια

Μετά την απομάκρυνση από την πρέσα, το τελικό ύψος του κελύφους ήταν 15,1 mm (ο αφρός έφτασε τα 20 mm). Ωστόσο, η συνολική βράχυνση δεν είναι η διαφορά αυτής της τιμής από την τιμή του αρχικού ύψους (36,2 mm), διότι το κέλυφος μετά την αφαίρεση της φόρτισης έχει την τάση να επανέρχεται (φυσικά για μικρό διάστημα). Έτσι, η συνολική βράχυνση είναι αυτή που σημειώνεται λίγο πριν την απομάκρυνση του εμβόλου της πρέσας και είναι 39,0 mm. Ακολουθεί το διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης της δοκιμής.



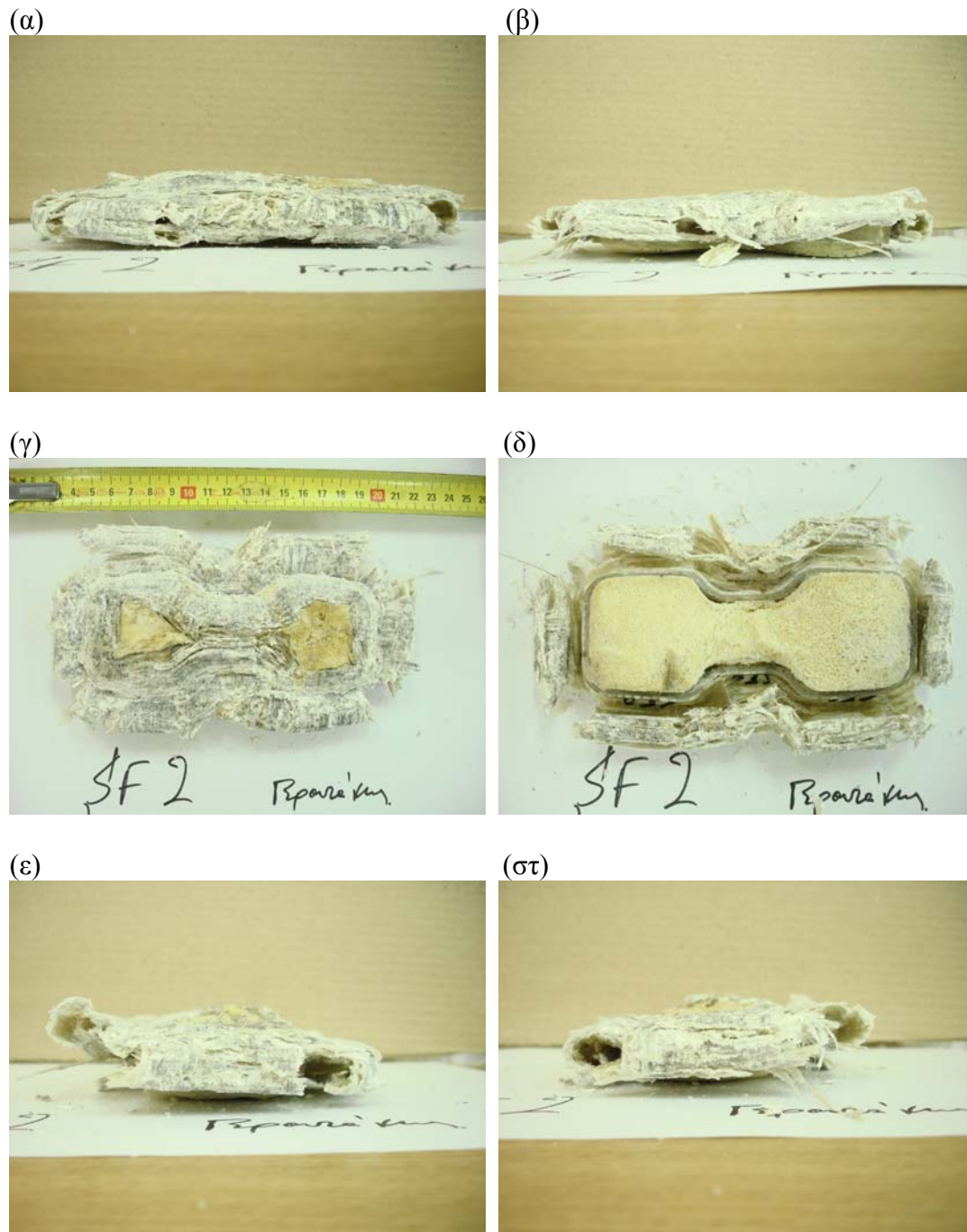
Σχήμα 7.4: Καμπύλη φορτίου – μετατόπισης του δοκιμίου SF2

Σχολιασμός επί της διαδικασίας κατάρρευσης

- Στο πρώτο στάδιο της συμπίεσης, το φορτίο εμφανίζει μία ταχεία αύξηση μέχρι την τιμή των 196184 N, η οποία σημειώνεται για βράχυνση περίπου 2,3 mm. Αρχικά, το δοκίμιο προβάλλει τη μεγαλύτερη αντίσταση στην εφαρμοζόμενη θλιπτική δύναμη.
- Μετά την εμφάνιση του μέγιστου φορτίου, ακολουθεί μία απότομη πτώση του σε ένα τοπικό ελάχιστο των 129521 N. Η προοδευτική κατάρρευση ξεκινά.
- Στη συνέχεια, η καμπύλη του φορτίου σχεδόν σταθεροποιείται, παρουσιάζοντας μικρές διακυμάνσεις γύρω από μια μέση τιμή 144000 N. Η πιο έντονη κοιλάδα εμφανίζεται περίπου σε μετατόπιση 30 mm κι έκτοτε το φορτίο βαίνει αυξανόμενο μέχρι το τέλος της δοκιμής.
- Κατά την καταστροφική τούτη καταπόνηση, οι στρώσεις του συνθέτου αποκολλήθηκαν (delamination) και οι μισές κάμφθηκαν προς το εξωτερικό του δοκιμίου, ενώ οι υπόλοιπες συμπίεστηκαν στο εσωτερικό του.
- Η κατάρρευση είχε την αφετηρία της και διαδόθηκε στο άνω άκρο του δοκιμίου, δηλαδή σε αυτό που ήταν σε επαφή με το έμβολο της πρέσας.

Χαρακτηριστικά απορρόφησης ενέργειας

- Συνολική απορροφούμενη ενέργεια: 5401,93 J
- Συντεθλιμμένη μάζα: 102,71 g
- Ειδική ενέργεια απορρόφησης: 52,60 kJ/kg



Εικόνα 7.9: Το δοκίμιο SF2 μετά την κατάρρευση: (α) πρόοψη, (β) οπίσθια όψη, (γ) κάτωψη, (δ) άνωψη, (ε) πλάγια από αριστερά όψη, (στ) πλάγια από δεξιά όψη

7.5 Δυναμικές δοκιμές

7.5.1 Πειραματική διαδικασία

Οι δυναμικές δοκιμές εκτελέστηκαν μέσω άμεσης σύγκρουσης σε μία σφύρα πέππουσας μάζας 77 kg. Τα δοκίμια, αφού μετρήθηκαν τα ύψη τους σε διάφορες περιφερειακές τους θέσεις, τοποθετήθηκαν κατά το δυνατόν στο κέντρο της βάσης της σφύρας. Όπως και στις στατικές δοκιμές, η σωστή τοποθέτηση, σε συνδυασμό με τον πρότερο έλεγχο δοκιμίων (βλ. εδάφιο 7.3), είναι απολύτως αναγκαία.

Η ταχύτητα πρόσκρουσης της μάζας στα δοκίμια ελεγχόταν μέσω του ύψους από το οποίο απελευθερώνόταν η μάζα. Έτσι, η ταχύτητα πρόσκρουσης υπολογίζεται από την αρχή διατήρησης ενέργειας και δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$v_{κρ} = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \text{ , όπου}$$

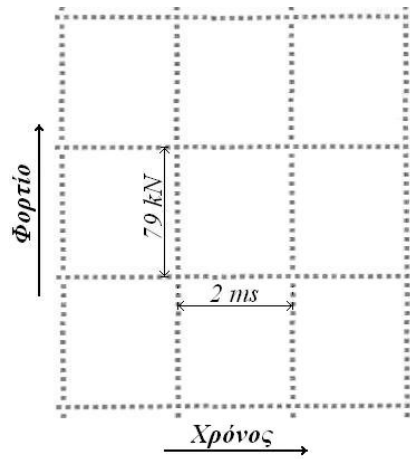
- $v_{κρ}$ είναι η ταχύτητα πρόσκρουσης
- g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας
- h είναι το ύψος από το οποίο αφήνεται η μάζα (ή αλλιώς η απόσταση μεταξύ μάζας και άνω επιφάνειας δοκιμίου).

Για τη μελέτη της συμπεριφοράς των κελυφών σε κρουστικά φορτία, επιλέχθηκαν τρία ύψη για την απελευθέρωση της μάζας, τόσο για τα κενά, όσο και για τα γεμάτα με αφρό κελύφη. Τα ύψη τούτα, καθώς και οι αντίστοιχες ταχύτητες πρόσκρουσης φαίνονται στον Πίνακα 7.3. Κατά την προετοιμασία του πειράματος, προκειμένου να τοποθετηθεί η μάζα κάθε φορά στη σωστή απόσταση, μετρούταν η απόστασή της από τη βάση της σφύρας. Η απόσταση αυτή (έστω H) είναι μέγεθος πιο πρακτικό στη μέτρησή του και είναι ουσιαστικά το ύψος h αυξημένο κατά το ύψος του δοκιμίου. Έτσι, αν π.χ. επιθυμούσαμε ένα ύψος πτώσης $h = 1,5 \text{ m}$, ανυψώναμε τη μάζα ώστε να είναι $H = 1,55 \text{ m}$.

Πίνακας 7.3

α / α	h (m)	H (m)	$v_{κρ}$ (m/s)
1	1,50	1,55	5,42
2	3,00	3,05	7,67
3	4,50	4,55	9,40

Με την εκτέλεση κάθε δοκιμής, το δυναμόμετρο λαμβάνει την απόκριση του φορτίου, το οποίο αποδίδει στο μετρητικό σύστημα ως ηλεκτρικό σήμα. Το μετρητικό σύστημα, με τη σειρά του, καταγράφει το σήμα αυτό συναρτήσει του χρόνου. Οι ρυθμίσεις που έγιναν για τις συγκεκριμένες δοκιμές δίνουν την εξής αντιστοιχία: 1 Volt ισοδυναμεί με δύναμη 39,5 kN. Η κλίμακα του κατακόρυφου άξονα (δηλ. του άξονα του φορτίου) του προκύπτοντος διαγράμματος επιλέχθηκε να είναι 2 Volts. Ήγουν η κλίμακα του άξονα τούτου είναι 79 kN. Από την άλλη, η κλίμακα του οριζόντιου άξονα (δηλ. του άξονα του χρόνου) επιλέχθηκε να είναι 2 ms (Σχήμα 7.5).



Σχήμα 7.5

7.5.2 Δοκίμιο DE1

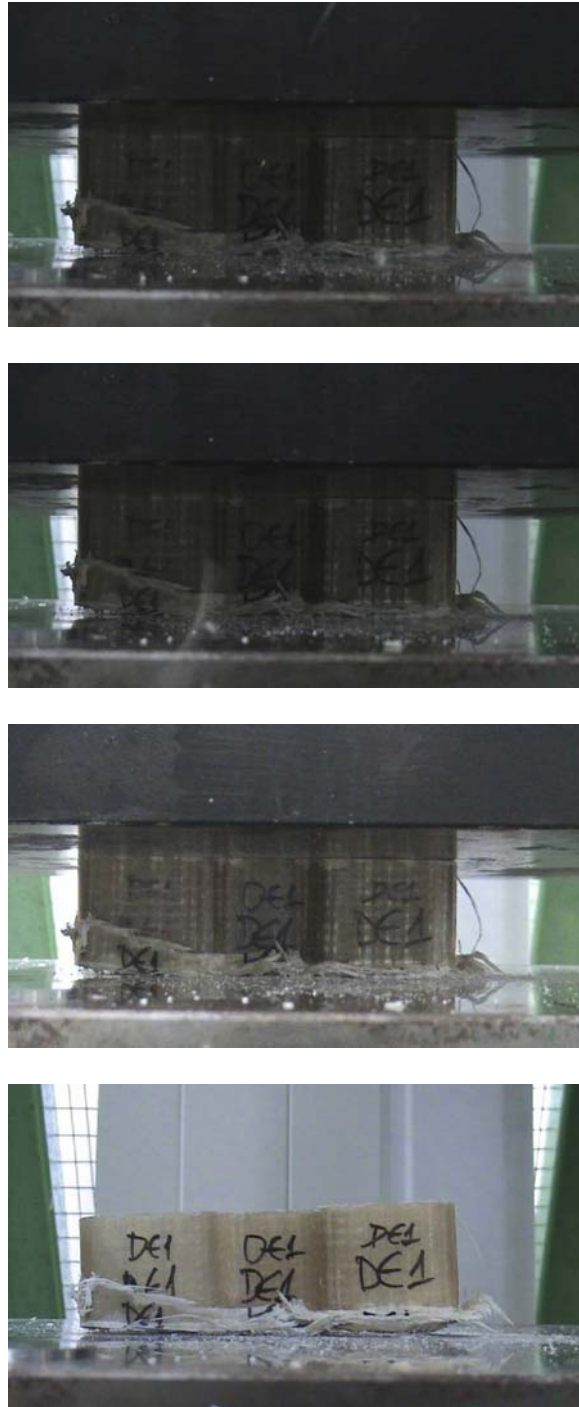
Το δοκίμιο DE1 είναι ένα κενό κέλυφος με μετρημένο αρχικό ύψος 51,2 mm. Οι αποκλίσεις από αυτήν την τιμή κατά την περιφέρεια του κελύφους φθάνουν τα 0,7 mm. Σε τούτη τη δοκιμή, η πύπτουσα μάζα αφήνεται από ύψος 1,5 m. Η ταχύτητα πρόσκρουσης που αντιστοιχεί σε αυτό το ύψος πτώσης είναι 5,42 m/s. Ακολουθεί σειρά στιγμιότυπων από τη δοκιμή τούτη, στην οποία το πρώτο αναπαριστά την κατάσταση του δοκιμίου πριν την πρόσκρουση της πύπτουσας μάζας και το τελευταίο προβάλλει τη μορφή του μετά την απομάκρυνσή της.



Εικόνα 7.10: Διαδοχικά καρέ από την κρούση του δοκιμίου DE1

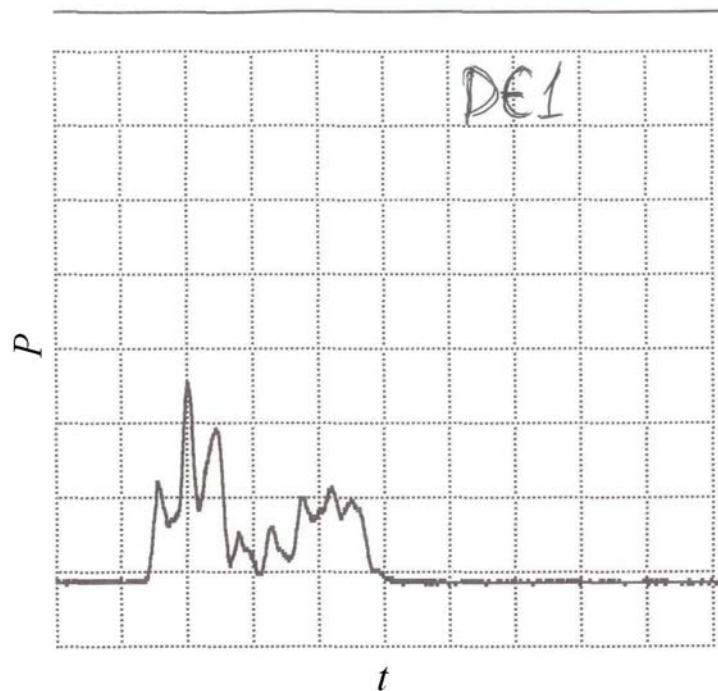


Εικόνα 7.10 – συνέχεια



Εικόνα 7.10 – συνέχεια

Το τελικό ύψος του δοκιμίου είναι 44,9 mm. Συνεπώς, η συνολική βράχυνση είναι 6,3 mm. Από τη μετρητική διάταξη ελήφθη το ακόλουθο διάγραμμα φορτίου – χρόνου (P – t).



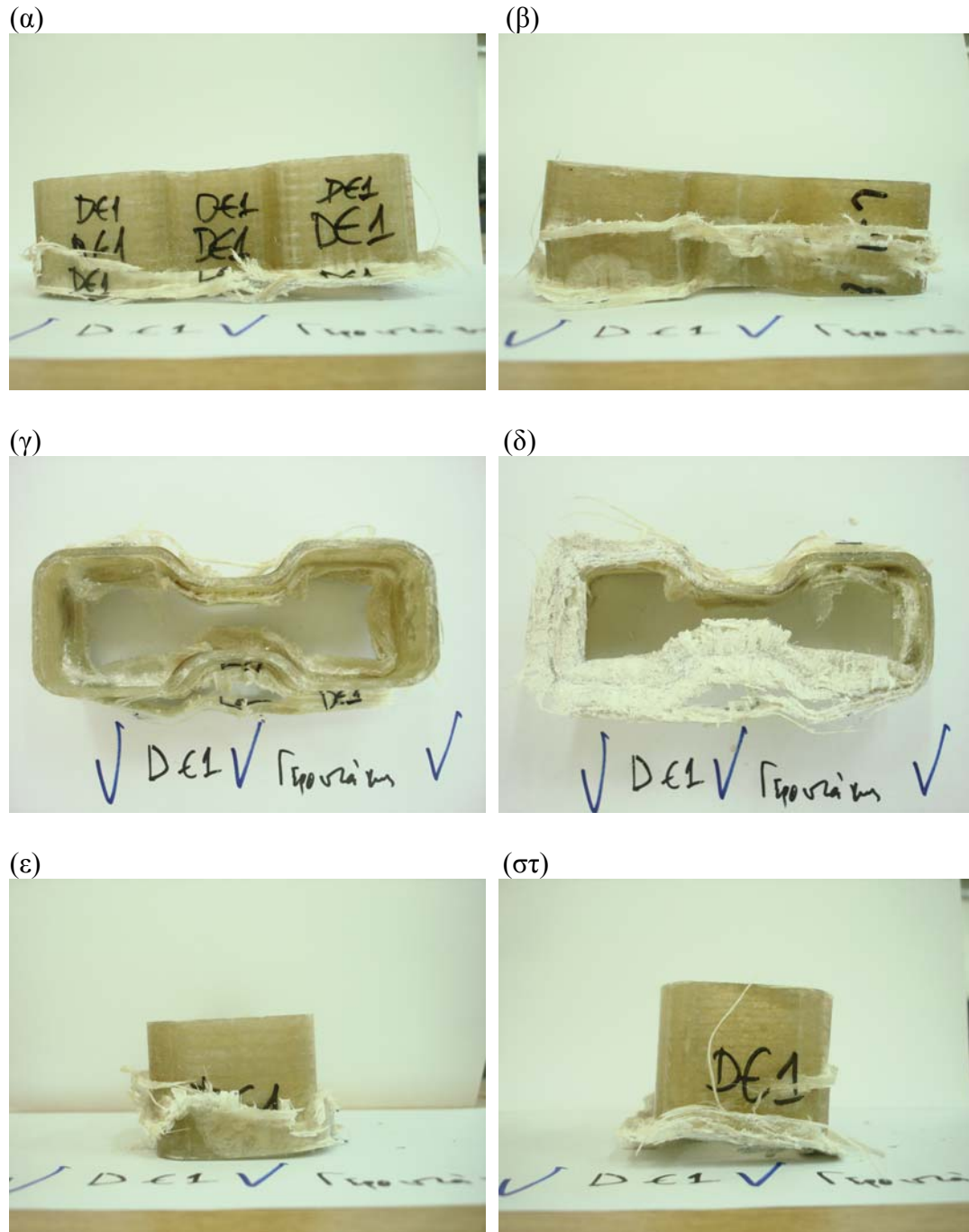
Σχήμα 7.6: Καμπύλη φορτίου – χρόνου (P – t) της κρούσης του δοκιμίου DE1

Παρατηρήσεις επί της δυναμικής καταπόνησης

- Στο διάγραμμα φορτίου – χρόνου διακρίνονται δύο χρονικές περιοχές με το ενδιάμεσό τους όριο να χαρακτηρίζεται από μικρό φορτίο. Η πρώτη χρονική περιοχή αντιστοιχεί στην άμεση κρούση της μάζας πάνω στο δοκίμιο, η οποία φυσικά περιέχει τη μεγαλύτερη κορυφή του φορτίου. Το ενδιάμεσο όριο αντιστοιχεί σε μία μικρή αναπήδηση που έκανε η μάζα, προτού επέλθει τελικά η ηρεμία (τέλος δεύτερης περιοχής).
- Χρονική διάρκεια κρούσης: 7,5 ms
- Μέγιστο σημειούμενο φορτίο: 214 kN
- Μέσο φορτίο: 65,3 kN
- Σε αυτήν τη δοκιμή είχαμε ψαθυρή ανομοιόμορφη θραύση. Η κύρια ρωγμή εμφανίστηκε περί το μέσο του ύψους του δοκιμίου, αλλά όχι σε όλη την περιφέρεια του. Αισθητή ήταν και η παρουσία διαστρωματικής αποκόλλησης (delamination), η οποία εμφανίστηκε στο κάτω άκρο του δοκιμίου, επίσης ανομοιόμορφα.

Χαρακτηριστικά απορρόφησης ενέργειας

- Συνολική απορροφούμενη ενέργεια: 411,39 J
- Συντεθλιμμένη μάζα: 11,52 g
- Ειδική ενέργεια απορρόφησης: 35,72 kJ/kg



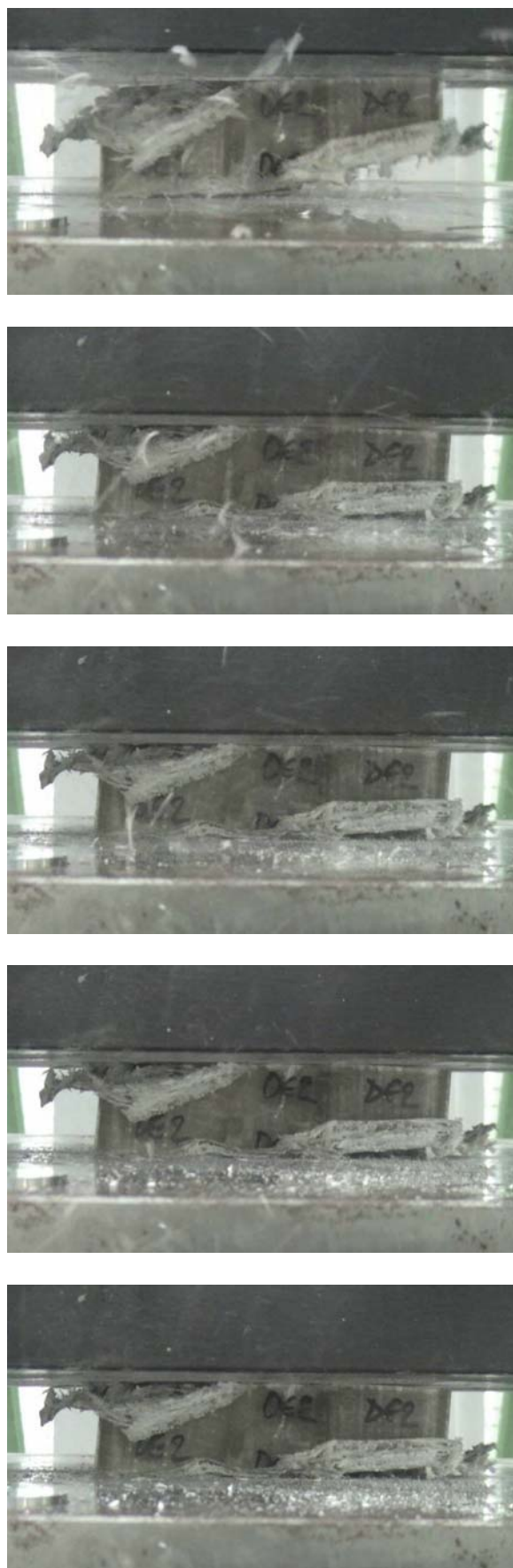
Εικόνα 7.11: Το δοκίμιο DE1 μετά την κατάρρευση: (α) πρόοψη, (β) οπίσθια όψη, (γ) κάτωψη, (δ) άνωψη, (ε) πλάγια από αριστερά όψη, (στ) πλάγια από δεξιά όψη

7.5.3 Δοκίμιο DE2

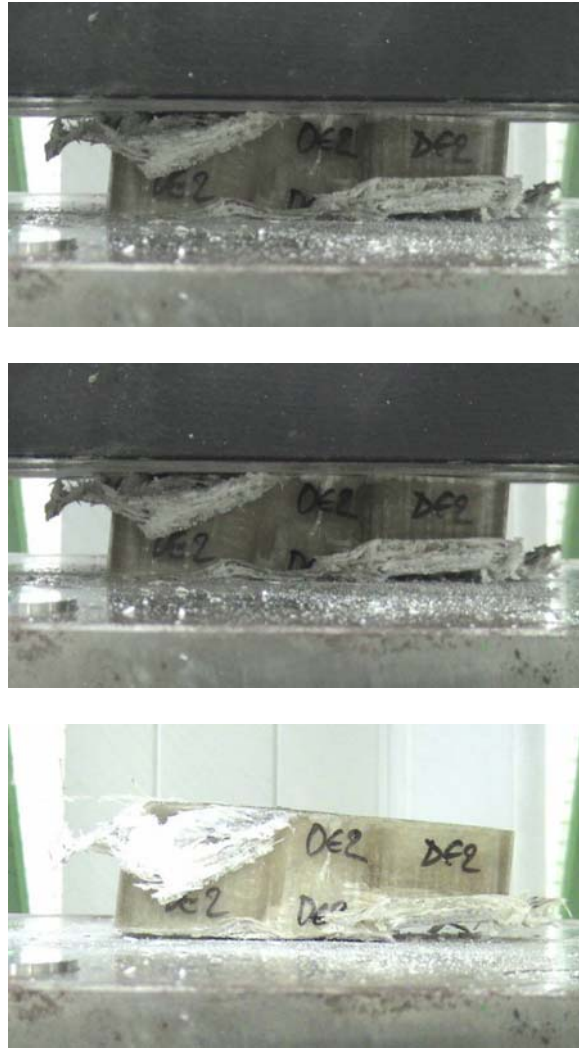
Το δοκίμιο DE2 είναι ένα κενό κέλυφος με μετρημένο αρχικό ύψος 51,4 mm. Οι αποκλίσεις από αυτήν την τιμή περιφερειακά του κελύφους είναι της τάξης των 0,2 – 0,3 mm. Σε τούτη τη δοκιμή, η πίπτουσα μάζα αφήνεται από ύψος 3 m. Η ταχύτητα πρόσκρουσης που αντιστοιχεί σε αυτό το ύψος πτώσης είναι 7,67 m/s. Ακολουθεί σειρά στιγμιότυπων από τη δοκιμή τούτη, στην οποία το πρώτο αναπαριστά την κατάσταση του δοκιμίου πριν την πρόσκρουση της πίπτουσας μάζας και το τελευταίο προβάλλει τη μορφή του μετά την απομάκρυνσή της.



Εικόνα 7.12: Διαδοχικά καρέ από την κρούση του δοκιμίου DE2

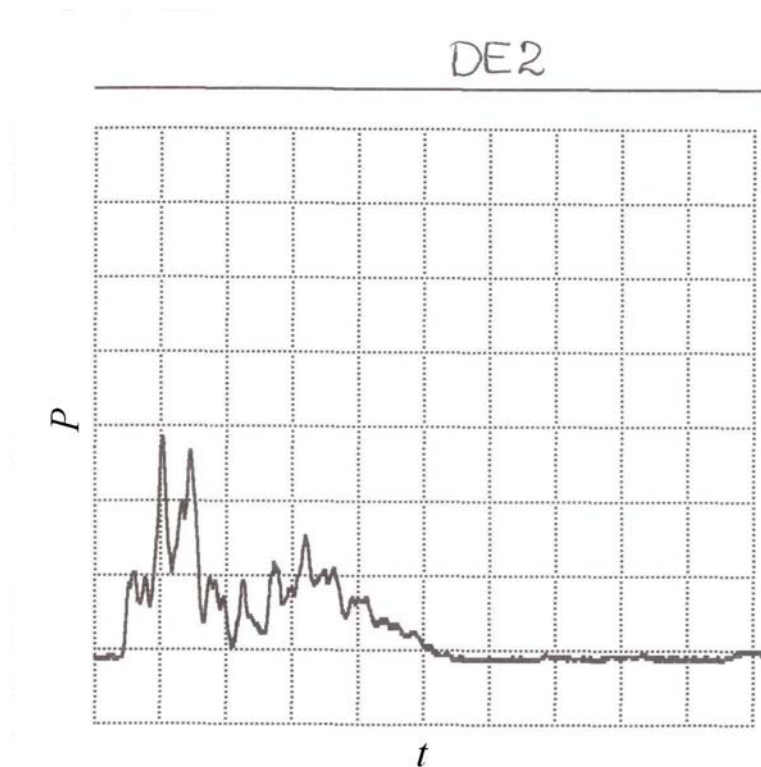


Εικόνα 7.12 – συνέχεια



Εικόνα 7.12 – συνέχεια

Το τελικό ύψος του δοκιμίου είναι 42,4 mm. Συνεπώς, η συνολική βράχυνση είναι 9 mm. Από τη μετρητική διάταξη ελήφθη το ακόλουθο διάγραμμα φορτίου – χρόνου (P – t).



Σχήμα 7.7: Καμπύλη φορτίου – χρόνου (P – t) της κρούσης του δοκιμίου DE2

Παρατηρήσεις επί της δυναμικής καταπόνησης

- Κι εδώ διακρίνονται δύο χρονικές περιοχές στο διάγραμμα φορτίου – χρόνου, των οποίων όμως το ενδιάμεσο όριο δεν είναι τόσο σαφές. Αυτό οφείλεται στο ότι σε αυτή τη δοκιμή η αναπήδηση της πέτρουσας μάζας είναι σχεδόν αμελητέα.
- Χρονική διάρκεια κρούσης: 10,1 ms
- Μέγιστο σημειούμενο φορτίο: 237 kN
- Μέσο φορτίο: 68,8 kN
- Ο κύριος μηχανισμός κατάρρευσης ήταν η διαστρωματική αποκόλληση (delamination).
- Η κατάρρευση σε αυτή τη δοκιμή αφορά κυρίως το αριστερό τμήμα του άνω άκρου και το δεξί τμήμα του κάτω άκρου του κελύφους.

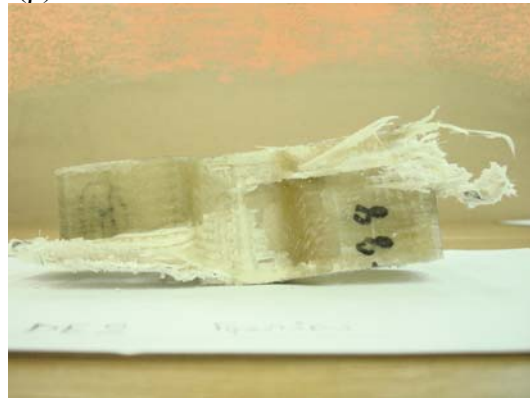
Χαρακτηριστικά απορρόφησης ενέργειας

- Συνολική απορροφούμενη ενέργεια: 619,2 J
- Συντεθλιμμένη μάζα: 16,37 g
- Ειδική ενέργεια απορρόφησης: 37,82 kJ/kg

(α)



(β)



(γ)



(δ)



(ε)



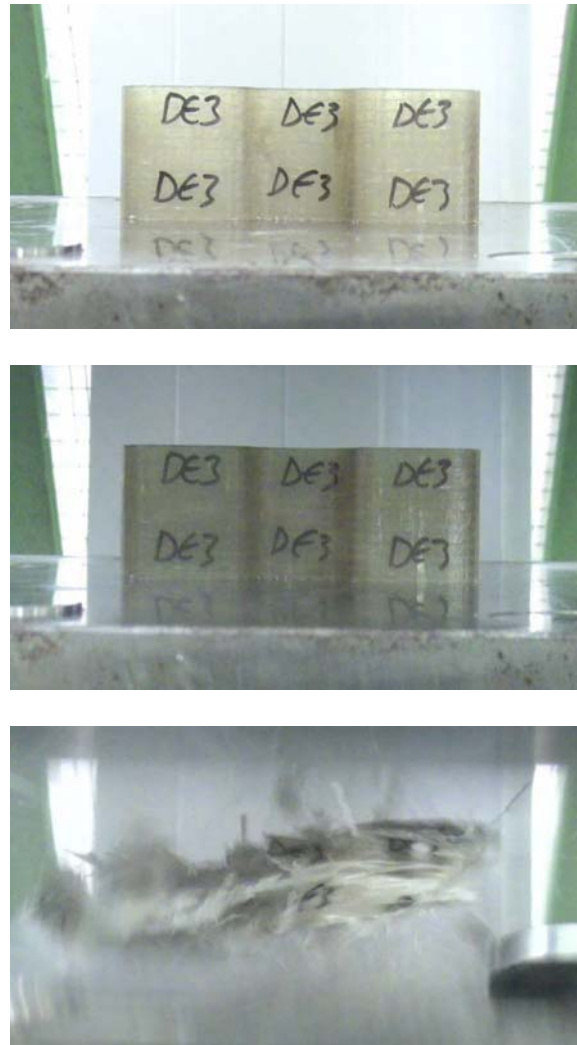
(στ)



Εικόνα 7.13: Το δοκίμιο DE2 μετά την κατάρρευση: (α) πρόοψη, (β) οπίσθια όψη, (γ) κάτωψη, (δ) άνωψη, (ε) πλάγια από αριστερά όψη, (στ) πλάγια από δεξιά όψη

7.5.4 Δοκίμιο DE3

Το δοκίμιο DE3 είναι ένα κενό κέλυφος με μετρημένο αρχικό ύψος 51,0 mm. Οι αποκλίσεις από αυτήν την τιμή περιφερειακά του κελύφους είναι της τάξης των 0,2 – 0,3 mm. Σε τούτη τη δοκιμή, η πίπτουσα μάζα αφήνεται από ύψος 4,5 m. Η ταχύτητα πρόσκρουσης που αντιστοιχεί σε αυτό το ύψος πτώσης είναι 9,40 m/s. Ακολουθεί σειρά στιγμιότυπων από τη δοκιμή τούτη, στην οποία το πρώτο αναπαριστά την κατάσταση του δοκιμίου πριν την πρόσκρουση της πίπτουσας μάζας και το τελευταίο προβάλλει τη μορφή του μετά την απομάκρυνσή της.



Εικόνα 7.14: Διαδοχικά καρέ από την κρούση του δοκιμίου DE3



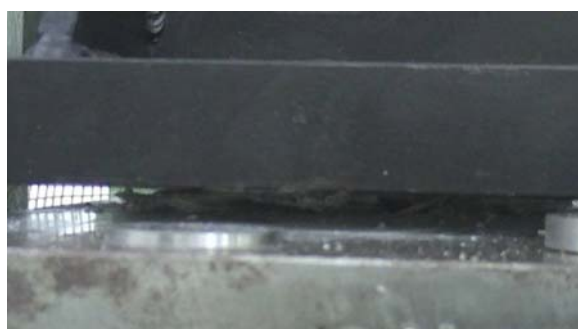
Εικόνα 7.14 – συνέχεια



Εικόνα 7.14 – συνέχεια

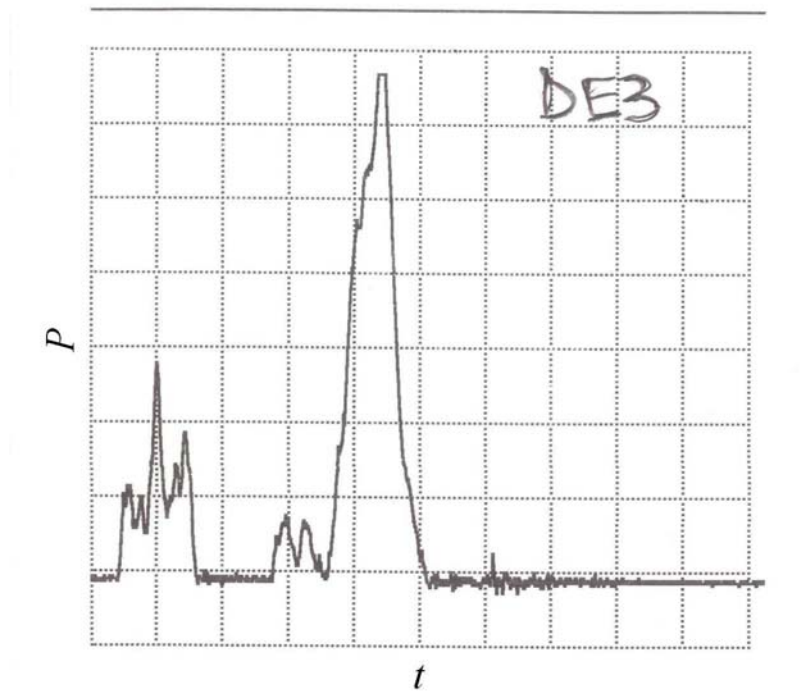


Εικόνα 7.14 – συνέχεια



Εικόνα 7.14 – συνέχεια

Το τελικό ύψος του δοκιμίου είναι 12,3 mm. Συνεπώς, η συνολική βράχυνση είναι 38,7 mm. Από τη μετρητική διάταξη ελήφθη το ακόλουθο διάγραμμα φορτίου – χρόνου ($P - t$).



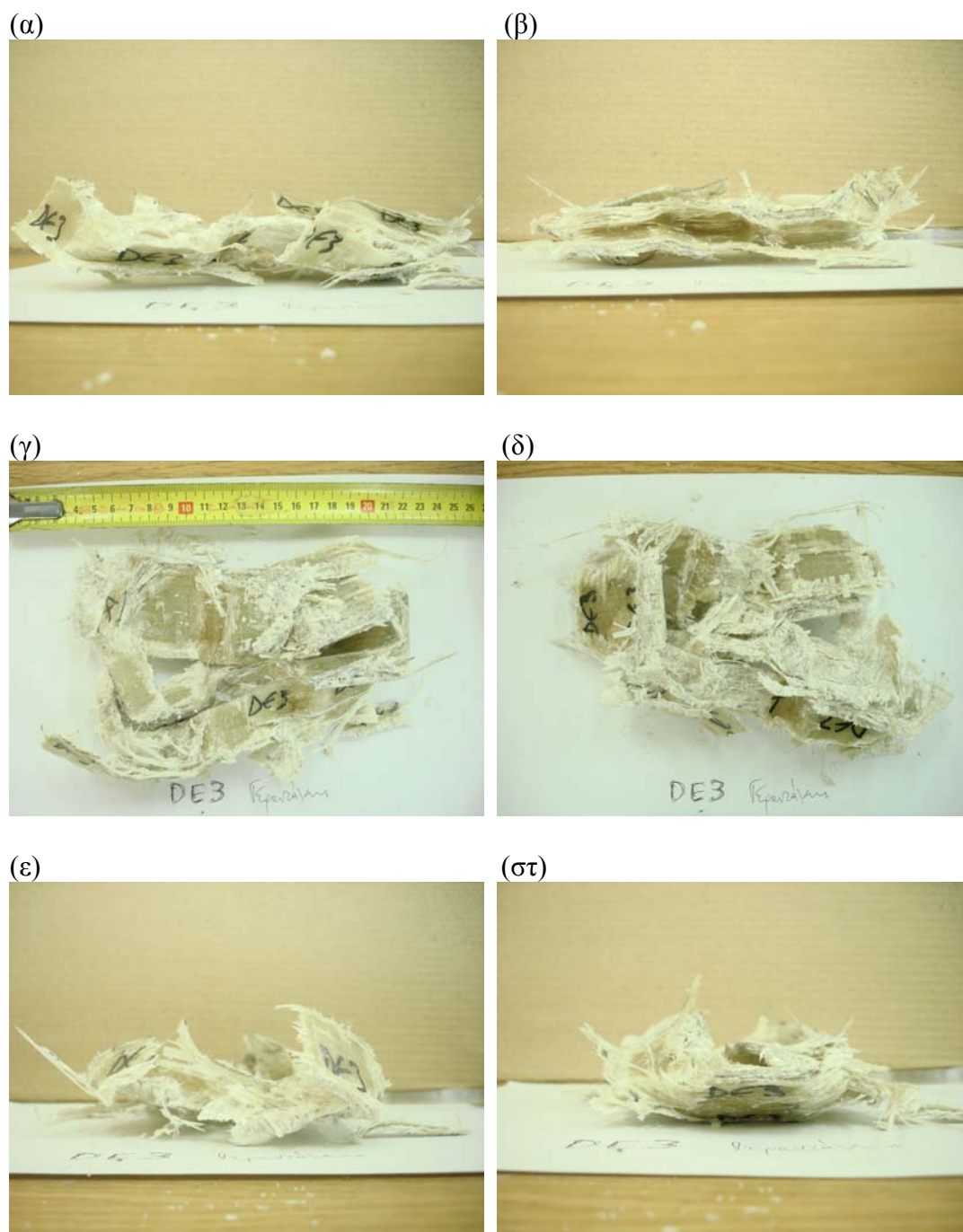
Σχήμα 7.8: Καμπύλη φορτίου – χρόνου ($P - t$) της κρούσης του δοκιμίου DE3

Παρατηρήσεις επί της δυναμικής καταπόνησης

- Σε τούτη τη δοκιμή η καταστροφή του κελύφους ήταν ολοσχερής. Η πίπτουσα μάζα, αφού προσέκρουσε στο δοκίμιο, το οποίο και έσπασε, αναπήδησε έντονα πάνω από αυτό. Η αναπήδηση αυτή ήταν τόσο έντονη που το φορτίο μηδενίστηκε για 2,3 ms (δηλ. για το διάστημα αυτό η μάζα βρισκόταν στον αέρα).
- Όταν η πίπτουσα μάζα προσγειώθηκε πάλι, το δοκίμιο ήταν τόσο απαξιωμένο που δεν προέβαλε καμία αντίσταση. Έτσι, το φορτίο εκτινάχθηκε εκτός των ορίων της μετρητικής διάταξης, διότι ουσιαστικά η μάζα προσέκρουσε στην άκαμπτη βάση της σφύρας. Συνεπώς, δεν έχει νόημα για μας να συμπεριλάβουμε αυτήν την περιοχή της καμπύλης φορτίου – χρόνου στην ανάλυση μας, διότι αυτή δεν αφορά το καταπονούμενο κέλυφος.
- Χρονική διάρκεια κρούσης: 2,5 ms
- Μέγιστο σημειούμενο φορτίο: 231 kN
- Μέσο φορτίο: 94,4 kN
- Κατά τη δοκιμή τούτη είχαμε ψαθυρή θραύση του δοκιμίου κυρίως σε μία από τις δύο μικρές πλευρές του και αναδίπλωση των δύο μεγάλων πλευρών.
- Ολόκληρο το δοκίμιο υποβαθμίστηκε.

Χαρακτηριστικά απορρόφησης ενέργειας

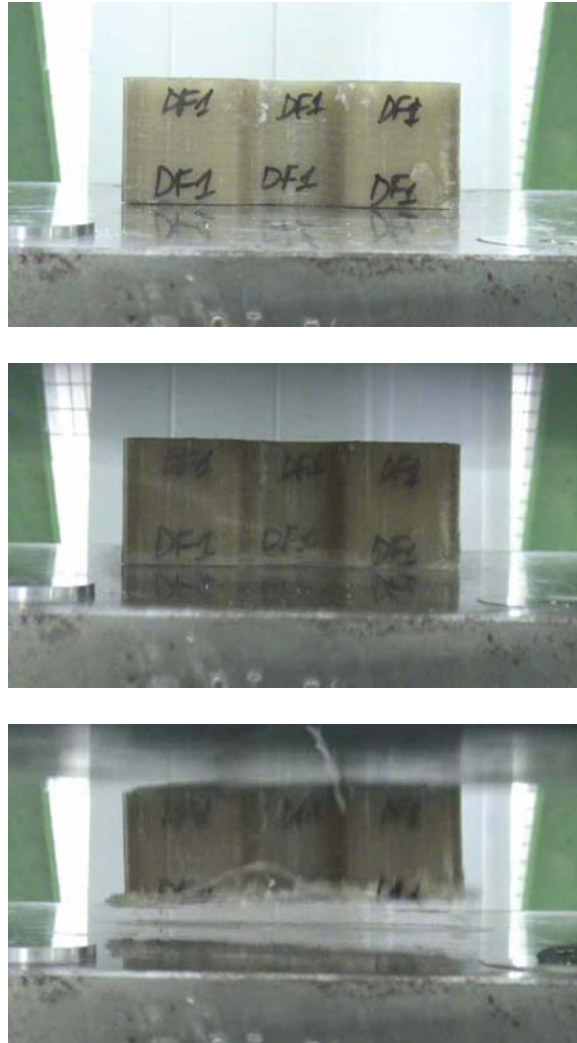
- Συνολική απορροφούμενη ενέργεια: 3653,28 J
- Συντεθλιμμένη μάζα: 72,70 g
- Ειδική ενέργεια απορρόφησης: 50,25 kJ/kg



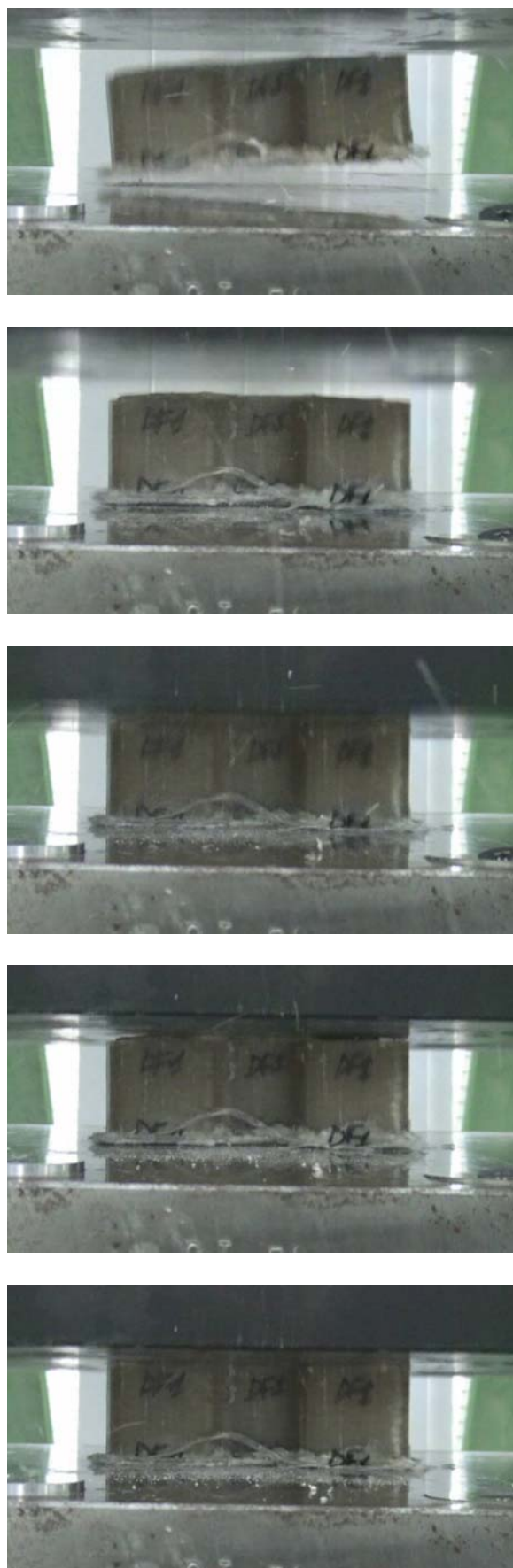
Εικόνα 7.15: Το δοκίμιο DE3 μετά την κατάρρευση: (α) πρόοψη, (β) οπίσθια όψη, (γ) κάτωψη, (δ) άνωψη, (ε) πλάγια από αριστερά όψη, (στ) πλάγια από δεξιά όψη

7.5.5 Δοκίμιο DF1

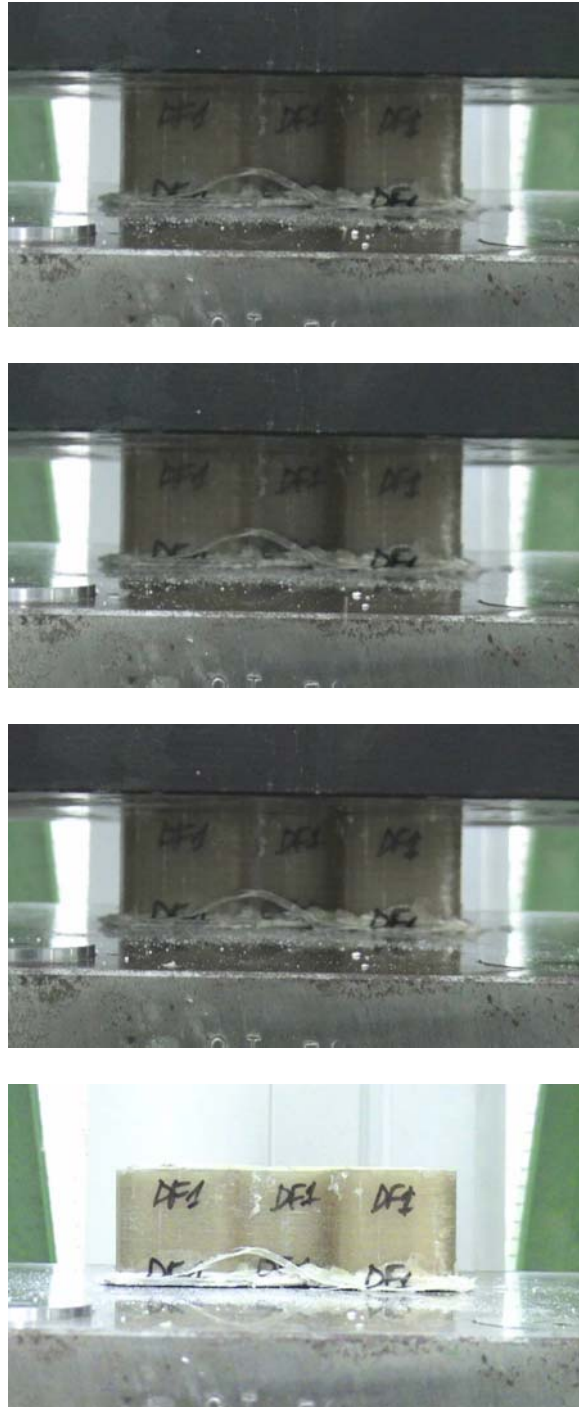
Το δοκίμιο DF1 είναι ένα κέλυφος γεμισμένο με αφρό, με μετρημένο αρχικό ύψος 51,0 mm. Οι αποκλίσεις από αυτήν την τιμή περιφερειακά του κελύφους είναι της τάξης των 0,2 – 0,3 mm. Σε τούτη τη δοκιμή, η πίπτουσα μάζα αφήνεται από ύψος 1,5 m. Η ταχύτητα πρόσκρουσης που αντιστοιχεί σε αυτό το ύψος πτώσης είναι 5,42 m/s. Ακολουθεί σειρά στιγμιότυπων από τη δοκιμή τούτη, στην οποία το πρώτο αναπαριστά την κατάσταση του δοκιμίου πριν την πρόσκρουση της πίπτουσας μάζας και το τελευταίο προβάλλει τη μορφή του μετά την απομάκρυνσή της.



Εικόνα 7.16: Διαδοχικά καρέ από την κρούση του δοκιμίου DF1

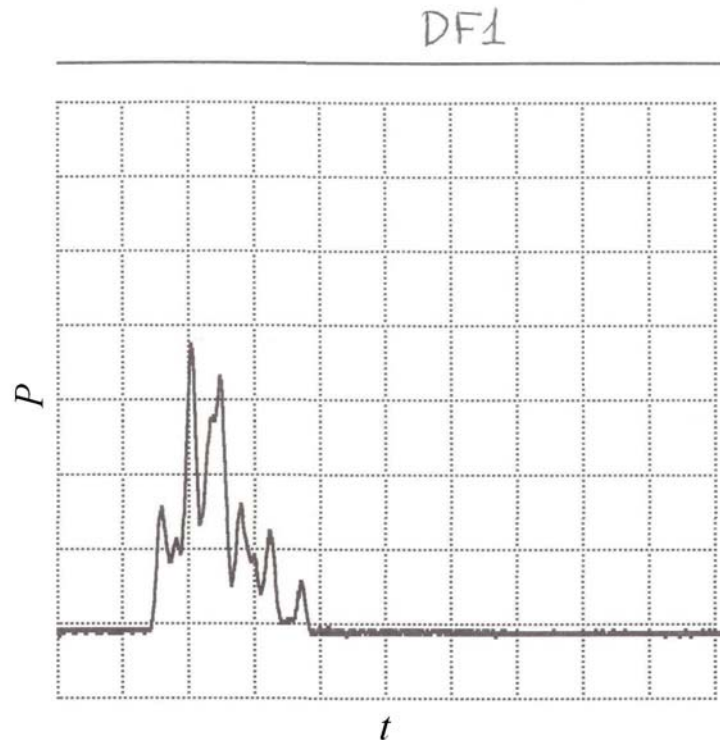


Εικόνα 7.16 – συνέχεια



Εικόνα 7.16 – συνέχεια

Το τελικό ύψος του δοκιμίου είναι 47,8 mm. Συνεπώς, η συνολική βράχυνση είναι 3,2 mm. Από τη μετρητική διάταξη ελήφθη το ακόλουθο διάγραμμα φορτίου – χρόνου (P – t).



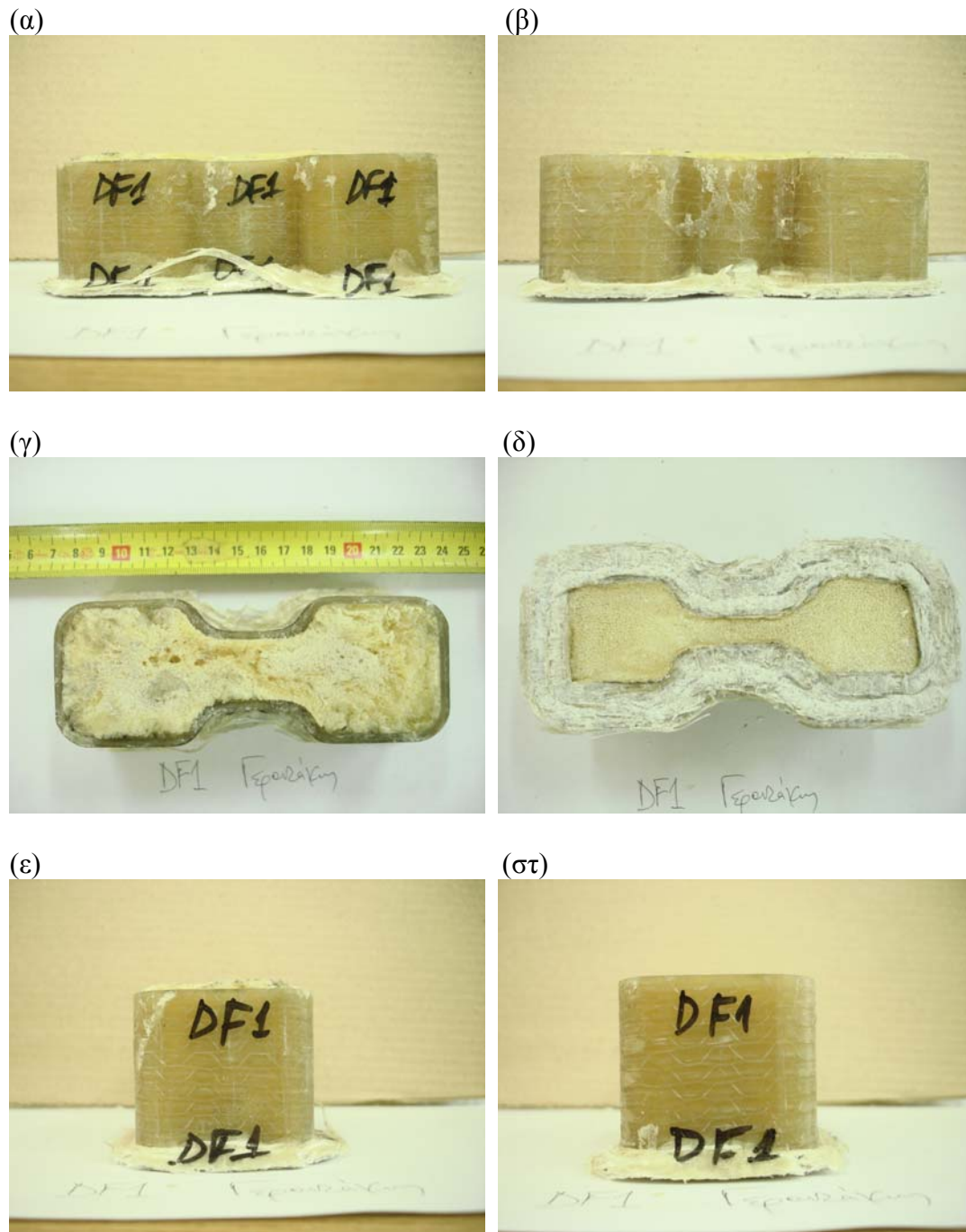
Σχήμα 7.9: Καμπύλη φορτίου – χρόνου (P – t) της κρούσης του δοκιμίου DF1

Παρατηρήσεις επί της δυναμικής καταπόνησης

- Στο διάγραμμα φορτίου – χρόνου διακρίνεται μία περιοχή, στην οποία κυριαρχούν δύο διαδοχικές κορυφές φορτίου.
- Χρονική διάρκεια κρούσης: 4,8 ms
- Μέγιστο σημειούμενο φορτίο: 310 kN
- Μέσο φορτίο: 112,5 kN
- Κατά την καταστροφική αυτή καταπόνηση, οι στρώσεις του συνθέτου αποκολλήθηκαν (delamination) και οι μισές κάμφθηκαν προς το εξωτερικό του δοκιμίου, ενώ οι υπόλοιπες συμπίεστηκαν προς το εσωτερικό του όπου βρισκόταν ο αφρός.
- Η κατάρρευση έλαβε χώρα στο κάτω άκρο του δοκιμίου, δηλαδή σε αυτό που βρισκόταν σε επαφή με τη βάση της σφύρας.

Χαρακτηριστικά απορρόφησης ενέργειας

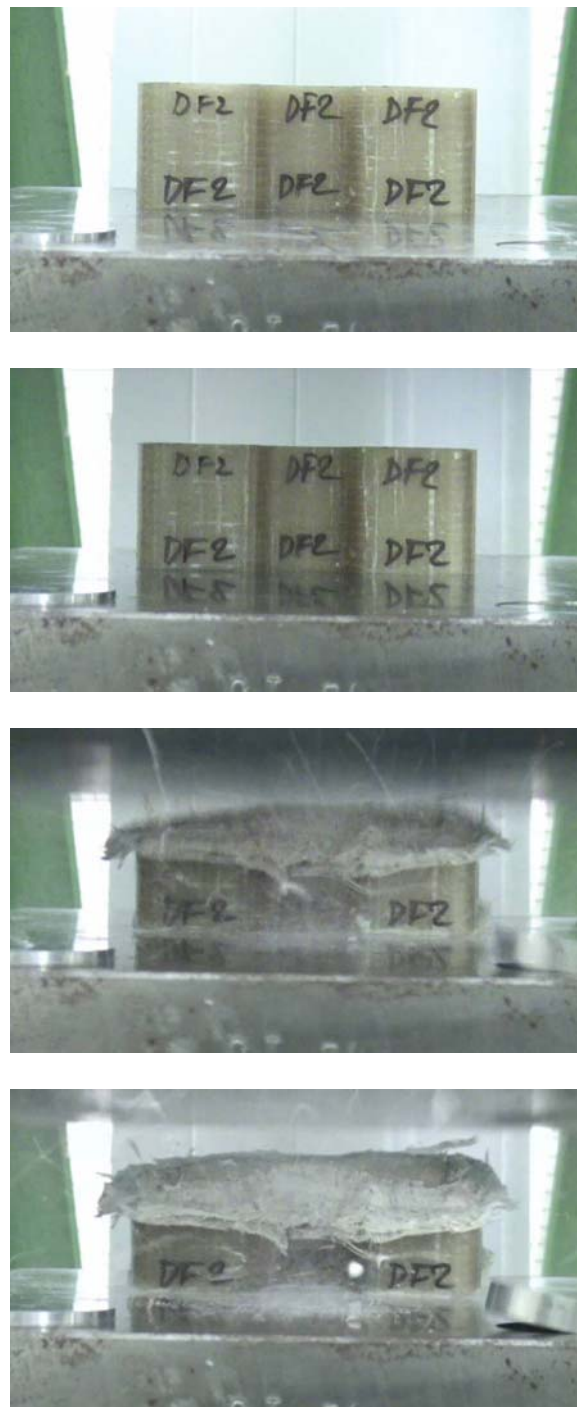
- Συνολική απορροφούμενη ενέργεια: 360 J
- Συντεθλιμμένη μάζα: 8,05 g
- Ειδική ενέργεια απορρόφησης: 44,72 kJ/kg



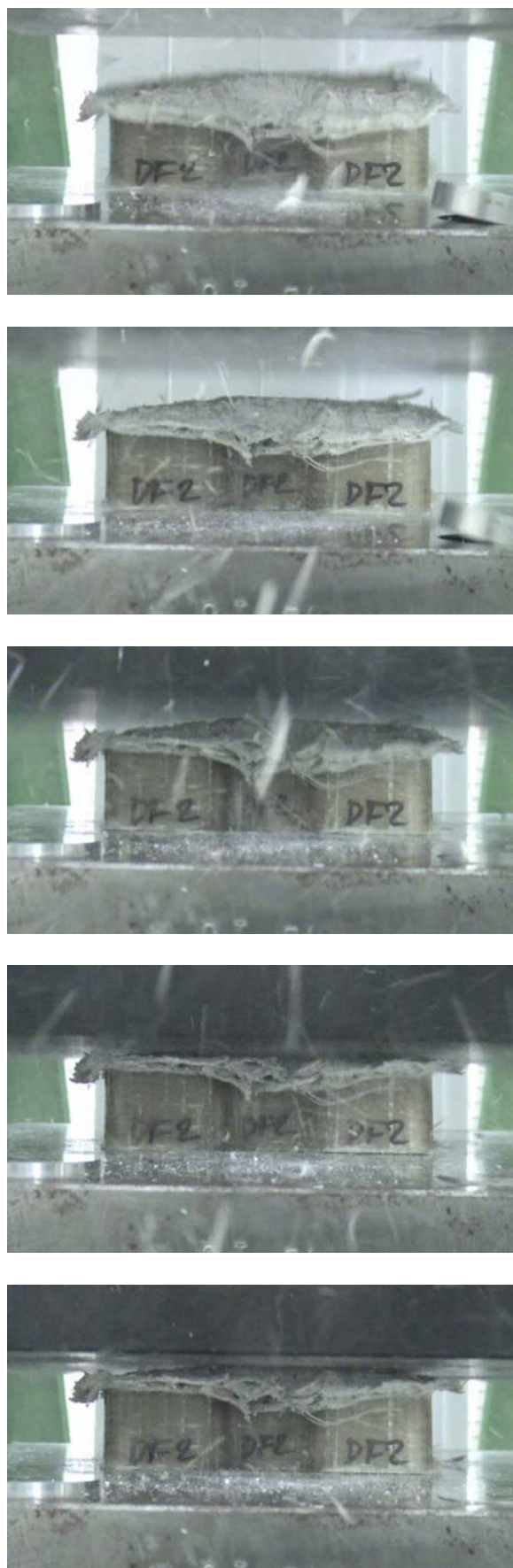
Εικόνα 7.17: Το δοκίμιο DF1 μετά την κατάρρευση: (α) πρόοψη, (β) οπίσθια όψη, (γ) κάτωψη, (δ) άνοψη, (ε) πλάγια από αριστερά όψη, (στ) πλάγια από δεξιά όψη

7.5.6 Δοκίμιο DF2

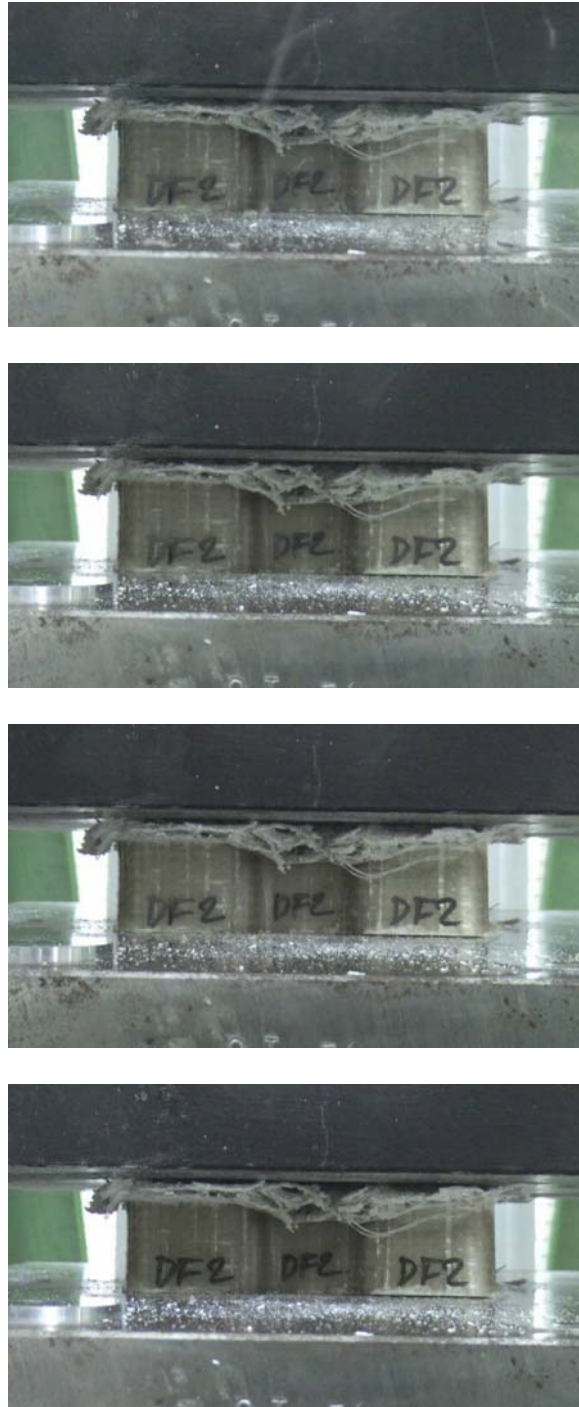
Το δοκίμιο DF2 είναι ένα κέλυφος γεμισμένο με αφρό, με μετρημένο αρχικό ύψος 51,1 mm. Οι αποκλίσεις από αυτήν την τιμή περιφερειακά του κελύφους είναι της τάξης των 0,2 – 0,3 mm. Σε τούτη τη δοκιμή, η πίπτουσα μάζα αφήνεται από ύψος 3 m. Η ταχύτητα πρόσκρουσης που αντιστοιχεί σε αυτό το ύψος πτώσης είναι 7,67 m/s. Ακολουθεί σειρά στιγμιότυπων από τη δοκιμή τούτη.



Εικόνα 7.18: Διαδοχικά καρέ από την κρούση του δοκιμίου DF2

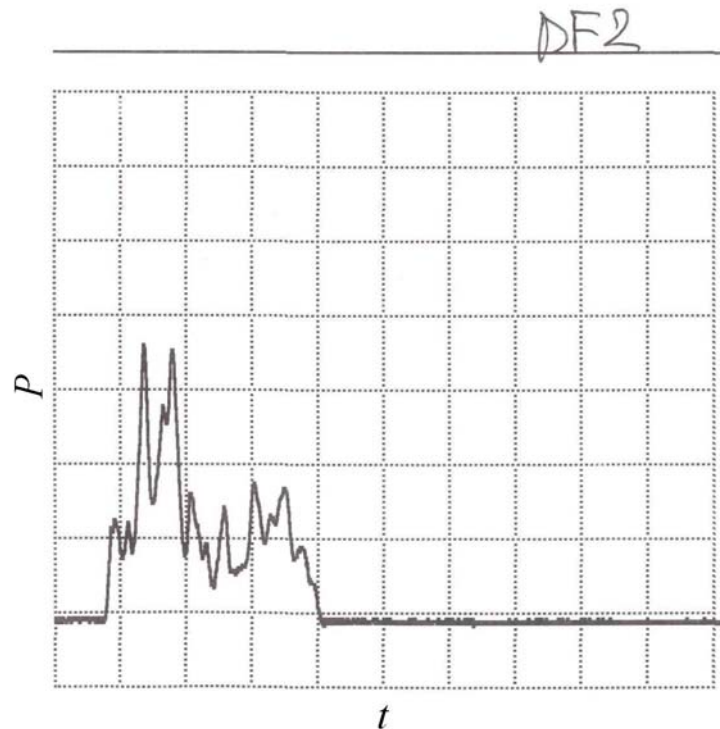


Εικόνα 7.18 – συνέχεια



Εικόνα 7.18 – συνέχεια

Το τελικό ύψος του δοκιμίου είναι 43,4 mm. Συνεπώς, η συνολική βράχυνση είναι 7,7 mm. Από τη μετρητική διάταξη ελήφθη το ακόλουθο διάγραμμα φορτίου – χρόνου (P – t).



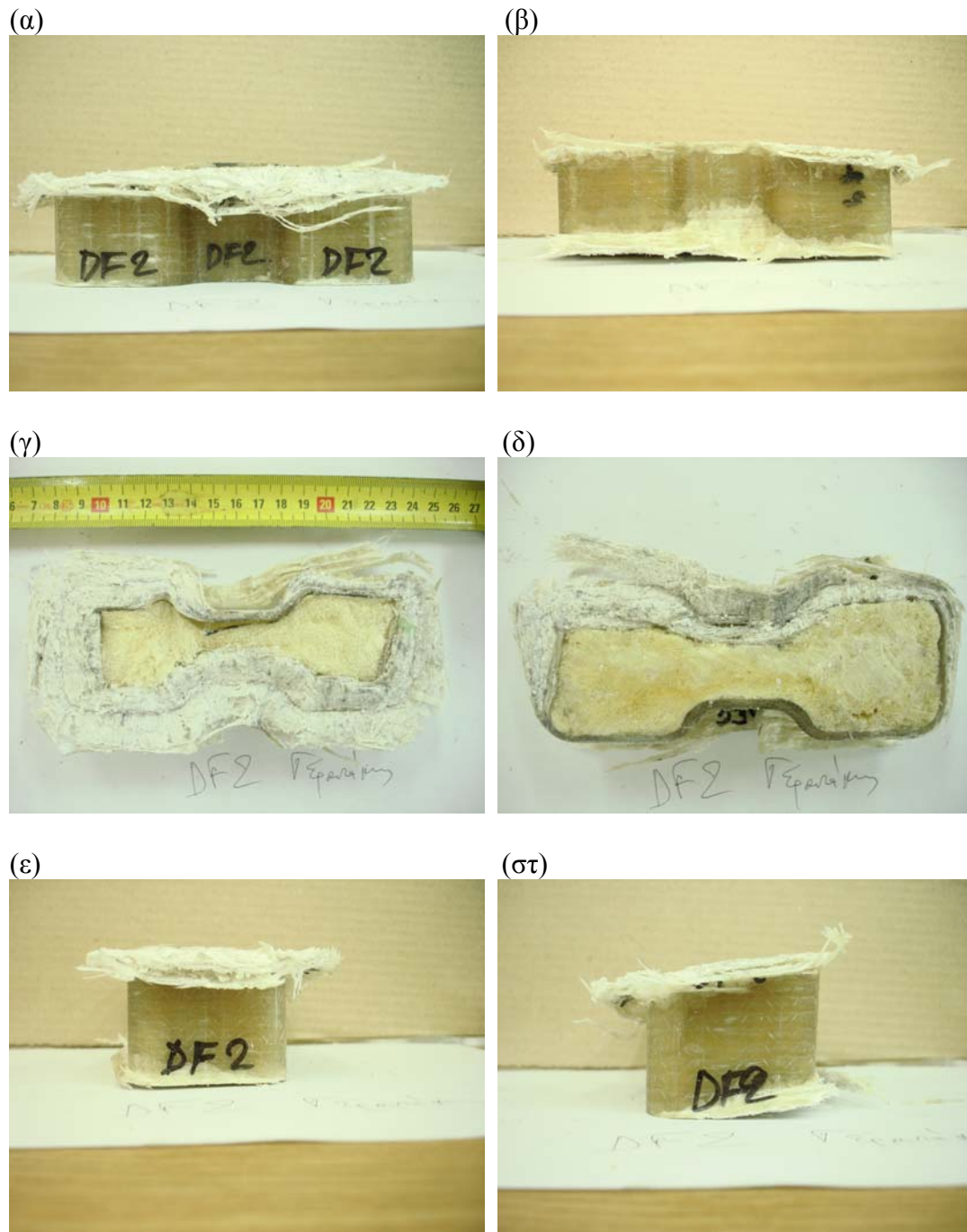
Σχήμα 7.10: Καμπύλη φορτίου – χρόνου ($P - t$) της κρούσης του δοκιμίου DF2

Παρατηρήσεις επί της δυναμικής καταπόνησης

- Στο διάγραμμα φορτίου – χρόνου παρατηρούνται δύο χρονικές περιοχές, οι οποίες όμως έχουν ασαφές μεταξύ τους όριο (το φορτίο δε μηδενίζεται). Τούτο, κατά τα γνωστά, σημαίνει ότι η όποια αναπήδηση της πίπτουσας μάζας είναι ανεπαίσθητη. Στην πρώτη περιοχή κυριαρχούν δύο κορυφές φορτίου, οι οποίες είναι σημαντικά μεγαλύτερες από αυτές της δεύτερης.
- Χρονική διάρκεια κρούσης: 6,6 ms
- Μέγιστο σημειούμενο φορτίο: 296 kN
- Μέσο φορτίο: 108,9 kN
- Κατά την καταστροφική αυτή καταπόνηση, οι στρώσεις του συνθέτου αποκολλήθηκαν (delamination) και οι μισές κάμφθηκαν προς το εξωτερικό του δοκιμίου, ενώ οι υπόλοιπες συμπίεστηκαν προς το εσωτερικό του όπου βρισκόταν ο αφρός.
- Η κατάρρευση έλαβε χώρα και στα δύο άκρα του δοκιμίου. Στο άνω άκρο συνέβη διαστρωματική αποκόλληση σε όλη την περιφέρεια του κελύφους, ενώ στο κάτω άκρο μόνο σε ένα μέρος της περιφέρειάς του.

Χαρακτηριστικά απορρόφησης ενέργειας

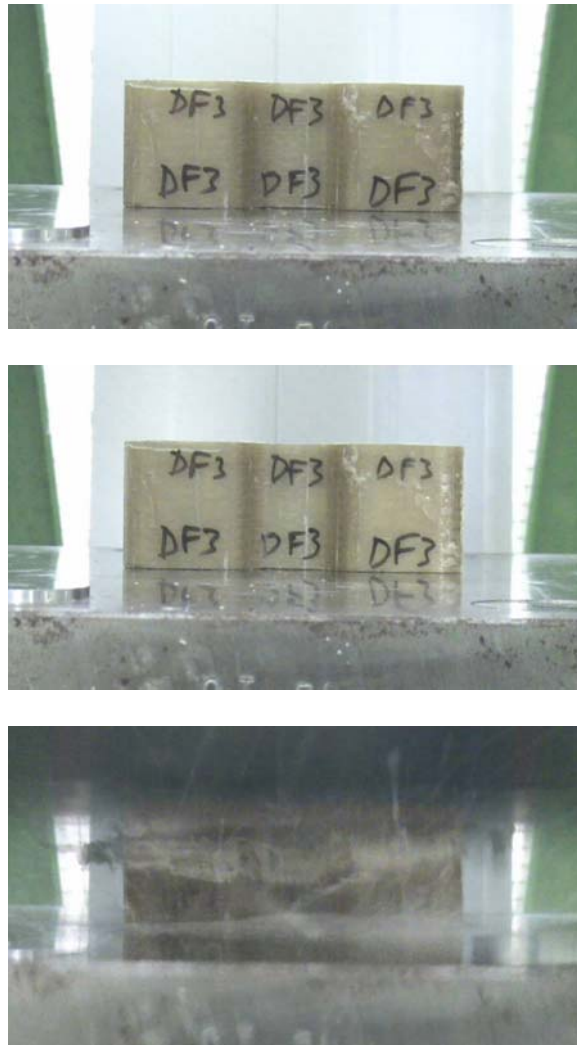
- Συνολική απορροφούμενη ενέργεια: 838,53 J
- Συντεθλιμμένη μάζα: 19,51 g
- Ειδική ενέργεια απορρόφησης: 42,97 kJ/kg



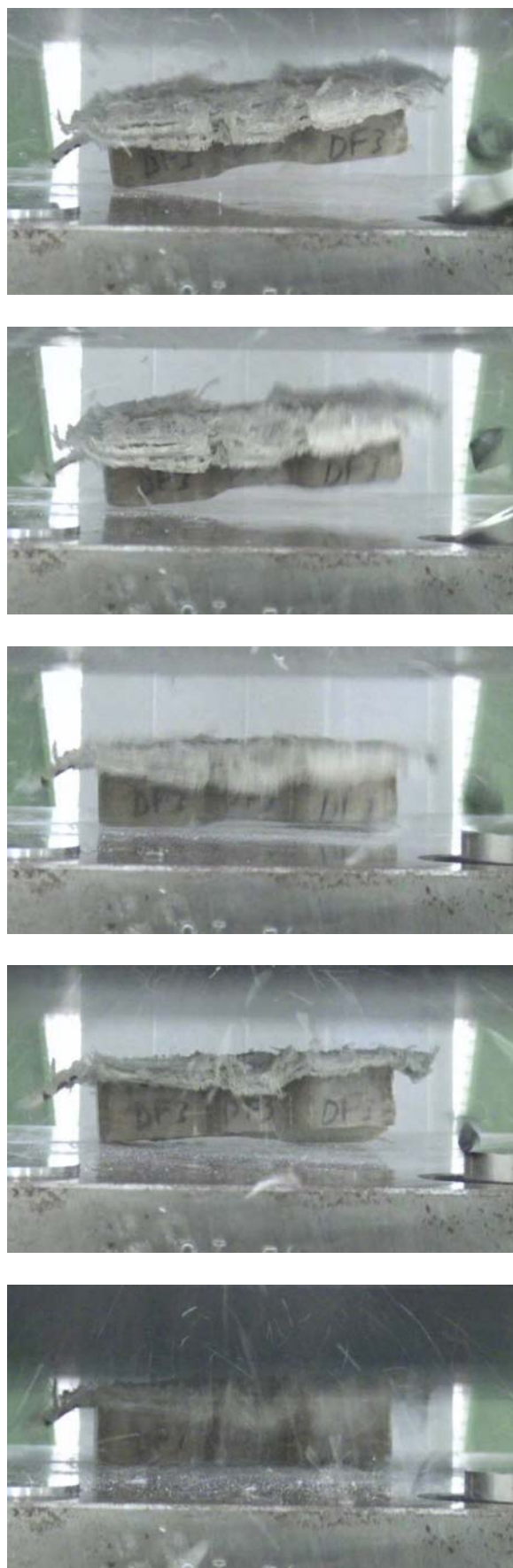
Εικόνα 7.19: Το δοκίμιο DF2 μετά την κατάρρευση: (α) πρόοψη, (β) οπίσθια όψη, (γ) κάτωψη, (δ) άνοψη, (ε) πλάγια από αριστερά όψη, (στ) πλάγια από δεξιά όψη

7.5.7 Δοκίμιο DF3

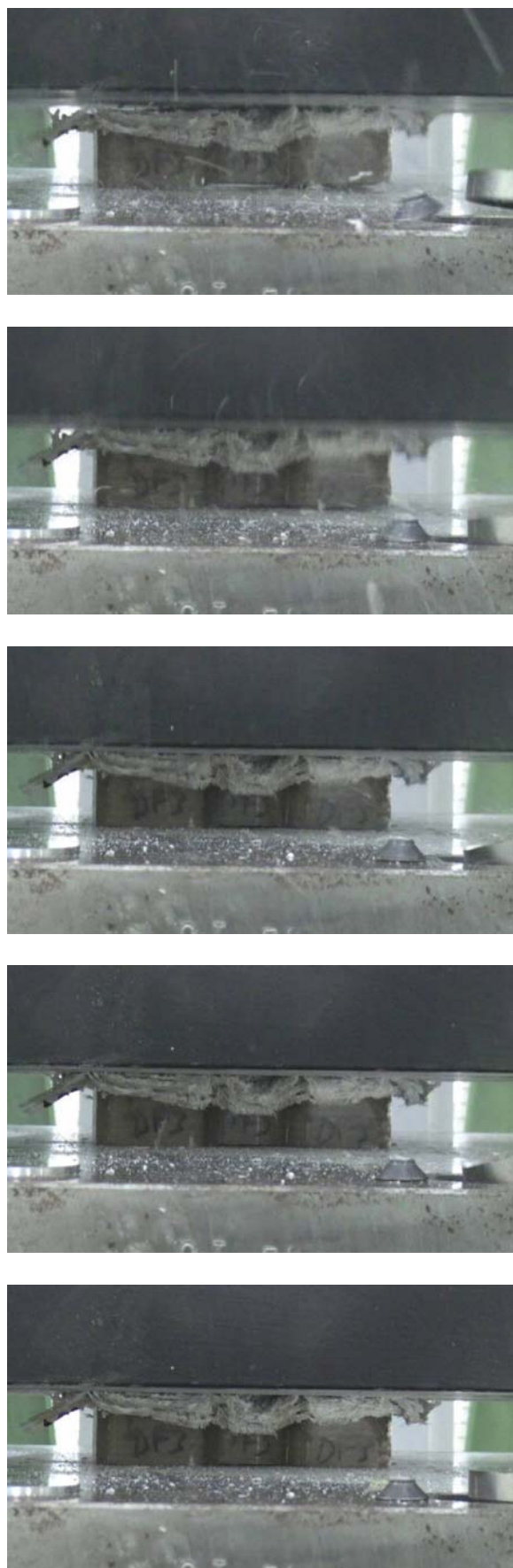
Το δοκίμιο DF3 είναι ένα κέλυφος γεμισμένο με αφρό, με μετρημένο αρχικό ύψος 50,9 mm. Οι αποκλίσεις από αυτήν την τιμή περιφερειακά του κελύφους είναι της τάξης των 0,2 – 0,3 mm. Σε τούτη τη δοκιμή, η πίπτουσα μάζα αφήνεται από ύψος 4,5 m. Η ταχύτητα πρόσκρουσης που αντιστοιχεί σε αυτό το ύψος πτώσης είναι 9,40 m/s. Ακολουθεί σειρά στιγμιότυπων από τη δοκιμή τούτη, στην οποία το πρώτο αναπαριστά την κατάσταση του δοκιμίου πριν την πρόσκρουση της πίπτουσας μάζας και το τελευταίο προβάλλει τη μορφή του μετά την απομάκρυνσή της.



Εικόνα 7.20: Διαδοχικά καρέ από την κρούση του δοκιμίου DF3



Εικόνα 7.20 – συνέχεια

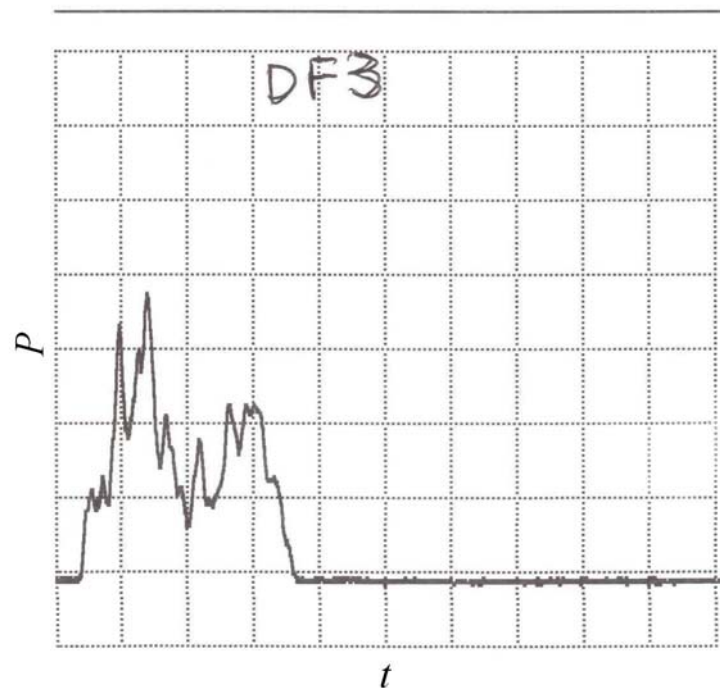


Εικόνα 7.20 – συνέχεια



Εικόνα 7.20 – συνέχεια

Το τελικό ύψος του δοκιμίου είναι 34 mm. Συνεπώς, η συνολική βράχυνση είναι 16,9 mm. Από τη μετρητική διάταξη ελήφθη το ακόλουθο διάγραμμα φορτίου – χρόνου ($P - t$).



Σχήμα 7.11: Καμπύλη φορτίου – χρόνου ($P - t$) της κρούσης του δοκιμίου DF3

Παρατηρήσεις επί της δυναμικής καταπόνησης

- Κι εδώ διακρίνονται δύο χρονικές περιοχές στο διάγραμμα φορτίου – χρόνου, με τις κορυφές του φορτίου να είναι υψηλότερες στην πρώτη περιοχή.
- Χρονική διάρκεια κρούσης: 6,6 ms
- Μέγιστο σημειούμενο φορτίο: 308 kN
- Μέσο φορτίο: 133,9 kN

- Κατά την καταστροφική αυτή καταπόνηση, οι στρώσεις του συνθέτου αποκολλήθηκαν (delamination) και οι μισές κάμφθηκαν προς το εξωτερικό του δοκιμίου, ενώ οι υπόλοιπες συμπιέστηκαν προς το εσωτερικό του όπου βρισκόταν ο αφρός.
- Η κατάρρευση έλαβε χώρα στο άνω άκρο του δοκιμίου, δηλαδή σε αυτό που ήρθε σε επαφή με την πίπτουσα μάζα.

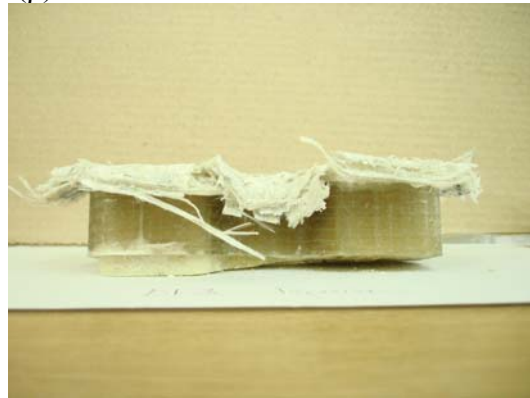
Χαρακτηριστικά απορρόφησης ενέργειας

- Συνολική απορροφούμενη ενέργεια: 2262,91 J
- Συντεθλιμμένη μάζα: 46,68 g
- Ειδική ενέργεια απορρόφησης: 48,47 kJ/kg

(α)



(β)



(γ)



(δ)



(ε)



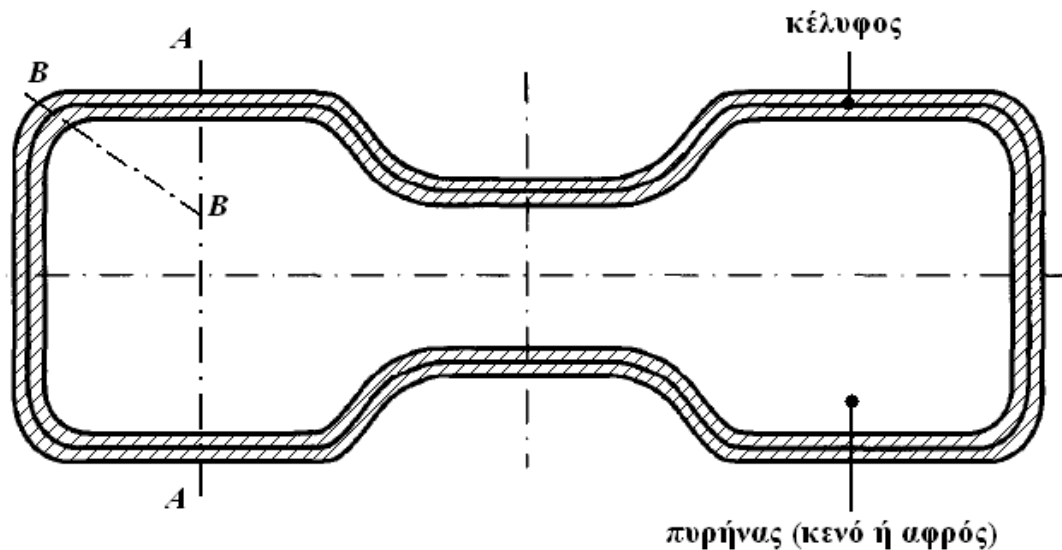
(στ)



Εικόνα 7.21: Το δοκίμιο DF3 μετά την κατάρρευση: (α) πρόοψη, (β) οπίσθια όψη, (γ) κάτωψη, (δ) άνοψη, (ε) πλάγια από αριστερά όψη, (στ) πλάγια από δεξιά όψη

7.6 Μικρογραφική διερεύνηση

Μετά την ολοκλήρωση των πειραμάτων παρατηρήθηκαν οι μορφές κατάρρευσης των καταπονημένων δοκιμίων. Ακολούθως, κρίθηκε σκόπιμο να παρασταθούν με λεπτομέρεια οι μορφές αυτές σε δύο ενδεικτικές θέσεις περιφερειακά του κελύφους. Για το λόγο τούτο, τα δοκίμια που επρόκειτο να εξετασθούν ετμήθησαν εγκάρσια στο ένα μισό του κελύφους (τομή A – A, Σχήμα 7.12), αλλά και υπό γωνία στην εξωτερική γωνία του κελύφους (τομή B – B, Σχήμα 7.12).



Σχήμα 7.12: Εφαρμογή τομών για την εξέταση της μορφής κατάρρευσης των δοκιμίων

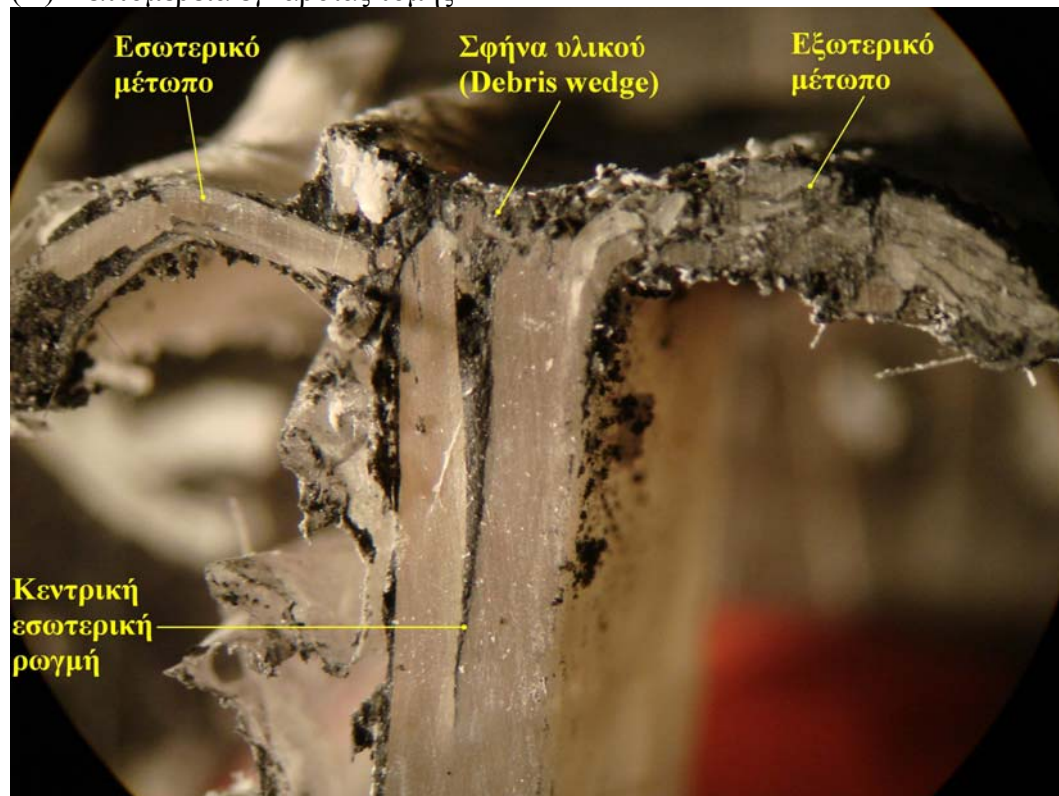
Εν συνεχεία, για να παρατηρηθούν και να φωτογραφηθούν οι ατέλειες λόγω κατάρρευσης των δοκιμίων, χρησιμοποιήθηκε στερεοσκόπιο (Εικόνα 7.22).



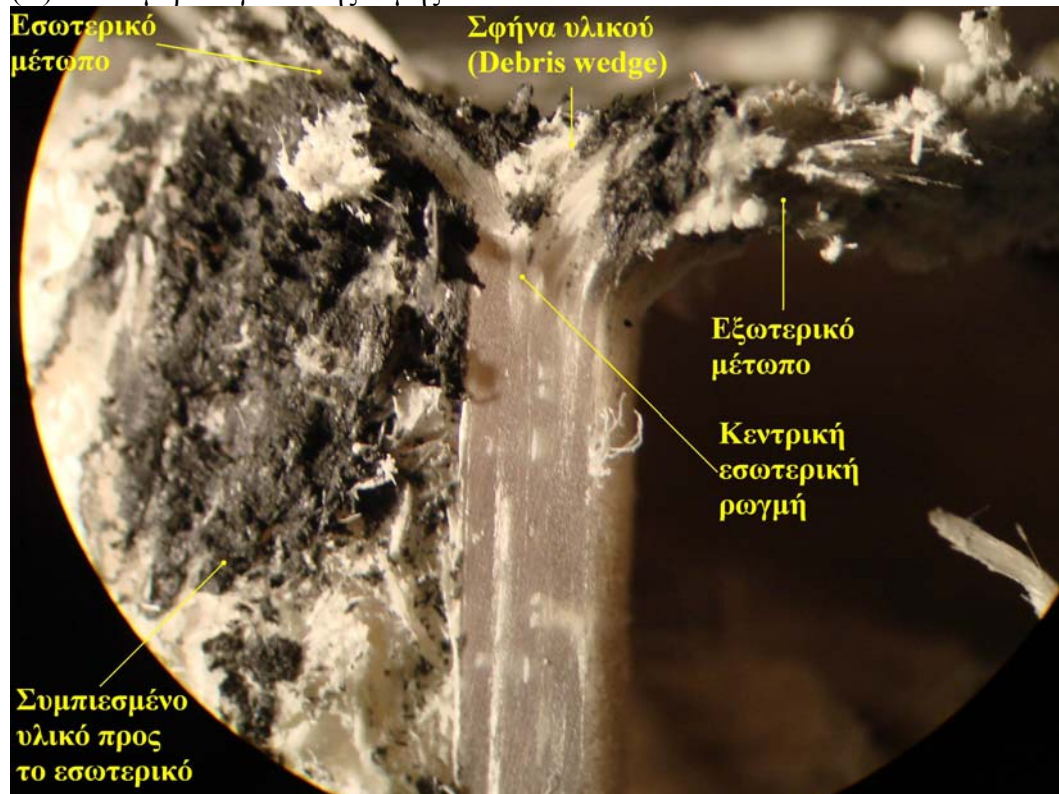
Εικόνα 7.22: Στερεοσκόπιο

Δοκίμιο SE1

(A) Λεπτομέρεια εγκάρσιας τομής



(B) Λεπτομέρεια γωνιακής τομής



Εικόνα 7.23: Μορφή κατάρρευσης δοκιμίου SE1

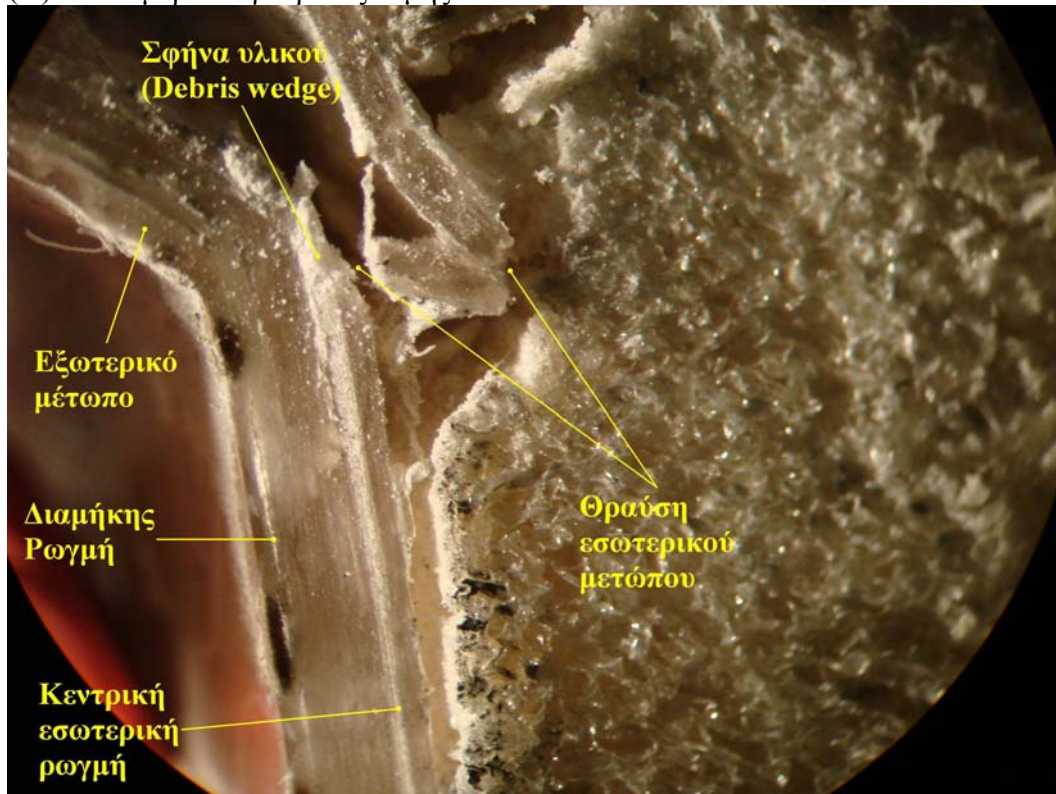
(Γ) Πλήρης τομή A – A



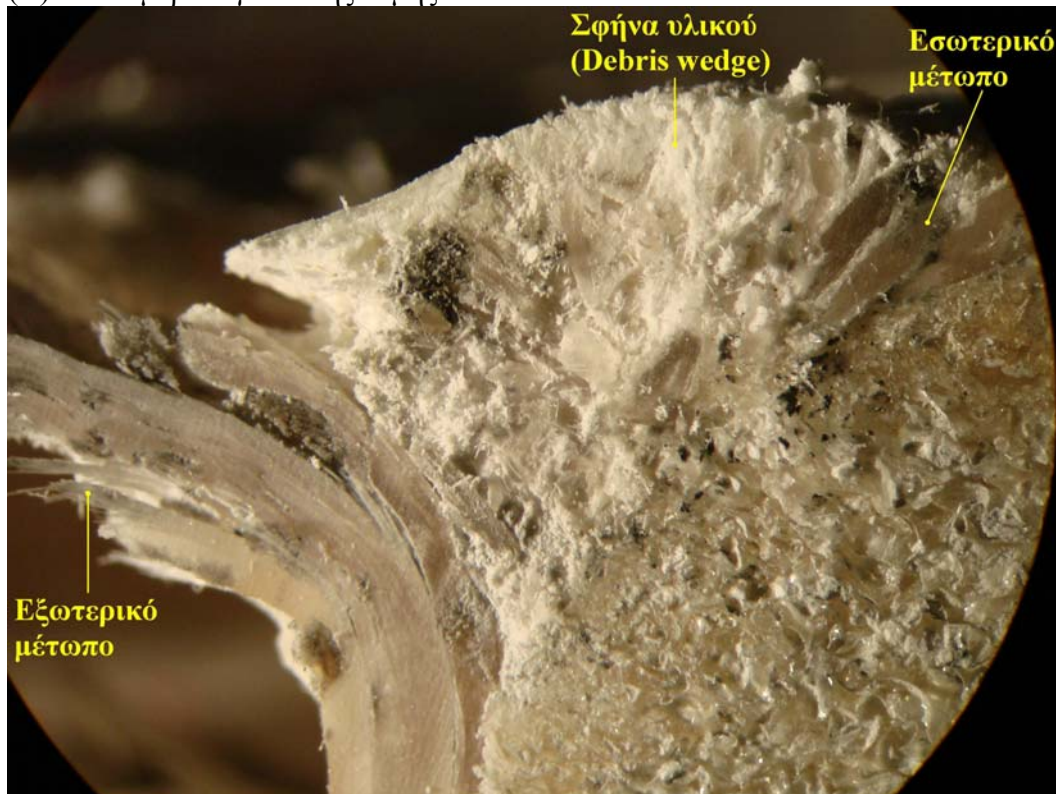
Εικόνα 7.23 – συνέχεια

Δοκίμιο SF2

(A) Λεπτομέρεια εγκάρσιας τομής



(B) Λεπτομέρεια γωνιακής τομής



Εικόνα 7.24: Μορφή κατάρρευσης δοκιμίου SF2

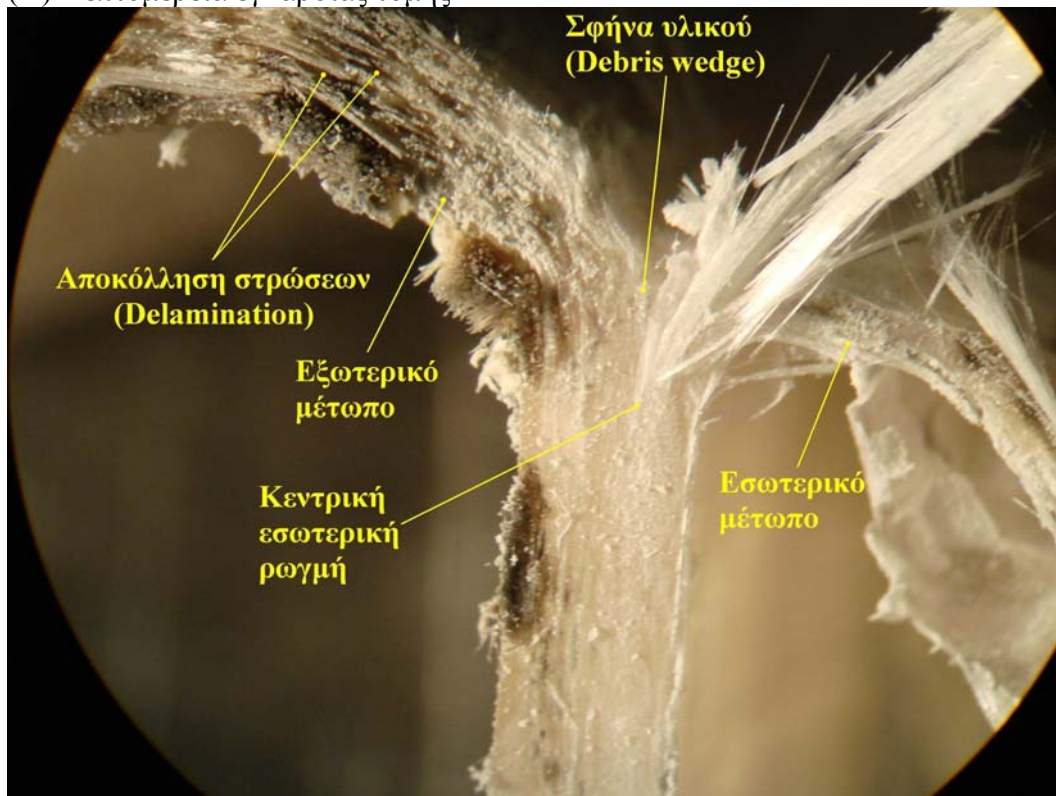
(Γ) Πλήρης τομή A – A



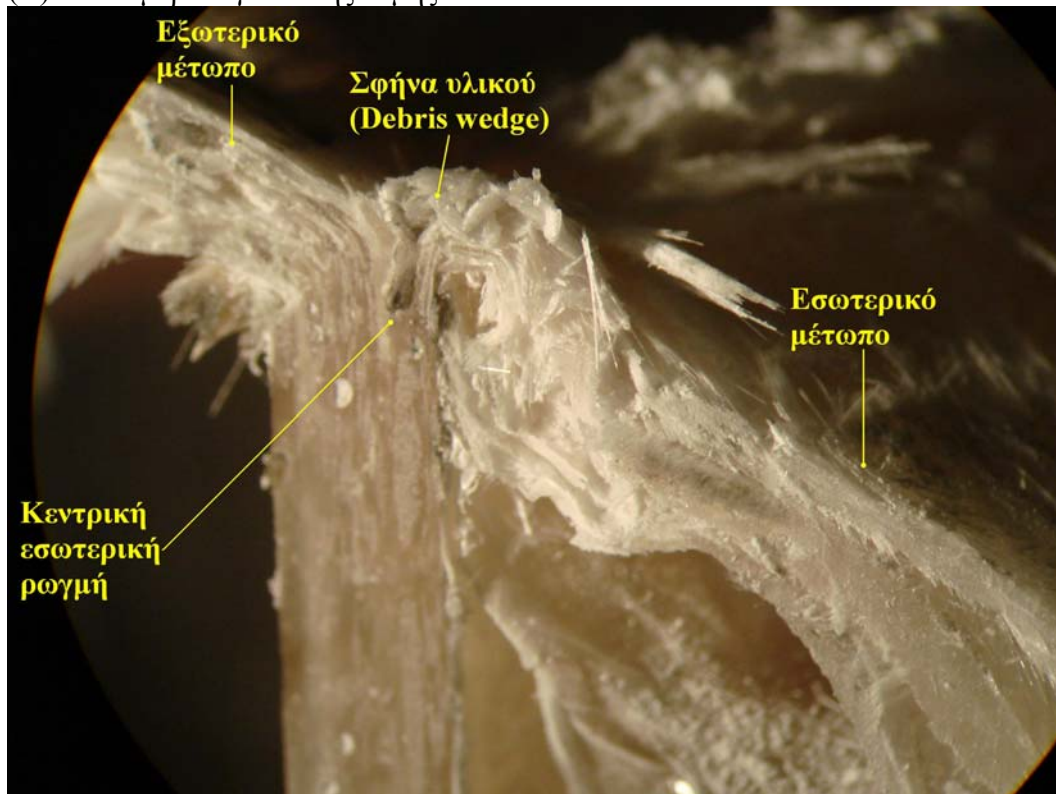
Εικόνα 7.24 – συνέχεια

Δοκίμιο DE2

(A) Λεπτομέρεια εγκάρσιας τομής



(B) Λεπτομέρεια γωνιακής τομής



Εικόνα 7.25: Μορφή κατάρρευσης δοκιμίου DE2

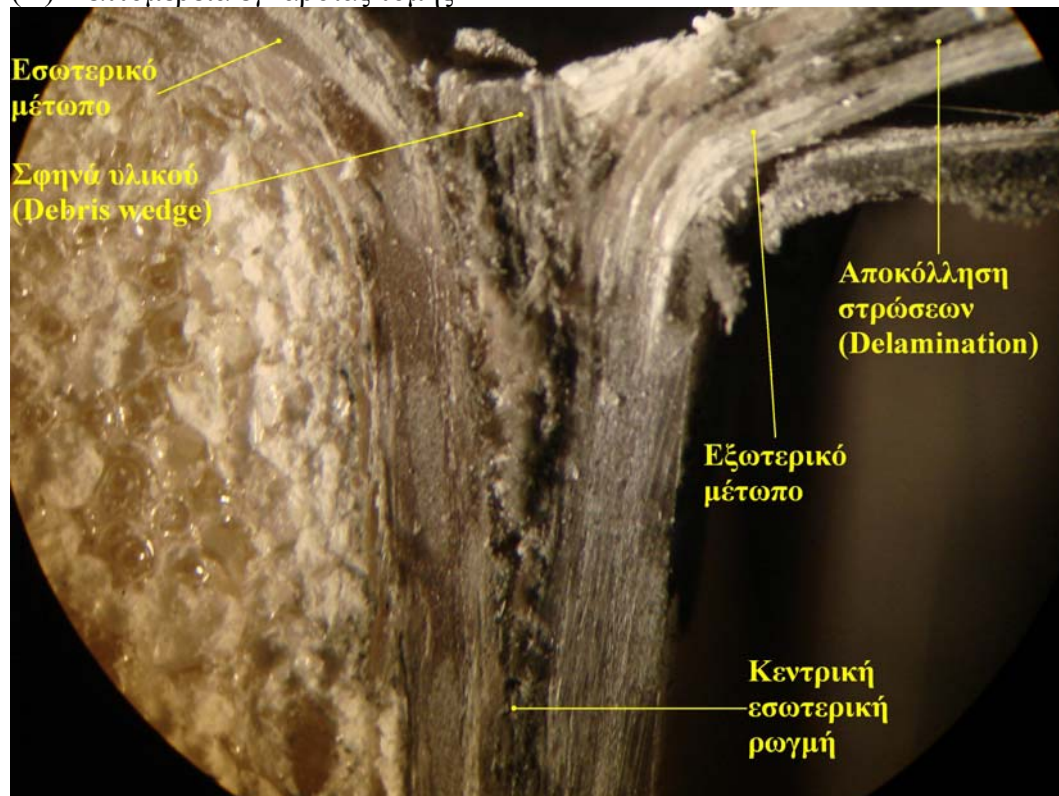
(Γ) Πλήρης τομή A – A



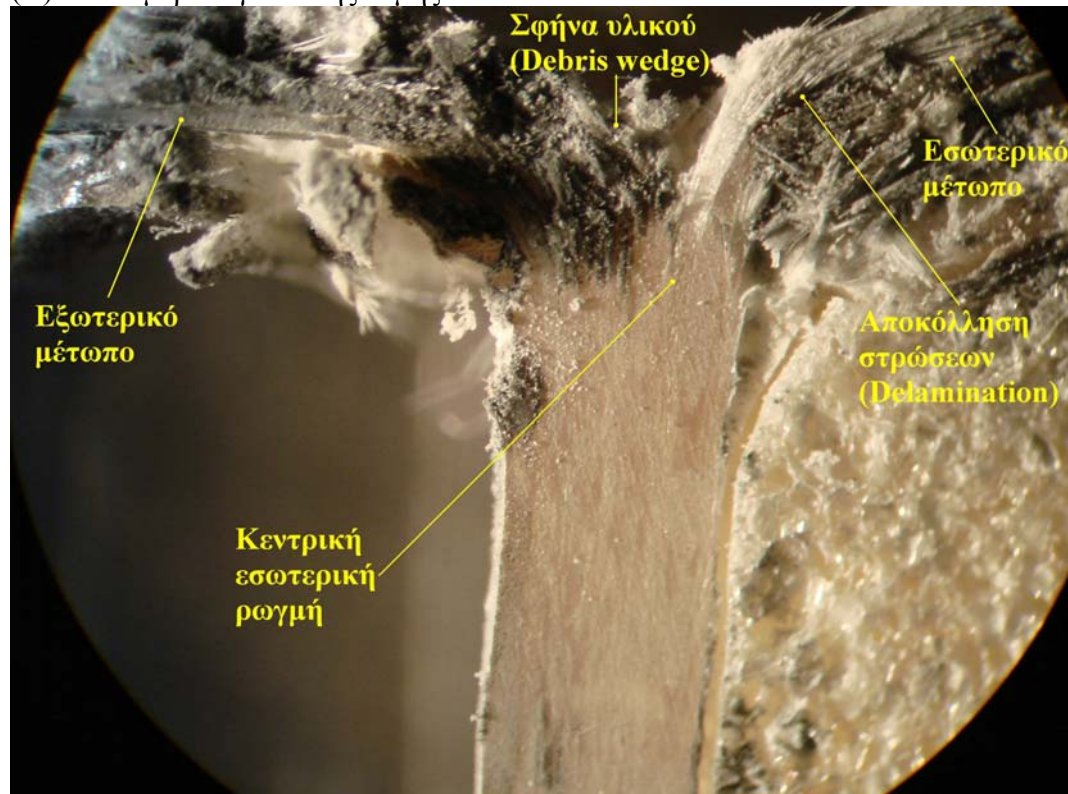
Εικόνα 7.25 – συνέχεια

Δοκίμιο DF1

(A) Λεπτομέρεια εγκάρσιας τομής



(B) Λεπτομέρεια γωνιακής τομής



Εικόνα 7.26: Μορφή κατάρρευσης δοκιμίου DF1

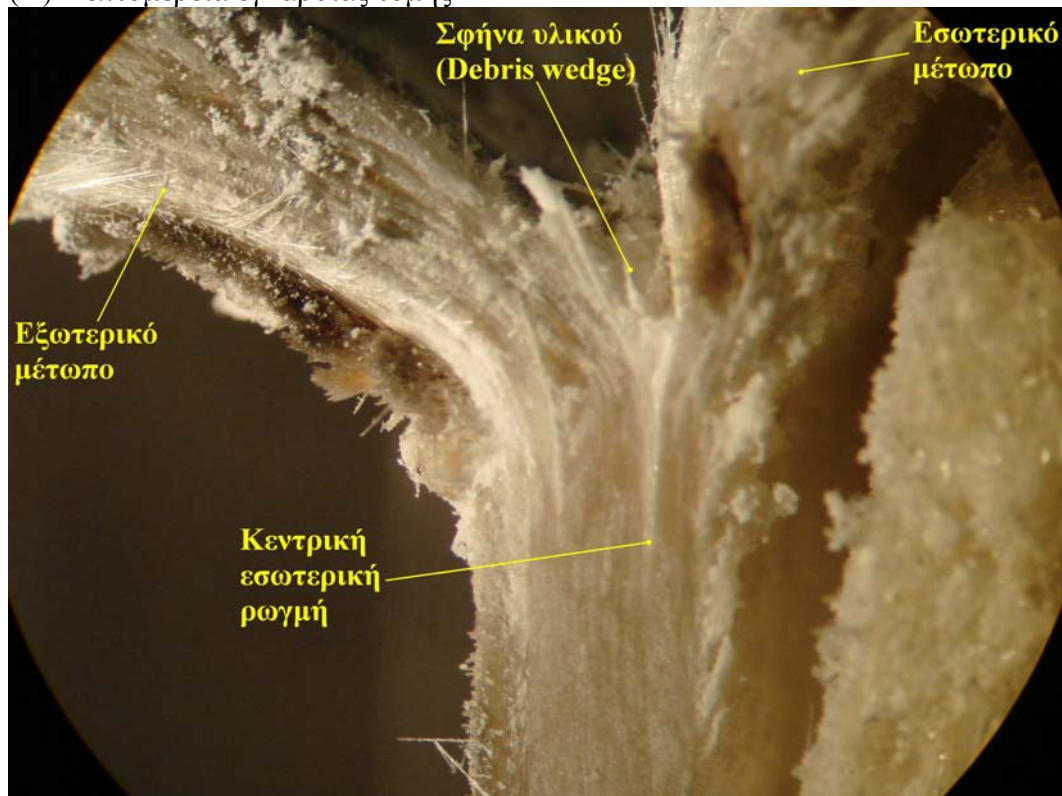
(Γ) Πλήρης τομή A – A



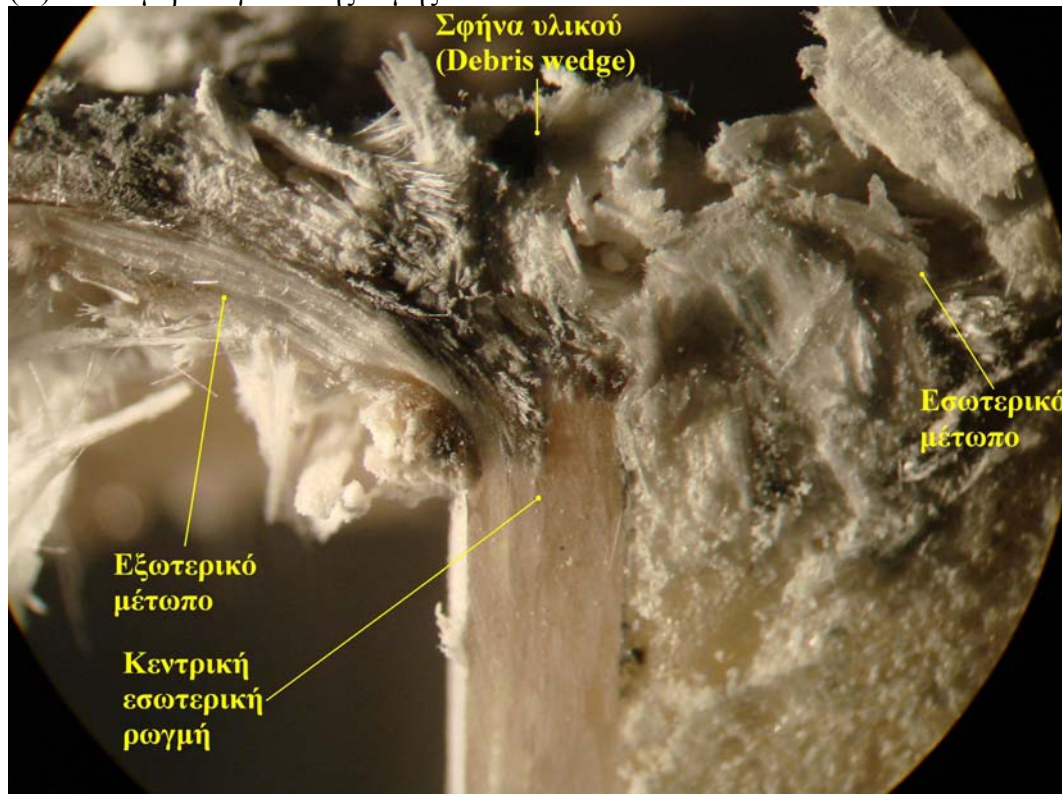
Εικόνα 7.26 – συνέχεια

Δοκίμιο DF2

(A) Λεπτομέρεια εγκάρσιας τομής



(B) Λεπτομέρεια γωνιακής τομής



Εικόνα 7.27: Μορφή κατάρρευσης δοκιμίου DF2

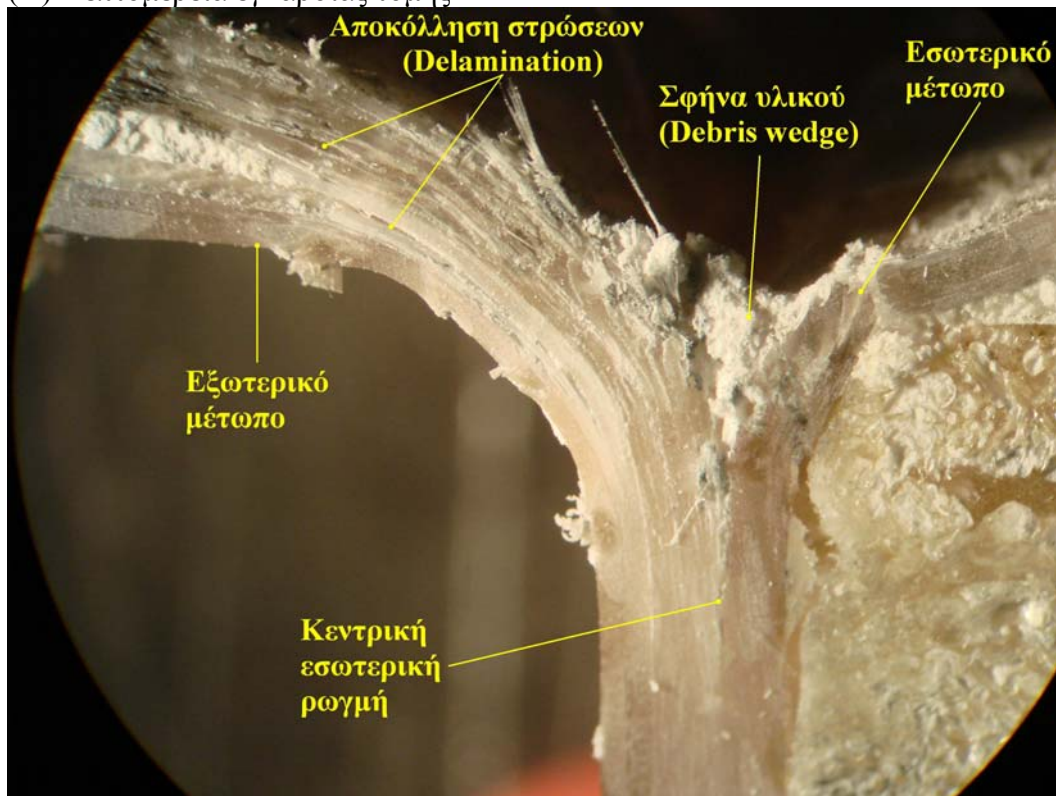
(Γ) Πλήρης τομή A – A



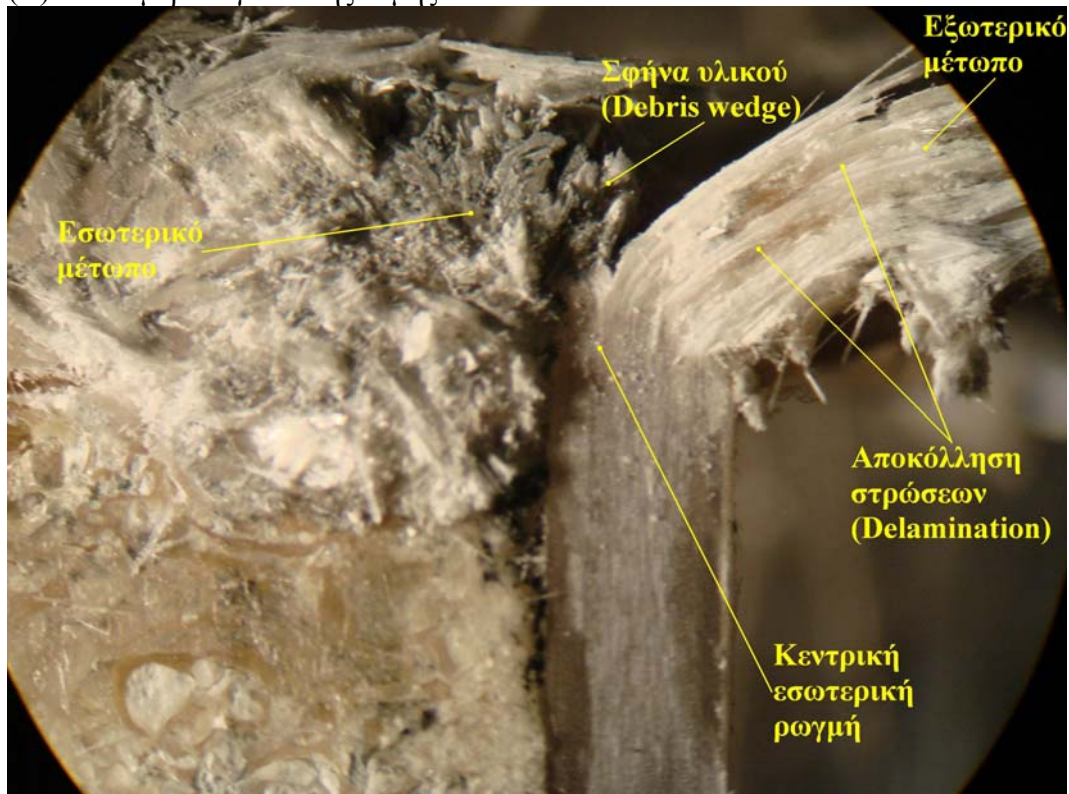
Εικόνα 7.27 – συνέχεια

Δοκίμιο DF3

(A) Λεπτομέρεια εγκάρσιας τομής



(B) Λεπτομέρεια γωνιακής τομής



Εικόνα 7.28: Μορφή κατάρρευσης δοκιμίου DF3

(Γ) Πλήρης τομή A – A



Εικόνα 7.28 – συνέχεια

Γενικές παρατηρήσεις

- Διακρίνεται μία εμφανής ζώνη παραμόρφωσης, η οποία μετατοπίζεται αξονικά προς το μέσο (κατά το μήκος) του κελύφους. Πρωτεύον χαρακτηριστικό της αποτελεί ο σχηματισμός μιας σφήνας από κονιοποιημένο υλικό (θραυσμένες ίνες γυαλιού αναμεμιγμένες με ρητίνη), η οποία πιέζει αξονικά προς τα κάτω, προξενώντας τη διάδοση μιας κεντρικής ρωγμής εσωτερικά του τοιχώματος του κελύφους.
- Σχηματίζεται μία αρχική ζώνη θραύσης από την περαιτέρω διείσδυση της σφήνας κονιοποιημένου υλικού (debris wedge), με επακόλουθο μία σταθερά κινούμενη εσωτερική ρωγμάτωση μέσα στο τοίχωμα του κελύφους κατά τη διάρκεια της επιβολής του φορτίου. Ως εκ τούτου, προκαλείται ο διαχωρισμός των στρώσεων σε δύο δέσμες που καλούνται μέτωπα: το εξωτερικό μέτωπο (external frond), το οποίο έχει κατεύθυνση προς το περιβάλλον του κελύφους και το εσωτερικό μέτωπο (internal frond), το οποίο έχει κατεύθυνση προς τον πυρήνα του.
- Τα μέτωπα ανθίστανται στο εφαρμοζόμενο φορτίο μέχρι μιας κρίσιμης τιμής του και τελικά κάμπτονται με τάση βοστρυχοποίησης. Βεβαίως, η τάση αυτή δεν παρουσιάζεται στην περίπτωση των εσωτερικών μετώπων δοκιμίων με αφρό.
- Στα δοκίμια που είναι κενά τα δύο μέτωπα τείνουν να έχουν το ίδιο πάχος (εικόνες 7.23 και 7.25). Στην περίπτωση αυτή, το εσωτερικό μέτωπο είναι

εμφανώς πιο κυρτωμένο από το εξωτερικό, λόγω ελλείψεως χώρου που δεν του επιτρέπει να αναπτυχθεί ελεύθερα.

- Στα γεμισμένα με αφρό δοκίμια το εξωτερικό μέτωπο είναι συνήθως πολύ πιο παχύ από το εσωτερικό. Τούτο οφείλεται στο γεγονός ότι υλικό του κελύφους έχει πολύ περιορισμένο χώρο μεταξύ αφρού και εμβόλου της πρέσας ή πίπτουσας μάζας. Συνεπώς το μεγαλύτερο ποσοστό του οδηγείται στο εξωτερικό μέτωπο. Τοιουτοτρόπως, και η κεντρική ρωγμή στην περίπτωση αυτή δεν αναπτύσσεται στο μέσο του πάχους του κελύφους, αλλά πλησίον της εσωτερικής πλευράς του.
- Παρατηρείται αστοχία λόγω κάμψης μεμονωμένων στρώσεων στα όρια της διαστρωματικής αποκόλλησης, λόγω μικρής ακτίνας καμπυλότητας.
- Στις γωνιακές τομές των δοκιμίων, στα εσωτερικά μέτωπα σημειώνεται μεγάλη συσσώρευση υλικού, όταν πρόκειται για δοκίμια με μεγάλη βράχυνση (εικόνες 7.23(B) και 7.28(B)).

ΣΥΝΟΨΗ

8.1 Αποτελέσματα

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα συνολικά αποτελέσματα από τα πειράματα που διενεργήθηκαν.

Πίνακας 8.1

Δοκίμιο	Ταχύτητα παραμόρφωσης, $\dot{\epsilon}$ (s ⁻¹)	Βράχυνση (mm)	Μέγιστο φορτίο, P_{\max} (kN)	Μέσο φορτίο, \bar{P} (kN)	Συνολική απορροφούμενη ενέργεια, W (J)	Ειδική ενέργεια, W_s (kJ/kg)
Στατικές καταπονήσεις						
SE1	0,00212	32,5	230,49	120,0	3901,15	64,71
SE2	0,00300	35,3	221,87	120,4	4251,73	65,04
SF1	0,00248	38,4	231,40	108,7	4174,26	41,12
SF2	0,00255	39,0	196,18	139,4	5401,93	52,60
Δυναμικές καταπονήσεις						
DE1	53,186	6,3	214	65,3	411,39	35,72
DE2	75,216	9,0	237	68,8	619,2	37,82
DE3	92,120	38,7	231	94,4	3653,28	50,25
DF1	53,186	3,2	310	112,5	360,0	44,72
DF2	75,216	7,7	296	108,9	838,53	42,97
DF3	92,120	16,9	308	133,9	2262,91	48,47

8.2 Παρατηρήσεις επί των στατικών δοκιμών

Χαρακτηριστικό των καμπύλων φορτίου – μετατόπισης των στατικών δοκιμών είναι ότι το φορτίο ανέρχεται μέχρι μία μέγιστη τιμή της τάξης των 220 kN, όπου και σημειώνεται η πρώτη θραύση, η οποία συνοδεύεται από απότομη μείωση του φορτίου. Η μέγιστη αυτή τιμή σημειώνεται για βράχυνση περίπου 2,3 mm. Τα παραπάνω ισχύουν τόσο για τα κενά, όσο και για τα πληρωμένα με αφρό κελύφη. Τούτο σημαίνει ότι η ελαστική περιοχή κατά την παραμόρφωση των δοκιμών εξαρτάται μόνο από το κέλυφος, όχι από τον ενδεχόμενα περιεχόμενο αφρό. Η αιτία της παρατήρησης αυτής εντοπίζεται στο γεγονός ότι ο αφρός είναι πολύ λιγότερο στιβαρός σε σχέση με το σύνθετο κέλυφος, δηλαδή μπορεί να παραμορφωθεί περισσότερο από αυτό. Επομένως, όταν το κέλυφος φθάσει την παραμόρφωση θραύσης του, αυτό θα υποστεί ρωγμάτωση, χωρίς ο αφρός να προσφέρει κάτι στην αντοχή του δοκιμίου.

Μετά την απότομη πτώση του φορτίου λόγω της θραύσης, αυτό αρχίζει να αυξάνεται και πάλι για σχετικά μικρή περαιτέρω βράχυνση. Η τιμή που το φορτίο προσεγγίζει σε αυτήν τη μεταβατική περιοχή είναι σαφώς μικρότερη του μέγιστου φορτίου της προηγούμενης (ελαστικής) περιοχής.

Εν τέλει, το φορτίο αρχίζει να λαμβάνει μία σταθερή τιμή, ταλαντευόμενο γύρω από αυτή. Η περιοχή τούτη είναι η περιοχή προοδευτικής κατάρρευσης και αποτελεί τη σημαντικότερη φάση φόρτισης από την άποψη της απορρόφησης ενέργειας. Εδώ, κάνει αισθητή την παρουσία του ο αφρός. Έτσι, στα γεμισμένα με αφρό δοκίμια το φορτίο της προοδευτικής κατάρρευσης είναι εμφανώς μεγαλύτερο από το αντίστοιχο των κενών. Συνεπώς, το συνολικά μέσο φορτίο των κενών κελυφών (SE1, SE2) είναι στα 120 kN, ενώ του δοκιμίου SF2 είναι στα 140 kN. Εξαίρεση συνιστά το δοκίμιο SF1, του οποίου η απροσδόκητη θραύση της μήτρας του σύνθετου κελύφους περί τα μέσα της φόρτισης μείωσε αρκετά το συνολικά μέσο φορτίο στα 109 kN. Ο αφρός, λοιπόν, συντελεί στην αύξηση του μέσου φορτίου, διότι όταν το κέλυφος έχει αρχίσει να καταρρέει η αντίσταση στη συμπίεση είναι μεγαλύτερη από ότι αν δεν υπήρχε ο αφρός.

Όλα τα παραπάνω οδηγούν σε μία συνολική απορρόφηση ενέργειας για τα μεν κενά κελύφη της τάξης των 4,1 kJ, ενώ με την πλήρωση με αφρό η απορρόφηση ενέργειας φτάνει τα 5,4 kJ. Δηλαδή με την προσθήκη αφρού μέσα στα κελύφη είχαμε μία αύξηση 32% στην απορροφούμενη ενέργεια. Πρέπει να σημειωθεί, βεβαίως, ότι η επιβαλλόμενη βράχυνση στα δοκίμια με τον αφρό ήταν ελαφρώς μεγαλύτερη αυτής των κενών και ότι το δοκίμιο SF1, για λόγους που αναφέρθηκαν παραπάνω, απορρόφησε μόνο 4,2 kJ. Η αντίστροφη τάση παρατηρείται στο μέγεθος της ειδικής ενέργειας απορρόφησης. Τα κενά κελύφη παρουσιάζουν μεγαλύτερη ειδική ενέργεια, με τιμή γύρω στα 64,9 kJ/kg, από τα γεμάτα με αφρό κελύφη (το SF2 δίνει 52,6 kJ/kg). Τούτο συμβαίνει επειδή, αν και με την προσθήκη του αφρού η ενέργεια αυξήθηκε, το βάρος των δοκιμίων αυξήθηκε περισσότερο. Κατά συνέπεια, προκλήθηκε αυτή η πτώση της τάξης του 19% στην ειδική ενέργεια.

8.3 Παρατηρήσεις επί των δυναμικών δοκιμών

Στις δυναμικές καταπονήσεις, το μέγιστο φορτίο δε συνιστά κοινό γνώρισμα των δοκιμίων, διότι αποτελεί μέτρο της ολικής φόρτισης και όχι ειδικά της ελαστικής περιοχής, όπως στις στατικές. Έτσι, το μέγιστο φορτίο για τα κενά κελύφη είναι στα 227 kN, ενώ για τα γεμάτα με αφρό κελύφη είναι 305 kN. Η περίπου σταθερή τιμή που παρουσιάζει το μέγιστο φορτίο αντιστοίχως στα κενά κελύφη και σε αυτά με τον αφρό υποδηλώνει ότι τούτο δεν επηρεάζεται από το ρυθμό παραμόρφωσης (ή άλλως από το ύψος από το οποίο αφήεται η πίπτουσα μάζα), αλλά από τη γεωμετρία και τη σύσταση των δοκιμίων. Το μέσο φορτίο φαίνεται να μεταβάλλεται ελαφρώς από τα 53,186 s⁻¹ (ύψος πτώσης 1,5 m) στα 75,216 s⁻¹ (ύψος πτώσης 3,0 m), δηλαδή μένει κατ' ουσία αμετάβλητο στην περιοχή αυτή ταχυτήτων παραμόρφωσης, τόσο για τα κενά κελύφη όσο και για αυτά με τον αφρό. Όμως, από τα 75,216 s⁻¹ στα 92,120 s⁻¹ (ύψος πτώσης 4,5 m) το μέσο φορτίο αυξάνεται σημαντικά, γεγονός που φανερώνει ότι κάπου μεταξύ των δύο αυτών τιμών της ταχύτητας παραμόρφωσης υπάρχει ένα σκαλοπάτι πάνω από το οποίο το μέσο φορτίο αυξάνεται έντονα με αύξηση της ταχύτητας παραμόρφωσης. Εν γένει, μεταξύ μέγιστου, P_{\max} , και μέσου, \bar{P} , φορτίου

σύνθλιψης στις δυναμικές δοκιμές παρατηρείται η εξής συσχέτιση:

$$\frac{\bar{P}}{P_{\max}} = 0.29 \div 0.43 .$$

Όσον αφορά την απορρόφηση ενέργειας δεν προκύπτει μία σαφής τάση, καθώς τα φορτία μπορεί να είναι υψηλότερα στην περίπτωση των δοκιμών με αφρό, όμως οι βραχύνσεις είναι μικρότερες από αυτές των κενών δοκιμών. Αντίστοιχα συμπεράσματα προκύπτουν και για την ειδική ενέργεια, μόνο που εδώ φαίνεται ότι τα δοκίμια με αφρό παρουσιάζουν μεγαλύτερη ειδική ενέργεια με τιμές γύρω στα 45,4 kJ/kg, ενώ τα κενά έχουν τιμές γύρω στα 41,3 kJ/kg. Σε κάθε περίπτωση, τα ποσά ενέργειας και η ειδική ενέργεια που απορροφήθηκαν κατά τις στατικές δοκιμές είναι σαφώς υψηλότερα αυτών των δυναμικών δοκιμών.

8.4 Μηχανισμοί κατάρρευσης

Παρατηρήθηκαν δύο τρόποι κατάρρευσης στις παραπάνω στατικές και δυναμικές δοκιμές, οι οποίοι ταξινομούνται ως τρόπος κατάρρευσης I και II (βλ. Κεφάλαιο 4). Η πλειονότητα των δοκιμών κατέρρευσε με μικρορωγμάτωση μέσω του τρόπου κατάρρευσης I, ο οποίος συνιστά αστοχία τύπου "μανιταριού". Χαρακτηρίζεται από προοδευτική κατάρρευση μέσω σχηματισμού συνεχών μετώπων, τα οποία διαδίδονται εσωτερικά και εξωτερικά του κελύφους. Παρατηρήθηκε και ο τρόπος κατάρρευσης II, ο οποίος διέπεται από ψαθυρή θραύση. Η θραύση εκκινεί σε μία απόσταση από το φορτιζόμενο άκρο του κελύφους περίπου ίση με το μισό ύψος του και συνεπάγεται καταστροφική αστοχία μέσω ρωγμάτωσης και διαχωρισμού του κελύφους.

Σε όλα τα δοκίμια που καταπονήθηκαν στατικά παρατηρήθηκε ομοιόμορφος τρόπος κατάρρευσης I. Τούτος ο μηχανισμός κατάρρευσης είναι και ο πιο επιθυμητός, διότι η αστοχία είναι ελεγχόμενη και συνοδεύεται από μεγάλα ποσά ειδικής ενέργειας. Από τα δοκίμια που καταπονήθηκαν δυναμικά, στο DE1 παρατηρήθηκε ένας ανομοιόμορφος τρόπος κατάρρευσης II, ενώ σε ένα μικρό κομμάτι του δοκιμίου είχαμε και τον τρόπο I. Έτσι, το κέλυφος διαχωρίστηκε περί το μισό του ύψος, αλλά όχι σε όλη την περιφέρεια του. Ο συνδυασμένος τούτος μηχανισμός κατάρρευσης παρατηρήθηκε πιθανότατα λόγω της απόκλισης του ύψους του κελύφους περιφερειακά έως και 0,7 mm. Στο δοκίμιο DE2 επικρατεί ο τρόπος κατάρρευσης I, ο οποίος όμως δεν εφαρμόστηκε ομοιόμορφα αλλά έκκεντρα. Τούτο οφείλεται πιθανώς στην απόκλιση της πρόοψης του αρχικού κελύφους από το προβλεπόμενο ορθογωνικό σχήμα. Τα δοκίμια που υπέστησαν δυναμική καταπόνηση και ήταν γεμισμένα με αφρό χαρακτηρίζονται από έναν εν πολλοίς ομοιόμορφο τρόπο κατάρρευσης I. Η παρατήρηση αυτή οδηγεί στο συμπέρασμα ότι ο αφρός στον πυρήνα του κελύφους συμβάλλει στη σημείωση ενός πιο ελεγχόμενου τρόπου κατάρρευσης.

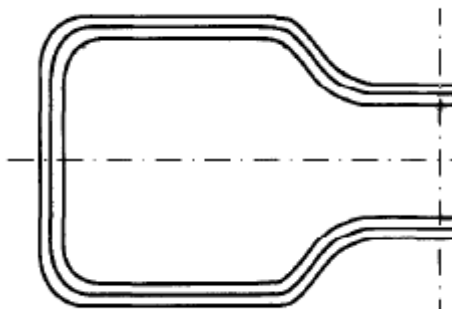
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΗΣ ΜΑΖΑΣ ΠΟΛΥΟΛΗΣ ΚΑΙ ΙΣΟΚΥΑΝΙΚΟΥ

Οι απαιτούμενες ποσότητες από την πολυόλη και το ισοκυανικό άλας υπολογίζονται από την ονομαστική πυκνότητα, την αναλογία πολυόλης – ισοκυανικού του αφρού, καθώς επίσης και από τον όγκο του συγκεκριμένου κελύφους.

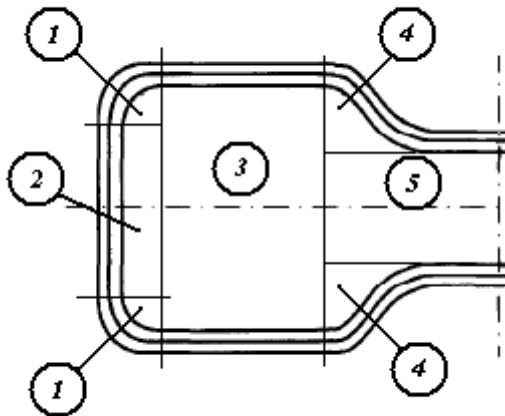
Η ονομαστική πυκνότητα του αφρού δίνεται στα τεχνικά χαρακτηριστικά του και είναι ίση με 400 kg/m^3 . Η αναλογία πρόσμιξης των δύο συστατικών δίνεται πάλι στα τεχνικά χαρακτηριστικά και είναι 100:100, δηλαδή απαιτείται ίδια ποσότητα και από τα δύο.

Ο όγκος του κελύφους (έστω V) υπολογίζεται από το εμβαδόν του εσωτερικού χωρίου (E) και το ύψος (h) του κελύφους, μέσω της απλής σχέσης $V = E \cdot h$. Για τον υπολογισμό του εμβαδού E , αρκεί η εκτίμηση του μισού εμβαδού (Σχήμα Π.1).



Σχήμα Π.1: Η μισή διατομή του κελύφους που απαιτείται για τον υπολογισμό του εμβαδού

Εν συνεχεία, χωρίζεται αυτή η μισή διατομή σε χωρία, όπως φαίνεται στο Σχήμα Π.1^α. Έτσι, ο υπολογισμός απλοποιείται σημαντικά.



Σχήμα Π.1^α: Διαίρεση της διατομής σε χωρία

Συνεπώς, το ζητούμενο εμβαδό θα είναι:

$$E = (2E_1 + E_2 + E_3 + 2E_4 + E_5) \cdot 2 \Rightarrow E \cong 4500 \text{ mm}^2 = 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

Με γνωστό το ύψος των δοκιμίων, $h = 0,051 \text{ m}$, προκύπτει εύκολα ο όγκος του κελύφους $V = E \cdot h = 4,5 \cdot 10^{-3} \cdot 0,051 \text{ m}^3 \Rightarrow V = 2,295 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$. Πολλαπλασιάζοντας τον όγκο αυτό με την πυκνότητα 400 kg/m^3 προκύπτει η συνολική απαιτούμενη ποσότητα αφρού. Τελικά, η ποσότητα από κάθε συστατικό (πολυόλη και ισοκυανικό άλας) θα είναι 45 g.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΣΤΑΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ

Για τις στατικές δοκιμές χρησιμοποιήθηκαν (Εικόνα Π.1):

- Υδραυλική πρέσα διπλής ενέργειας SMG ονομαστικού φορτίου 100 tn
- Δυναμόμετρο
- Ενισχυτής για το δυναμόμετρο KING – SWISS, Type 5005
- Μετατοπισιόμετρο (LVDT) ονομαστικής διαδρομής 1 m
- Ενισχυτής για το μετατοπισιόμετρο Schaevitz, CAS – 025
- Ηλεκτρονικός υπολογιστής με εγκατεστημένο το λογισμικό Lab – View για τη λήψη και επεξεργασία των μετρήσεων και μετρητική κάρτα National Instruments για την ψηφιοποίηση των δεδομένων
- Ψηφιακή συσκευή για την ανάγνωση της μετατόπισης Philips



Εικόνα Π.1: Γενική άποψη της πρέσας

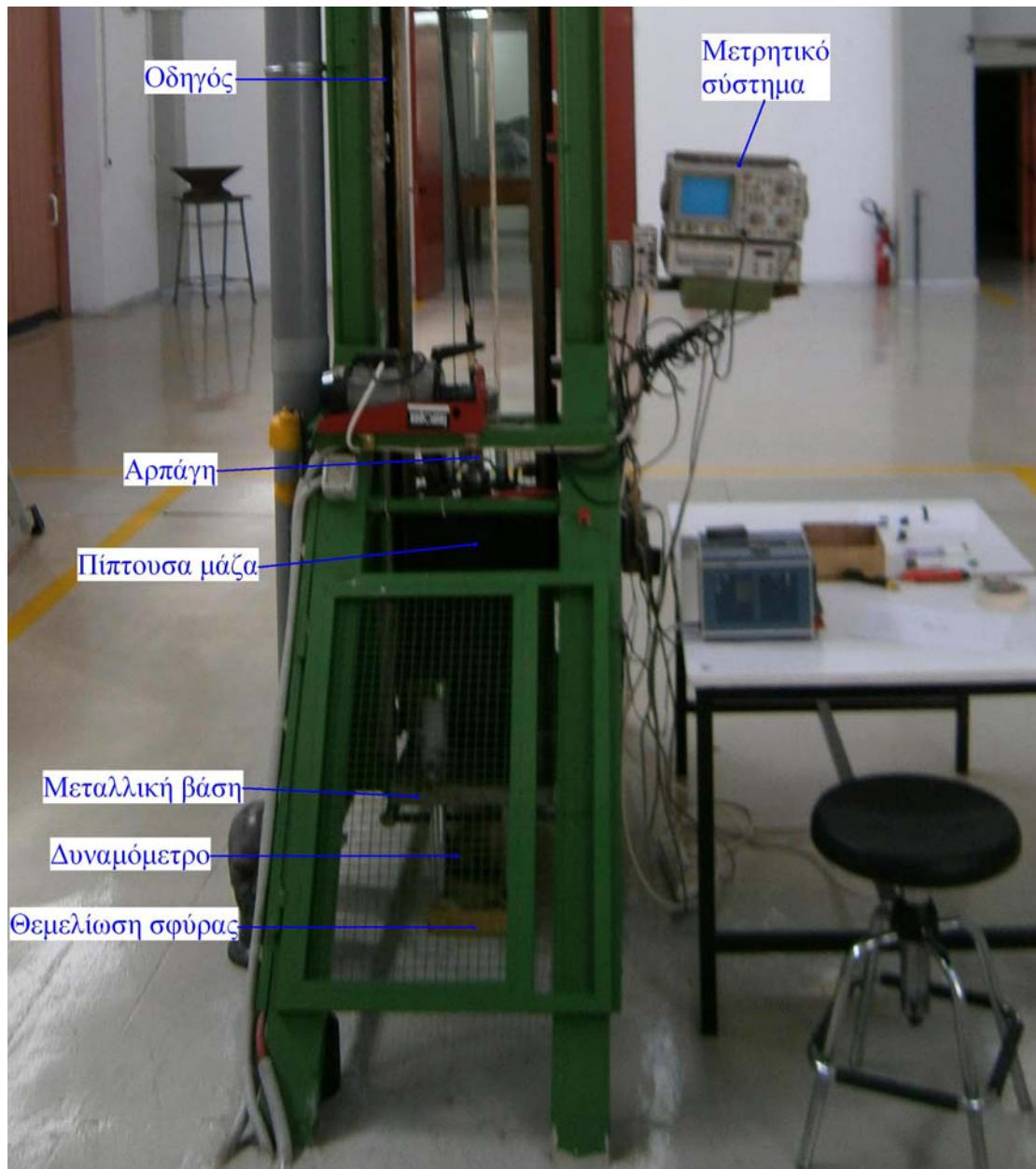
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ

Για τις δυναμικές δοκιμές ο πειραματικός εξοπλισμός περιλαμβάνει:

- Σφύρα πίπτουσα μάζας ($m \approx 77 \text{ kg}$)
- Δυναμόμετρο ηλεκτρομηκυσιομέτρων Kyowa LC-50TE
- Ενισχυτής δυναμόμετρου Kyowa CDA – 110A
- Παλμογράφος δύο καναλιών Hameg HM205 – 3 και printer Hameg HM 8143 – 2
- Επαγωγικός διακόπτης προσέγγισης (triggering)



Εικόνα Π.2: (α) Πειραματική διάταξη δυναμικών δοκιμών (σφύρα πίπτουσας μάζας)



Εικόνα Π.2: (β) Βασικά μέρη της πειραματικής διάταξης της σφύρας και μέρος του συστήματος μετρήσεων

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] A. G. Mamalis, D. E. Manolakos, G. A. Demosthenous & M. B. Ioannidis, "The static and dynamic axial collapse of fibreglass composite frame rails", *Composite Structures* 34 (1996)
- [2] A. G. Mamalis, M. Robinson, D. E. Manolakos, G. A. Demosthenous, M. B. Ioannidis & J. Carruthers, "Crashworthy capability of composite material structures", *Composite Structures* 37 (1997)
- [3] A. G. Mamalis, D. E. Manolakos, G. A. Demosthenous & M. B. Ioannidis, "Analytical and experimental approach to damage and residual strength of fibreglass composite automotive frame rails during manufacturing", *Composite Structures* 32 (1995)
- [4] A. G. Mamalis, D. E. Manolakos, G. A. Demosthenous & M. B. Ioannidis, "On the bending of automotive fibre-reinforced composite thin-walled structures", *Composites* 25 (1994)
- [5] A. G. Mamalis, D. E. Manolakos, G. A. Demosthenous & M. B. Ioannidis, "Analysis of Failure Mechanisms Observed in Axial Collapse of Thin-Walled Circular Fibreglass Composite Tubes", *Thin-Walled Structures* 24 (1996)
- [6] A. G. Mamalis, D. E. Manolakos, G. A. Demosthenous & M. B. Ioannidis, "Axial Collapse of Thin-Walled Fibreglass Tubular Components at Elevated Strain Rates", *Composites Engineering* 4 (1994)
- [7] P. H. Thornton and R. A. Jeryan, "Crash energy management in composite automotive structures", *Int. J. Impact Engineering* 7 (1988)
- [8] G. L. Farley, "Energy absorption of composite materials", *J. Composite Mater.* 17 (1983)
- [9] G. L. Farley and R. M. Jones, "Crushing characteristics of continuous fibre-reinforced composite tubes", *J. Composite Mater.* 26 (1992)
- [10] J. N. Price and D. Hull, "Axial Crushing of Glass Fibre – Polyester Composite Cones", *Composites Science and Technology* 28 (1987)
- [11] P. A. Kirch and H. A. Jannie, "Energy absorption of glass polyester structures", *Technical Paper Series SAE 810233* (1981)
- [12] A. G. Mamalis, Y. B. Yuan and G. L. Viegelaahn, "Collapse of thin-wall composite sections subjected to high speed axial loading", *Int. J. Vehicle Design* 13 (1992)
- [13] P. H. Thornton, "Energy absorption in composite structures", *J. Composite Mater.* 13 (1979)
- [14] P. H. Thornton and P. J. Edwards, "Energy absorption in composite tubes", *J. Composite Mater.* 16 (1982)
- [15] D. W. Schmueser and L. E. Wickliffe, "Impact energy absorption of continuous fiber composite tubes", *J. Eng. Mater. Trans. ASME* 72 (1987)
- [16] G. L. Farley, "Effect of fibre and matrix maximum strain rate on the energy absorption of composite materials", *J. Composite Mater.* 20 (1986)
- [17] G. L. Farley, "Effect of specimen geometry on the energy absorption of composite materials", *J. Composite Mater.* 20 (1986)

- [18] C. M. Kindervater, "Energy absorption of composites as an aspect of aircraft structural crash resistance", *Developments in the Science and Technology of Composite Materials* (1990)
- [19] D. Hull, "Energy Absorption of Composite Materials Under Crash Conditions", *Progress in Science and Engineering of Composites* (ed. T. Hayashi, K. Kawata & S. Umekawa), *Proceedings of ICCM-IV*, Tokyo (1982)
- [20] Ch. Wolff, P. Bastid and A. R. Bunsell, "Relation of Energy Absorption of Composite Structures to Material Strength", *Composites Engineering* 4 (1994)
- [21] S. Palanivelu, W. Van Paepegem, J. Degrieck, J. Vantomme, D. Kakogiannis, J. Van Ackeren, D. Van Hemelrijck & J. Wastiels, "Comparison of the crushing performance of hollow and foam-filled small-scale composite tubes with different geometrical shapes for use in sacrificial cladding structures", *Composites: Part B* 41 (2010)
- [22] G. C. Jacob, J. F. Fellers, J. M. Starbuck & S. Simunovic, "Crashworthiness of Automotive Composite Material Systems", *J. Applied Polymer Science* 92 (2004)
- [23] R. Muralikannan, R. Velmurugan and G. L. Eswaraprasad, "Energy absorption characteristics of circular composite tubes in quasi static and impact loading", *Proceedings of the IMPLAST 2010 Conference*
- [24] B. Spencer and J. McGee, "Design methodology for a composite driveshaft", *Proceedings of Advanced Composites Conf.*, ASM/ESD, Dearborn Michigan (1985)
- [25] M.O.W. Richardson, "Polymer Engineering Composites", Applied Science Publishers
- [26] G.A.O. Davies, "Structural Impact And Crashworthiness, Volume 1: Keynote Lectures", Elsevier Applied Science Publishers, 1984
- [27] Mel M. Schwartz, "Composite Materials, Volume I: Properties, Nondestructive Testing and Repair", Prentice Hall PTR, 1997
- [28] Daniel Gay, Suong V. Hoa, Stephen W. Tsai, "Composite Materials, Design And Applications", CRC Press, 2003
- [29] Γ. Παπανικολάου, Δ. Μουζάκης, "Σύνθετα Υλικά", Κλειδάριθμος, 2007
- [30] Δ. Ι. Παντελής, "Μη Μεταλλικά Τεχνικά Υλικά", Παπασωτηρίου, 2008
-