



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΑΞΟΝΙΚΗ ΣΥΜΠΙΕΣΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ  
ΚΕΛΥΦΩΝ ΛΕΠΤΟΥ ΠΑΧΟΥΣ ΜΕ  
ΠΥΡΗΝΑ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΟΥ ΑΦΡΟΥ**

Συγγραφή:

ΜΠΟΜΠΟΛΑΚΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

Επιβλέπων καθηγητής: Μανωλάκος Δημήτριος

ΑΘΗΝΑ (Φεβρουάριος 2019)

## Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η διερεύνηση της ικανότητας απορρόφησης ενέργειας σε αξονική καταπόνηση σύνθετων κελυφών λεπτού πάχους τετραγωνικής και ορθογωνικής διατομής με πυρήνες αποτελούμενους από διάφορα είδη πολυμερικών αφρών. Στο δεύτερο κεφάλαιο της εργασίας γίνεται γενική αναφορά στα σύνθετα υλικά, στους τρόπους κατασκευής τους, στις ιδιότητες τους αλλά και στις διάφορες κατηγοριοποιήσεις που υπάρχουν. Ακολούθως στο επόμενο κεφάλαιο αναλύονται τα είδη των πολυμερικών αφρών αλλά και τα χαρακτηριστικά τους. Στη συνέχεια γίνεται επεξήγηση της διαδικασίας του πειράματος. Για το πείραμα χρησιμοποιήθηκε η πρέσα δοκιμών ISTRON 4482 και η διαδικασία περιλάμβανε τη μελέτη δεκατριών δοκιμών από τα οποία τα έντεκα διέθεταν πυρήνα πολυμερικού αφρού. Το πείραμα διεξήχθη στον εργαστηριακό χώρο της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και τα αποτελέσματα του πειράματος αναλύονται και αξιολογούνται στο τέταρτο και πέμπτο κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

## Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 <sup>ο</sup> .....	5
1.1 Εισαγωγή .....	5
1.2 Στόχος εργασίας και τρόπος επίτευξης αυτού .....	7
1.3 Δείκτες crashworthiness .....	8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 <sup>ο</sup> .....	10
2.1 Σύνθετα υλικά (composites).....	10
2.2 Ταξινόμηση των σύνθετων υλικών .....	11
2.3 Ίνες.....	12
2.4 Σύγκριση ενισχυτικών ινών .....	13
2.5 Μήτρα.....	13
2.6 Ειδικότερα χαρακτηριστικά.....	14
2.7 Τεχνικά χαρακτηριστικά .....	16
2.8 Είδη υφασμάτων .....	19
2.9 Μέθοδος παραγωγής υαλονημάτων .....	21
2.10 Ο λειτουργικός ρόλος της μήτρας στα σύνθετα υλικά .....	23
2.11 Παράμετροι επιτυχούς σύνδεσης ίνας-μήτρας .....	23
2.12 Μηχανισμοί αστοχίας συνθέτων υλικών ( μικροσκοπικά) .....	23
2.13 Μηχανισμοί αστοχίας σύνθετων υλικών συνθέτων λεπτότοιχων κελυφών υπό αξονική φόρτιση (μακροσκοπικά).....	24
2.13.1 Αστοχία μέσω λυγισμού .....	24
2.13.2 Catastrophic failure .....	24
2.13.3 Progressive folding .....	25
2.13.4 Progressive crushing.....	26
2.13.4.1 Mushrooming failure .....	26
2.13.4.2 Προοδευτική αστοχία καταρρέοντος υλικού προς τα μέσα .....	27
2.13.4.3 Προοδευτική αστοχία καταρρέοντος υλικού προς τα έξω .....	27
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 <sup>ο</sup> .....	29
3.1 Αφρώδη υλικά .....	29
3.1.1 Ορισμοί κυψελοειδών στερεών – αφρών.....	29
3.2 Μέθοδοι παρασκευής κυψελοειδών στερεών.....	31
3.3 Μηχανική συμπεριφορά των αφρών .....	32
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 <sup>ο</sup> .....	36
4.1 Πειραματική διαδικασία .....	36

4.2 Πειραματικός εξοπλισμός - πρέσα INSTRON 4482 .....	36
4.3 Γεωμετρικά στοιχεία δοκιμίων.....	37
4.4 Πειραματικές μετρήσεις και αποτελέσματα δοκιμίων .....	38
4.4.1 Δοκίμιο R1.....	42
4.4.2 Δοκίμιο R2.....	44
4.4.3 Δοκίμιο R3.....	46
4.4.4 Δοκίμιο R4.....	48
4.4.5 Δοκίμιο R5.....	50
4.4.6 Δοκίμιο R6.....	52
4.4.7 Δοκίμιο R7.....	54
4.4.8 Δοκίμιο S1 .....	56
4.4.9 Δοκίμιο S2.....	58
4.4.10 Δοκίμιο S3 .....	60
4.4.11 Δοκίμιο S4.....	62
4.4.12 Δοκίμιο S5 .....	64
4.4.13 Δοκίμιο S6.....	66
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 <sup>ο</sup> .....	68
5.1 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων και συγκριτικά σχόλια .....	68
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	70

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>

## 1.1 Εισαγωγή

Για την εισαγωγή που ακολουθεί στην παρούσα ενότητα χρησιμοποιήθηκε εκτενώς το αντίστοιχο τμήμα του άρθρου των Guohua Zhu, Guangyong Sun, Qiang Liu, Guangyao Li και Qing Li [1] καθώς από τη βιβλιογραφική αναζήτηση αξιολογήθηκε από τον γράφοντα ως το πιο πρόσφατο, πλήρες και σχετικό με το κεντρικό θέμα της παρούσας διπλωματικής.

Σε προηγούμενες δεκαετίες, οι λεπτότοιχες κατασκευές έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως ως ενεργειακοί απορροφητές με στόχο να προστατεύσουν τους επιβαίνοντες οχημάτων σε περίπτωση πρόσκρουσης. Οι προσπάθειες μελέτης και βελτιστοποίησης της ενεργειακής απορρόφησης σε κατάσταση σύγκρουσης λεπτότοιχων κατασκευών είναι συνεχείς και σε ένα μεγάλο εύρος υλικών. Ανατρέχοντας ιστορικά, οι έρευνες πάνω σε ενεργειακούς απορροφητές από λεπτότοιχους σωλήνες χάλυβα έχουν ξεκινήσει από το 1960 όταν ο Alexander εφήρμοσε την θεωρητική φόρμουλα σε μοντέλο για το μέσο φορτίο σε κυκλικής διατομής σωλήνες. Οι Wierzbicki και Abramowicz επέκτειναν την έρευνα σε τετραγωνικής διατομής χαλύβδινους σωλήνες. Οι θεωρητικές προβλέψεις επαληθευτήκαν με πειραματικές μεθόδους στις δεκαετίες του 1980 και 1990 σε μια σειρά εργασιών του Abramowicz και των συνεργατών του.

Στη σύγχρονη εποχή η ασφάλεια έναντι πρόσκρουσης και οι περιβαλλοντικοί κανονισμοί για τον έλεγχο των αέριων ρύπων έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη ενδιαφέροντος στον τομέα του crashworthiness και στη μείωση του βάρους των οχημάτων. Αυτές οι παράμετροι συνέκλιναν με την επιθυμία να βελτιωθεί η ενεργειακή αποδοτικότητα των οχημάτων μέσω της εφαρμογής πιο ελαφρών κατασκευών από τις βιομηχανίες αυτοκίνητου. Έτσι άρχισαν να χρησιμοποιούνται εκτεταμένα ελαφρά υλικά όπως το αλουμίνιο και τα σύνθετα προς αντικατάσταση των παραδοσιακών χαλύβδινων κατασκευών.

Μια συγκεκριμένη εφαρμογή όπου αυτά τα ελαφρά υλικά μπορούν να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο είναι ως μηχανισμοί ενεργειακής απορρόφησης οχημάτων σε συνθήκες σύγκρουσης. Για αυτόν τον λόγο ο βασικός στόχος των βιομηχανιών είναι να βελτιώσουν τις παραμέτρους crashworthiness για τις ελαφρές κατασκευές απορροφητών ενέργειας.

Στο παρελθόν έχουν γίνει αναλυτικές έρευνες σε σχέση με την συμπεριφορά σε σύγκρουση λεπτότοιχων αλουμινένιων κατασκευών. Επί παραδείγματι οι Langseth και Hopperstad πραγματοποίησαν σειρά στατικών και δυναμικών αξονικών δοκιμών συμπίεσης σε κυλινδρικούς σωλήνες αλουμινίου που προέρχονταν από διέλαση. Διαπίστωσαν ότι το μέσο φορτίο για δυναμικές φορτίσεις είναι εξαιρετικά υψηλότερο σε σχέση με αυτό των στατικών για την ίδια αξονική μετατόπιση. Ο Jensen διεξήγαγε πειράματα σε οιονεί στατικές και δυναμικές συνθήκες για να

μελετήσει τον τρόπο παραμόρφωσης/κατάρρευσης σε αξονικά φορτισμένους σωλήνες αλουμινίου, προσπαθώντας να εκτιμήσει την ενεργειακή απορρόφηση. Γενικά, αυτές οι εργασίες έδειξαν ότι οι λεπτότοιχοι αλουμινένιοι σωλήνες που υπόκεινται σε αξονική φόρτιση μπορούν να καταρρεύσουν σε αξονοσυμμετρικό (εκτατό) και μη εκτατό (diamond) μοτίβο με τον προοδευτικό σχηματισμό μιας σειράς διαδοχικών λοβών και απορροφώντας τυπικά 15-30 kJ/kg (ειδική ενέργεια απορρόφησης: ενέργεια ανηγμένη στη καταρρέουσα μάζα).

Από την άλλη μεριά, τα σύνθετα υλικά ενισχυτικού υφάσματος ινών γυαλιού και άνθρακα σε πολυμερική μήτρα, προσφέρονται ως μια διαφορετική πρόταση πολλά υποσχόμενων ελαφρών υλικών. Έχουν εισαχθεί στις εφαρμογές μεταφορών, λόγω των πλεονεκτημάτων τους ως προς την υψηλή ειδική ενέργεια απορρόφησης, την υψηλή στιβαρότητα και τις προσαρμοζόμενες μηχανικές ιδιότητες, προκειμένου να βελτιώσουν την οικονομία καυσίμου και την ασφάλεια στις κατασκευές.

Έχουν γίνει αναρίθμητες μελέτες πάνω στην θραυστομηχανική συμπεριφορά σύνθετων κατασκευών στη βιβλιογραφία. Επί παραδείγματι, ο Mamalis με τους συνεργάτες του, διερεύνησε πειραματικά τα χαρακτηριστικά θραύσης λεπτότοιχων σωλήνων ανθρακονήματος σε δυναμικές και στατικές αξονικές καταπονήσεις. Τα συμπεράσματα στα οποία κατέληξε ως προς την θραυστομηχανική συμπεριφορά είναι ότι διέπεται από ψαθυρότητα εξ αιτίας των συστατικών υλικών τους.

Ο Liu και οι συνεργάτες του πραγματοποίησαν μια σειρά πειραμάτων πάνω στην double hat κατηγορία σωλήνων. Οι συγκεκριμένοι σωλήνες κατασκευάζονταν από ύφασμα ινών άνθρακα εγκιβωτισμένο σε μήτρα πολυμερούς. Τα δοκίμια αυτά υπόκειντο σε διαφορετικές συνθήκες φόρτισης. Με τον τρόπο αυτό μελετήθηκε μια σειρά μορφών κατάρρευσης των εν λόγω υλικών. Ο Israr με τους συνεργάτες του έκανε πειράματα σε οιονεί στατικές συνθήκες σε σύνθετα διαφορετικών διατάξεων μονοδιευθυντικών ινών και υφασμάτων διερευνώντας την συμπεριφορά σε θραύση μονοστρωματικών υλικών έναντι μηχανικής φόρτισης. Ο Feraboli παρουσίασε μία μελέτη στην οποία διερευνούσε την επίδραση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών στη θραύση σύνθετων κατασκευών αυλακωτής διατομής. Τα συμπεράσματα τα οποία εξήγαγε αναφέρουν ότι τα δοκίμια που εμπεριέχουν μικρά γωνιακά επιμέρους στοιχεία στη διατομή τους είναι πιο ικανά να απορροφούν ενέργεια ανά μονάδα μάζας συγκρινόμενα με εκείνα με μεγαλύτερα ευθύγραμμα στοιχεία.

Σε αντίθεση με τα μεταλλικά υλικά, η συμπεριφορά σε κρούση των συνθέτων υλικών διέπεται από θραύση, διαστρωματική αποκόλληση και εκτεταμένη μικρορωγμάτωση, που μπορούν να ελεγχθούν μέσω της διάταξης και της επιλογής επιμέρους υλικών (διεύθυνση ινών, αλληλουχία επιστοίβασης, ιδιότητες μεμονωμένης στρώσης, κλπ).

Παρά την αποδεδειγμένη ελαφρά φύση και το πλεονέκτημα της υψηλής ειδικής ενέργειας απορρόφησης, οι κατασκευές σύνθετων υλικών χρήζουν περαιτέρω έρευνας και ανάπτυξης προτού αντικαταστήσουν πλήρως τις αντίστοιχες μεταλλικές

δομές στον τομέα των μεταφορών. Ως προς την ανάλυση κόστους-απόδοσης στις εφαρμογές απορρόφησης ενέργειας σε κρούση, οι υβριδικές κατασκευές αποτελούμενες από σύνθετα υλικά και μέταλλα προσφέρονται ως μια εναλλακτική και αποτελεσματική προσέγγιση η οποία συνδυάζει την μικρή πυκνότητα, την υψηλή στιβαρότητα και το χαμηλό κόστος των συνθέτων με την υψηλή πλαστικότητα/ολκιμότητα των μεταλλικών υλικών (αλουμίνιο). Επίσης η χρήση μεταλλικών/συνθέτων υβριδικών διατάξεων μπορεί να μετατρέψει τον ασταθή τρόπο κατάρρευσης των συνθέτων κελυφών σε ευσταθή και προοδευτικό. Αυτή η λειτουργία επιτυγχάνεται μέσω του ελέγχου της θραύσης του συνθέτου από την πλαστική παραμόρφωση που ακολουθεί το αλουμινίου. Με τον τρόπο αυτό, αυξάνεται η απορρόφηση ενέργειας στο σύνολο της κατασκευής.

Η συμπεριφορά κατά τη θραύση των υβριδικών (σύνθετων-μεταλλικών) κατασκευών έχει βρεθεί ότι εξαρτάται από τη γεωμετρία, την αλληλουχία επιστοίβασης του συνθέτου και τον ρυθμό παραμόρφωσης. Επί παραδείγματι ο Watanable διερεύνησε την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας χαλύβδινων σωλήνων περιεχομένων σε ινοπλισμένα σύνθετα. Κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η ενεργειακή απορρόφηση αυξάνεται με το πάχος του συνθέτου μέρους αλλά μειώνεται με την ελάττωση της γωνίας προσανατολισμού των ινών. Ο Lima διεξήγαγε σειρά πειραμάτων για να διερευνήσει την επίδραση του μήκους στην συμπεριφορά κατάρρευσης υβριδικών σωλήνων αποτελούμενων από χάλυβα εσωτερικά με σύνθετο υαλονήματος εξωτερικά. Ο El-Hage και οι συνεργάτες του διερεύνησαν την επίδραση του πάχους τοιχώματος του εσωτερικά τοποθετημένου μεταλλικού κυλίνδρου, καθώς και του αριθμού των στρώσεων και της διεύθυνσης των ινών του συνθέτου, σε αξονική θλιπτική καταπόνηση με αριθμητικές μεθόδους. Κατέληξαν στο συμπέρασμα, ότι πιο λεπτότοιχοι αλουμινένιοι σωλήνες μπορούν να συμβάλουν περισσότερο στην απορρόφηση ενέργειας, ενώ η διεύθυνση των ινών του συνθέτου υπό γωνία  $90^\circ$  οδηγεί στην μεγαλύτερη απορρόφηση ενέργειας των υβριδικών σωλήνων.

Από την προαναφερθείσα ερευνητική δραστηριότητα προκύπτει ότι τα υβριδικά (μέταλλο-σύνθετο) κελύφη προσφέρουν μία νέα κατασκευαστική προοπτική, για την επίτευξη υψηλότερων προδιαγραφών μειωμένου βάρους και χαρακτηριστικών ενεργειακής απορρόφησης στη βιομηχανία οχημάτων.

## **1.2 Στόχος εργασίας και τρόπος επίτευξης αυτού**

Στην παρούσα εργασία διερευνάται η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας δοκιμίων σε αξονική καταπόνηση. Τα δοκίμια τα οποία κατασκευάστηκαν είναι από chopped strand mat fiberglass και οι κατηγορίες οι οποίες αξιολογήθηκαν είναι οι εξής:

- Λεπτότοιχα σύνθετα δοκίμια τετραγωνικής διατομής

- Λεπτότοιχα σύνθετα δοκίμια ορθογωνικής διατομής

Τα ανωτέρω δοκίμια δοκιμάστηκαν και μελετήθηκαν με την παρουσία η όχι πυρήνα πολυμερικού αφρού. Έτσι αξιολογήθηκε η απόκριση των κελυφών μεμονωμένα και σε σύγκριση μεταξύ τους, προκειμένου κυρίως να προκύψει ένα βασικό (για τις συγκεκριμένες κατασκευαστικές επιλογές) συμπέρασμα για τα κύρια χαρακτηριστικά μεγέθη της συμπεριφοράς τους.



**Εικόνα 1.1:** Κατηγορίες παραχθέντων δοκιμίων με παρουσία πολυμερικού αφρού.

### 1.3 Δείκτες crashworthiness

Η μελέτη της ικανότητας των υλικών στην απορρόφηση ενέργειας μέσω της παραμόρφωσης ή ολοκληρωτικής τους θραύσης, βαθμονομείται βάσει μίας σειράς μεγεθών (crashworthiness characteristics). Τα εν λόγω μεγέθη προσδιορίζονται βάσει της καμπύλης φορτίου-μετατόπισης, κατά την πειραματική δοκιμή των υλικών.

- Ενέργεια απορρόφησης- Energy absorption ( $E_{abs}$ )

Η ενέργεια απορρόφησης ( $E_{abs}$ ) εκφράζει την συνολική ενέργεια που απορροφήθηκε από το υλικό μέσω πλαστικής παραμόρφωσης σε συνθήκες πρόσκρουσης. Η τιμή του εν λόγω μεγέθους, προκύπτει μέσω του υπολογισμού του εμβαδού που εμπεριέχεται κάτω από την καμπύλη ασκούμενου φορτίου-μετατόπισης του προς μελέτη υλικού.



$$E_{abs} = \int_0^x F(x)dx$$

Όπου:  $E_{abs}$ (Joule),  $F$ (KN),  $X$ (mm)

➤ Μέσο φορτίο (P mean)

Αντιστοιχεί, στον λόγο της ενέργειας απορρόφησης προς την μετατόπιση (βράχυνση) που υπέστη το δοκίμιο κατά την διάρκεια επιβολής φορτίου. Υψηλή τιμή του μέσου φορτίου, αντιστοιχεί σε μεγάλη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας για δεδομένη παραμόρφωση.

➤ Μέγιστο φορτίο- Peak crush force (PCF) ή Pmax

Αντιστοιχεί στην υψηλότερη τιμή φορτίου κατά την διάρκεια μίας δοκιμής.

➤ Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου Crush Force Efficiency (CFE)

Προκύπτει μέσω του λόγου του μέσου φορτίου ( $P_{mean}$ ) προς το μέγιστο φορτίο ( $P_{max}$ ). Στόχο αποτελεί, ο δείκτης ομοιομορφίας φορτίου να τείνει στο ένα. Ο λόγος εντοπίζεται στο ότι, μια πολύ υψηλή τιμή μέγιστου φορτίου (σε σχέση με το μέσο) σε πραγματικές συνθήκες πρόσκρουσης θα μπορούσε να αποβεί μοιραίο για τους επιβαίνοντες ενός οχήματος, ασχέτως με την συνολική ενεργειακή απορρόφηση της κατασκευής.

➤ Ειδική ενέργεια απορρόφησης-Specific Energy Absorption (SEA) ή  $W_s$

Ορίζεται ως, ο λόγος της ενέργειας που απορροφά ένα υλικό ( $E_{abs}$ ), κατά την κατάρρευσή του προς το τμήμα της καταρρέουσας μάζας ( $m_c$ ) του υλικού που έχει αστοχήσει. Η μάζα  $m_c$  (gr) υπολογίζεται γνωρίζοντας την πυκνότητα του υπό μελέτη υλικού μέσω του τύπου:

$$m_c = \rho \times V$$

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>

### 2.1 Σύνθετα υλικά (composites)

Η χρήση ενισχυμένων με ίνες σύνθετων υλικών (fiber-reinforced composite) [7-10] σε κατασκευές έναντι πρόσκρουσης (crashworthiness) έχει συγκεντρώσει ιδιαίτερα εκτεταμένο ερευνητικό ενδιαφέρον, καθώς, σχεδιαζόμενα κατάλληλα, μπορούν να εξασφαλίσουν δυνατότητες απορρόφησης ενέργειας (energy absorption) ανώτερες εκείνων των μετάλλων αναφορικά με το βάρος τους. Γενικά, τα ινοπλισμένα πλαστικά (fibre-reinforced plastic - FRP) δεν παρουσιάζουν την όλκιμη κατάρρευση των μετάλλων, αλλά τείνουν να δημιουργούν ψαθυρό τρόπο κατάρρευσης λόγω της αντίστοιχης ψαθυρής φύσης των περισσότερων ινών και ρητινών. Δοθέντος ότι οι μηχανισμοί θραύσης μπορούν να ελεγχθούν έτσι ώστε το σύνθετο υλικό να αστοχεί/καταρρέει με ευσταθή και προοδευτικό τρόπο, είναι δυνατό να απορροφηθούν πολύ υψηλά ποσά ενέργειας.

Τα πλεονεκτήματα των σύνθετων υλικών σε εφαρμογές του τομέα μεταφορών (οχημάτων), αναφορικά με το μικρό βάρος, το κόστος του κύκλου ζωής τους και κυρίως τη συμπεριφορά τους έναντι πρόσκρουσης, έχουν αναγνωριστεί και διατυπωθεί εκτεταμένα στη διεθνή βιβλιογραφία [11-20]. Για ευρύ όμως χρονικό ορίζοντα, η σχετική έρευνα και οι εφαρμογές αφορούσαν στους τομείς της αεροδιαστημικής και της αγωνιστικής αυτοκινητοβιομηχανίας, όπου, λόγω των μεγάλων οικονομικών προϋπολογισμών, υπήρχε η δυνατότητα χρήσης υψηλής ποιότητας σύνθετων υλικών (κατασκευές εποξικής ρητίνης ενισχυμένες με ανθρακονήματα). Τέτοιου είδους και αντίστοιχου κόστους εφαρμογές δεν είναι (οικονομικά) προσιτές στους τομείς των μαζικών μεταφορών (αυτοκίνητα, λεωφορεία, τραίνα, τραμ), ενώ, από την άλλη πλευρά, η έρευνα αφορούσε κυρίως κατασκευές (κελύφη) απλής γεωμετρίας, όπως πλάκες, κυλινδρικούς και ορθογωνικούς σωλήνες, κώνους, τετραγωνικές πυραμίδες, σε αξονική φόρτιση [21-28], ενώ μέρος της ερευνητικής προσπάθειας αφορούσε και σε δοκίμια διαφορετικής γεωμετρίας (π.χ., διατομής κλεψύδρας/hourglass) και διεύθυνσης επιβολής του φορτίου (κάμψη), καθώς και συγκριτικές δοκιμές σε σχέση με τη γεωμετρία και την ταχύτητα καταπόνησης [28-32]. Το ερώτημα που εγείρεται αφορά στο κατά πόσο τέτοιες απλές γεωμετρίες, ενταγμένες σε ευρύτερες κατασκευές, ή πολύπλοκες κατασκευές τέτοιων γεωμετριών εμφανίζουν απορρόφηση υψηλών ποσών ενέργειας σε ρεαλιστικές εφαρμογές συνθηκών κατάρρευσης [33-35].

Το προαναφερθέν πεδίο έρευνας, βέβαια, είναι “εκ των ων ουκ άνευ” για την κατανόηση και ανάλυση της συμπεριφοράς των σύνθετων υλικών στις ζητούμενες εφαρμογές (crashworthiness), καθώς και την περαιτέρω ενσωμάτωσή τους σε πολύπλοκες γεωμετρίες και δομικές διατάξεις, ενώ ο σχεδιασμός ευρύτερων συνθέσεων από απλής γεωμετρίας στοιχεία απαιτεί τη γνώση της συμπεριφοράς των επιμέρους δομικών συστατικών. Γενικά, πάντως, προκειμένου να υιοθετηθούν από τη

βιομηχανία συμβατικών επίγειων οχημάτων τα σύνθετα υλικά (και τα πλεονεκτήματά τους), ο σχεδιασμός τους πρέπει να εξασφαλίζει οικονομικές και ελαφρές κατασκευές με σταθερό, προοδευτικό και ελεγχόμενο τρόπο κατάρρευσης καθώς και υψηλής απορρόφησης ενέργειας μορφές αστοχίας σε συνθήκες πρόσκρουσης.

## 2.2 Ταξινόμηση των σύνθετων υλικών

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

- **Ινώδη σύνθετα υλικά (fibrous composites):** Με ενίσχυση ινών εμποτισμένων σε υλικό μήτρας.
- **Στρωματικά σύνθετα (laminated composites):** Με επάλληλες στρώσεις υλικών.
- **Κοκκώδη σύνθετα (particulate composites):** Με ενίσχυση σωματιδίων διασκορπισμένων στο υλικό της μήτρας

Τα ινώδη υλικά μπορούν να διαχωριστούν επιπλέον ανάλογα με τον προσανατολισμό και τη διάταξη των ινών μέσα στη μήτρα και διακρίνονται σε:

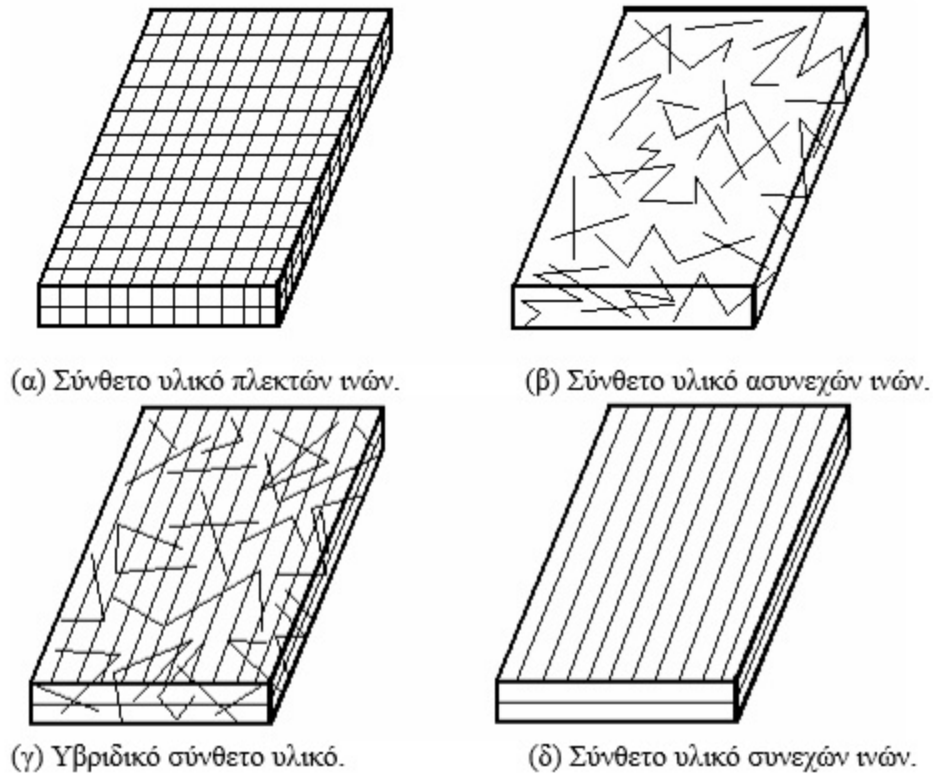
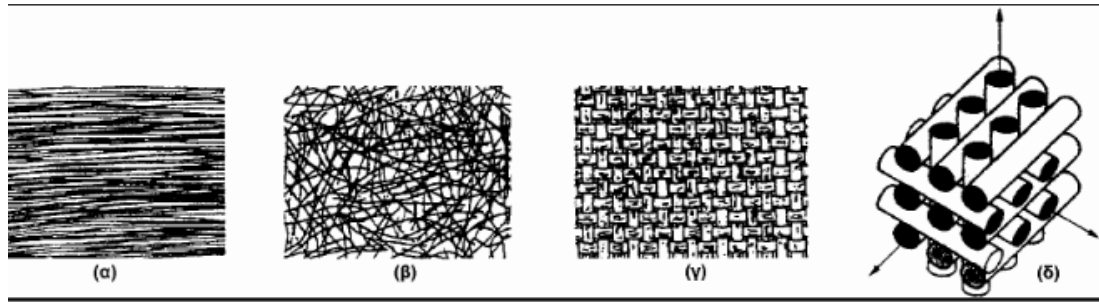
- **Μονοδιευθυντικά σύνθετα**, στα οποία, οι ίνες έχουν όλες την ίδια διεύθυνση.
- **Πολυδιευθυντικά σύνθετα**, στα οποία, οι ίνες έχουν διαφορετικές διευθύνσεις

Τα πολυδιευθυντικά σύνθετα με τη σειρά τους χωρίζονται σε:

- Σύνθετα με ίνες τυχαίας διεύθυνσης.
- Σύνθετα με ίνες σε πλέξη ύφανσης
- Σύνθετα με ίνες σε τρισροθογώνια ύφανση

Σχετικά με το λόγο μήκους προς διάμετρο των ινών, τα ινώδη σύνθετα κατηγοριοποιούνται σε:

- **Συνεχείς ή μεγάλου μήκους ίνες (continuous fibers)**, όταν είναι  $l/d \geq 100$ .
- **Ασυνεχείς ή κοντές ίνες (discontinuous fibers)**, όταν είναι  $l/d < 100$ .
- **Νηματίδια ή τριχίτες (whiskers):** Με  $d < 1\mu\text{m}$  και  $l = 100\mu\text{m}$  (πρόκειται για λεπτούς μονοκρυστάλλους κεραμικού υλικού).



**Σχήμα 2.1** Τύποι διάταξης ινών: (α) μονοδιευθυντικές ίνες, (β) ίνες τυχαίου προσανατολισμού, (γ) ίνες σε τρισσορθογώνια πλέξη.

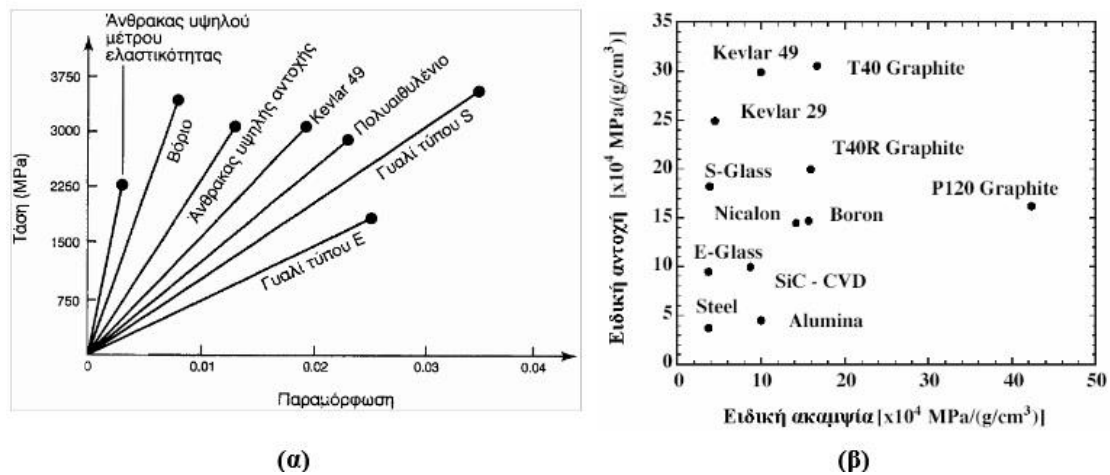
## 2.3 Ίνες

Προκειμένου οι ίνες να προσφέρουν ικανοποιητική ενίσχυση των μηχανικών ιδιοτήτων της μήτρας, το υλικό κατασκευής τους επιλέγεται, έτσι ώστε να παρουσιάσει υψηλό μέτρο ελαστικότητας, υψηλή τάση θραύσης σε εφελκυσμό, μεγάλη ακαμψία, χαμηλή δυσθραυστότητα και επιπλέον να έχει μικρή πυκνότητα.

Στα προηγμένα σύνθετα υλικά οι ενισχυτικές ίνες είναι κατασκευασμένες από ανόργανα υλικά ( γυαλί, άνθρακας, μέταλλα, κεραμικά) είτε από οργανικά υλικά (πολυμερή).

## 2.4 Σύγκριση ενισχυτικών ινών

A) Ως προς την ειδική αντοχή και την ειδική ακαμψία



Σχήμα 2.2

B) Ως προς την παραμόρφωση θραύσης

Ίνα	Παραμόρφωση θραύσης (%)
Kevlar	3-4
Glass	2
Carbon	1
Ceramic	<1

Σχήμα 2.3

## 2.5 Μήτρα

Ο ρόλος της μήτρας συνίσταται σε:

- Συγκράτηση των ινών μεταξύ τους
- Προστασία των ινών από περιβαλλοντικές φθορές και προσβολές
- Μεταβίβαση των μηχανικών τάσεων που ασκούνται συνολικά στο σύνθετο υλικό προς τις ίνες
- Ανακοπή της διάδοσης των ρωγμών, που ξεκινούν από θραύση των ινών.

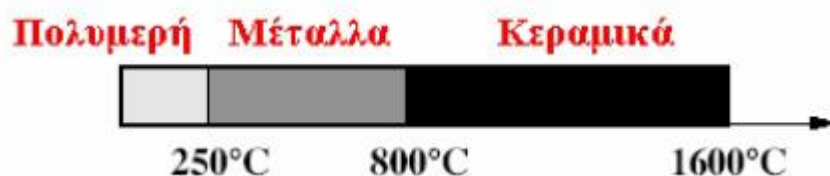
Για να ικανοποιεί τον ρόλο για τον οποίο προορίζεται η μήτρα θα πρέπει να χαρακτηρίζεται από:

- Ολκιμότητα
- Ανθεκτικότητα
- Σχετική ακαμψία
- Σημείο τήξης μεγαλύτερο από τη μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας του συνθέτου υλικού

Συνήθως το υλικό της μήτρας έχει μικρότερη πυκνότητα, αντοχή και δυσκαμψία από τις ίνες. Οι μήτρες διακρίνονται σε κατηγορίες ανάλογα με το υλικό κατασκευής τους:

- Οργανικές
- Μεταλλικές
- Κεραμικές

Μια γενική οδηγία αναφορικά με τα θερμοκρασιακά όρια για κάθε ομάδα υλικών παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 2.4 Θερμοκρασιακά όρια για κάθε ομάδα υλικών

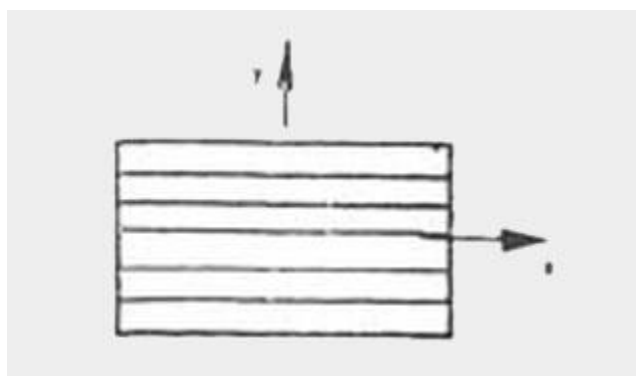
## 2.6 Ειδικότερα χαρακτηριστικά

Εξ' ορισμού, όπως αναφέραμε παραπάνω, σύνθετα υλικά, ονομάζονται τα υλικά τα οποία προκύπτουν από τη σύνθεση, σε μακροσκοπική κλίμακα, δύο ή περισσότερων υλικών με σκοπό την απόκτηση καλύτερων και χρησιμότερων ιδιοτήτων. Το σύνθετο υλικό είναι ανομοιογενές και ανισότροπο.

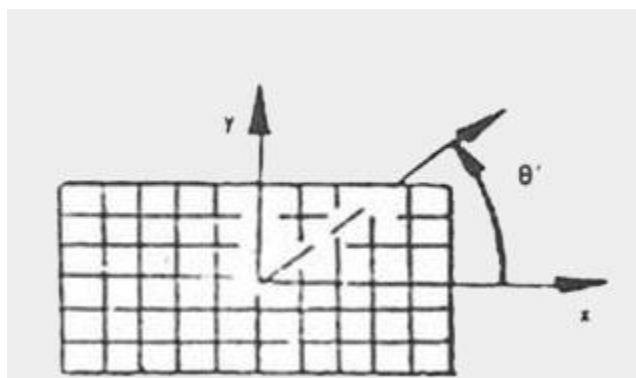
Ανομοιογενές είναι το υλικό του οποίου οι ιδιότητες είναι διαφορετικές από σημείο σε σημείο, ενώ το ανισότροπο συμπεριφέρεται με διαφορετική αντοχή όταν το φορτίο εφαρμόζεται υπό διαφορετικές διευθύνσεις. Σε αυτή την περίπτωση δεν υπάρχουν επίπεδα συμμετρίας των ιδιοτήτων του υλικού. Επομένως τα τεχνικά χαρακτηριστικά είναι συναρτήσεις του προσανατολισμού σε έκαστο σημείο του υλικού.

Για να αποκτηθεί ένα ισότροπο σύνθετο υλικό π.χ. από υαλοϋφασμα, είναι απαραίτητο να τοποθετηθούν περισσότερες στρώσεις υφάσματος υπό διαφορετικές κύριες διευθύνσεις αντοχής έτσι ώστε το υλικό που θα προκύψει να παρουσιάζει την συγκεκριμένη συμπεριφορά υπό οποιαδήποτε διεύθυνση του εφαρμοστεί το φορτίο.

Αντιθέτως με τα σύνθετα υλικά, τα μεταλλικά υλικά θεωρούνται ομοιογενή και ισότροπα.



**Σχήμα 2.5.** Σχηματική παράσταση υφάσματος με νήματα κατά μία μόνο διεύθυνση.



**Σχήμα 2.6.** Σχηματική παράσταση υφάσματος με νήματα κατά δύο διευθύνσεις την διαμήκη ( $x$ ) και την εγκάρσια ( $y$ ).

Ένα πολύ γνωστό σύνθετο υλικό είναι εκείνο το οποίο αποκτάται εμποτίζοντας υαλοϋφασμα με πολυεστερική ή εποξειδική ρητίνη.

Όταν η ρητίνη στερεοποιηθεί, τότε το σύνθετο υλικό που θα προκύψει θα έχει τεχνικά χαρακτηριστικά τα οποία θα είναι συναρτήσεις των δύο επιμέρους υλικών (υαλοϋφάσματος – ρητίνης), του τρόπου εμποτισμού, της αναλογίας σε βάρος υφάσματος/ρητίνης, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος υπό την οποία έγινε η εργασία, της θερμοκρασίας υπό την οποία θα γίνει η σκλήρυνση της ρητίνης, τη διεύθυνση των κυρίων νημάτων του υφάσματος σε σχέση με την διεύθυνση εφαρμογής του φορτίου, κτλ. Γίνεται επομένως σαφές ότι εάν το σύνθετο υλικό δεν προμηθεύεται

έτοιμο αλλά κατασκευάζεται από τον εκάστοτε χρήστη, τότε είναι πολύ πιθανό να παρουσιάζει διαφορετικά τεχνικά χαρακτηριστικά από χρήστη σε χρήστη.

Αυτό βέβαια δε συμβαίνει μετά μεταλλικά υλικά τα οποία ο χρήστης προμηθεύεται έτοιμα από τον παραγωγό και πληρούν συγκεκριμένες προδιαγραφές. Είναι σαφές ότι για να αποκτηθούν οι μέγιστες επιθυμητές τιμές των τεχνικών χαρακτηριστικών του σύνθετου υλικού, απαιτείται πολύ μεγάλη εμπειρία τόσο στην επιλογή των δύο υπό σύνθεση υλικών, όσο και στη διεργασία σύνθεσης. Εάν δεν υπάρχει εμπειρία τότε τα τεχνικά χαρακτηριστικά και γενικώς η συμπεριφορά του προκύψαντος σύνθετου υλικού θα είναι σίγουρα τυχαία.

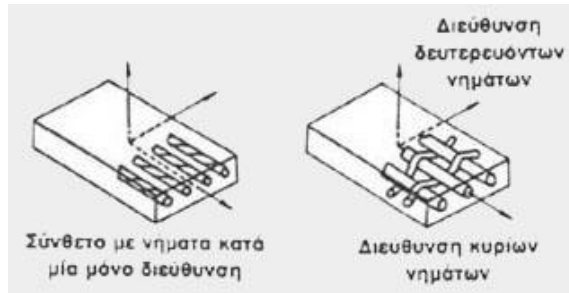
Οι δυσκολίες που συναντώνται ειδικά στον σωστό εμποτισμό του υφάσματος με την κατάλληλα και άριστα παρασκευασμένη ρητίνη, τείνουν να μειωθούν με την εμφάνιση των προεμποτισμένων υφασμάτων. Αυτά τα υφάσματα αφού εμποτιστούν με τη σωστή ποιότητα και ποσότητα ρητίνης, τοποθετούνται σε ξηρό πάγο όπου υπό τη χαμηλή θερμοκρασία η σκλήρυνση της ρητίνης σταματά σε μία προκαθορισμένη φάση. Όταν αυτό το εργοστασιακά προεμποτισμένο, σύνθετο υλικό πρόκειται να χρησιμοποιηθεί τότε μεταφέρεται σε υψηλότερες θερμοκρασίες όπου και συνεχίζεται η σκλήρυνση της ρητίνης.

## **2.7 Τεχνικά χαρακτηριστικά**

Το βασικότερο πλεονέκτημα των σύνθετων έναντι άλλων υλικών (μεταλλικών, πλαστικών, κεραμικών κτλ.) είναι η δυνατότητα απόκτησης της επιθυμητής αντοχής κατά τη διεύθυνση εφαρμογής του φορτίου μέσω της απλής διευθέτησης, προσανατολισμού, των νημάτων του υφάσματος.

Εάν η διεύθυνση του φορτίου είναι σταθερή, τότε είναι εύλογο να χρησιμοποιηθεί ύφασμα μίας κύριας διεύθυνσης στο οποίο τα κύρια νήματα είναι τοποθετημένα κατά μία μόνο διεύθυνση έτσι ώστε η μέγιστη αντοχή του υφάσματος να είναι κατά τη διεύθυνση αυτή. Σε αυτό τον τύπο υφάσματος υπάρχουν και λίγα δευτερεύοντα, αμελητέας σημασίας νήματα κάθετα προς την κύρια διεύθυνση με σκοπό να συγκρατούν με απλή πλέξη τα κύρια νήματα.





Σχήμα 2.7

Στην περίπτωση που το φορτίο είναι στο επίπεδο και κατά δύο κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις, τότε στην κατασκευή του σύνθετου πρέπει να χρησιμοποιηθεί ύφασμα με κύρια νήματα τοποθετημένα κατά δύο διευθύνσεις κάθετες μεταξύ τους.

Σ' αυτή την περίπτωση ο αριθμός νημάτων ανά μονάδα μήκους κατά την εγκάρσια διεύθυνση είναι ακριβώς ίσος με τον αριθμό νημάτων ανά μονάδα μήκους κατά τη διαμήκη διεύθυνση.

Επομένως και η αντοχή του σύνθετου είναι ίδια κατά τις δύο αυτές διευθύνσεις και είναι η μέγιστη. Η μικρότερη αντοχή παρουσιάζεται κατά τη διεύθυνση της διχοτόμου της ορθής γωνίας που σχηματίζουν τα κύρια νήματα, δηλαδή κατά τη διεύθυνση που σχηματίζει γωνία  $\theta^\circ = 45^\circ$  με τις κύριες διευθύνσεις. Ένα τέτοιο επίπεδο, σύνθετο υλικό, που παρουσιάζει την αυτή αντοχή κατά διευθύνσεις κάθετες μεταξύ τους, ονομάζεται "ορθότροπο".

Παρομοίως ονομάζεται ορθότροπο και το τρισδιάστατο σύνθετο υλικό που έχει τρία κάθετα μεταξύ τους επίπεδα συμμετρίας των ιδιοτήτων ελαστικότητας του και γενικότερα των μηχανικών του ιδιοτήτων.

Το σύνθετο υλικό που υπό οποιαδήποτε διεύθυνση (ή γωνία  $\theta$ ) στο επίπεδο του παρουσιάζει τις αυτές μηχανικές ιδιότητες, ονομάζεται δισδιάστατο "ισότροπο" υλικό. Στον τρισδιάστατο χώρο αυτό το υλικό είναι και ονομάζεται "σχεδόν ισότροπο". Τέτοιο σύνθετο υλικό μπορεί να κατασκευαστεί τοποθετώντας πολλές στρώσεις υφάσματος με τις κύριες διευθύνσεις των νημάτων κατάλληλα διευθετημένες έτσι ώστε το σύνθετο που θα προκύψει να συμπεριφέρεται κατά τον ίδιο τρόπο υπό οποιαδήποτε διεύθυνση στο επίπεδο (xy) του εφαρμοστεί το φορτίο.

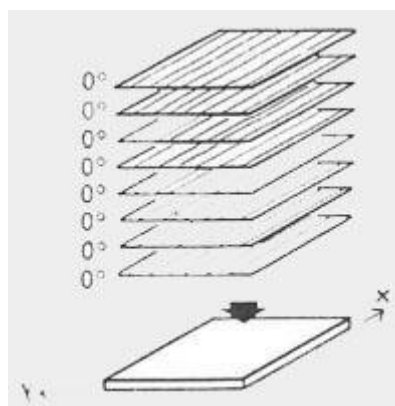
Συνήθως ένα "σχεδόν ισότροπο" σύνθετο υλικό μπορεί να αποκτηθεί τοποθετώντας κατ' ελάχιστο τρία στρώματα ορθότροπου υφάσματος, με το διαμήκη άξονα να σχηματίζει γωνίες  $+60^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $-60^\circ$ , με τον άξονα αναφοράς x, όπου  $0^\circ$  σχηματίζει ο διαμήκης άξονας του μεσαίου στρώματος με τον άξονα x.

Είναι ευκολονόητο επομένως ότι τα σύνθετα υλικά είναι γενικώς "ανισότροπα" υλικά, ενώ μπορούν να γίνουν με τον κατάλληλο αριθμό στρωμάτων και διεύθυνση

των νημάτων, υλικά "δισδιάστατα ισότροπα" ή αλλιώς υλικά "τρισδιάστατα σχεδόν ισότροπα".

Η ρητίνη παίζει σημαντικό ρόλο στα μηχανικά χαρακτηριστικά του σύνθετου. Η ποσοστιαία αναλογία του βάρους της ρητίνης προς το συνολικό βάρος του σύνθετου (ρητίνης + υφάσματος) είναι ένα βασικό στοιχείο της σύνθεσης. Συνήθως το ποσοστό του βάρους της ρητίνης κυμαίνεται από 25-50% του συνολικού Βάρους.

Χρησιμοποιούνται κυρίως δύο τύποι ρητινών, οι πολυεστερικές και οι εποξειδικές. Οι πολυεστερικές ρητίνες έχουν κατώτερες μηχανικές ιδιότητες από τις εποξειδικές και γι' αυτό δε χρησιμοποιούνται στις αεροπορικές κατασκευές, αλλά αντιθέτως είναι ο κύριος τύπος ρητίνης για τις ναυτικές κατασκευές. Μερικές γνωστές εποξειδικές ρητίνες, εμποτισμού του εμπορίου είναι η Shell Epon 828, η Ciba Geigy 604, η Dow Der 331, η Safe-T-Poxy 2410 της Arco, η EA 9309 της Hysol, και άλλες.

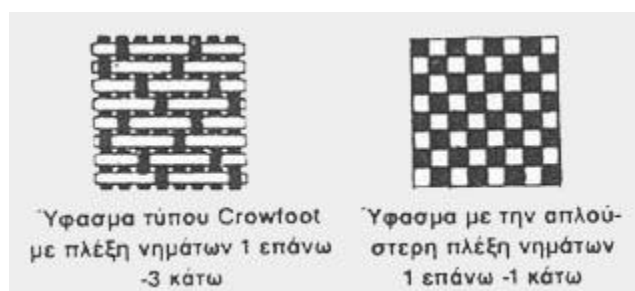


**Σχήμα 2.8.** Κατασκευή συνθέτου μιας διεύθυνσης με 8 στρώσεις νημάτων κατά την αυτή διεύθυνση.

Οι τελικές ιδιότητες ενός ιώδους σύνθετου υλικού εξαρτώνται και από γεωμετρικές παραμέτρους όπως διάμετρος, μήκος, περιεκτικότητα σε όγκο των ινών, ευθυγράμμιση και χωρική διάταξη των ινών εντός του υλικού μήτρας.

## 2.8 Είδη υφασμάτων

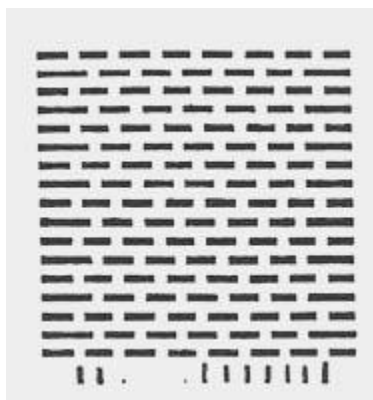
Τα Βασικότερα είδη υφασμάτων που χρησιμοποιούνται, είναι τα ακόλουθα



Σχήμα 2.9

### ➤ Ε-Υαλοϋφασμα

Το υαλοϋφασμα είναι το συνηθέστερο υλικό (ανόργανο) που χρησιμοποιείται στις σύνθετες κατασκευές. Είναι υλικό που δεν καίγεται, δε σαπίζει, δεν απορροφά υγρασία και δεν αλλοιώνεται με το χρόνο. Επίσης, έχει γραμμική συμπεριφορά ελαστικότητας, η καμπύλη (σ-ε) είναι ευθεία γραμμή έως το σημείο θραύσης και παρουσιάζει εξαιρετικά υψηλή αντοχή στα φορτία. Ευρίσκεται στο εμπόριο σε μεγάλη ποικιλία πλέξεων και είναι σχετικά το φθηνότερο ύφασμα για σύνθετες κατασκευές. Χρησιμοποιείται στις αεροπορικές κατασκευές ως υλικό επικάλυψης, στην κατασκευή κύριων και δευτερευόντων δομικών στοιχείων, στην κατασκευή του ριναίου κώνου, κτλ.



Σχήμα 2.10 Αποτύπωμα πλέξης νημάτων 1 επάνω -1 κάτω.

### ➤ **S-Υαλουφασμα**

Έχει τις ίδιες περίπου ιδιότητες με το E-Υαλοϋφασμα (E:για Electrical, S: για Structural) αλλά υπερέχει αυτού κατά 20% περίπου στην αντοχή και 15% στο μέτρο ελαστικότητας. Ο τύπος S-YY (ΥαλοΥφασμα) είναι ελαφρότερος από τον E-YY, παρουσιάζει μεγάλη αντοχή στην κρούση και κοστίζει περίπου τρεις φορές περισσότερο από τον E-YY

Χρησιμοποιείται για κρίσιμα δομικά στοιχεία και σε συνδυασμό με το E-YY για εξωτερικές δεξαμενές, για δοχεία καυσίμων, για δοχεία υψηλής πίεσης, για ριναίους κώνους κτλ.

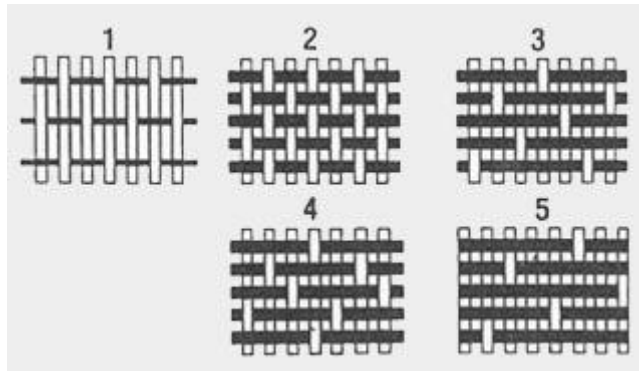


**Σχήμα 2.11** Αποτύπωμα πλέξης νημάτων 4 επάνω -1 κάτω.

### ➤ **S2- Υαλοϋφασμα**

Είναι παραλογή του S-YY με τα ίδια μηχανικά χαρακτηριστικά αλλά είναι ποιοτικώς περισσότερο ευέλικτο και δεν ανταποκρίνεται ακριβώς στις προδιαγραφές MIL-SPEC., όπως αντιθέτως συμβαίνει με τον τύπο S-YY.

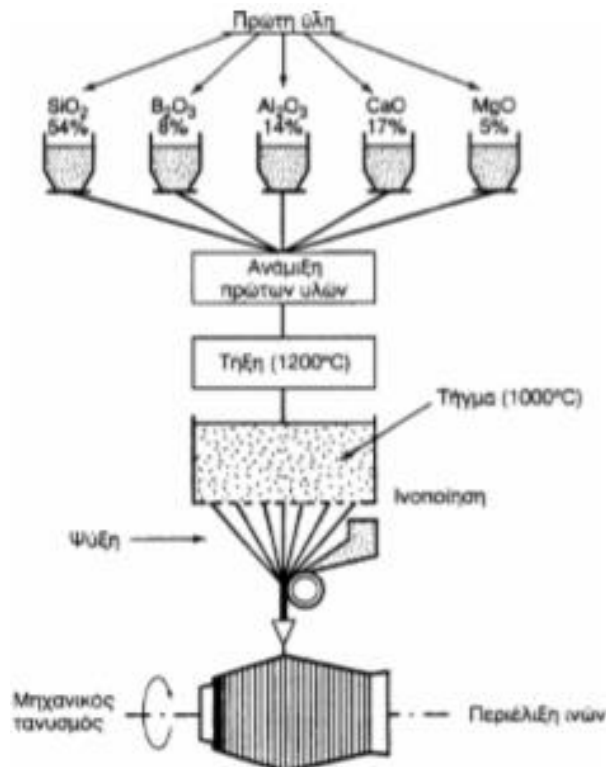
Χρησιμοποιείται σε υβριδικές σύνθετες κατασκευές (συνδυασμός δύο ή περισσότερων διαφορετικών υφασμάτων, π.χ. (E-YY + S2-YY + Κέβλαρ) / Εποξειδική, για δομικά στοιχεία που απαιτούν υψηλό μέτρο ελαστικότητας, για δοχεία υψηλής πίεσης και για τμήματα που καταπονούνται σε υψηλές θερμοκρασίες, διότι το S2-YY διατηρεί τις μηχανικές του ιδιότητες και άνω των 800 C.



**Σχήμα 2.12** Διάφοροι τύποι πλέξης νημάτων υαλοϋφάσματος: 1) Μονής διεύθυνσης, 2) Διπλής διεύθυνσης με απλή πλέξη 1 επάνω - 1 κάτω, 3) τύπου HSI επάνω - 4 κάτω, 4) τύπου CrowFoot 1 επάνω - 3 κάτω, 5) τύπου BMS.

## 2.9 Μέθοδος παραγωγής υαλονημάτων

Η παραγωγή των ινών γυαλιού πραγματοποιείται με διαδικασία εκβολής τήγματος γυαλιού, μέσω μήτρας διάτρητου πυθμένα. Στην παρακάτω διαγραμματική απεικόνιση (εικ 1.2) παρουσιάζεται ένα απλοποιημένο διάγραμμα των σταδίων παραγωγής υαλονήματος.



**Σχήμα 2.13:** Στάδια παραγωγής υαλονήματος [2].

Αρχικά, τα επιμέρους χημικά συστατικά της τελικής υαλοϊνας τοποθετούνται στις εκάστοτε αναλογίες σε δεξαμενή, τήξης. Ακολούθως, το τήγμα τροφοδοτείται σε σειρά κυλινδρικών δοχείων με διάτρητο πυθμένα. Η διάμετρος των οπών είναι περί τα 1-2. Έπειτα, το γυαλί ρέει μέσα από τις οπές του πυθμένα υπό την επίδραση της βαρύτητας. Οι παραγόμενες ίνες συγκεντρώνονται σε ένα σύνολο και τανύονται μηχανικά μέχρις ότου αποκτήσουν την κατάλληλη διάμετρο η οποία κυμαίνεται από 1-15  $\mu\text{m}$ . Ακολουθεί ελαφρός ψεκάσμος τους με νερό. Εν συνεχεία, οι ίνες διέρχονται από ιμάντα όπου επενδύονται με υλικό που δρά προστατευτικά και συνεισφέρει στην μετέπειτα πρόσφυση των ινών στην μήτρα. Τέλος, οι ίνες περιελίσσονται ανά δέσμες γύρο από περιστρεφόμενο τύμπανο. Οι ρόλοι υαλονήματος υφίστανται ξήρανση πριν υποβληθούν σε οποιαδήποτε περαιτέρω διεργασία μορφοποίησης. Στον παρακάτω πίνακα (πίνακας 2.1) παρατίθενται τα χαρακτηριστικά μεγέθη των διαφόρων κατηγοριών ινών γυαλιού.

**Πίνακας 2.1** Χαρακτηριστικά μεγέθη κατηγοριών υαλονήματος [2]

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΤΥΠΟΣ		
	E	C	S
Χημική σύσταση (%)			
SiO <sub>2</sub>	54	60	65
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16	25	25
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8	–	–
CaO	17	9	10
MgO	5	6	10
Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	75	80	84
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	2100 – 3400	2500 – 4400	2800 – 4800
Πυκνότητα ( $g/cm^3$ )	2.54	2.50	2.48
Θερμοκρασία τήξης (C)	900 – 1200	1400 – 1600	1400 – 1600
Μέγιστη θερμοκρασία χρήσης (C)	550	650	650

## **2.10 Ο λειτουργικός ρόλος της μήτρας στα σύνθετα υλικά**

Προϋπόθεση για την δημιουργία ενός σύνθετου υλικού, είναι η ενισχυτική σύνθεση του υλικού μήτρας με την δομή ενίσχυσης αυτής. Η μήτρα σε ένα σύνθετο υλικό εγκιβωτίζει και σταθεροποιεί το υλικό ενίσχυσης ενώ παράλληλα συνεισφέρει ενεργά στην υψηλή μηχανική αντοχή του συνθέτου υλικού. Ο βασικότερος λειτουργικός ρόλος της μήτρας στην συμπεριφορά ενός συνθέτου υλικού που δέχεται μηχανικές φορτίσεις, είναι αυτός της μεταφοράς του ασκούμενου φορτίου στην ενίσχυση (ίνα). Ακόμα, η μήτρα αποτρέπει την διάδοση προκυπτουσών ρηγματώσεων των ινών στην μάζα του υλικού, περιορίζοντας την έκταση αστοχίας του υλικού.

## **2.11 Παράμετροι επιτυχούς σύνδεσης ίνας-μήτρας**

Η επιτυχής παραγωγή συνθέτων υλικών βασίζεται στην σύνδεση των ινών ενίσχυσης με την μήτρα και καθορίζεται από μία σειρά παραμέτρων. Η κυριότερη εξ αυτών είναι η επίτευξη συνάφειας μεταξύ ίνας και μήτρας. Οι αναπτυσσόμενοι δεσμοί στη διεπιφάνεια ίνας-μήτρας, πρέπει να είναι αρκετά ισχυροί, ώστε να εξασφαλίζεται η μεταφορά τάσεων μεταξύ των δύο συστατικών του σύνθετου. Για αυτόν τον λόγο, οι ίνες επενδύονται κατά την παραγωγή τους με ουσίες που εξασφαλίζουν, αφενός μεν τη συνάφεια με τη μήτρα, αφετέρου δε, την αντίσταση του σύνθετου στην υγρασία. Επίσης, κατά τη διάρκεια των διεργασιών πρόσφυσης ίνας-μήτρας, διάφοροι παράγοντες επενεργούν στην τοπική διαφοροποίηση, των ιδιοτήτων στις δύο πλευρές της διεπιφάνειας. Οι παράγοντες αυτοί εντοπίζονται, στα φαινόμενα διάχυσης, χημικών αντιδράσεων και διαφορικών θερμικών φαινομένων. Τέλος η μηχανική σύνδεση (επιτυγχάνεται μέσω της τραχύτητας του υαλονήματος), και η επίτευξη χημικής σύνδεσης καθορίζουν την επιτυχή δομική συνοχή του συνθέτου.

## **2.12 Μηχανισμοί αστοχίας συνθέτων υλικών ( μικροσκοπικά)**

Τα σύνθετα υλικά παρουσιάζουν μία σειρά μηχανισμών αστοχίας κατά την μηχανική τους φόρτιση. Το κύριο χαρακτηριστικό αυτών των υλικών είναι ότι σε μία τυπική περίπτωση, κατά την επιβολή φορτίου πρώτα θραύονται οι ενισχυτικές ίνες και μετά η μήτρα. Το φαινόμενο αυτό λαμβάνει χώρα λόγω της διαφοράς μέτρου ελαστικότητας μεταξύ ίνας μήτρας. Απότοκος αυτού είναι, ότι δεν μπορεί να ελεγχθεί μακροσκοπικά το επίπεδο υποβάθμισης του συνθέτου υλικού προτού οι ατέλειες επεκταθούν σε ευρεία κλίμακα. Οι βασικότεροι μηχανισμοί αστοχίας είναι οι εξής :

- Θραύση ινών (εκκινείται όταν ξεπεραστεί το όριο διαρροής αυτών)
- Παραμόρφωση και θραύση της μήτρας (ακολουθεί κατόπιν της έναρξης αστοχίας των ινών)
- Αποκόλληση ινών από μήτρα ( προκύπτει λόγω περιορισμένης συνάφειας μεταξύ ίνας και μήτρας)

- Διαστρωματική αποκόλληση ( εμφανίζεται στα πολυστρωματικά σύνθετα, μεταξύ των επάλληλων στρώσεων κυρίως σε αξονική καταπόνηση )

### **2.13 Μηχανισμοί αστοχίας σύνθετων υλικών συνθέτων λεπτότοιχων κελυφών υπό αξονική φόρτιση (μακροσκοπικά)**

Οι ερευνητικές μελέτες του Hull [3], κατέδειξαν τέσσερεις μηχανισμούς αστοχίας των λεπτότοιχων συνθέτων κελυφών που υπόκεινται σε θλίψη. Τα κύρια χαρακτηριστικά που διαμορφώνουν τον τρόπο κατάρρευσης αυτών των δοκιμίων είναι τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κελύφους και το είδος του συνθέτου. Οι σύνθετοι σωλήνες, που καταρρέουν κατά τρόπο σταθερό, προοδευτικό και ελεγχόμενο, (progressive crushing, progressive folding) μπορούν να απορροφήσουν ένα μεγάλο ποσό ενέργειας. Αντίθετα, όταν η θραύση προκύπτει απότομα και ψαθυρά η απορροφούμενη ενέργεια είναι ελάχιστη. Οι τρόποι κατάρρευσης κατηγοριοποιήθηκαν σε τέσσερεις κύριες κατηγορίες οι οποίες θα αναλυθούν παρακάτω:

- Λυγισμός (Euler)
- Catastrophic failure
- Progressive crushing
- Progressive folding

#### **2.13.1 Αστοχία μέσω λυγισμού**

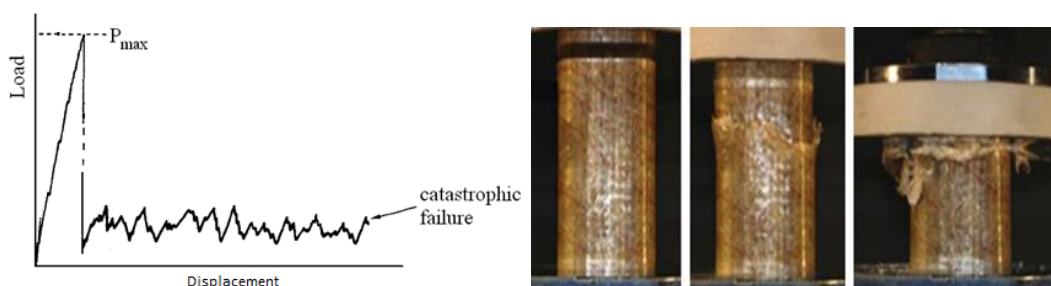
Ο τρόπος κατάρρευσης μέσω λυγισμού, παρουσιάζεται σε λεπτότοιχα δοκίμια (είτε μεταλλικά είτε σύνθετα) των οποίων ο λόγος μήκους/ διάμετρο είναι πολύ μεγάλος. Λόγω του ότι τα καταρρέοντα με αυτόν τον τρόπο κελύφη αποδίδουν μια πολύ μικρή ενέργεια απορρόφησης, είναι προτιμητέο να αποφεύγεται η εφαρμογή τους σε διατάξεις απορροφητών ενέργειας.

#### **2.13.2 Catastrophic failure**

Ο εν λόγω τρόπος κατάρρευσης, εμφανίζεται με εκτεταμένη περιφερειακή ψαθυρή θραύση του τοιχώματος. Η θραύση εμφανίζεται στο μέσον περίπου του κελύφους και



ακολουθεί διείσδυση του ενός (διαχωρισμένου εγκαρσίου) τμήματος στο άλλο (Εικ.1.3). Το ποσοστό απορροφημένης ενέργειας είναι πολύ μικρό (Εικ.1.3). Λόγω του ότι μετά την θραύση μόνο οι δυνάμεις τριβής μεταξύ των δύο τμημάτων (που το ένα διεισδύει στο άλλο) παρέχουν μια μικρή αντίσταση κατάρρευσης και προκύπτουσα ενέργεια απορρόφησης. [4]



**Σχήμα 2.14** Διάγραμμα φορτίου μετατόπισης και οπτική απεικόνιση καταστροφικής καταπόνησης. [5]

### 2.13.3 Progressive folding

Σε αντιστοιχία με την δημιουργία εκτατών λοβών στα μεταλλικά κελύφη, η προοδευτική αναδίπλωση (folding) (Εικ 2.15) παρουσιάζει μεγαλύτερη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας σε σχέση με τους προαναφερθέντες τρόπους κατάρρευσης συνθέτων κελυφών (λυγισμός, καταστροφική κατάρρευση). Ο εν λόγω τρόπος κατάρρευσης παρουσιάζει αρχικά γραμμές θραύσης και ακολούθως επάλληλες πτυχώσεις του συνθέτου υλικού κατά την εφαρμογή θλιπτικού φορτίου. Συνήθως, είναι η εμφάνισή του σε περιπτώσεις χρήσης ενισχυτικών ινών Kevlar για την δημιουργία συνθέτου.



**Σχήμα 2.15** Απεικόνιση σύνθετου δοκιμίου που έχει καταρρεύσει με progressive folding τρόπο.

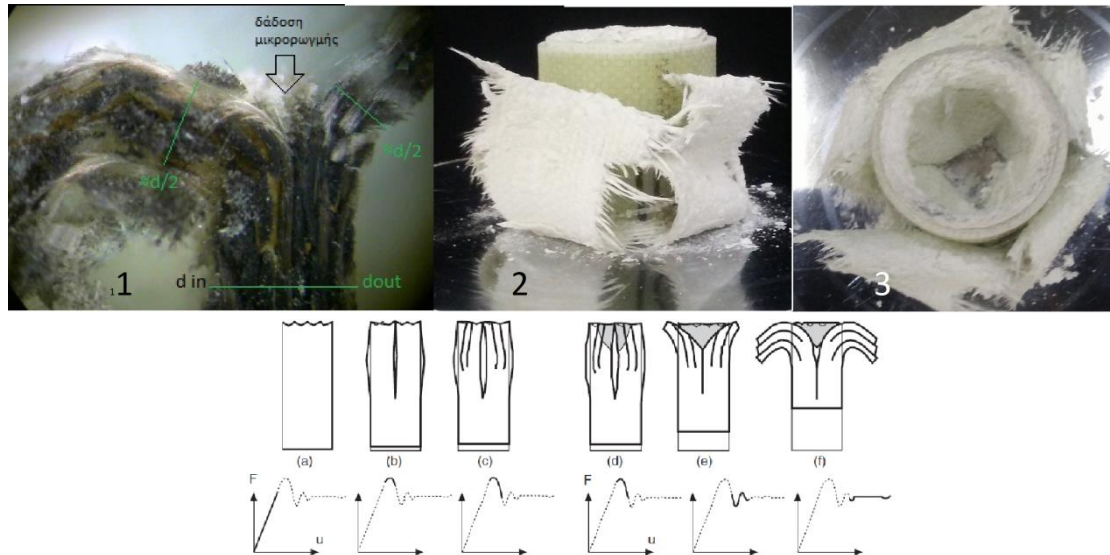
### 2.13.4 Progressive crushing

Ο συγκεκριμένος τρόπος κατάρρευσης χαρακτηρίζεται από προοδευτική συντριβή του συνθέτου υλικού με δημιουργία και διάδοση μικρορωγμών στην ζώνη παραμόρφωσης του κελύφους. Είναι ο πλέον αποδοτικός τρόπος κατάρρευσης συνθέτων υλικών και συνδέεται με μεγάλα ποσά ενέργειας απορρόφησης. Τα χαρακτηριστικά του χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες βάσει της μορφολογίας της εκτεινόμενης (κατά την συμπίεση) θραύσης.

- mushrooming failure
- προοδευτική αστοχία του καταρρέοντος υλικού προς τα **μέσα**
- προοδευτική αστοχία του καταρρέοντος υλικού προς τα **έξω**

#### 2.13.4.1 Mushrooming failure

Η πρώτη μορφή κατάρρευσης, αναφέρεται σαν αστοχία με μορφή μανιταριού (Σχήμα 2.16 (3)) λόγω της οπτικής παραπομπής της θραυμένης επιφάνειας σε μανιτάρι. Χαρακτηρίζεται κυρίως από την σταδιακή κατάρρευση του κελύφους μέσω του σχηματισμού συνεχών μετώπων τα οποία εκτείνονται εσωτερικά και εξωτερικά και με την ταυτόχρονη ανάπτυξη ενός αριθμού αξονικών ρηγματώσεων στο εξωτερικό μέτωπο λόγω εφελκυστικών περιφερειακών τάσεων (Σχήμα 2.16 (2)). Στα στρεφόμενα προς τα μέσα φύλλα του συνθέτου προκύπτουν θλιπτικά φορτία (Σχήμα 2.16 (3)) για τον λόγο αυτό εμφανίζεται μόνο θραύση και όχι διάρρηξη της συνέχειας τους υλικού μέσω διάδοσης ρωγμών. Η διαστρωματική αποκόλληση που λαμβάνει χώρα στο τοίχωμα του υλικού προκύπτει στο μισό του πάχους τοιχώματος (Σχήμα 2.16 (1)), και διαδίδεται κατακόρυφα μέσω σφήνα θρυμματισμένου/συμπιεσμένου υλικού (Σχήμα 2.16 (1) και 2.16 διαγραμματική απεικόνιση φαινομένου).



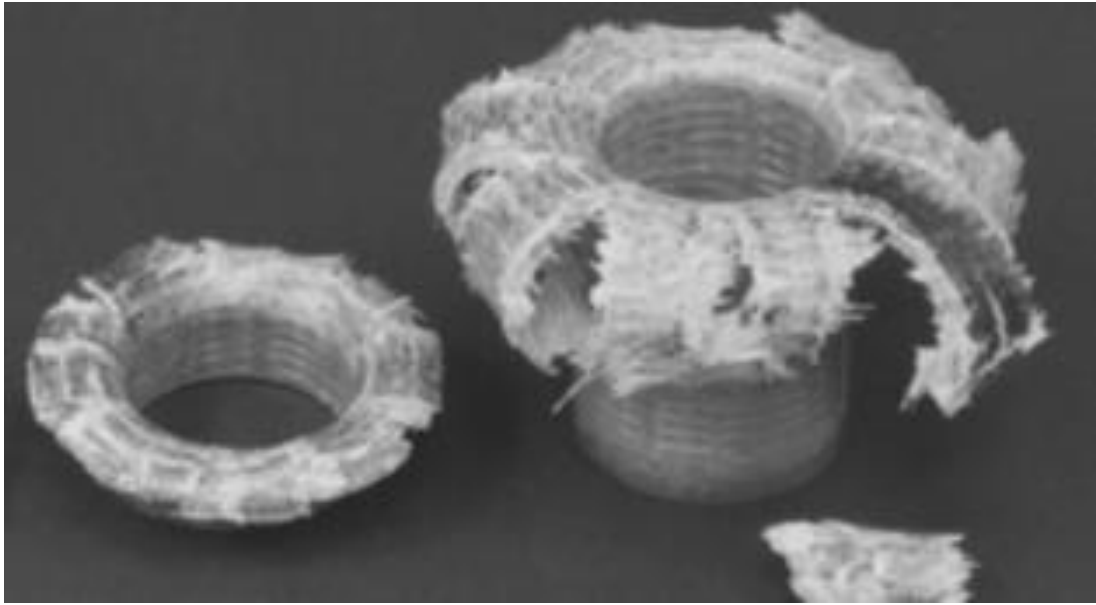
**Σχήμα 2.16** Στις εικόνες 1 έως 3 παρουσιάζεται η θραύση με μορφή μανιταριού. Στο κάτω μέρος της εικόνας, παρατίθεται τυπικό διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης, με τα στάδια δημιουργίας της εν λόγω δομής. [5]

#### 2.13.4.2 Προοδευτική αστοχία καταρρέοντος υλικού προς τα μέσα

Αυτή η μορφή προοδευτικής κατάρρευσης, χαρακτηρίζεται από στροφή του διαρρέοντος θρυμματιζόμενου υλικού αποκλειστικά προς τα μέσα. Η στροφή αυτή του παραμορφωθέντος υλικού προς τα μέσα εξελίσσεται σε όλη τη περιφέρεια και καθ' όλο το πάχος του τοιχώματος και δεν εμφανίζονται αξονικές ρηγματώσεις.

#### 2.13.4.3 Προοδευτική αστοχία καταρρέοντος υλικού προς τα έξω

Αυτή η μορφή προοδευτικής κατάρρευσης, χαρακτηρίζεται από στροφή του καταρρέοντος θρυμματιζόμενου υλικού αποκλειστικά προς τα έξω. Η στροφή αυτή του παραμορφωθέντος υλικού προς τα έξω εξελίσσεται σε όλη τη περιφέρεια και καθ' όλο το πάχος του τοιχώματος και εμφανίζονται ακτινικές ρηγματώσεις στην θραυμένη επιφάνεια (Εικ 2.17). Οι εν λόγω ρηγματώσεις προκύπτουν λόγω των καμπτικών και εφελκυστικών φορτίων που επιδρούν στην καταρρέουσα επιφάνεια .



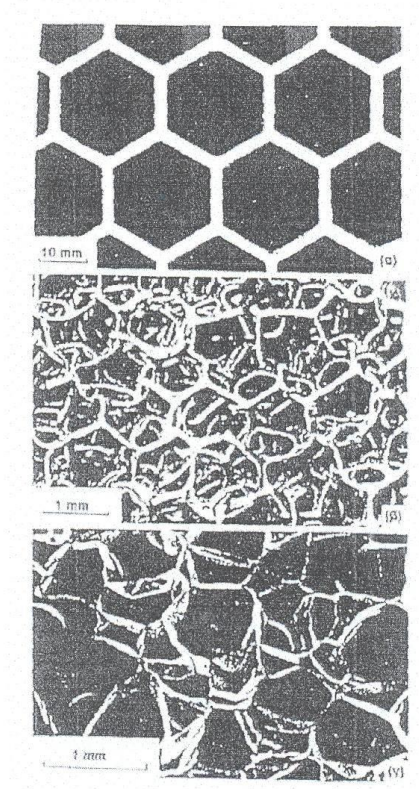
*Σχήμα 2.17 Χαρακτηριστική απεικόνιση κατάρρευσης συνθέτου κελύφους προς τα έξω.[6]*

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>

### 3.1 Αφρώδη υλικά

#### 3.1.1 Ορισμοί κυψελοειδών στερεών – αφρών

Με τον όρο κυψελοειδές στερεό, εννοούμε το στερεό εκείνο, το οποίο συνίσταται από ένα διασυνδεδεμένο δίκτυο από στερεές ράβδους ή πλάκες οι οποίες και μορφοποιούν τόσο τις άκρες όσο και τις επιφάνειες των κυψελών. Τρεις τυπικές δομές εμφανίζονται στις ακόλουθες εικόνες :



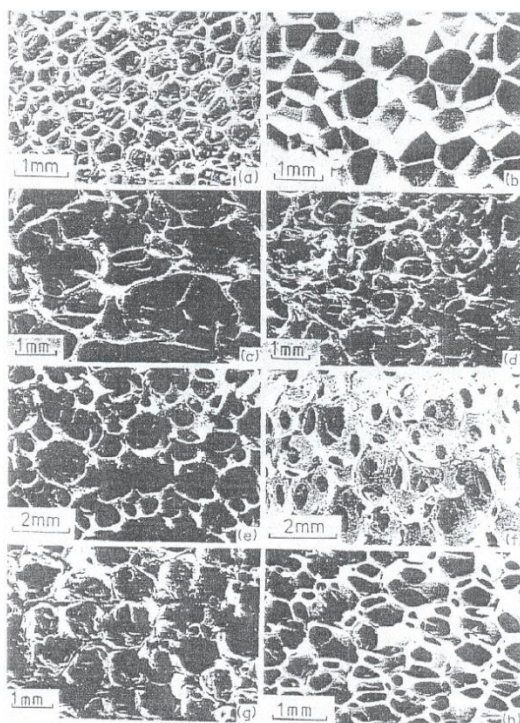
**Σχήμα 3.1** Παραδείγματα κυψελοειδών υλικών. (α) Κηρύθρα δύο διαστάσεων, (β) αφρός ανοιχτών κυψελών τριών διαστάσεων και (γ) αφρός κλειστών κυψελών τριών διαστάσεων.

Η απλούστερη είναι μια δισδιάστατη διάταξη από πολύγωνα, τα οποία είναι τοποθετημένα έτσι, ώστε να καλύπτουν μια επίπεδη επιφάνεια μορφής παρόμοιας με τις εξαγωνικές κυψέλες των μελισσών. Γι αυτό το λόγο τέτοια υλικά αποκαλούνται ως «κηρήθρες». Πιο απλά, οι κυψέλες είναι πολύεδρα τα οποία συγκροτούνται στο χώρο των τριών διαστάσεων μορφοποιώντας στερεά. Τέτοιου είδους κυψελοειδή υλικά των οποίων η δομή είναι τρισδιάστατη αποκαλούνται αφροί (foams). Εάν το στερεό από το οποίο είναι κατασκευασμένος ο αφρός περιέχεται μόνο στις άκρες των κυψελών τότε ο αφρός λέμε ότι είναι ανοικτών κυψελών (open celled). Αν και οι

όψεις των κυψελών είναι επίσης στερεές έτσι ώστε κάθε κυψέλη να είναι αποκλεισμένη δίχως συνδέσεις με τις διπλανές τις, λέμε ότι ο αφρός είναι κλειστών κυψελών (closed celled). Υπάρχουν και κάποιοι αφροί οι οποίοι είναι εν μέρει ανοιχτοί και εν μέρει κλειστοί.

Σημαντικό χαρακτηριστικό σε ένα κυψελοειδές υλικό είναι η σχετική του πυκνότητα  $\rho/\rho_s$ , δηλαδή το πηλίκο της πυκνότητας του κυψελοειδούς υλικού  $\rho$ , προς την πυκνότητα  $\rho_s$  του υλικού από το οποίο είναι φτιαγμένα τα τοιχώματα των κυψελών. Καθώς η σχετική πυκνότητα αυξάνεται, τα τοιχώματα των κυψελών διογκώνονται ενώ οι πόροι συστέλλονται – πέρα περίπου από την τιμή 0.30 υφίσταται μετάβαση από την αμιγώς κυψελοειδή δομή σε μια άλλη δομή η οποία μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελεί στερεό το οποίο περιέχει απομονωμένους μεταξύ τους πόρους.

Στις εικόνες που ακολουθούν διακρίνονται διάφορα παραδείγματα κυψελοειδών υλικών :



**Σχήμα 3.2.** Παραδείγματα κυψελοειδών υλικών. (α) πολυουρεθάνη, (β) πολυαιθυλένιο, (c) νικέλιο, (d) χαλκός, (e) ζirkονία, (f) μολύβης, (g) γυαλί, (h) πολυεστέρα.

### 3.2 Μέθοδοι παρασκευής κυψελοειδών στερεών

Τα πιο κοινά υλικά που μπορούν να αποκτήσουν δομή αφρού είναι τα πολυμερή. Πάντως και τα μέταλλα, τα κεραμικά, τα υαλώδη, αλλά ακόμα και τα σύνθετα υλικά μπορούν να παραχθούν ως αφροί σε σύνθετη δομή. Οι κυριότεροι τρόποι παρασκευής κυψελοειδών στερεών είναι οι εξής :

#### α) Κηρήθρες :

Ένας προφανής τρόπος κατασκευής υλικού είναι να συμπιεστεί ένα λεπτό φύλλο υλικού και να δώσει ένα ημιεξαγωνικό προφίλ. Στη συνέχεια πρέπει να κολληθούν τα ημιεξαγωνικά προφίλ, ώστε να δώσουν εξάγωνα. Επίσης, κηρήθρες μπορούν να χυτευτούν σε καλούπια. Τέλος, κηρήθρες μπορούν να παραχθούν και με διέλαση. Οι κεραμικές κηρήθρες που χρησιμοποιούνται στους καταλύτες των αυτοκινήτων κατασκευάζονται με τον τρόπο αυτό.

#### β) Αφροί :

Για την μορφοποίηση σε αφρούς διαφόρων ειδών στερεών χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές. Τα πολυμερή μορφοποιούνται σε αφρούς με την εισαγωγή φυσαλίδων αερίου στο υγρό μονομερές ή στο θερμό πολυμερές, επιτρέποντας στις φυσαλίδες να διογκωθούν και να στερεοποιηθούν, και στη συνέχεια να στερεοποιηθούν με ψύξη. Το αέριο εισάγεται με τη βοήθεια μηχανικού αναδευτήρα, είτε αναμειγνύοντας κάποιο μέσο που διογκώνεται μέσα στο πολυμερές βοηθώντας έτσι στο να λάβει το αέριο μέρος του όγκου του. Φυσικά διογκωτικά μέσα είναι τα αδρανή αέρια, όπως το διοξείδιο του άνθρακα ή το άζωτο. Αυτά διαλύονται στο θερμό πολυμερές σε υψηλή πίεση και διαστέλλονται καθώς η πίεση ελατώνεται. Εναλλακτικά, υγρά χαμηλού σημείου τήξης, όπως οι χλωροφθοράνθρακες, αναμειγνύονται με το πολυμερές και εξατμίζονται κατόπιν θέρμανσης προς σχηματισμό ατμωδών φυσαλίδων. Τα χημικά διογκωτικά μέσα είναι πρόσθετα, τα οποία είτε αποσυντίθενται κατά την θέρμανση, είτε ελευθερώνουν αέρια. Οποιαδήποτε από τις παραπάνω διεργασίες οδηγεί στη δημιουργία αφρών ανοικτών ή κλειστών κυψελών. Αφροί μετάλλων παράγονται αναμειγνύοντας οργανικές αλυσίδες (πχ άνθρακα) μέσα στο τήγμα του μετάλλου σε αδρανή ατμόσφαιρα. Όταν το μέταλλο ψυχθεί και στερεοποιηθεί, ο άνθρακας αφήνει στη θέση του μια μήτρα κυψελοειδούς μορφής. Εξάλλου, τα μέταλλα μπορούν να διηθηθούν μέσα σε χαμηλής πυκνότητας επίστρωμα άνθρακα ή κεραμικού, το οποίο ακολούθων απομακρύνεται, αφήνοντας το σκελετό του μετάλλου το οποίο είχε διαπεράσει τους πόρους. Κονιοποιητικές μέθοδοι μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν. Σκόνη μετάλλου αναμειγνύομενη με αδρανές υλικό (άνθρακα) δημιουργεί συμπαγές συσσωμάτωμα. Μετά τη συσσωμάτωση, το πρόσθετο του άνθρακα απομακρύνεται. Αφροί μετάλλων, τέλος, μπορούν να παραχθούν με απευθείας διαμόρφωση: δημιουργώντας εγκλείσματα πάνω στα φύλλα των μετάλλων και εν συνεχεία ενώνοντας τα φύλλα μεταξύ τους. Αφροί μετάλλων παράγονται με παρόμοιες μεθόδους με αυτές που χρησιμοποιούνται για τα πολυμερή κυρίως με χρήση

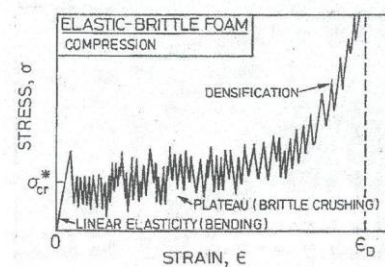
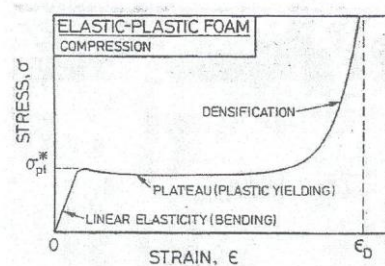
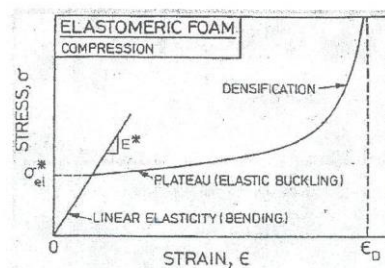
διογκωτικών μέσων. Αφροί κεραμικών παράγονται διηθώντας έναν αφρό πολυμερούς σε μίγμα του κεραμικού σε νερό ή σε κάποιο άλλο υγρό.

### 3.3 Μηχανική συμπεριφορά των αφρών

Οι μηχανικές ιδιότητες ενός αφρού σχετίζονται με τη δομή του και με το υλικό από το οποίο είναι φτιαγμένα τα τοιχώματα των κυψελών του. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά της δομής ενός αφρού είναι η σχετική του πυκνότητα  $\rho/\rho_s$ , ο βαθμός στον οποίο οι κυψέλες είναι ανοικτές ή κλειστές και οι λόγοι ανισοτροπίας του R12 και R13. Οι κρίσιμες ιδιότητες των τοιχωμάτων των κυψελών είναι η πυκνότητα του στερεού από το οποίο αποτελούνται  $\rho_s$ , το μέτρο ελαστικότητας  $E_s$ , το όριο διαρροής  $\sigma_v$ , το όριο θραύσης  $\sigma_f$ , και οι παράμετροι ερπυσμού  $\eta_s$ ,  $\epsilon_{os}$  και  $\sigma_{os}$ .

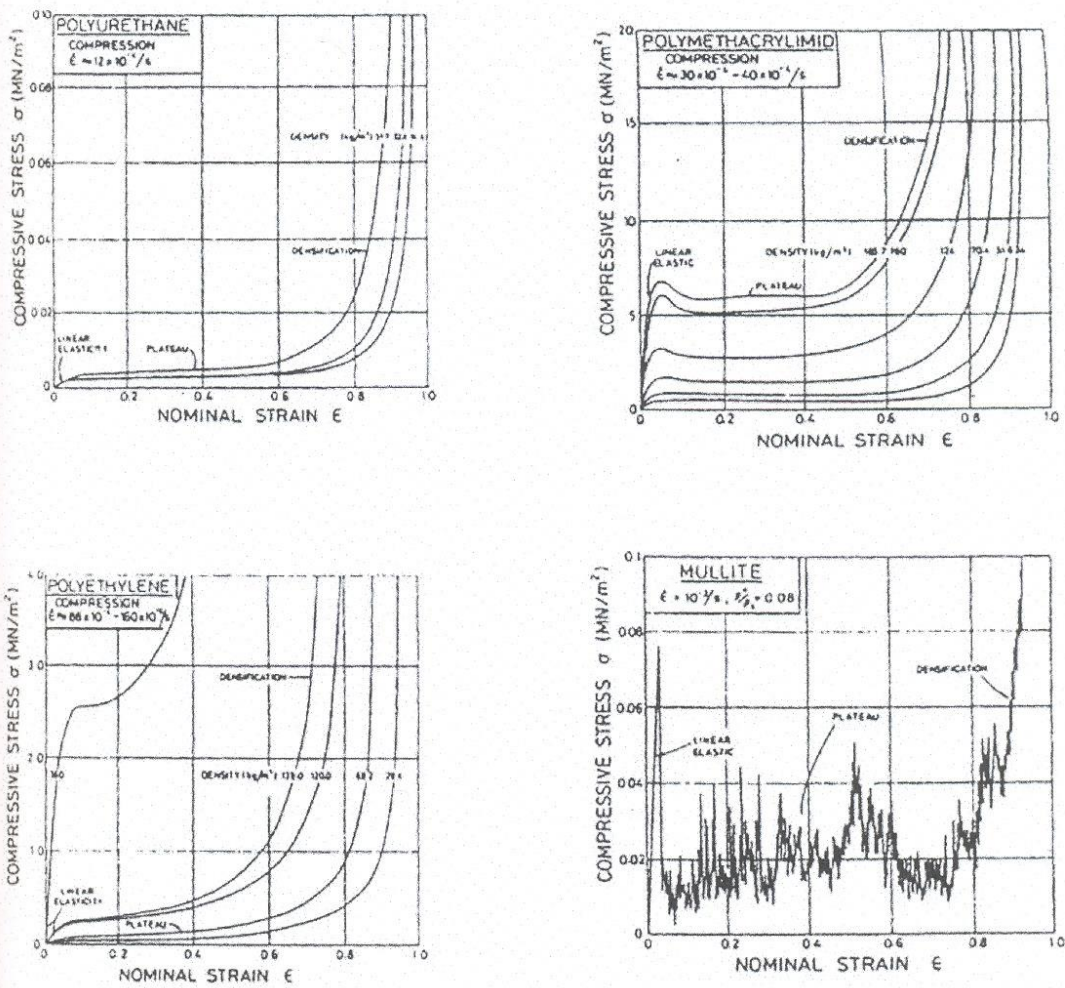
Οι ιδιότητες ενός αφρού αναλύονται με βάση αυτές τις παραμέτρους και κατόπιν συγκρίνονται και συσχετίζονται με τα πειραματικά δεδομένα προκειμένου να δώσουν τις κατάλληλες εξισώσεις. Παράγοντες όπως ο ρυθμός παραμόρφωσης, η θερμοκρασία, η ανισοτροπία και η πολυαξονική φόρτιση επηρεάζουν σημαντικά τις ιδιότητες αυτές. Γενικά, η έρευνα της πλήρους μηχανικής ανάλυσης είναι αρκετά δύσκολη, λόγω της γεωμετρικής πολυπλοκότητας.

Στα παρακάτω σχήματα παρατίθενται οι καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης και οι μικρογραφίες για εφελκισμό ή θλίψη για έναν ελαστομερή, έναν ελαστικο-πλαστικό και έναν ψαθυρό αφρό :

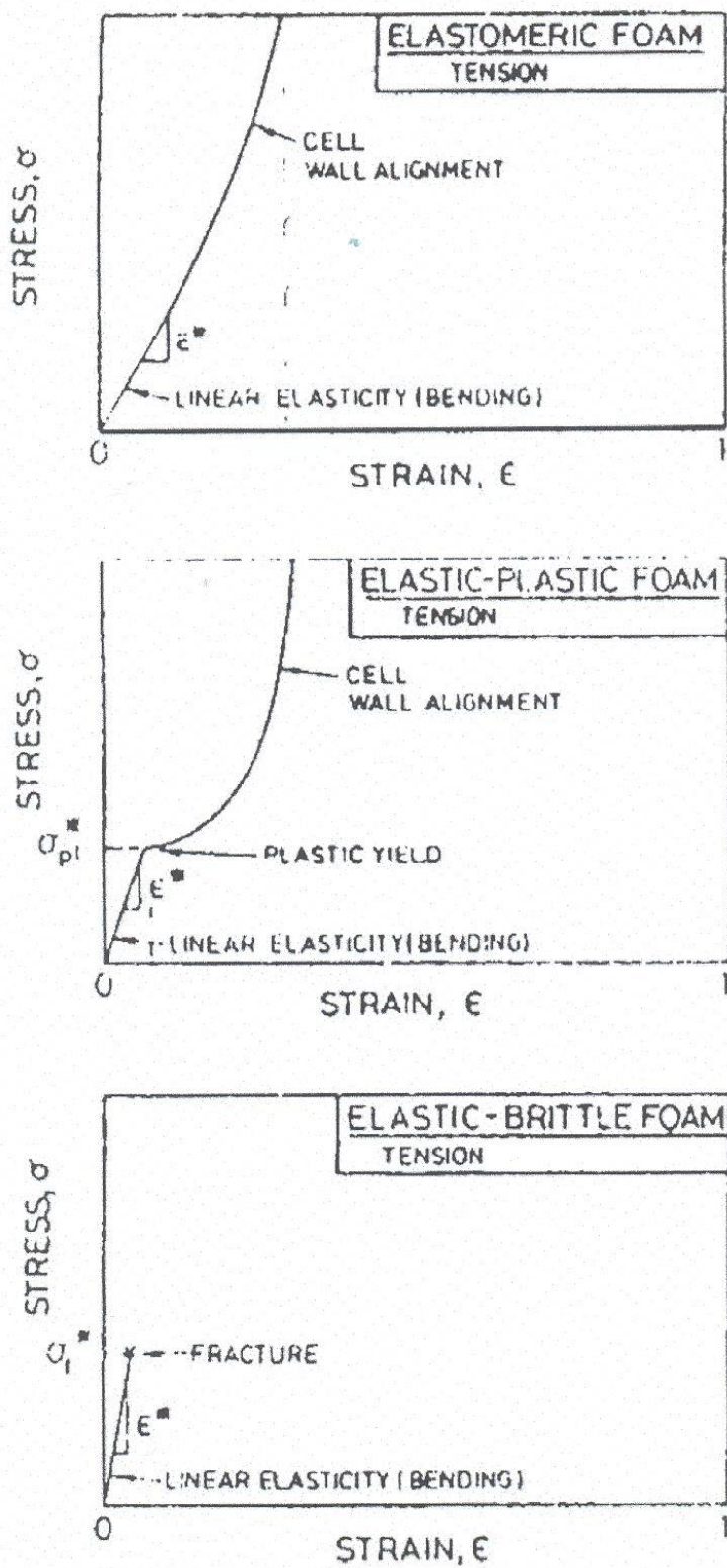




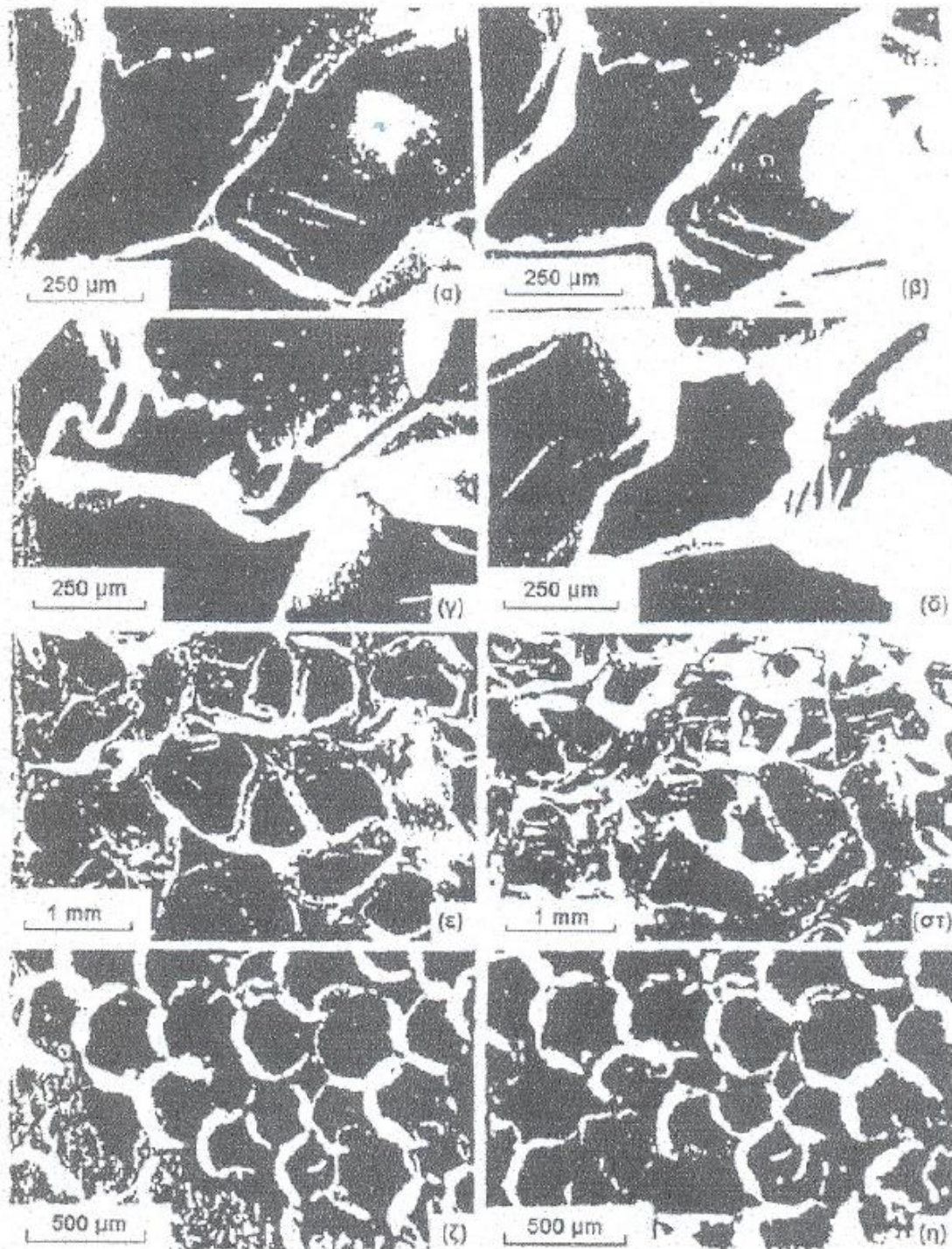
**Σχήμα 3.3** Καμπύλες τάσης παραμόρφωσης θλιπτικής καταπόνησης για (α) ελαστομερή αφρό, (β) ελαστικό-πλαστικό αφρό και (γ) ψαθυρό ελαστικό αφρό.



**Σχήμα 3.4** Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης θλίψης για αφρούς (α) εόκαμπτης πολυουρεθάνης, (β) πολυαιθυλενίου, (γ) πολυμεθυλακρυλαμιδίου και (δ) μουλλίτη για διάφορες τιμές πυκνότητας.



**Σχήμα 3.5** Καμπύλες τάσεων – παραμορφώσεων δοκιμής εφελκυσμού για (α) ελαστομερή αφρό, (β) ελαστοπλαστικό αφρό και (γ) ελαστικό ψαθυρό αφρό.



**Σχήμα 3.6** Μικρογραφίες στις οποίες βλέπουμε τους τρόπους της παραμόρφωσης που ανταποκρίνονται σε κάθε περιοχή συμπεριφοράς στη θλίψη του ελαστομερούς πολυαιθυλενίου: (α) αφόρτιστο, (β) φόρτιση στην περιοχή γραμμικής ελαστικότητας, (γ) φόρτιση στην περιοχή της μη γραμμικής ελαστικότητας, (δ) αποκατάσταση ελαστικής παραμόρφωσης στη αποφόρτιση.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>

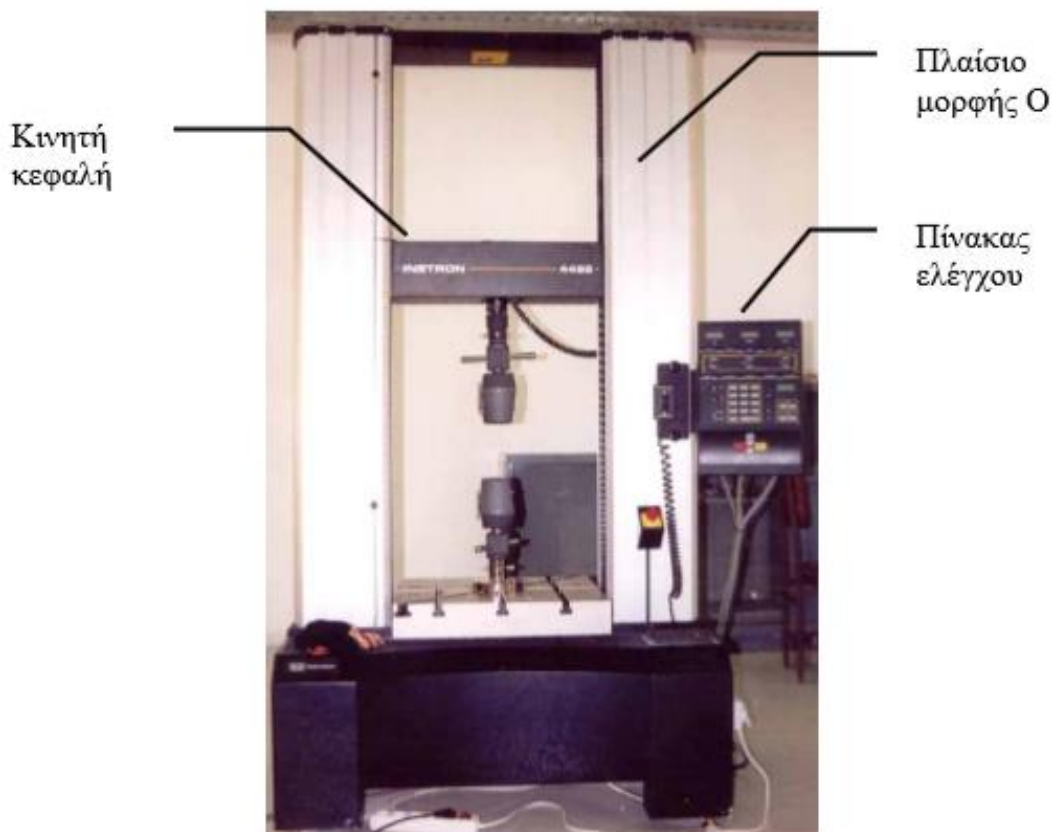
### 4.1 Πειραματική διαδικασία

#### Σύνοψη

Στο παρακάτω κεφάλαιο παρουσιάζονται οι διατάξεις των πειραματικών διαδικασιών καθώς και οι παράμετροι για την εκτέλεση των πειραμάτων. Ακόμα, παρατίθενται οι εξαγόμενες μετρήσεις καθώς και τα αποτελέσματα αυτών.

### 4.2 Πειραματικός εξοπλισμός - πρέσα INSTRON 4482

Για την αξονική στατική καταπόνηση χρησιμοποιήθηκε η πρέσα δοκιμών INSTRON 4482 του εργαστηρίου (Εικ. 4.1). Πρόκειται για μηχανική πρέσα (μηχανισμού, κοχλία -περικοχλίου) ονομαστικού φορτίου 10 KN.



**Εικόνα 4.1:** Πρέσα δοκιμών INSTRON 4482.

Τα βασικά μέρη της πρέσας αυτής, είναι:

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

Τα βασικά λειτουργικά χαρακτηριστικά της πρέσας είναι:

- Ονομαστική δύναμη: 10 KN.
- Μέγιστη ταχύτητα κινητής κεφαλής: 500 mm/ min
- Ταχύτητα επιστροφής κινητής κεφαλής στην αρχική θέση: 600 mm/ min.
- Μέγιστο αναπτυσσόμενο φορτίο στη μέγιστη ταχύτητα: 75 KN.
- Μέγιστη ταχύτητα κινητής κεφαλής σε μέγιστο φορτίο: 250 mm/ min.
- Ευαισθησία κεφαλής πρέσας: 2 mV/ V.

### 4.3 Γεωμετρικά στοιχεία δοκιμίων

Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα που εκτελέστηκε, χωρίζονται σε δυο ομάδες, τα τετραγωνικά (S) και τα ορθογωνικά (R). Έγινε χρήση επτά (7) δοκιμίων ορθογωνικής διατομής και έξι (6) δοκιμίων τετραγωνικής τα οποία σε κάθε επανάληψη του πειράματος είχαν πυρήνα διαφορετικού τύπου πολυμερικού αφρού. Στον κάτωθι πίνακα φαίνονται τα γεωμετρικά στοιχεία των δυο ομάδων δοκιμίων:

**Πίνακας 4.1** Γεωμετρικά στοιχεία δοκιμίων

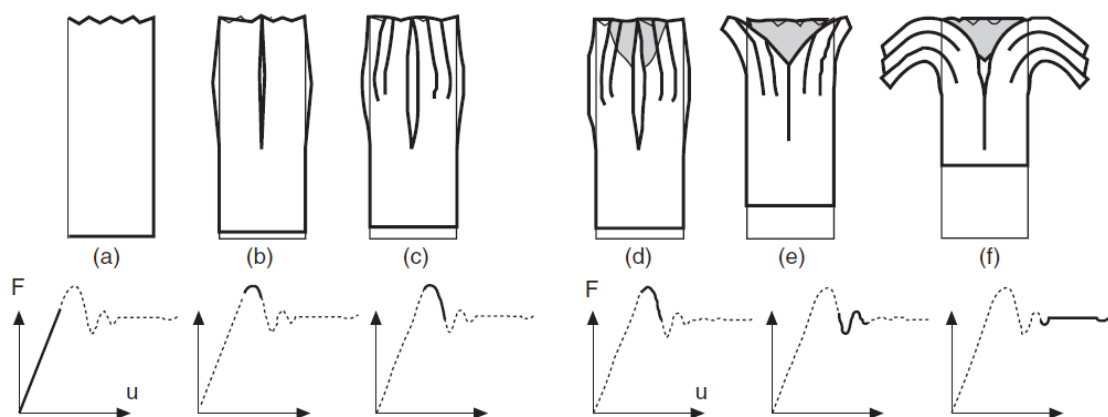
Ομάδα δοκιμίων		
Γεωμετρικά στοιχεία	Τετραγωνικά δοκίμια	Ορθογωνικά δοκίμια
Ύψος	69,00 mm	69,00 mm
Εξωτερική διάμετρος (Μεγάλη)	49,50 mm	58,30 mm
Εξωτερική διάμετρος (Μικρή)		48,00 mm
Εσωτερική διάμετρος (Μεγάλη)	41,85 mm	52,40 mm
Εσωτερική διάμετρος (Μικρή)		41,30 mm
Πάχος τοιχώματος	3,50 mm	3,60 mm
Πάχος στην γωνία	2,1 mm	2.27 mm

Εσωτερική ακτίνα καμπυλότητας	7,0 mm	7,00 mm
Εξωτερική ακτίνα καμπυλότητας	13,00 mm	11,00 mm

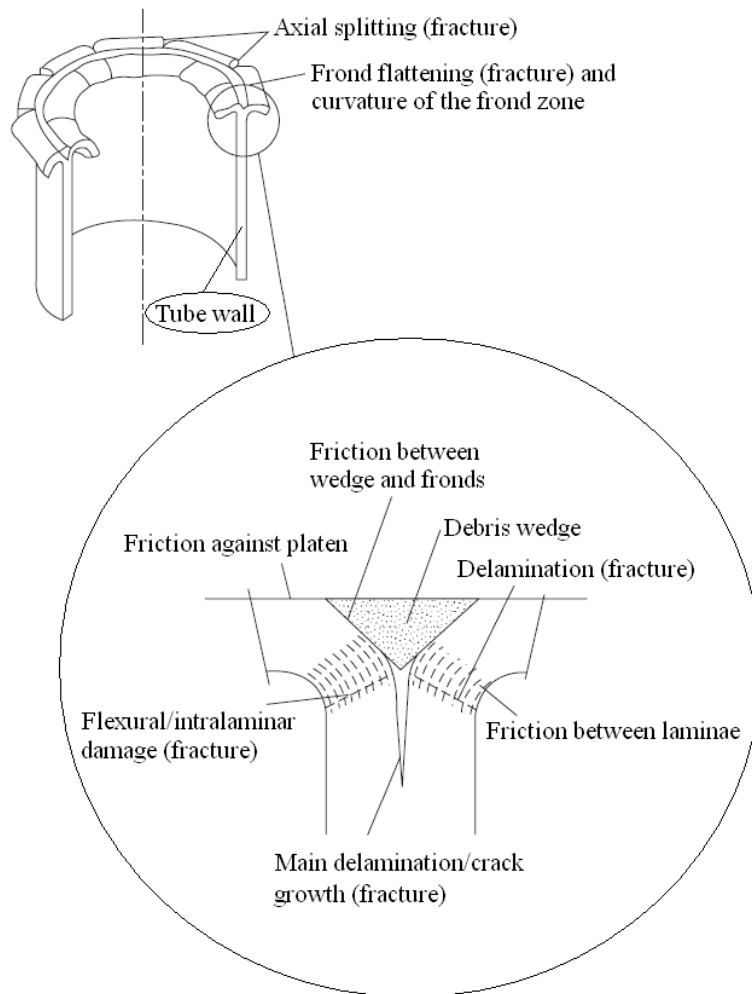
#### 4.4 Πειραματικές μετρήσεις και αποτελέσματα δοκιμίων

Στην παρούσα παράγραφο εξετάζεται η κατάρρευση των δοκιμίων σύνθετου υλικού σε συνθήκες στατικής αξονικής συμπίεσης

Στα σύνθετα κελύφη, υπό συνθήκες αξονικής συμπίεσης, διαπιστώθηκε ευσταθής, προοδευτικός και ελεγχόμενος τρόπος (μοτίβο) κατάρρευσης. Η συνολική ακολουθία κατάρρευσης, και τα μακροσκοπικά μοτίβα που τη συνιστούν, διέπουν την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας του κελύφους. Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε προοδευτική κατάρρευση με μικρο-θραύσεις του σύνθετου υλικού, συνοδευόμενη από υψηλά ποσά ενέργειας απορρόφησης, με αποτέλεσμα να σχηματιστεί ζώνη θραύσης (μέτωπο κατάρρευσης), στο ένα ή και στα δύο άκρα του κελύφους, σε μορφή μανιταριού (“mushrooming” failure). Οι εσωτερικές στρώσεις συγκλίνουν ακτινικά - συμπιεζόμενες περιφερικά - προς το εσωτερικό του σωλήνα, ενώ οι εξωτερικές στρώσεις εκτείνονται προς το εξωτερικό του σωλήνα, εφελκυόμενες περιφερικά. Ο διαχωρισμός των στρώσεων λαμβάνει χώρα περίπου στο μέσο του τοιχώματος, οφειλόμενος στην κεντρική διαμήκη ρωγμή διαστρωματικής αποκόλλησης (αποκόλληση δύο διαδοχικών στρώσεων στη συγκεκριμένη - περίπου μέση - διάμετρο του κελύφους) Το μοτίβο αυτό κατάρρευσης χαρακτηρίζεται ως “progressive crushing splaying mode” και αποτελεί τον αποδοτικότερο τρόπο αξονικής θλιπτικής κατάρρευσης σύνθετου κελύφους με κριτήριο την απορρόφηση ενέργειας και τα επιμέρους χαρακτηριστικά αξιολόγησής της. [1-4].



**Εικόνα 4.4:** Μηχανισμός ανάπτυξης μετώπου (ευσταθούς) κατάρρευσης (crash-front) σύνθετου σωλήνα (τοιχώμα) σε αξονική συμπίεση (σχηματικά) και συσχέτιση με τα αντίστοιχα τμήματα του διαγράμματος φορτίου-μετατόπισης [6]



**Εικόνα 4.5:** Σχηματική αναπαράσταση της ζώνης θραύσης (μέτωπο κατάρρευσης) σύνθετου σωλήνα (τοιχώμα) σε αξονική συμπίεση, με απεικόνιση των παραγόντων απορρόφησης ενέργειας [1, 6]

Συγκεκριμένα, τα κύρια χαρακτηριστικά του παραπάνω μηχανισμού μικρο-θραύσεων είναι (Εικ.4.4 και 4.5) [1-3, 5]:

- Ένας δακτυλιοειδής σφήνας έντονα θρυμματισμένου υλικού, ωθούμενου αξονικά διά μέσου του τοιχώματος προς το τρεχόντως αλώβητο τμήμα του.
- Μια διαμήκης - κατά τον άξονα του κελύφους - μικρο-ρωγή εντός του τοιχώματος, που αναπτύσσεται μπροστά από τη ζώνη θραύσης στην κορυφή του δακτυλιοειδούς σφήνα και διαδίδεται με ρυθμό που προσεγγίζει εκείνον της αξονικής συμπίεσης.
- Δύο συνεχείς δέσμες (φύλλα) στρώσεων (εσωτερική και εξωτερική) ως αποτέλεσμα κυρίως της διαστρωματικής αποκόλλησης στη ζώνη θραύσης, που σχηματίζονται και εκτείνονται ακτινικά - καμπτόμενες - προς το εσωτερικό και το εξωτερικό του κελύφους - λόγω του εσωτερικού/κεντρικού σφήνα - μεταξύ της κεντρικής διαμήκου ρωγής και της εσωτερικής και εξωτερικής αντίστοιχα επιφάνειας του τοιχώματος, υποκείμενες σε συνδυασμένη εφελκυστική και

θλιπτική παραμόρφωση. Στην εξωτερική δέσμη στρώσεων σχηματίζονται διαμήκεις σχισμές λόγω του αναπτυχθέντος εφελκυσμού περιφερικά, ενώ στην εσωτερική δέσμη στρώσεων δεν παρατηρείται κάτι αντίστοιχο (σχεδόν συνεχείς οι στρώσεις), καθώς υπόκειται σε θλίψη περιφερικά λόγω του περιορισμένου εσωτερικού χώρου του κελύφους. Και οι δύο δέσμες στρώσεων (εσωτερική και εξωτερική) υφίστανται υψηλή καμπτική παραμόρφωση λόγω αλλαγής της κατεύθυνσής τους διαδοχικά, κατά την ολίσθησή τους στις παρειές του σφήνα (εσωτερική και εξωτερική αντίστοιχα) και στην επιφάνεια της πλάκας συμπίεσης. Ως αποτέλεσμα αυτού, λόγω διάτμησης στη ζώνη κάμψης, δευτερεύουσες διαμήκεις μικρο-ρωγμές και διαστρωματική αποκόλληση αναπτύσσονται μεταξύ των επιμέρους στρώσεων των δεσμών λόγω διάτμησης στη ζώνη κάμψης.

Από τη σκοπιά της ενέργειας απορρόφησης, οι κυριότεροι παράγοντες που συντελούν σε αυτήν είναι μικροσκοπικά οι ακόλουθοι (Εικ 4.4 και 4.5 [1, 2]):

- Διάδοση διαμήκους (κατά τον άξονα του κελύφους) κεντρικής ρωγμής εντός του τοιχώματος
- Κάμψη των δεσμών των στρώσεων λόγω της κεντρικής διαστρωματικής αποκόλλησης
- Διαμήκης διαίρεση/σχίσσιμο των δεσμών των στρώσεων
- Καμπτική αστοχία μεμονωμένων στρώσεων λόγω μεγάλης καμπυλότητας στο όριο της κεντρικής διαστρωματικής αποκόλλησης (κορυφή σφήνα θρυμματισμένου υλικού)
- Αντίσταση τριβής σε διαμήκη ολίσθηση μεταξύ διαδοχικών στρώσεων
- Αντίσταση τριβής μεταξύ του σφήνα και της εσωτερικής και εξωτερικής δέσμης στρώσεων κατά τη διείδυσή του ανάμεσά τους
- Αντίσταση τριβής των δεσμών των στρώσεων κατά την ακτινική ολίσθησή τους - εσωτερικά και εξωτερικά του τοιχώματος - επί της πλάκας συμπίεσης

Στις περιπτώσεις προοδευτικής και ευσταθούς αξονικής κατάρρευσης σύνθετων κελυφών, όπως η συγκεκριμένη, με τους μηχανισμούς και τη μορφολογία που περιεγράφηκε παραπάνω, το μεγαλύτερο ποσοστό (50% και άνω) της ενέργειας απορρόφησης δαπανάται στις τριβές εντός του υλικού και στις επιφάνειες των πλακών συμπίεσης [1, 3].

Όσον αφορά στο διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης, το φορτίο αρχικά αυξάνεται απότομα και γραμμικά, παρακολουθώντας την ελαστική παραμόρφωση του κελύφους, μέχρι τον σχηματισμό της πρώτης - κεντρικής - ρωγμής περιφερικά στο εσωτερικό του τοιχώματος του κελύφους. Στο σημείο αυτό καταγράφεται ουσιαστικά η αντοχή του κελύφους σε αξονική συμπίεση, αφού η αρχική αυτή κορυφή του φορτίου συνιστά και τη μέγιστη τιμή ( $P_{max}$ ) που λαμβάνει κατά τη διάρκεια της κατάρρευσης. Αμέσως μετά το φορτίο μειώνεται ραγδαία, αλλά σε μικρό βαθμό



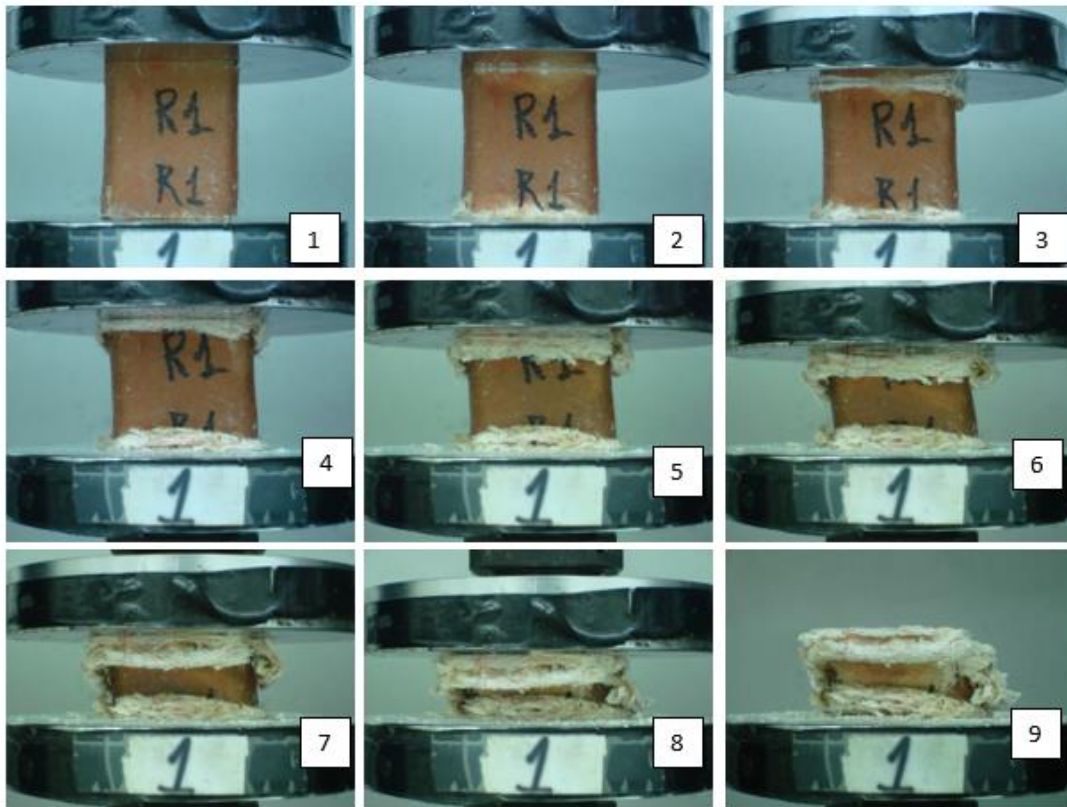
σχετικά, και ξεκινά η διαδικασία κατάρρευσης με σταθερά αυξανόμενη την αξονική βράχυνση του κελύφους. Το φορτίο πλέον, και μέχρι την ολοκλήρωση της συμπίεσης, κυμαίνεται ταλαντωτικά - με μικρό εύρος τιμών και υψηλή συχνότητα - γύρω από μία (σχεδόν σταθερή) μέση τιμή. Η «οδοντωτή» μορφή του διαγράμματος φορτίου-μετατόπισης είναι αποτέλεσμα των ψαθυρών (λόγω των ιδιοτήτων των συστατικών του σύνθετου υλικού) μικρο-θραύσεων που διέπουν τον μηχανισμό κατάρρευσης του κελύφους, όπως περιγράφηκε προηγουμένως.

Στο τελικό στάδιο της διαδρομής φόρτισης και των δύο κελυφών καταγράφεται μια σχεδόν ανεπαίσθητη αύξηση του φορτίου, στην οποία φαίνεται να συμβάλλει - πέραν του γεγονότος ότι τα κελύφη βραχυνόμενα καθίστανται κατά τι στιβαρότερα - η επιπλέον αξονική συμπίεση των εσωτερικών δεσμών των στρώσεων, που καμπτόμενες μετά τον σχηματισμό και τη διέλευσή τους από το μέτωπο κατάρρευσης, στρέφονται προς την αντίθετη κατεύθυνση, οδηγούμενες αξονικά εντός του περιορισμένου διαθέσιμου εσωτερικού κενού του κελύφους, προς την απέναντι πλάκα συμπίεσης. Η απουσία - ουσιαστικά - αξονικών σχισμάτων και ο πολύ περιορισμένος διαθέσιμος χώρος κίνησής τους, τις καθιστούν σχετικά στιβαρές αξονικά, παρόλη την προηγηθείσα αστοχία, με αποτέλεσμα να καταγράφεται ένα μικρό πρόσθετο φορτίο.

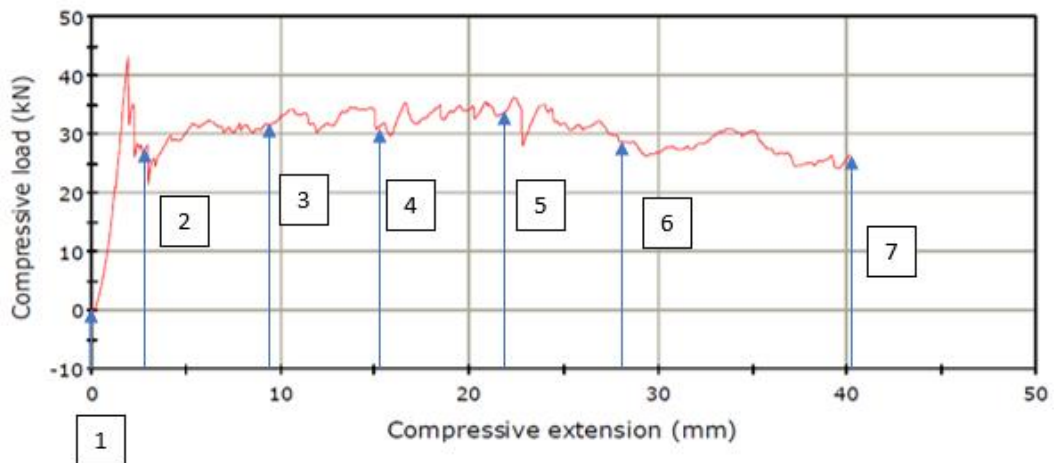
Στις εξωτερικές δέσμες στρώσεων δεν παρατηρείται κάτι αντίστοιχο, καθώς αυτές διαθέτουν απεριόριστο χώρο για την έκτασή τους, και επιπλέον - λόγω ακριβώς αυτού - κάμπτονται με αρκετά μικρότερη καμπυλότητα μετά τη «διέλευσή» τους από το μέτωπο κατάρρευσης, με αποτέλεσμα να μην κατευθύνονται αμιγώς στην αξονική διεύθυνση και να μην έρχονται καθόλου σε επαφή με την απέναντι πλάκα συμπίεσης.

Συνολικά, τα μεταβατικά φαινόμενα σύνθλιψης και θραύσης, καθώς και ο σχηματισμός και η ανάπτυξη του μηχανισμού κατάρρευσης, σχετικά με την αξονική συμπίεση κελυφών σύνθετου υλικού, είναι εξαιρετικά πολύπλοκα και στοχαστικά. Η εντατική κατάσταση στην οποία υπόκεινται οι μεμονωμένες ζώνες του κελύφους είναι σύνθετη, περιλαμβάνοντας - κατά περίπτωση - συνδυασμό των απλών εντατικών καταπονήσεων: εφελκυσμό/έκταση, θλίψη, κάμψη, διάτμηση [1, 2].

#### 4.4.1 Δοκίμο R1



STRESS - STRAIN (ENGINEERING) GRAPH



**Εικόνα 4.6:** Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης δοκ. R1 και καμπύλη φορτίου-μετατόπισης. Η αρίθμηση (1-7) στην καμπύλη δηλώνει τις θέσεις των στιγμιότυπων.

**Πίνακας 4.2:** Πειραματικά δεδομένα και αποτελέσματα για το δοκ. R1

R1	
Φωτογραφία	Displacement (mm)
0	0
1	2.7
2	9.8
3	15.2
4	21.8
5	27.8
6	33.0
7	40.1

Διαδρομή εμβόλου:	S	40	mm
Μέσο Φορτίο	Pmean	29.94	kN
Μέγιστο φορτίο	Pmax	43.25	kN
Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου	c.f.e	0.692	%
Ενέργεια απορρόφησης	Eabs	1198,144	Joule

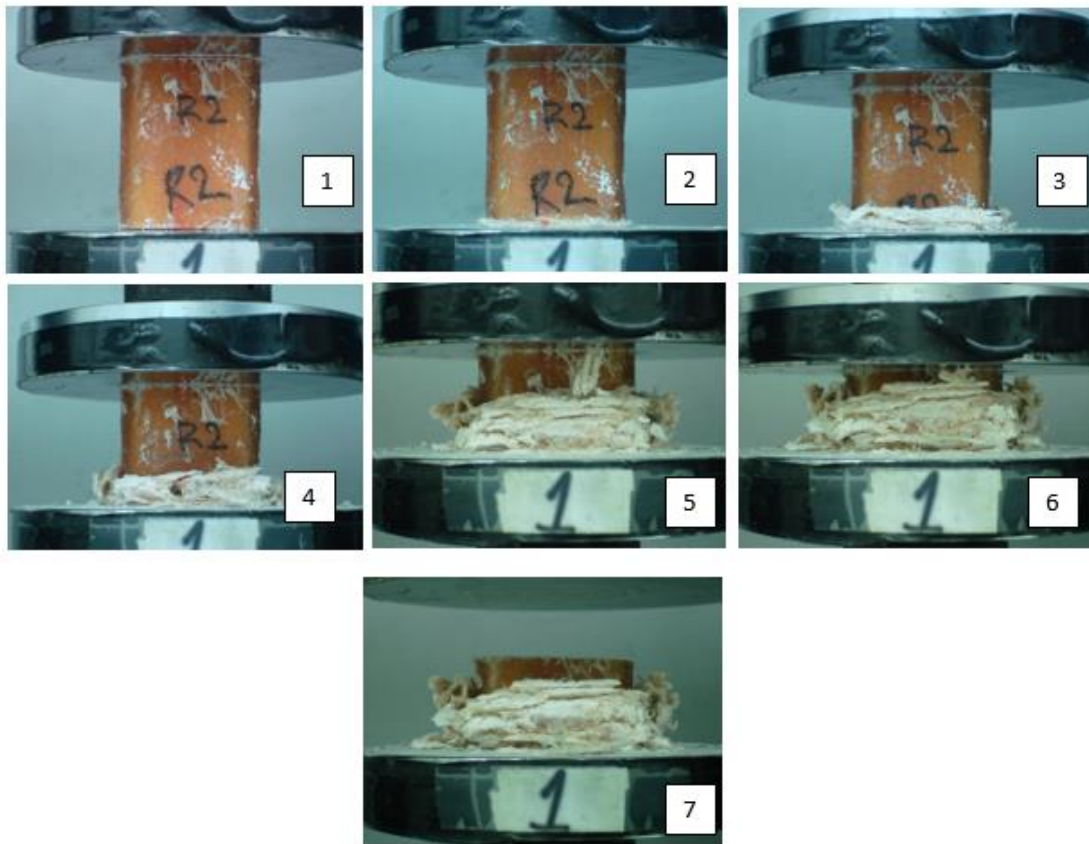
Το δοκίμιο R1 αποτελεί ορθογωνικής διατομής κέλυφος με πυρήνα από αφρό πολυαιθυλαίνιου.

Το κέλυφος του δοκιμίου R1 συμπιέζεται αξονικά μεταξύ της άνω (κινούμενης προς τα κάτω) πλάκας συμπίεσης και της κάτω ακίνητης πλάκας της μηχανής δοκιμών. Κατά την εξέλιξη του πειράματος παρατηρήθηκε προοδευτική κατάρρευση με μικροθραύσεις του σύνθετου υλικού, συνοδευόμενη από υψηλά ποσά ενέργειας απορρόφησης, με αποτέλεσμα να σχηματιστεί ζώνη θραύσης (μέτωπο κατάρρευσης), και στα δύο άκρα του κελύφους, σε μορφή μανιταριού (“mushrooming” failure).

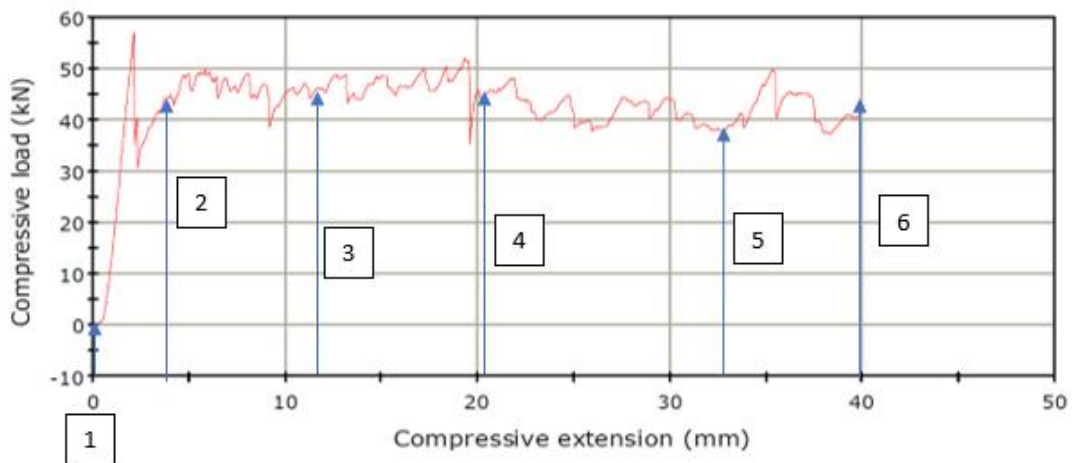
Κατά την δυναμική άσκηση φορτίου στο δοκίμιο R1 καταγράφηκε το μέγιστο φορτίο στα 43.25 KN για την τιμή βράχυνσης των 1.9471 mm.

Ο τρόπος κατάρρευσης του δοκιμίου σύμφωνα με το διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης, χαρακτηρίζεται αποτελεσματικός λόγω των μεγάλων ποσών ενέργειας που απορροφούνται και της ομοιομορφίας του φορτίου. Αρχικά παρατηρείται μεγάλη αύξηση του φορτίου με αντίστοιχη μικρή βράχυνση του δοκιμίου λόγω της προβαλλόμενης αντίστασης του υλικού. Στη συνέχεια, σημειώνεται δραστική μείωση του φορτίου και έναρξη προοδευτικής κατάρρευσης του υλικού με εμφάνιση μικρορωγμών και με μικρές έντονες διακυμάνσεις του φορτίου συμπίεσης. Λόγω του τελευταίου η καμπύλη φορτίου-μετατόπισης χαρακτηρίζεται από έντονα πριονωτή μορφή και κυμαίνεται κοντά στην τιμή του μέσου φορτίου. Τέλος κατά την συμπίεση του σύνθετου, οι στρώσεις αποκολλούνται και κάμπτονται εξωτερικά.

#### 4.4.2 Δοκίμο R2



STRESS - STRAIN (ENGINEERING) GRAPH



**Εικόνα 4.7:** Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης δοκ. R2 και καμπύλη φορτίου-μετατόπισης. Η αρίθμηση (1-6) στην καμπύλη δηλώνει τις θέσεις των στιγμιότυπων.

**Πίνακας 4.3:** Πειραματικά δεδομένα και αποτελέσματα για το δοκ. R2

R2	
Φωτογραφία	Displacement (mm)
1	0
2	3.8
3	11.8
4	20.3
5	33.0
6	40.0

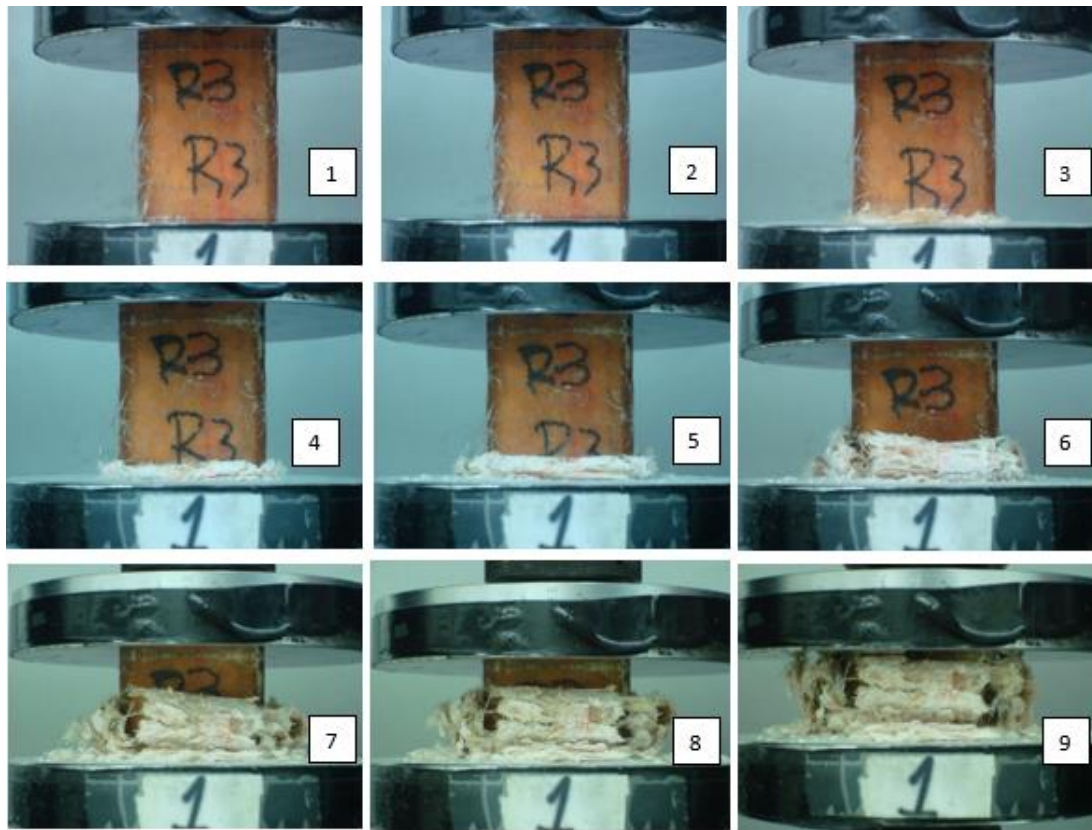
Διαδρομή εμβόλου:	S	40.00	mm
Μέσο Φορτίο	P <sub>mean</sub>	42.59	kN
Μέγιστο φορτίο	P <sub>max</sub>	57.1	kN
Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου	c.f.e	0.745	%
Ενέργεια απορρόφησης	E <sub>abs</sub>	1705.32	Joule

Το δοκίμιο R2 αποτελεί ορθογωνικής διατομής κέλυφος με πυρήνα από αφρό γραμμικού χλωριούχου πολυβινυλίου (PVC)

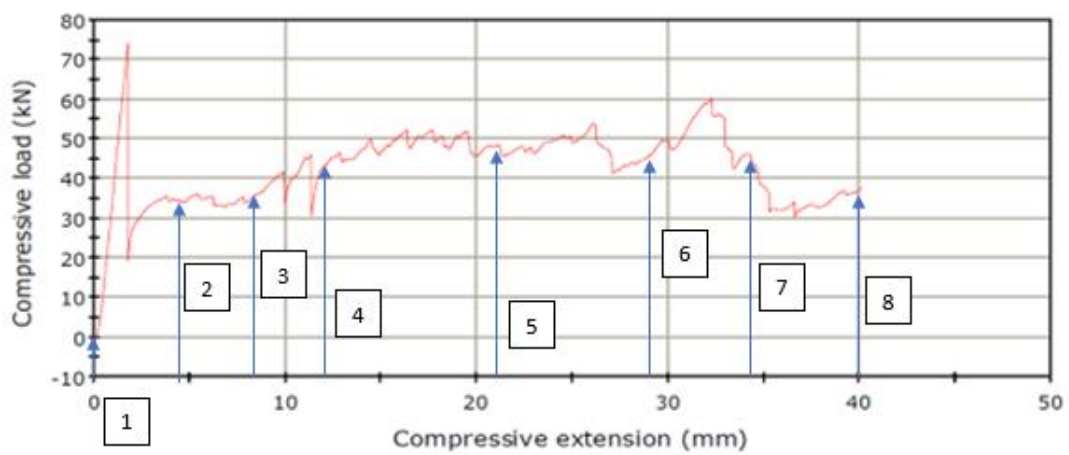
Το κέλυφος του δοκιμίου R2 συμπιέζεται αξονικά μεταξύ της άνω (κινούμενης προς τα κάτω) πλάκας συμπίεσης και της κάτω ακίνητης πλάκας της μηχανής δοκιμών. Κατά την εξέλιξη του πειράματος παρατηρήθηκε προοδευτική κατάρρευση με μικροθραύσεις του σύνθετου υλικού, συνοδευόμενη από υψηλά ποσά ενέργειας απορρόφησης, με αποτέλεσμα να σχηματιστεί ζώνη θραύσης (μέτωπο κατάρρευσης), μόνο στο κάτω άκρο του κελύφους, σε μορφή μανιταριού (“mushrooming” failure).

Κατά την δυναμική άσκηση φορτίου στο δοκίμιο R2 καταγράφηκε το μέγιστο φορτίο στα 57,10 KN για την τιμή βράχυνσης των 2,163 mm.

#### 4.4.3 Δοκίμο R3



STRESS - STRAIN (ENGINEERING) GRAPH



Εικόνα 4.8: Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης δοκ. R3 και καμπύλη φορτίου-μετατόπισης. Η αρίθμηση (1-8) στην καμπύλη δηλώνει τις θέσεις των στιγμιότυπων.

**Πίνακας 4.4:** Πειραματικά δεδομένα και αποτελέσματα για το δοκ. R3

R3	
Φωτογραφία	Displacement (mm)
1	0
2	4.6
3	8.3
4	12.3
5	21.1
6	29.3
7	34.4
8	40

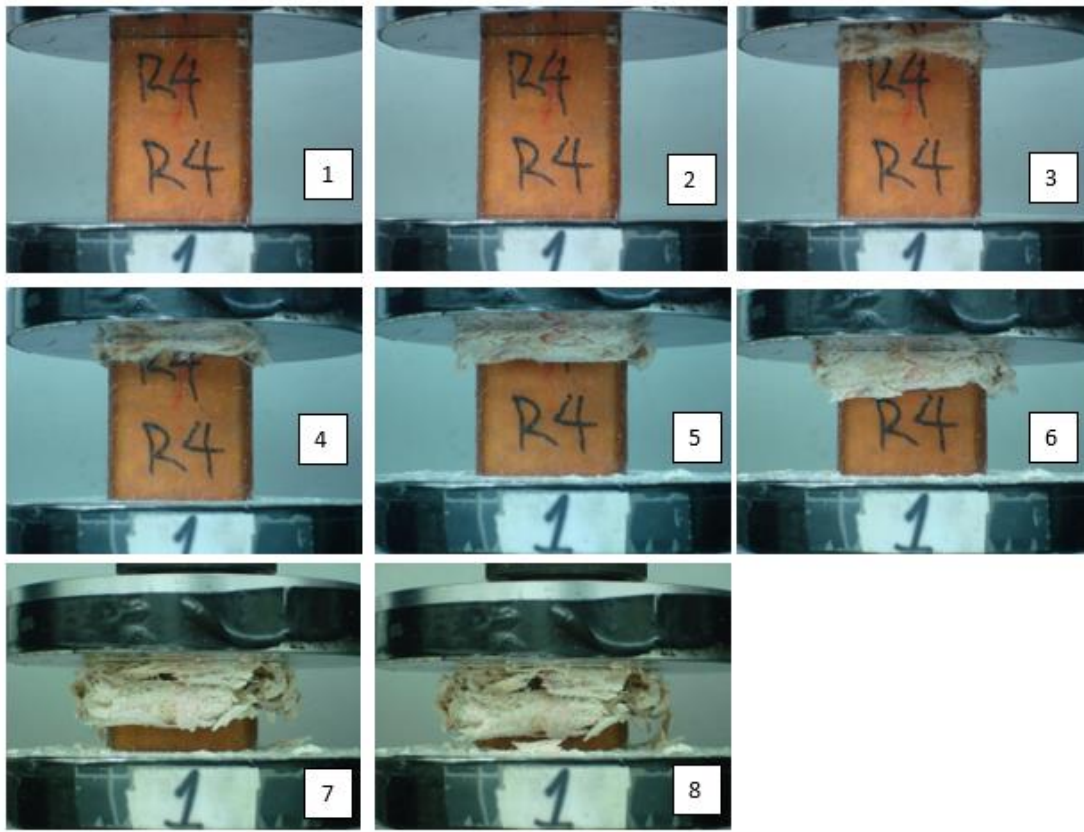
Διαδρομή εμβόλου:	S	40.00	mm
Μέσο Φορτίο	Pmean	42.62	kN
Μέγιστο φορτίο	Pmax	74.34	kN
Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου	c.f.e	0.57	%
Ενέργεια απορρόφησης	Eabs	1708.21	Joule

Το δοκίμιο R3 αποτελεί ορθογωνικής διατομής κέλυφος με πυρήνα από αφρό διασταυρωμένου γλωριούχου πολυβινυλίου.

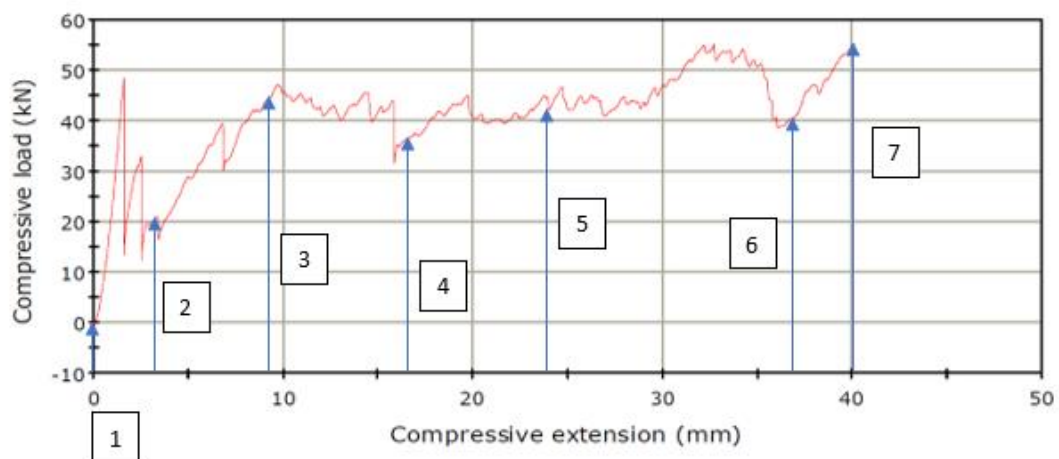
Το κέλυφος του δοκιμίου R3 συμπιέζεται αξονικά μεταξύ της άνω (κινούμενης προς τα κάτω) πλάκας συμπίεσης και της κάτω ακίνητης πλάκας της μηχανής δοκιμών. Κατά την εξέλιξη του πειράματος παρατηρήθηκε προοδευτική κατάρρευση με μικροθραύσεις του σύνθετου υλικού, συνοδευόμενη από υψηλά ποσά ενέργειας απορρόφησης, με αποτέλεσμα να σχηματιστεί ζώνη θραύσης (μέτωπο κατάρρευσης), μόνο στο κάτω άκρο του κελύφους, σε μορφή μανιταριού (“mushrooming” failure).

Κατά την δυναμική άσκηση φορτίου στο δοκίμιο R3 καταγράφηκε το μέγιστο φορτίο στα 74,34 KN για την τιμή βράχυνσης των 1,8168 mm.

#### 4.4.4 Δοκίμο R4



STRESS - STRAIN (ENGINEERING) GRAPH



**Εικόνα 4.9:** Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης δοκ. R4 και καμπύλη φορτίου-μετατόπισης. Η αρίθμηση (1-7) στην καμπύλη δηλώνει τις θέσεις των στιγμιότυπων.



**Πίνακας 4.5:** Πειραματικά δεδομένα και αποτελέσματα για το δοκ. R4

R4	
Φωτογραφία	Displacement (mm)
1	0
2	3.2
3	9.2
4	16.7
5	24.4
6	37.3
7	40.0

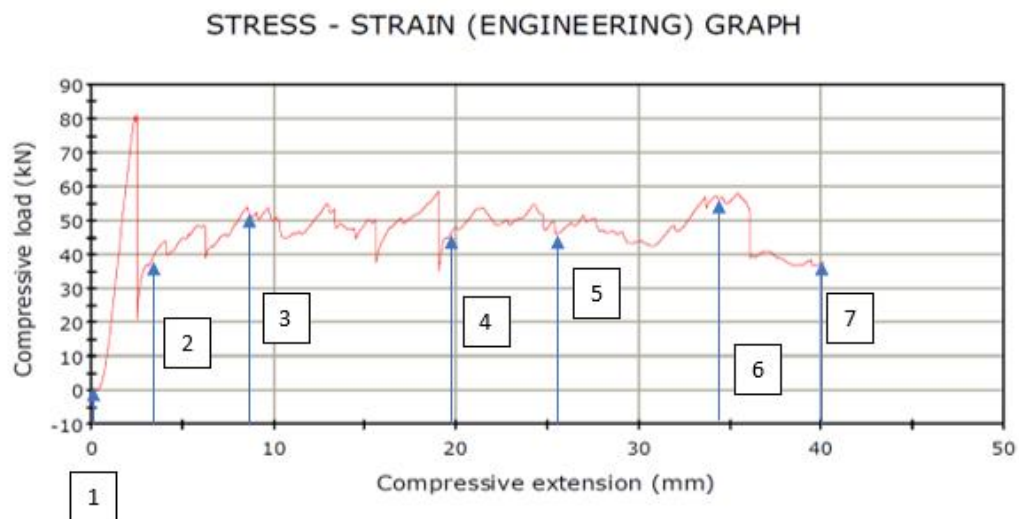
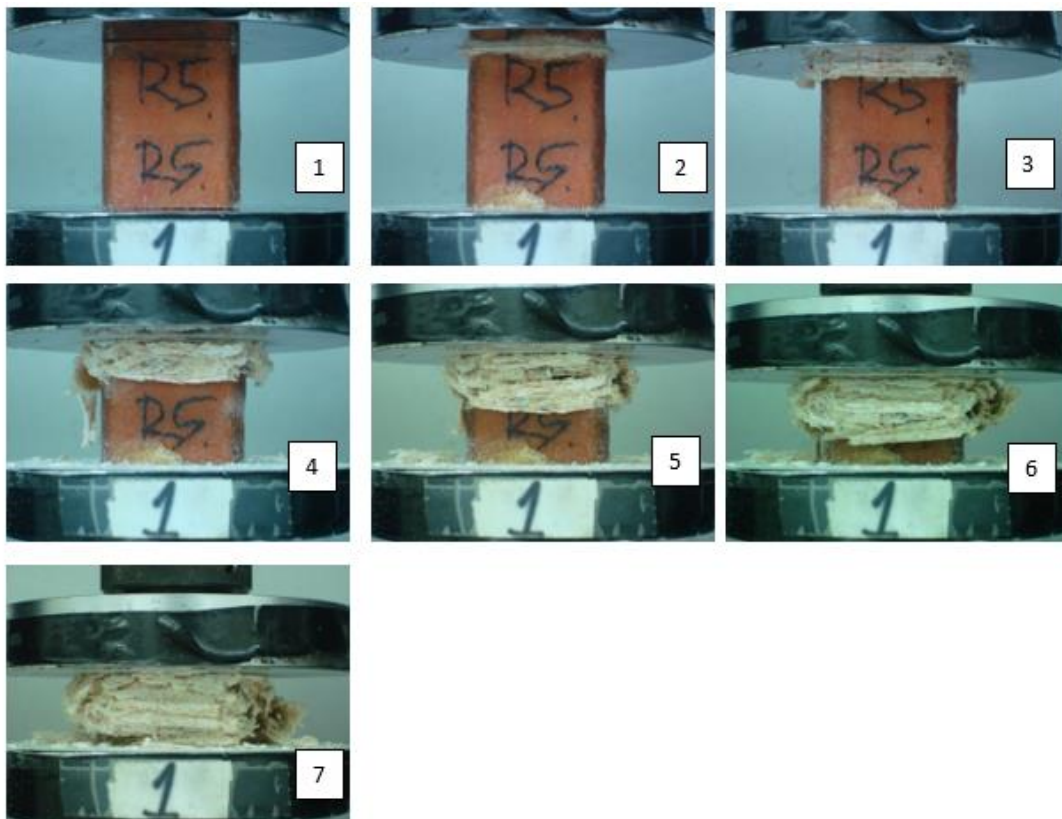
Διαδρομή εμβόλου:	S	40.00	mm
Μέσο Φορτίο	Pmean	40.85	kN
Μέγιστο φορτίο	Pmax	55.15	kN
Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου	c.f.e	0.74	%
Ενέργεια απορρόφησης	Eabs	1636.17	Joule

Το δοκίμιο R4 αποτελεί ορθογωνικής διατομής κέλυφος με πυρήνα από μαλακό αφρό πολουρεθάνης.

Το κέλυφος του δοκιμίου R4 συμπιέζεται αξονικά μεταξύ της άνω (κινούμενης προς τα κάτω) πλάκας συμπίεσης και της κάτω ακίνητης πλάκας της μηχανής δοκιμών. Κατά την εξέλιξη του πειράματος παρατηρήθηκε προοδευτική κατάρρευση με μικροθραύσεις του σύνθετου υλικού, συνοδευόμενη από υψηλά ποσά ενέργειας απορρόφησης, με αποτέλεσμα να σχηματιστεί ζώνη θραύσης (μέτωπο κατάρρευσης), μόνο στο άνω άκρο του κελύφους, σε μορφή μανιταριού (“mushrooming” failure).

Κατά την δυναμική άσκηση φορτίου στο δοκίμιο R4 καταγράφηκε το μέγιστο φορτίο στα 55,15 KN για την τιμή βράχυνσης των 32,6808 mm.

#### 4.4.5 Δοκίμο R5



**Εικόνα 4.10:** Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης δοκ. R5 και καμπύλη φορτίου-μετατόπισης. Η αρίθμηση (1-7) στην καμπύλη δηλώνει τις θέσεις των στιγμιότυπων.

**Πίνακας 4.6:** Πειραματικά δεδομένα και αποτελέσματα για το δοκ. R5

R5	
Φωτογραφία	Displacement (mm)
1	0
2	3.4
3	8.4
4	19.9
5	25.8
6	34.4
7	40

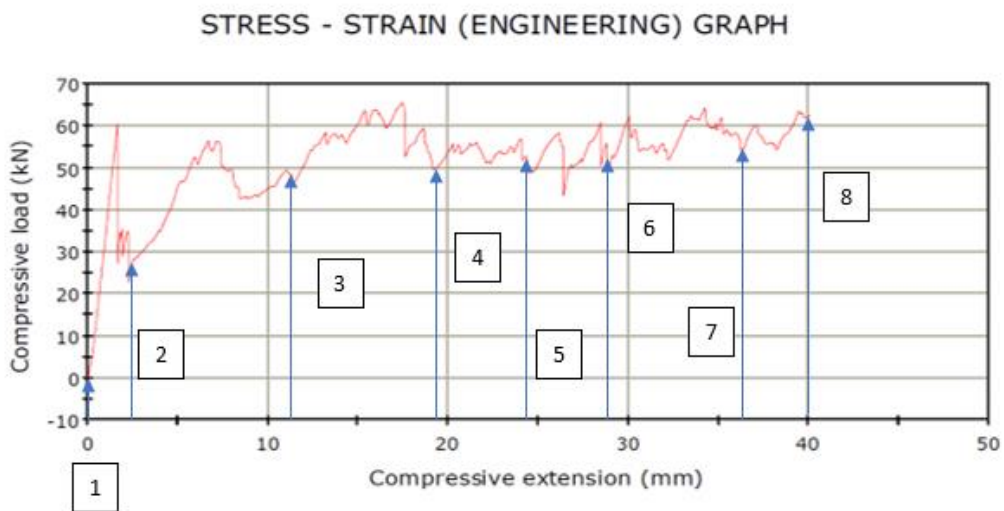
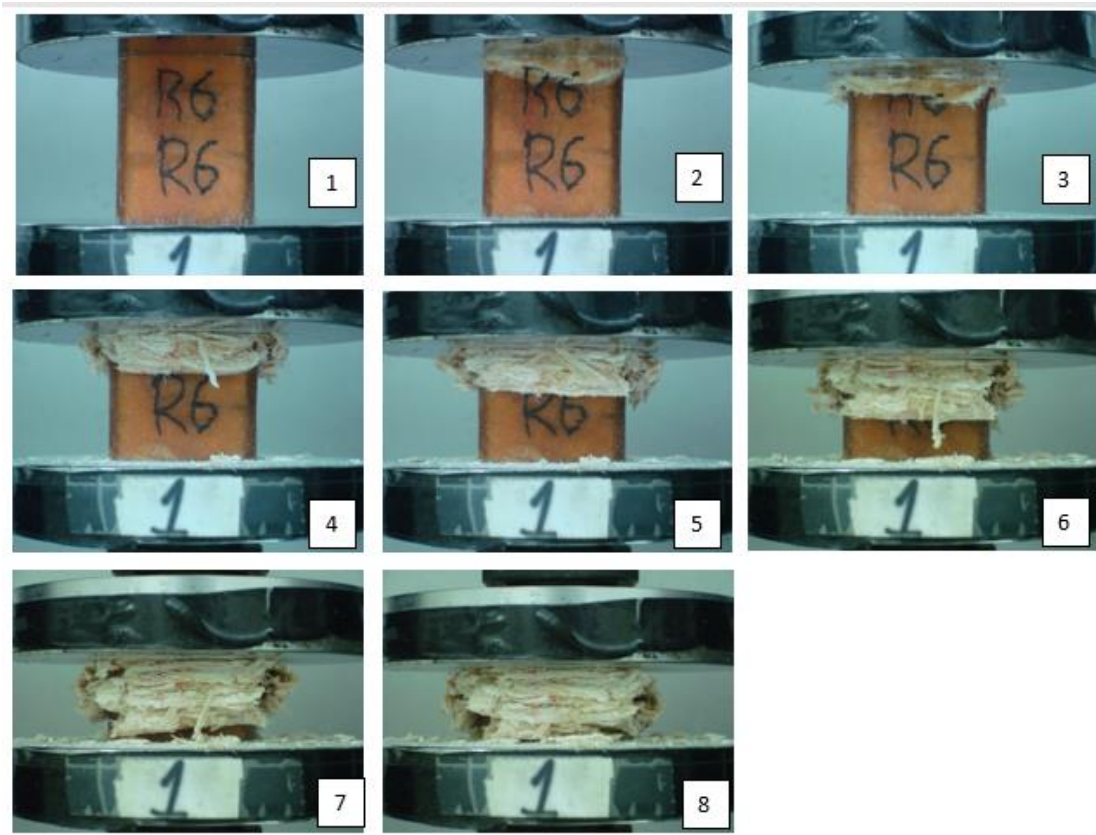
Διαδρομή εμβόλου:	S	40	mm
Μέσο Φορτίο	P <sub>mean</sub>	46.48	kN
Μέγιστο φορτίο	P <sub>max</sub>	81.24	kN
Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου	c.f.e	0.572	%
Ενέργεια απορρόφησης	E <sub>abs</sub>	1863.36	Joule

Το δοκίμιο R5 αποτελεί ορθογωνικής διατομής κέλυφος με πυρήνα από αφρό πολυμεθακρυλιμίδιου.

Το κέλυφος του δοκιμίου R5 συμπιέζεται αξονικά μεταξύ της άνω (κινούμενης προς τα κάτω) πλάκας συμπίεσης και της κάτω ακίνητης πλάκας της μηχανής δοκιμών. Κατά την εξέλιξη του πειράματος παρατηρήθηκε προοδευτική κατάρρευση με μικροθραύσεις του σύνθετου υλικού, συνοδευόμενη από υψηλά ποσά ενέργειας απορρόφησης, με αποτέλεσμα να σχηματιστεί ζώνη θραύσης (μέτωπο κατάρρευσης), μόνο στο άνω άκρο του κελύφους, σε μορφή μανιταριού (“mushrooming” failure).

Κατά την δυναμική άσκηση φορτίου στο δοκίμιο R5 καταγράφηκε το μέγιστο φορτίο στα 81,24 KN για την τιμή βράχυνσης των 2,5225 mm.

#### 4.4.6 Δοκίμο R6



Εικόνα 4.11 Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης δοκ. R6 και καμπύλη φορτίου-μετατόπισης. Η αρίθμηση (1-8) στην καμπύλη δηλώνει τις θέσεις των στιγμιότυπων.

**Πίνακας 4.7:** Πειραματικά δεδομένα και αποτελέσματα για το δοκ. R6

R6	
Φωτογραφία	Displacement (mm)
1	0
2	2.5
3	11.5
4	19.2
5	24.3
6	28.8
7	36.2
8	40

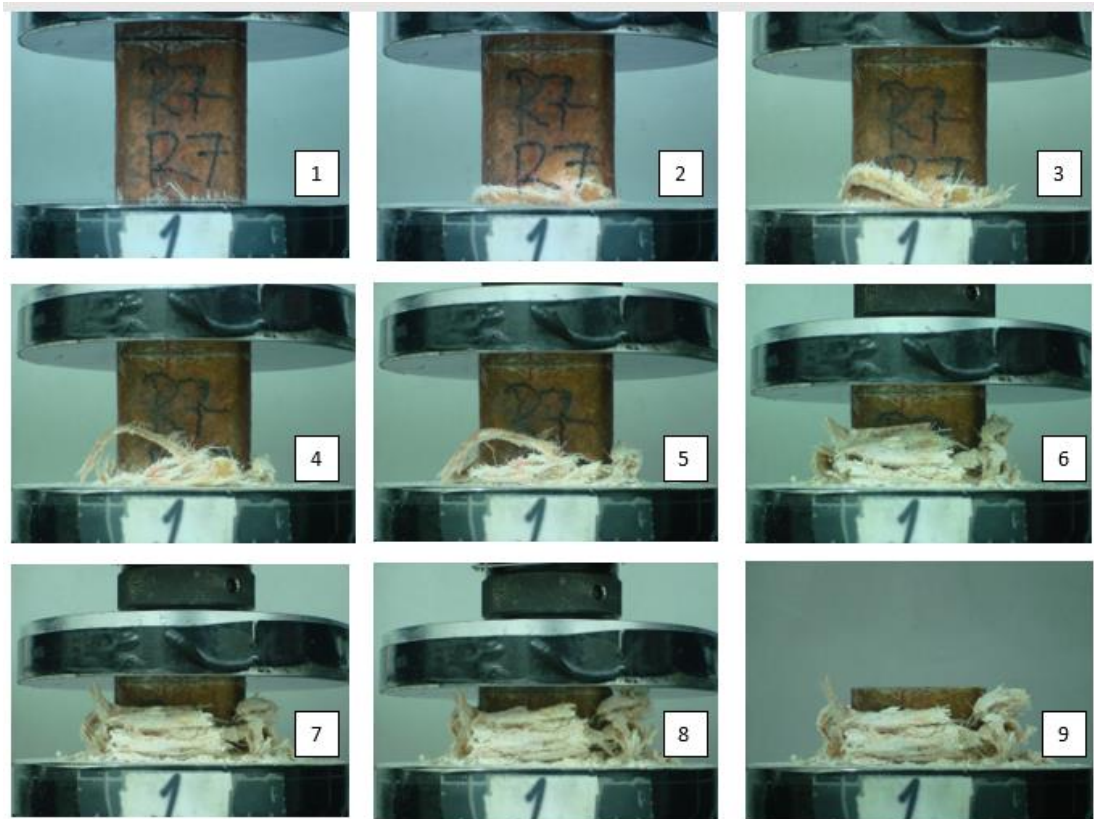
Διαδρομή εμβόλου:	S	40	mm
Μέσο Φορτίο	Pmean	51.87	kN
Μέγιστο φορτίο	Pmax	65.47	kN
Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου	c.f.e	0.79	%
Ενέργεια απορρόφησης	Eabs	2075.5	Joule

Το δοκίμιο R6 αποτελεί ορθογωνικής διατομής κέλυφος με πυρήνα από αφρό αλουμινίου.

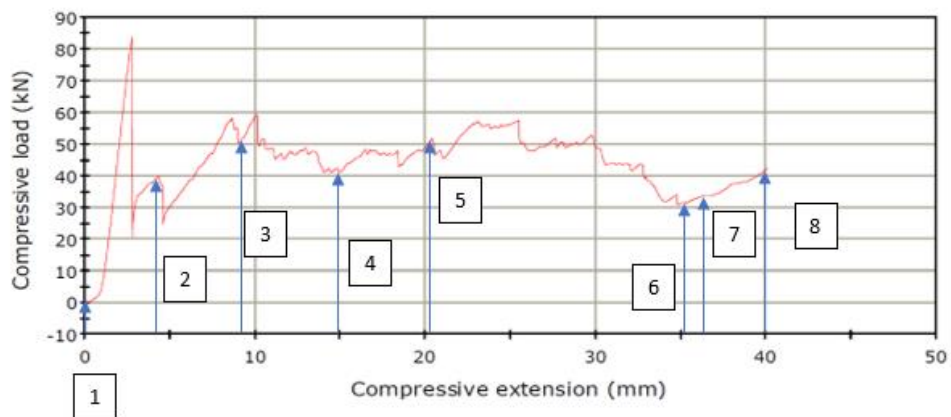
Το κέλυφος του δοκιμίου R6 συμπιέζεται αξονικά μεταξύ της άνω (κινούμενης προς τα κάτω) πλάκας συμπίεσης και της κάτω ακίνητης πλάκας της μηχανής δοκιμών. Κατά την εξέλιξη του πειράματος παρατηρήθηκε προοδευτική κατάρρευση με μικροθραύσεις του σύνθετου υλικού, συνοδευόμενη από υψηλά ποσά ενέργειας απορρόφησης, με αποτέλεσμα να σχηματιστεί ζώνη θραύσης (μέτωπο κατάρρευσης), μόνο στο άνω άκρο του κελύφους, σε μορφή μανιταριού (“mushrooming” failure).

Κατά την δυναμική άσκηση φορτίου στο δοκίμιο R6 καταγράφηκε το μέγιστο φορτίο στα 65,47 KN για την τιμή βράχυνσης των 17,44 mm.

#### 4.4.7 Δοκίμο R7



STRESS - STRAIN (ENGINEERING) GRAPH



**Εικόνα 4.12:** Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης δοκ. R7 και καμπύλη φορτίου-μετατόπισης. Η αρίθμηση (1-8) στην καμπύλη δηλώνει τις θέσεις των στιγμιότυπων.

**Πίνακας 4.8:** Πειραματικά δεδομένα και αποτελέσματα για το δοκ. R7

R7	
Φωτογραφία	Displacement (mm)
1	0
2	4.3
3	9.6
4	15.0
5	20.1
6	31.5
7	36.6
8	40.0

Διαδρομή εμβόλου:	S	40.00	mm
Μέσο Φορτίο	P <sub>mean</sub>	43.66	kN
Μέγιστο φορτίο	P <sub>max</sub>	83.95	kN
Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου	c.f.e	0.52	%
Ενέργεια απορρόφησης	E <sub>abs</sub>	1747.605	Joule

Το δοκίμιο R7 αποτελεί ορθογωνικής διατομής κέλυφος χωρίς την τοποθέτηση αφρού στον πυρήνα

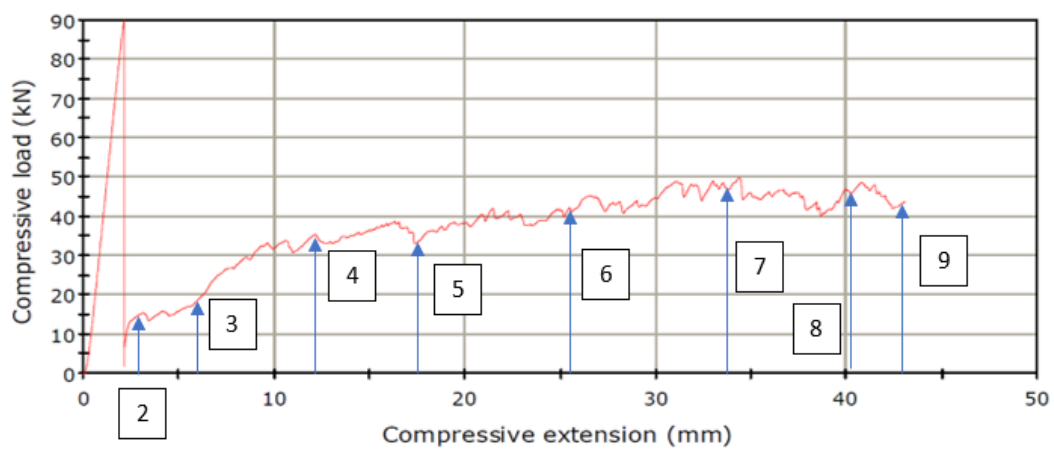
Το κέλυφος του δοκιμίου R7 συμπιέζεται αξονικά μεταξύ της άνω (κινούμενης προς τα κάτω) πλάκας συμπίεσης και της κάτω ακίνητης πλάκας της μηχανής δοκιμών. Κατά την εξέλιξη του πειράματος παρατηρήθηκε προοδευτική κατάρρευση με μικροθραύσεις του σύνθετου υλικού, συνοδευόμενη από υψηλά ποσά ενέργειας απορρόφησης, με αποτέλεσμα να σχηματιστεί ζώνη θραύσης (μέτωπο κατάρρευσης), μόνο στο κάτω άκρο του κελύφους, σε μορφή μανιταριού (“mushrooming” failure).

Κατά την δυναμική άσκηση φορτίου στο δοκίμιο R7 καταγράφηκε το μέγιστο φορτίο στα 83,95 KN για την τιμή βράχυνσης των 2,8135 mm.

#### 4.4.8 Δοκίμο S1



STRESS - STRAIN (ENGINEERING) GRAPH



**Εικόνα 4.13:** Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης δοκ. S1 και καμπύλη φορτίου-μετατόπισης. Η αρίθμηση (1-9) στην καμπύλη δηλώνει τις θέσεις των στιγμιότυπων.



**Πίνακας 4.9:** Πειραματικά δεδομένα και αποτελέσματα για το δοκ. S1

S1	
Φωτογραφία	Displacement (mm)
1	0
2	2.8
3	6.0
4	12.1
5	17.4
6	25.7
7	33.9
8	40.2
9	43

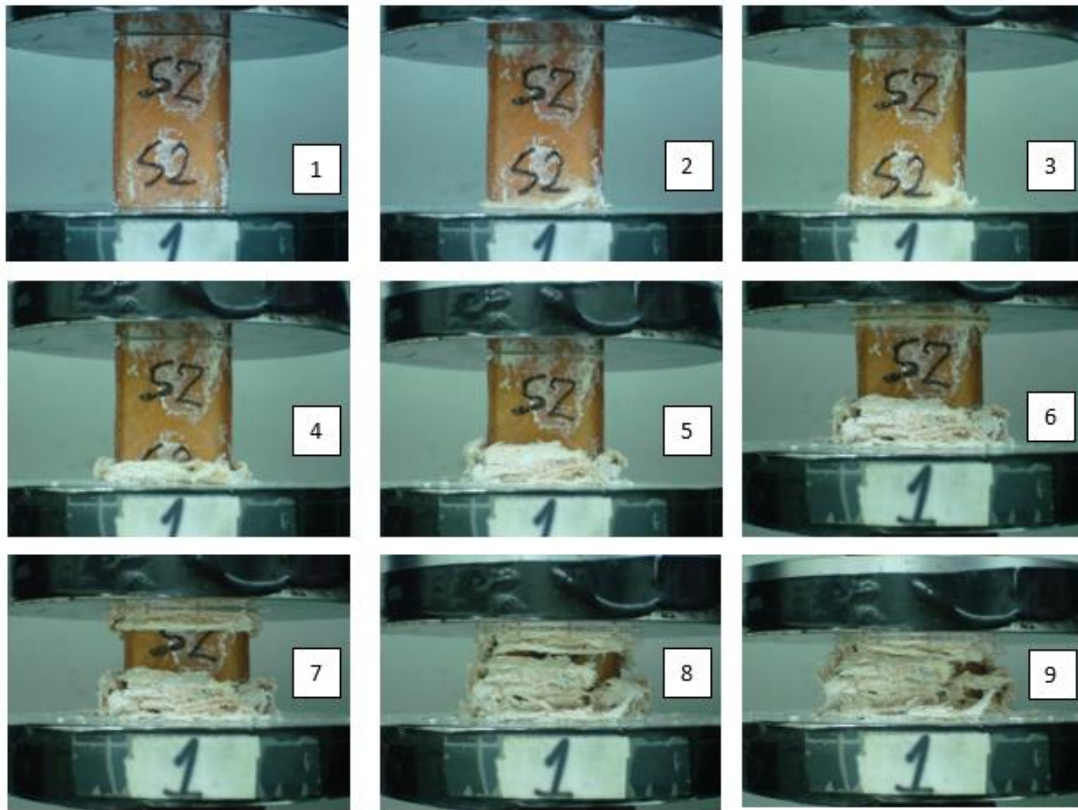
Διαδρομή εμβόλου:	S	40.00	mm
Μέσο Φορτίο	P <sub>mean</sub>	37.102	kN
Μέγιστο φορτίο	P <sub>max</sub>	89.95	kN
Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου	c.f.e	0.412	%
Ενέργεια απορρόφησης	E <sub>abs</sub>	1484.56	Joule

Το δοκίμιο S1 αποτελεί τετραγωνικής διατομής κέλυφος με πυρήνα από αφρό πολυαιθυλαίνιου.

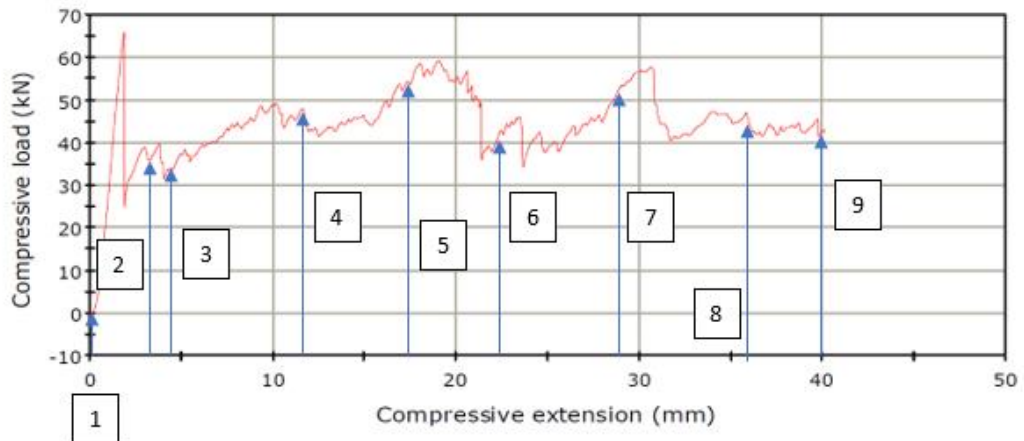
Το κέλυφος του δοκιμίου S1 συμπιέζεται αξονικά μεταξύ της άνω (κινούμενης προς τα κάτω) πλάκας συμπίεσης και της κάτω ακίνητης πλάκας της μηχανής δοκιμών. Κατά την εξέλιξη του πειράματος παρατηρήθηκε προοδευτική κατάρρευση με μικροθραύσεις του σύνθετου υλικού, συνοδευόμενη από υψηλά ποσά ενέργειας απορρόφησης, με αποτέλεσμα να σχηματιστεί ζώνη θραύσης (μέτωπο κατάρρευσης), μόνο στο άνω άκρο του κελύφους, σε μορφή μανιταριού (“mushrooming” failure).

Κατά την δυναμική άσκηση φορτίου στο δοκίμιο S1 καταγράφηκε το μέγιστο φορτίο στα 89,95 KN για την τιμή βράχυνσης των 2,1551 mm.

#### 4.4.9 Δοκίμο S2



STRESS - STRAIN (ENGINEERING) GRAPH



**Εικόνα 4.14** Προοδεντικές φάσεις κατάρρευσης δοκ. S2 και καμπύλη φορτίου-μετατόπισης. Η αρίθμηση (1-9) στην καμπύλη δηλώνει τις θέσεις των στιγμιότυπων.

**Πίνακας 4.10:** Πειραματικά δεδομένα και αποτελέσματα για το δοκ. S2

S2	
Φωτογραφία	Displacement (mm)
1	0
2	3.2
3	5.5
4	11.9
5	17.2
6	22.4
7	29.1
8	36.0
9	40

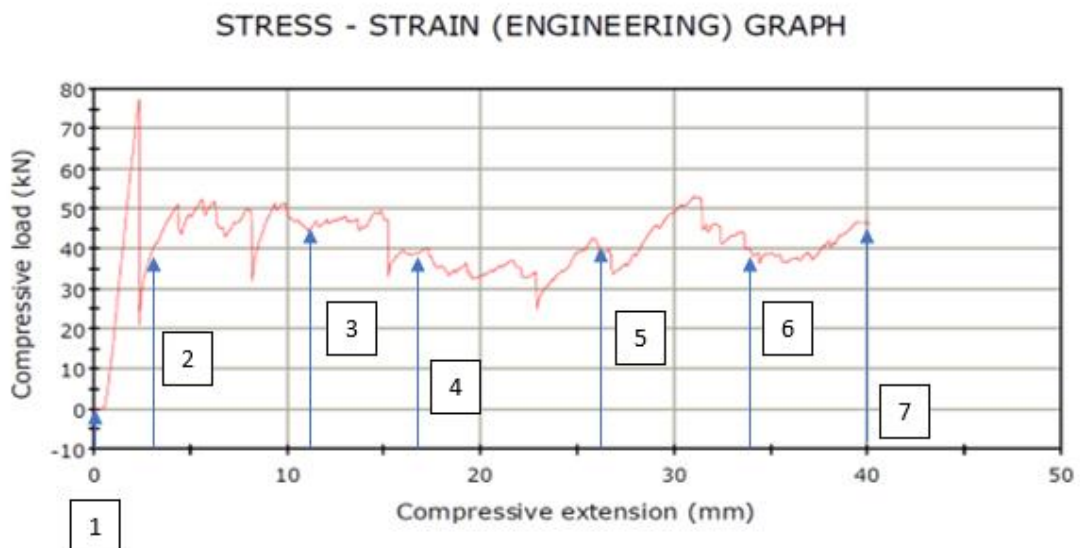
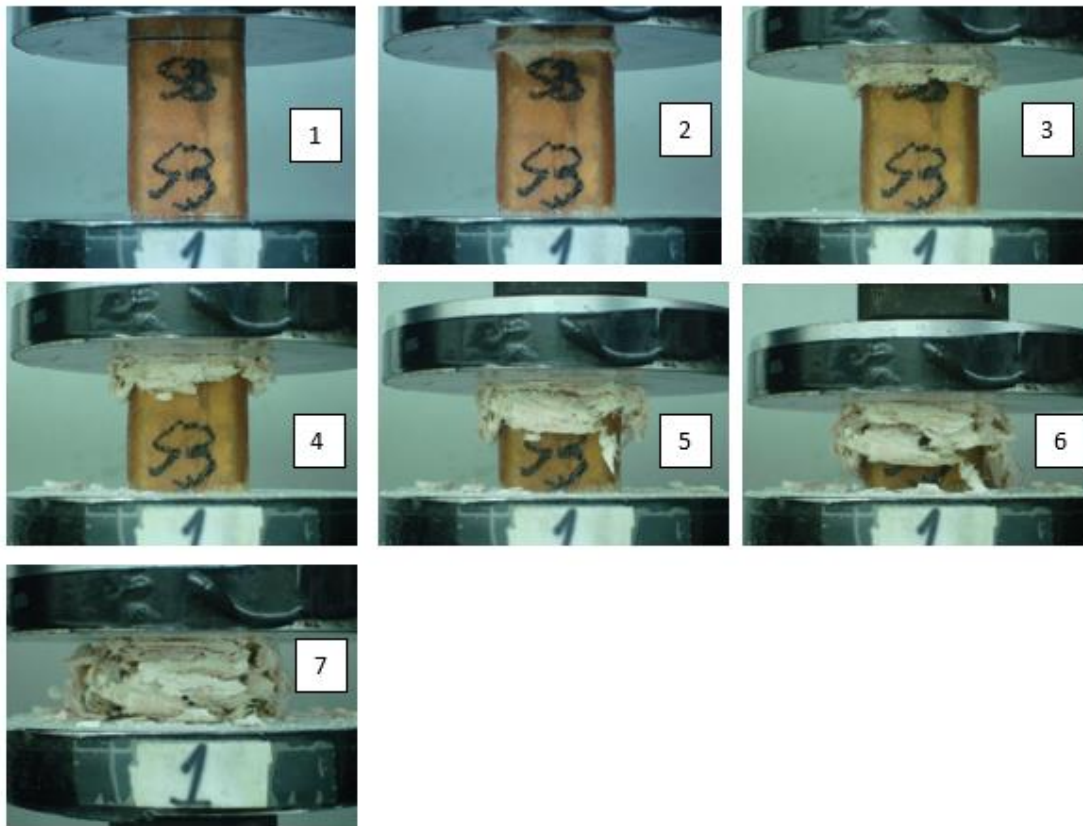
Διαδρομή εμβόλου:	S	40.00	mm
Μέσο Φορτίο	Pmean	44.13	kN
Μέγιστο φορτίο	Pmax	65.94	kN
Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου	c.f.e	0.669	%
Ενέργεια απορρόφησης	Eabs	1768.93	Joule

Το δοκίμιο S2 αποτελεί τετραγωνικής διατομής κέλυφος με πυρήνα από αφρό γραμμικού χλωριούχου πολυβινυλίου (PVC).

Το κέλυφος του δοκιμίου S2 συμπιέζεται αξονικά μεταξύ της άνω (κινούμενης προς τα κάτω) πλάκας συμπίεσης και της κάτω ακίνητης πλάκας της μηχανής δοκιμών. Κατά την εξέλιξη του πειράματος παρατηρήθηκε προοδευτική κατάρρευση με μικροθραύσεις του σύνθετου υλικού, συνοδευόμενη από υψηλά ποσά ενέργειας απορρόφησης, με αποτέλεσμα να σχηματιστεί ζώνη θραύσης (μέτωπο κατάρρευσης), μόνο στο κάτω άκρο του κελύφους, σε μορφή μανιταριού (“mushrooming” failure).

Κατά την δυναμική άσκηση φορτίου στο δοκίμιο S2 καταγράφηκε το μέγιστο φορτίο στα 65,94 KN για την τιμή βράχυνσης των 1,8968 mm.

#### 4.4.10 Δοκίμιο S3



**Εικόνα 4.15:** Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης δοκ. S3 και καμπύλη φορτίου-μετατόπισης. Η αρίθμηση (1-7) στην καμπύλη δηλώνει τις θέσεις των στιγμιότυπων.

**Πίνακας 4.11:** Πειραματικά δεδομένα και αποτελέσματα για το δοκ. S3

S3	
Φωτογραφία	Displacement (mm)
1	0
2	3.1
3	10.1
4	16.4
5	26.4
6	33.9
7	40

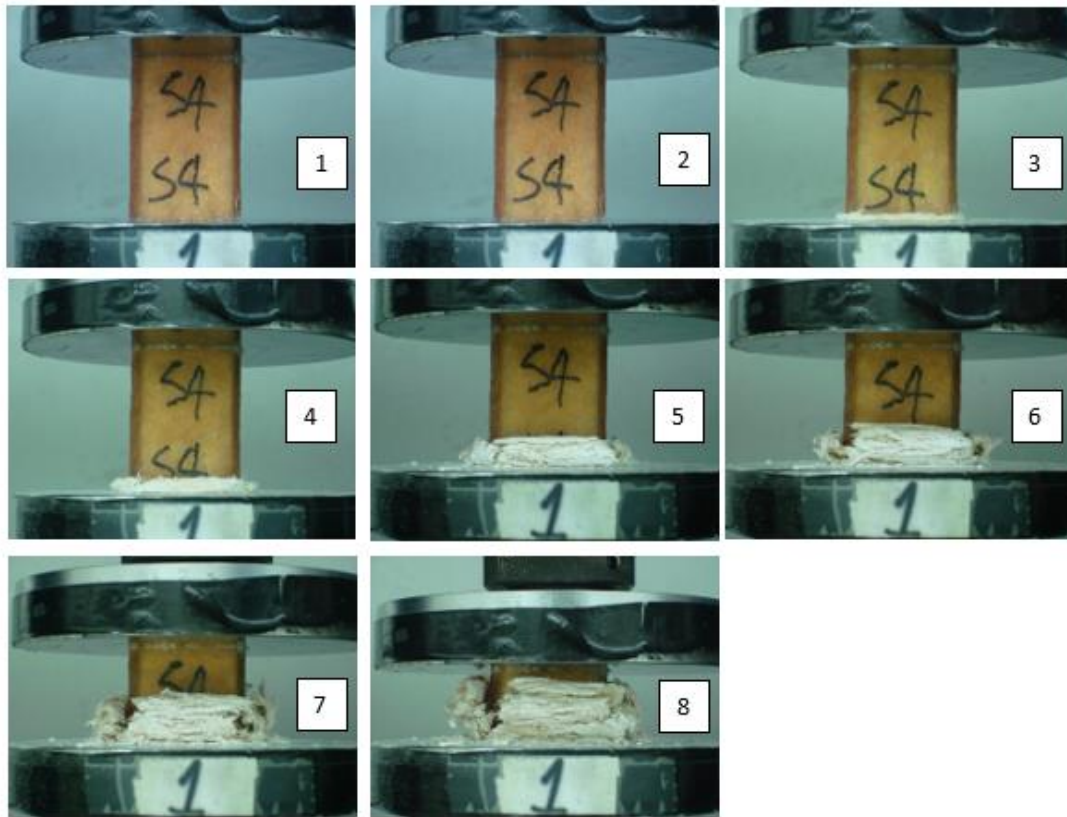
Διαδρομή εμβόλου:	S	40.00	mm
Μέσο Φορτίο	P <sub>mean</sub>	41.07	kN
Μέγιστο φορτίο	P <sub>max</sub>	77.37	kN
Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου	c.f.e	0.53	%
Ενέργεια απορρόφησης	E <sub>abs</sub>	1643.876	Joule

Το δοκίμιο S3 αποτελεί τετραγωνικής διατομής κέλυφος με πυρήνα από αφρό διασταυρωμένου χλωριούχου πολυβινυλίου.

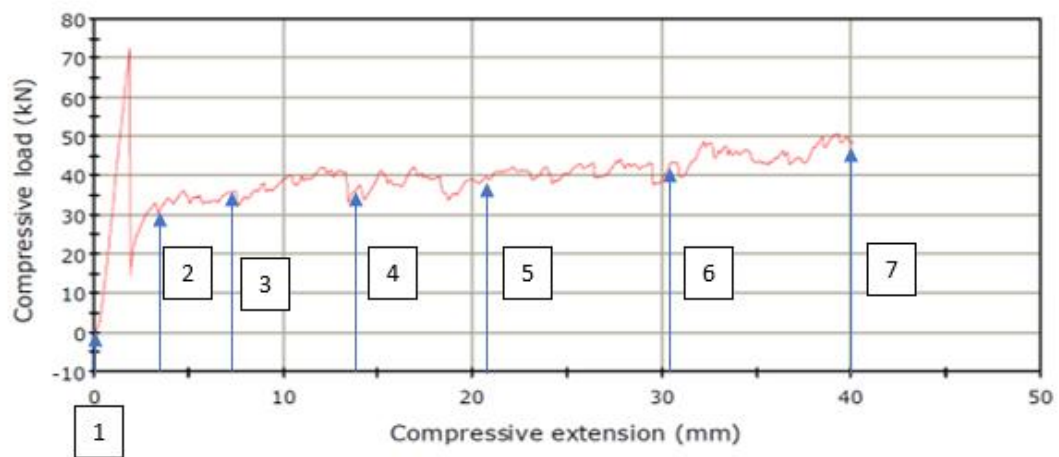
Το κέλυφος του δοκιμίου S3 συμπιέζεται αξονικά μεταξύ της άνω (κινούμενης προς τα κάτω) πλάκας συμπίεσης και της κάτω ακίνητης πλάκας της μηχανής δοκιμών. Κατά την εξέλιξη του πειράματος παρατηρήθηκε προοδευτική κατάρρευση με μικροθραύσεις του σύνθετου υλικού, συνοδευόμενη από υψηλά ποσά ενέργειας απορρόφησης, με αποτέλεσμα να σχηματιστεί ζώνη θραύσης (μέτωπο κατάρρευσης), μόνο στο άνω άκρο του κελύφους, σε μορφή μανιταριού (“mushrooming” failure).

Κατά την δυναμική άσκηση φορτίου στο δοκίμιο S3 καταγράφηκε το μέγιστο φορτίο στα 77,37 KN για την τιμή βράχυνσης των 2,3635 mm.

#### 4.4.11 Δοκίμιο S4



STRESS - STRAIN (ENGINEERING) GRAPH



**Εικόνα 4.16** Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης δοκ. S4 και καμπύλη φορτίου-μετατόπισης. Η αρίθμηση (1-7) στην καμπύλη δηλώνει τις θέσεις των στιγμιότυπων.

**Πίνακας 4.12:** Πειραματικά δεδομένα και αποτελέσματα για το δοκ. S4

S4	
Φωτογραφία	Displacement (mm)
1	0
2	3.7
3	7.3
4	13.9
5	20.9
6	30.4
7	40

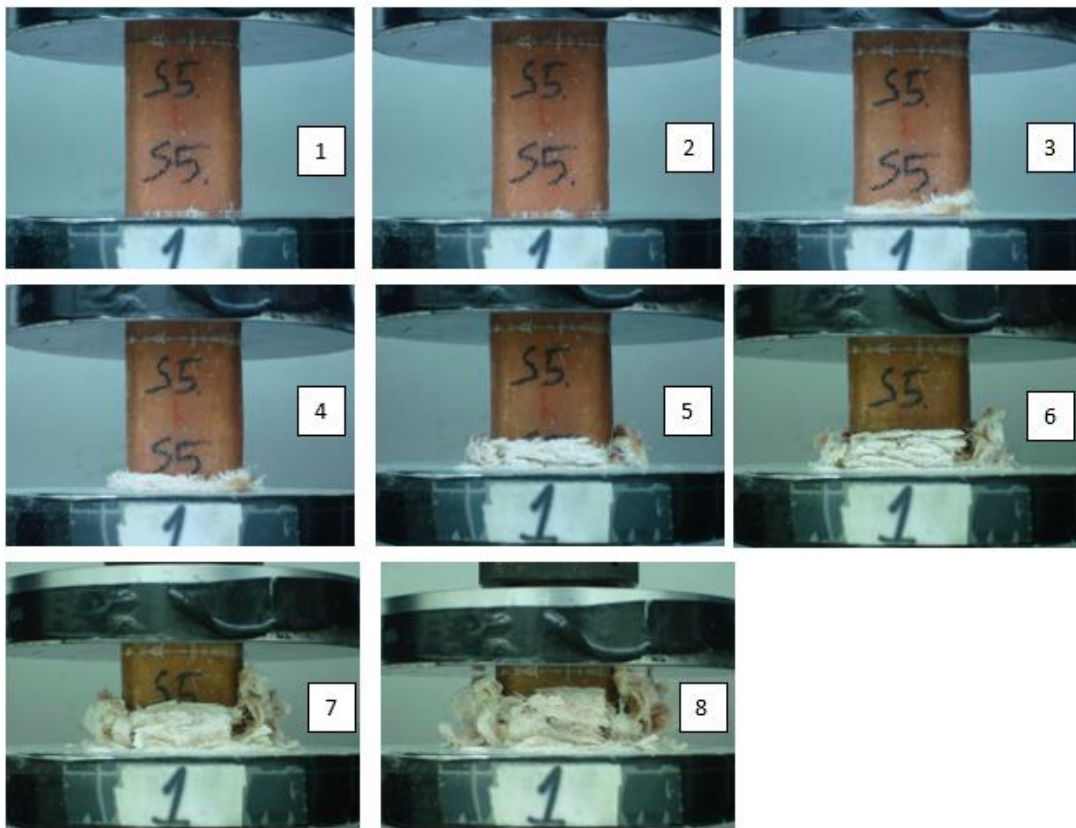
Διαδρομή εμβόλου:	S	40	mm
Μέσο Φορτίο	P <sub>mean</sub>	39.65	kN
Μέγιστο φορτίο	P <sub>max</sub>	72.63	kN
Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου	c.f.e	0.545	%
Ενέργεια απορρόφησης	E <sub>abs</sub>	1588.142	Joule

Το δοκίμιο S4 αποτελεί τετραγωνικής διατομής κέλυφος με πυρήνα από αφρό πολυουρεθάνης.

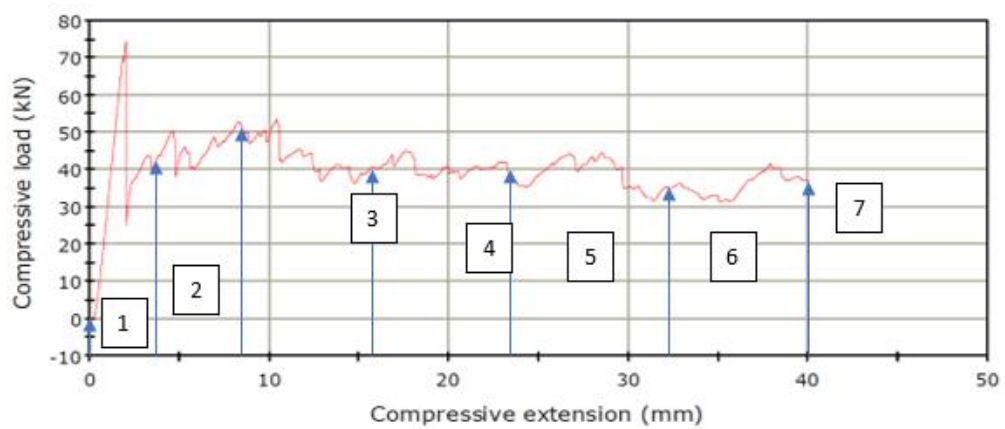
Το κέλυφος του δοκιμίου S4 συμπιέζεται αξονικά μεταξύ της άνω (κινούμενης προς τα κάτω) πλάκας συμπίεσης και της κάτω ακίνητης πλάκας της μηχανής δοκιμών. Κατά την εξέλιξη του πειράματος παρατηρήθηκε προοδευτική κατάρρευση με μικροθραύσεις του σύνθετου υλικού, συνοδευόμενη από υψηλά ποσά ενέργειας απορρόφησης, με αποτέλεσμα να σχηματιστεί ζώνη θραύσης (μέτωπο κατάρρευσης), μόνο στο κάτω άκρο του κελύφους, σε μορφή μανιταριού (“mushrooming” failure).

Κατά την δυναμική άσκηση φορτίου στο δοκίμιο S4 καταγράφηκε το μέγιστο φορτίο στα 72,63 KN για την τιμή βράχυνσης των 1,9221 mm.

#### 4.4.12 Δοκίμιο S5



STRESS - STRAIN (ENGINEERING) GRAPH



**Εικόνα 4.17:** Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης δοκ. S5 και καμπύλη φορτίου-μετατόπισης. Η αρίθμηση (1-7) στην καμπύλη δηλώνει τις θέσεις των στιγμιότυπων.



**Πίνακας 4.13:** Πειραματικά δεδομένα και αποτελέσματα για το δοκ. S5

S5	
Φωτογραφία	Displacement (mm)
1	0
2	3.9
3	8.4
4	15.5
5	23.4
6	32.1
7	40

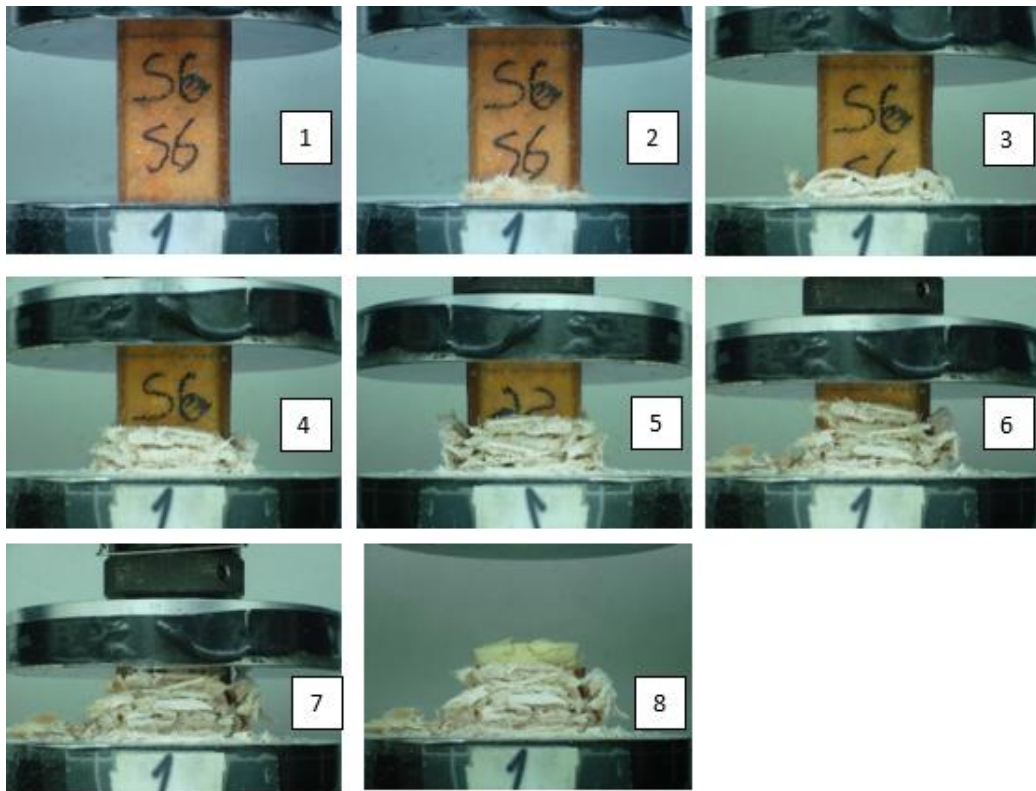
Διαδρομή εμβόλου:	S	40.00	mm
Μέσο Φορτίο	P <sub>mean</sub>	39.96	kN
Μέγιστο φορτίο	P <sub>max</sub>	74.37	kN
Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου	c.f.e	0.537	%
Ενέργεια απορρόφησης	E <sub>abs</sub>	1599.238	Joule

Το δοκίμιο S5 αποτελεί τετραγωνικής διατομής κέλυφος με πυρήνα από αφρό πολυμεθακρυλιμίδιου.

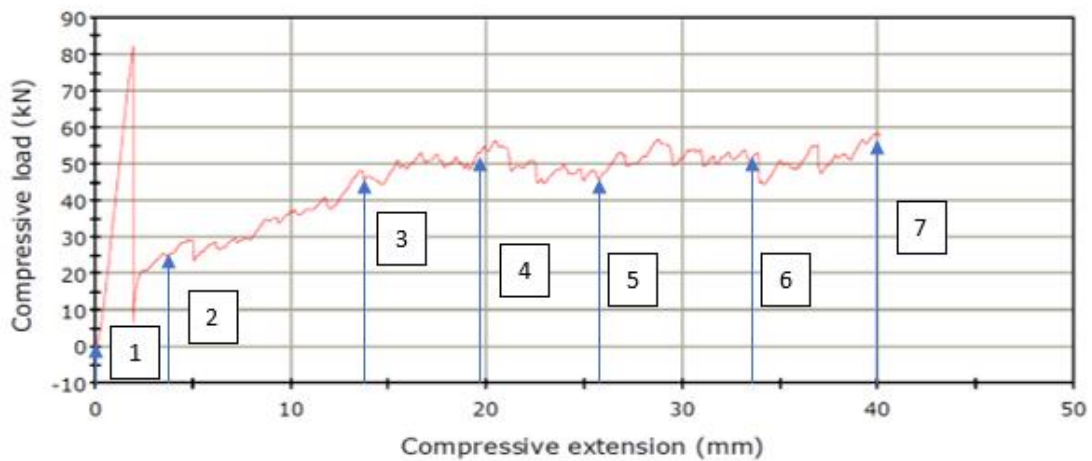
Το κέλυφος του δοκιμίου S5 συμπιέζεται αξονικά μεταξύ της άνω (κινούμενης προς τα κάτω) πλάκας συμπίεσης και της κάτω ακίνητης πλάκας της μηχανής δοκιμών. Κατά την εξέλιξη του πειράματος παρατηρήθηκε προοδευτική κατάρρευση με μικροθραύσεις του σύνθετου υλικού, συνοδευόμενη από υψηλά ποσά ενέργειας απορρόφησης, με αποτέλεσμα να σχηματιστεί ζώνη θραύσης (μέτωπο κατάρρευσης), μόνο στο κάτω άκρο του κελύφους, σε μορφή μανιταριού (“mushrooming” failure).

Κατά την δυναμική άσκηση φορτίου στο δοκίμιο S5 καταγράφηκε το μέγιστο φορτίο στα 74,37 KN για την τιμή βράχυνσης των 2,0552 mm.

#### 4.4.13 Δοκίμιο S6



STRESS - STRAIN (ENGINEERING) GRAPH



**Εικόνα 4.18:** Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης δοκ. S6 και καμπύλη φορτίου-μετατόπισης. Η αρίθμηση (1-7) στην καμπύλη δηλώνει τις θέσεις των στιγμιότυπων.

**Πίνακας 4.14:** Πειραματικά δεδομένα και αποτελέσματα για το δοκ. S6

S6	
Φωτογραφία	Displacement (mm)
1	0
2	3.6
3	13.7
4	19.8
5	25.9
6	33.7
7	40

Διαδρομή εμβόλου:	S	40	mm
Μέσο Φορτίο	P <sub>mean</sub>	44.52	kN
Μέγιστο φορτίο	P <sub>max</sub>	82.29	kN
Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου	c.f.e	0.541	%
Ενέργεια απορρόφησης	E <sub>abs</sub>	1784.068	Joule

Το δοκίμιο S6 αποτελεί τετραγωνικής διατομής κέλυφος χωρίς την τοποθέτηση αφρού στον πυρήνα.

Το κέλυφος του δοκιμίου S6 συμπιέζεται αξονικά μεταξύ της άνω (κινούμενης προς τα κάτω) πλάκας συμπίεσης και της κάτω ακίνητης πλάκας της μηχανής δοκιμών. Κατά την εξέλιξη του πειράματος παρατηρήθηκε προοδευτική κατάρρευση με μικροθραύσεις του σύνθετου υλικού, συνοδευόμενη από υψηλά ποσά ενέργειας απορρόφησης, με αποτέλεσμα να σχηματιστεί ζώνη θραύσης (μέτωπο κατάρρευσης), μόνο στο κάτω άκρο του κελύφους, σε μορφή μανιταριού (“mushrooming” failure).

Κατά την δυναμική άσκηση φορτίου στο δοκίμιο S6 καταγράφηκε το μέγιστο φορτίο στα 82,29 KN για την τιμή βράχυνσης των 1,9714 mm.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup>

### 5.1 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων και συγκριτικά σχόλια

Στο κεφάλαιο αυτό αξιολογούνται τα αποτελέσματα των πειραμάτων με τη βοήθεια των κριτηρίων - δεικτών αξιολόγησης που προαναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 1. ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με τη συμπεριφορά των διάφορων λεπτότοιχων δοκιμίων ως προς την αξονική κατάρρευση.

Αρχικά δίνεται ο πίνακας 5.1 που περιλαμβάνει όλα τα δοκίμια που μελετήθηκαν σε αξονική συμπίεση με τους αντίστοιχους δείκτες αξιολόγησης.

**Πίνακας 5.1:** Συγκεντρωτικός πίνακας αξιολόγησης δοκιμίων

Δοκίμιο	Πολυμερικός αφρός	Διαδρομή εμβόλου:	Μέσο Φορτίο	Μέγιστο φορτίο	Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου	Ενέργεια απορρόφησης
		S (mm)	P <sub>mean</sub> (kN)	P <sub>max</sub> (kN)	c.f.e (%)	E <sub>abs</sub> (Joule)
R1	Αφρός πολυαιθυλαίνιου	40	29.94	43.25	0.692	1198.144
R2	Αφρός γραμμικού χλωριούχου πολυβινυλίου (PVC)	40	42.59	57.1	0.745	1705.32
R3	Αφρός διασταυρωμένου χλωριούχου πολυβινυλίου	40	42.62	74.34	0.57	1708.21
R4	Αφρός πολυουρεθάνης	40	40.85	55.15	0.74	1636.17
R5	Αφρός πολυμεθακρυλιμίδιου	40	46.48	81.24	0.572	1863.36
R6	Αφρός αλουμινίου	40	<b>51.87</b>	65.47	<b>0.79</b>	<b>2075.5</b>
R7	Χωρίς παρουσία αφρού	40	43.66	83.95	0.52	1747.605
S1	Αφρός πολυαιθυλαίνιου	40	37.102	<b>89.95</b>	0.412	1484.56
S2	Αφρός γραμμικού χλωριούχου πολυβινυλίου (PVC)	40	44.13	65.94	0.669	1768.93
S3	Αφρός διασταυρωμένου χλωριούχου πολυβινυλίου	40	41.07	77.37	0.53	1643.876
S4	Αφρός πολυουρεθάνης	40	39.65	72.63	0.545	1588.142
S5	Αφρός πολυμεθακρυ- λιμίδιου	40	39.96	74.37	0.537	1599.238
S6	Χωρίς παρουσία αφρού	40	44.52	82.29	0.541	1784.068

Μεταξύ των δοκιμών διακρίνουμε επαναληψιμότητα, με την μόνη διαφορά στην τιμή του αρχικού φορτίου, και ως εκ τούτου στον συντελεστή ομοιομορφίας φορτίου.

Η μικρή διαφοροποίηση μόνο στο αρχικό/μέγιστο φορτίο,  $P_{max}$  και - ως εκ τούτου - στον δείκτη ανομοιομορφίας φορτίου, c.f.e οφείλεται αποκλειστικά σε κάποια μεμονωμένη/τοπική γεωμετρική ή/και δομική απόκλιση μεταξύ των σύνθετων κελυφών, εντός των αναμενόμενων/αποδεκτών ορίων.

Συμπερασματικά, τα συγκεκριμένα σύνθετα κελύφη παρουσίασαν πολύ καλή (splaying mode) συμπεριφορά κατάρρευσης έναντι αξονικής συμπίεσης (crashworthiness), που αποτυπώθηκε στο μοτίβο κατάρρευσης και - ως εκ τούτου - στο διάγραμμα φορτίου μετατόπισης και τις χαρακτηριστικές (αριθμητικές) τιμές αξιολόγησης της συμπεριφοράς κατάρρευσης.

Ειδικότερα, η πολύ μικρή βύθιση/πτώση του φορτίου αμέσως μετά την πρώτη/μέγιστη τιμή ( $P_{max}$ ) στο τέλος της αρχικής ελαστικής παραμόρφωσης, η σταθερή - σχεδόν οριζόντια - καμπύλη του φορτίου με την εξαιρετικά μικρού εύρους διακύμανση στη συνέχεια (φάση κατάρρευσης), καθώς και η υψηλή τιμή του δείκτη ομοιομορφίας φορτίου (c.f.e), καταδεικνύουν την καλή ποιότητα της συνάφειας ινών-μήτρας, της συνολικής κατασκευής (fabrication) και της κατεργασίας τελικής μορφοποίησης (manufacturing) των κελυφών σύνθετου υλικού, για τη συγκεκριμένη επιλογή διαστάσεων, αριθμού στρώσεων, υλικού και διάταξης ενισχυτικών ινών και υλικού μήτρας. Να σημειωθεί τέλος, ότι η συγκεκριμένη απόκριση των κελυφών προέκυψε δίχως να έχει προηγηθεί επιπλέον κατεργασία διαμόρφωσης (σταδιακή μείωση) της διατομής του ενός άκρου τους (μηχανισμός triggering), που θα προκαλούσε/διευκόλυνε την ελεγχόμενη έναρξη και προοδευτική/ευσταθή κατάρρευση των δοκιμών από το διαμορφωθέν άκρο (η διατομή των δοκιμών στα άκρα τους δηλαδή ήταν πλήρης και τα άκρα τετραγωνισμένα).

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Guohua Zhu, Guangyong Sun, Qiang Liu, Guangyao Li, Qing Li, On crushing characteristics of different configurations of metal-composites hybrid tubes, *Composite Structures* 175 (2017)
- [2] Διπλωματική εργασία Κρουσταλάκη Ιωάννη, Η επίδραση Εξωτερικών Αυλακώσεων Στην Αξονική Κατάρρευση Σωλήνων Απο Σύνθετο Υλικό, Επιβλέπων Καθηγητής: Δημήτριος Μανωλάκος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Τομέας Τεχνολογίας Των Κατεργασιών, Αθήνα 2014.
- [3] Dirk H and Lukaszewicz, Automotive Composite Structures for Crashworthiness, in *Advanced Composite Materials for Automotive Applications: Structural Integrity and Crashworthiness*, Elmarakbi A (ed) Wiley, West Sussex, 2014.
- [4] D.Hull, (1991), A Unified Approach to Progressive Crushing of Fibre-Reinforced Composite Tubes, *Composites Science and Technology* 377-42.
- [5] Pinho ST, Camanho PP and de Moura MF (2004) Numerical Simulation of the Crushing Process of Composite Materials, *International Journal of Crashworthiness*, 9(3), 263-276.
- [6] Narasimhan Swaminathan & Ronald C. Averill (2006) Contribution of Failure Mechanisms to Crush Energy Absorption in a Composite Tube *Mechanics of Advanced Materials and Structures*.
- [7] Tuttle M (2004) *Structural Analysis of Polymeric Composite Materials*, Marcel Dekker, New York.
- [8] Backman B (2005) *Composite Structures, Design, Safety and Innovation*, Elsevier, Oxford.
- [9] Mallick P (2007) *Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing and Design*, CRC Press, Boca Raton.
- [10] Camanho P, Dávila C, Pinho S and Remmers L (Eds.) (2008) *Mechanical Response of Composites*, Springer, Dordrecht
- [11] Thornton P (1979) Energy Absorption in Composite Structures, *Journal of Composite Materials*, 13, 247-262.
- [12] Farley G (1983) Energy Absorption of Composite Materials, *Journal of Composite Materials*, 17, 267-279.
- [13] Schmueser D and Wickliffe L (1987) Impact Energy Absorption of Continuous Fiber Composite Tubes, *Journal of Engineering Materials Technology*, 109, 72-77.
- [14] Thornton P and Jeryan R (1988) Crash Energy Management in Composite Automotive Structures, *International Journal of Impact Engineering*, 7(2), 167-180.
- [15] Mamalis A, Manolakos D and Viegelnahn G (1989) Deformation Characteristics of Crashworthy Components, *Fortschritt-Berichte der VDI-Zeitschriften* 18(62), Düsseldorf.
- [16] Hull D (1991) A Unified Approach to Progressive Crushing of Fibre-Reinforced Composite Tubes, *Composites Science and Technology*, 40, 377-421.

- [17] Mamalis A, Robinson M, Manolakos D, Demosthenous G, Ioannidis M and Carruthers J (1997) Review: Crashworthy Capability of Composite Material Structures, *Composite Structures*, 37, 109-134.
- [18] Carruthers J, Kettle A and Robinson A (1998) Energy Absorption Capability and Crashworthiness of Composite Material Structures: A Review, *Applied Mechanics Reviews*, 51(10), 635-649.
- [19] Jacob G, Fellers J, Simunovic S and Starbuck J (2002) Energy Absorption in Polymer Composites for Automotive Crashworthiness, *Journal of Composite Materials*, 36(7), 813-851.
- [20] Pitarresi G, Carruthers J, Robinson A, Torre G, Kenny J, Ingleton S, Velegela O and Found M (2007) A Comparative Evaluation of Crashworthy Composite Sandwich Structures, *Composite Structures*, 78, 34-44.
- [21] Mamalis A and Manolakos D (1989) Crashworthy Characteristics of Thin Fibre-Reinforced Composite Frusta under Axial Collapse, *Journal of Vehicle Design*, 10(2), 165-174.
- [22] Mamalis A, Manolakos D, Viegela G, Demosthenous G and Yap S (1991) Microscopic Failure Mechanism of Thin-Walled Fibre-Reinforced Composite Frusta under Static Axial Collapse, *International Journal of Vehicle Design*, 12, 557-578.
- [23] Mamalis A, Yuan Y and Viegela G (1992) Collapse of Thin Wall Composite Sections Subjected to High Speed Axial Loading, *International Journal of Vehicle Design*, 13(5/6), 564-579.
- [24] Farley G and Jones R (1992) Crushing Characteristics of Continuous Fibre-Reinforced Composite Tubes, *Journal of Composite Materials*, 26, 37-50.
- [25] Mamalis A, Manolakos D, Demosthenous G and Ioannidis M (1996) Analysis of Failure Mechanisms Observed in Axial Collapse of Thin-Walled Circular Fibreglass Composite Tubes, *Thin-Walled Structures*, 24, 335-352.
- [26] Mamalis A, Manolakos D, Demosthenous G and Ioannidis M (1996) Energy Absorption Capability of Fibreglass Composite Square Frusta Subjected to Static and Dynamic Axial Collapse, *Thin-Walled Structures*, 25, 269-295.
- [27] Mamalis A, Manolakos D, Demosthenous G and Ioannidis M (1997) Analytical Modelling of the Static and Dynamic Axial Collapse of Thin-Walled Fibreglass Composite Conical Shells, *International Journal of Impact Engineering*, 19(5/6), 477-492.
- [28] Mamalis A, Manolakos D, Demosthenous G and Ioannidis M (1997) Experimental Determination of Splitting in Axially Collapsed Thick-Walled Fibre-Reinforced Composite Frusta, *Thin-Walled Structures*, 28, 279-296.
- [29] Farley G (1986) Effect of Specimen Geometry on the Energy Absorption Capability of Composite Materials, *Journal of Composite Materials*, 20, 390-400.
- [30] Mamalis A, Manolakos D, Demosthenous G and Ioannidis M (1994) On the Bending of Automotive Fibre-Reinforced Composite Thin-Walled Structures, *Composites*, 25(1), 47-57.
- [31] Mamalis A, Manolakos D, Demosthenous G and Ioannidis M (1995) Analytical and Experimental Approach to Damage and Residual Strength of Fibreglass

Composite Automotive Frame Rails During Manufacturing, *Composite Structures*, 32, 325-330.

[32] Hamada H, Ramakrishna S and Sato H (1996) Effect of Fiber Orientation on the Energy Absorption Capability of Carbon Fiber PEEK Composite Tubes, *Journal of Composite Materials*, 30(8), 947–963.

[33] Mamalis A, Manolakos D, Demosthenous G and Ioannidis M (1996) The Static and Dynamic Axial Collapse of Fibreglass Composite Automotive Frame Rails, *Composite Structures*, 34, 77-90.

[34] Found M, Robinson A and Carruthers J (1997) The Influence of FRP Inserts on the Energy Absorption of a Foam-Cored Sandwich Panel, *Composite Structures*, 38, 373-381.

[35] Mamalis A, Manolakos D, Ioannidis M, Papapostolou D, Kostazos P and Konstantinidis D (2002) On the Compression of Hybrid Sandwich Composite Panels Reinforced with Internal Tube Inserts: Experimental, *Composite Structures*, 56(2), 191-199.