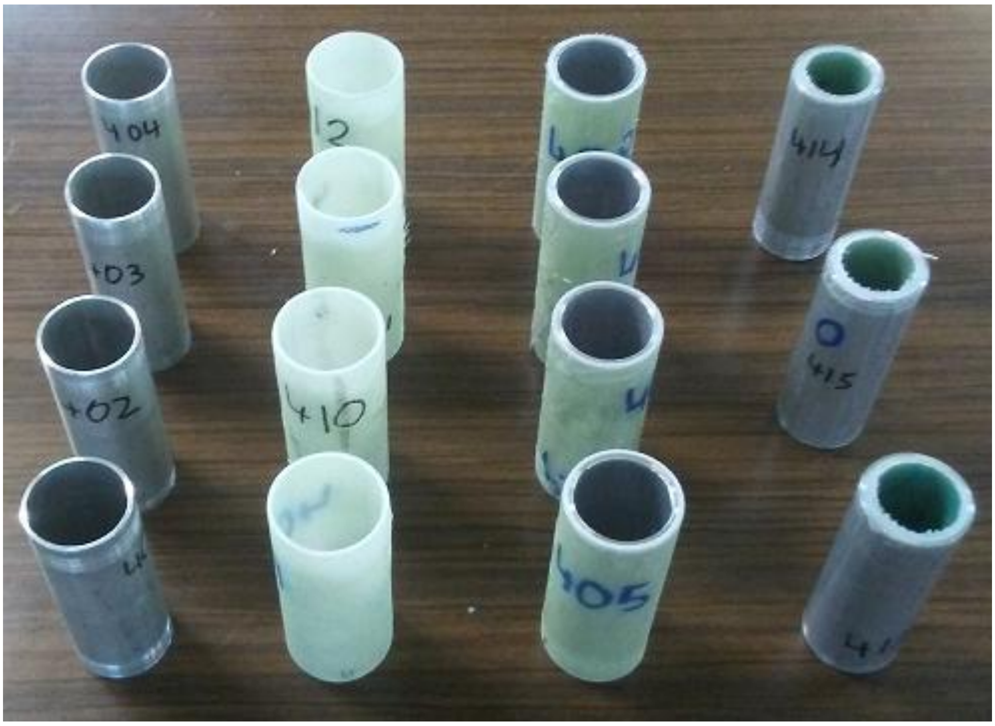
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
Τομέας Τεχνολογίας των Κατεργασιών

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΔΙΠΛΟΚΕΛΥΦΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΕΝΑΝΤΙ ΚΡΟΥΣΤΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ



ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Βενετσάνος Βασίλειος Οδυσσέας

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Μανωλάκος Δημήτριος

ΑΘΗΝΑ 2018

Ευχαριστίες

Η ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας οφείλει πολλά στη συμπαράσταση του προσωπικού του Εργαστηρίου Κατεργασιών των Υλικών.

Ευχαριστώ από καρδιάς τον κ. Νίκο Μελισσά που υποστήριξε εργαστηριακά κάθε ιδέα μου βελτιώνοντάς την και κυρίως τον κ. Πρωτεσίλαο Κωστάζο για τη συζήτηση και τις γνώσεις που μου μετέδωσε. Θερμά ευχαριστώ τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Δημήτρη Μανωλάκο για την συνεργασία, την εμπιστοσύνη και την ενθάρρυνση.

Τέλος ευχαριστώ τη φίλη μου Μαρία Καλύβα για την υπομονή της και την ενθάρρυνση.

Περίληψη

Οι υβριδικές κατασκευές μετάλλων/συνθέτων υλικών, συνδυάζουν την χαμηλή πυκνότητα των συνθέτων με το χαμηλό κόστος των μεταλλικών υλικών. Λαμβάνουν συνεχώς αυξανόμενο ενδιαφέρον, λόγω των απαιτήσεων ελάφρυνσης και βελτιστοποίησης των crashworthiness χαρακτηριστικών που θέτει η σύγχρονη μηχανική της αυτοκίνησης και της αεροδιαστημικής.

Η παρούσα εργασία διερευνά τα χαρακτηριστικά απορρόφησης ενέργειας έναντι πρόσκρουσης δύο κατηγοριών λεπτότοιχων υβριδικών κυλινδρικών κελυφών (αλουμινίου/υαλοϋφάσματος). Οι πειραματικές δοκιμές υλοποιήθηκαν υπό οιονεί στατικές και δυναμικές αξονικές φορτίσεις. Για λόγους σύγκρισης αποτελεσμάτων δοκιμάστηκαν επίσης δοκίμια αλουμινίου και υαλοϋφάσματος.

Abstract

Metal/composites hybrid structures, which combine low-density composites with low-cost metallic materials, are gaining increasing attention for meeting higher and higher requirements of lightweigthing and crashworthiness in automotive and aerospace engineering.

This study explores the crushing characteristics of thin walled cylindrical tubes involving the energy absorption and damage behaviors of two different configurations of hybrid (aluminum/fiberglass) under quasi-static and dynamic axial loading . For comparative purpose, empty aluminum and fiberglass were tested as well.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κεφάλαιο 1 Θεωρητικό μέρος

Κεφάλαιο 2 Μέθοδος χειρισμού τεχνικών υλικών απουσία κενού

Κεφάλαιο 3 Κατασκευή – προετοιμασία δοκιμίων

Κεφάλαιο 4 Πειραματική διαδικασία

Κεφάλαιο 5 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Κεφάλαιο 1 Θεωρητικό μέρος

Σύνοψη

Στο παρακάτω κεφάλαιο παρουσιάζεται συνοπτικά η μέχρις στιγμής έρευνα στον τομέα του crashworthiness, ο σκοπός της εργασίας καθώς και οι δείκτες ενεργειακής απορρόφησης. Ακόμα, παρατίθενται τα χαρακτηριστικά των επιμέρους υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική και οι πιθανοί τρόποι κατάρρευσης λεπτότοιχων κελυφών αποτελούμενων από αυτά, βάσει βιβλιογραφικής ανασκόπησης.

Εισαγωγή [1]

Για την εισαγωγή που ακολουθεί στην παρούσα ενότητα χρησιμοποιήθηκε εκτενώς το αντίστοιχο τμήμα του άρθρου των Guohua Zhu, Guangyong Sun, Qiang Liu, Guangyao Li kai Qing Li 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 ιδία 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 συνθέτων 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 διευθέτηση των ινών του συνθέτου υπό γωνία 90^o 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.

1.1. Στόχος εργασίας και τρόπος επίτευξης αυτού

Στην παρούσα εργασία διερευνάται η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας δοκιμίων σε αξονική καταπόνηση σε οιονεί στατικές και δυναμικές συνθήκες. Οι κατηγορίες δοκιμίων οι οποίες κατασκευάστηκαν και αξιολογήθηκαν είναι οι εξής:

- Κοίλα λεπτότοιχα κυλινδρικά δοκίμια αλουμινίου (Εικ. 1.1, $1^η$ σειρά)
- Κοίλα λεπτότοιχα κυλινδρικά δοκίμια συνθέτου (μήτρα εποξειδικής ρητίνης με ενίσχυση πεπλεγμένου υαλοϋφάσματος) (εικόνα 1.1.2)
- Υβριδικά δοκίμια (αλουμινίου-συνθέτου) με τοποθέτηση του συνθέτου στην **εξωτερική** επιφάνεια του κοίλου κυλινδρικού αλουμινίου (εικόνα 1.1.3)
- Υβριδικά δοκίμια (συνθέτου -αλουμινίου) με τοποθέτηση του συνθέτου στην **εσωτερική** επιφάνεια του κοίλου κυλινδρικού αλουμινίου (εικόνα 1.1.4)

Αξιολογείται η απόκριση των κελυφών - απλών και υβριδικών - 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 των υβριδικών κατασκευών έναντι εκείνων από τα συστατικά τους μέρη.

Εικόνα 1.1: Κατηγορίες παραχθέντων δοκιμίων.

1.2 Δείκτες crashsworthiness

Η μελέτη της ικανότητας των υλικών στην απορρόφηση ενέργειας μέσω της παραμόρφωσης ή ολοκληρωτικής τους θραύσης, βαθμονομείται βάσει μίας σειράς μεγεθών (crashsworthines 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.

$$Eabs = \int_0^x F(x)dx$$

Όπου: $Eabs$(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 P_{max}**

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 μεγίστου 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:

$$mc = p \times V$$

1.3 Κατηγοριοποίηση υαλονημάτων και εφαρμογές

Η χρήση υαλονημάτων στην κατασκευή συνθέτων υλικών είναι ευρέως διαδεδομένη. Τα εν γενεί χαρακτηριστικά των υαλονημάτων αποτελούν το υψηλό μέτρο ελαστικότητας (E), η υψηλή τάση θραύσης σε εφελκυσμό (UTS), η μεγάλη ακαμψία (stiffness),η χαμηλή δυσθραυστότητα (toughness) και επιπλέον η χαμηλή πυκνότητα (ρ).

Ανάλογα με τη χημική τους σύσταση, οι ίνες γυαλιού κατηγοριοποιούνται ως τύπου E (electrical), C (corrosion) και S (stiffness).

Τα E–glass αποτελούν την πλέον διαδεδομένη κατηγορία στις εφαρμογές συνθέτων κατασκευών. Τα κύρια τους χαρακτηριστικά είναι, οι καλές ηλεκτρικές ιδιότητες (συγκρινόμενα με της άλλες κατηγορίες υαλονημάτων),η δυσκαμψία, η αντοχή, και η πολύ καλή συμπεριφορά στις εναλλαγές καιρικών συνθηκών. Έχουν μέτρια αντοχή σε αλληλεπίδραση με χημικά αντιδραστήρια και γραμμική συμπεριφορά ελαστικότητας. Εμπορικά, αντιστοιχεί στην φθηνότερη κατηγορία ινών γυαλιού και προσφέρεται σε μεγάλη ποικιλία πλέξεων κάνοντάς το ελκυστικό για μια σειρά εφαρμογών. Κατά κύριο λόγο βρίσκει εφαρμογή στην αεροπορική βιομηχανία ως υλικό επικάλυψης, στην κατασκευή κύριων και δευτερευόντων δομικών στοιχείων.

Τα C–glass όπως καταδεικνύει η ονομασία τους έχουν ως κύριο χαρακτηριστικό την υψηλή αντίσταση σε χημική διάβρωση. Ακόμα, οι μηχανικές τους ιδιότητες είναι καλύτερες από αυτές της κατηγορίας E. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά όμως, ανεβάζουν το εμπορικό κόστος αυτής της κατηγορίας .Ως εκ τούτου, οι εφαρμογές τους είναι κυρίως εντοπισμένες σε περιπτώσεις που η αντίσταση σε χημική διάβρωση είναι πρωταρχικής σημασίας.

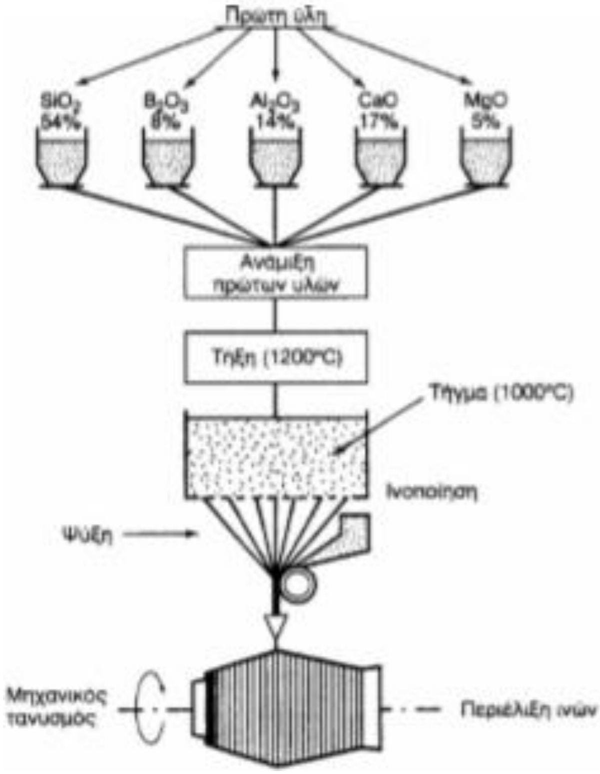
Το S–glass έχει τις ίδιες χαρακτηριστικές ιδιότητες με το E–glass. Οι διαφορές τους εντοπίζονται στην ποιότητα του υλικού, μίας και το S–glass έχει βελτιωμένη αντοχή , υψηλότερο μέτρο ελαστικότητας , υψηλότερη αντοχή σε κρούση και χαμηλότερο βάρος. Στον αντίποδα, το κόστος του είναι σχεδόν τριπλάσιο σε σχέση με το E–glass. Όπως γίνεται κατανοητό, οι εφαρμογές του βρίσκουν θέση σε κρίσιμα δομικά στοιχεία των κατασκευών όπως οι εξωτερικές δεξαμενές τα δοχεία καυσίμων, τα δοχεία υψηλής πίεσης και άλλα σημαντικά τμήματα των αεροπορικών κατασκευών.

Υποκατηγορία του S–glass αποτελεί το S2- glass, το οποίο έχει μεγαλύτερη ελαστικότητα, και μεγαλύτερη μηχανική αντοχή συγκριτικά με το S–glass. Υπερτερεί κατά 20% σε μηχανική αντοχή και 15% σε μέτρο ελαστικότητας. Για αυτόν τον λόγο βρίσκει εφαρμογή σε υβριδικές σύνθετες κατασκευές και δομικά στοιχεία που απαιτούν εκτός των άλλων, υψηλό μέτρο ελαστικότητας. Ακόμα έχει εξαιρετική αντοχή υποβάθμισης σε υψηλές θερμοκρασίες (έως και 800^{o}) με συνέπεια να χρησιμοποιείται σε εφαρμογές όπου απαιτούνται υψηλές μηχανικές ιδιότητες κάτω από υψηλή θερμοκρασία

Τα κύρια μειονεκτήματα των υαλονημάτων είναι , το εν γένει χαμηλό μέτρο ελαστικότητας και η μικρή αντοχή τους έναντι φθοράς εκτριβής (λύση της συνέχειας της επιφάνειάς τους). Εγχαράξεις και εκδορές, δημιουργούν περιοχές συγκέντρωσης τάσεων στην επιφάνεια της ίνας, με αποτέλεσμα την ταχεία υποβάθμιση των μηχανικών τους ιδιοτήτων σε επόμενους κύκλους φόρτισης.

1.4 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.



Εικόνα 1.2: 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 μm. Ακολουθεί ελαφρός ψεκασμός 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 1.1) παρατίθενται τα χαρακτηριστικά μεγέθη των διαφόρων κατηγοριών ινών γυαλιού.

Πίνακας 1.1 Χαρακτηριστικά μεγέθη κατηγοριών υαλονήματος [2]

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΤΥΠΟΣ		
	E	C	S
Χημική σύσταση (%)			
SiO_2	54	60	65
Al_2O_3	16	25	25
B_2O_3	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

1.5 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 πού 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.

1.6 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.

1.7 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 ελεχθεί 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 επάλληλλων στρώσεων κυρίως σε αξονική καταπόνηση)

1.8 Μηχανισμοί αστοχίας 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 τρόπου κατάρρευσης κατηγοριοποιήθηκαν σε τέσσερεις κύριες κατηγορίες οι οποίες θα αναλυθούν παρακάτω:

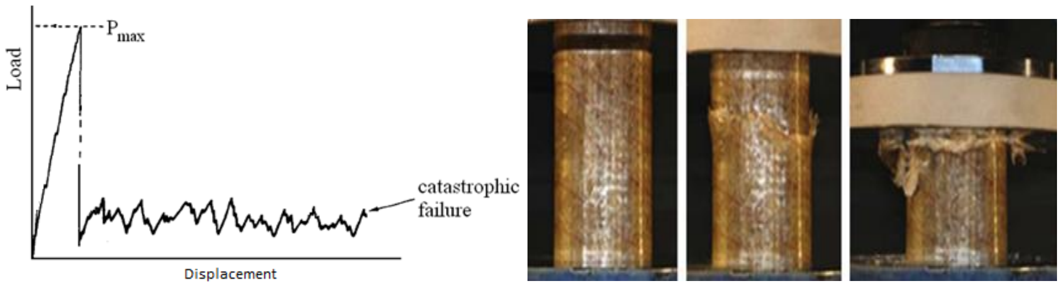
- Λυγισμός (Euler)
- Catastrophic failure
- Progressive crushing
- Progressive folding

1.8.1 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.

1.8.2 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 εγκαρσίως) 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]



Εικόνα 1.3: Διάγραμμα φορτίου μετατόπισης και οπτική απεικόνιση καταστροφικής καταπόνησης.[5]

1.8.3 Progressive folding

Σε αντιστοιχία με την δημιουργία εκτατών λοβών στα μεταλλικά κελύφη (κεφ.1.9.1), η προοδευτική αναδίπλωση (folding)(Εικ 1.4) 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. Συνήθης, είναι η εμφάνισή του σε περιπτώσεις χρήσης ενισχυτικών ινών Kevlar για την δημιουργία συνθέτου.

Εικόνα 1.4: Απεικόνιση σύνθετου δοκιμίου που έχει καταρρεύσει με progressive folding τρόπο.

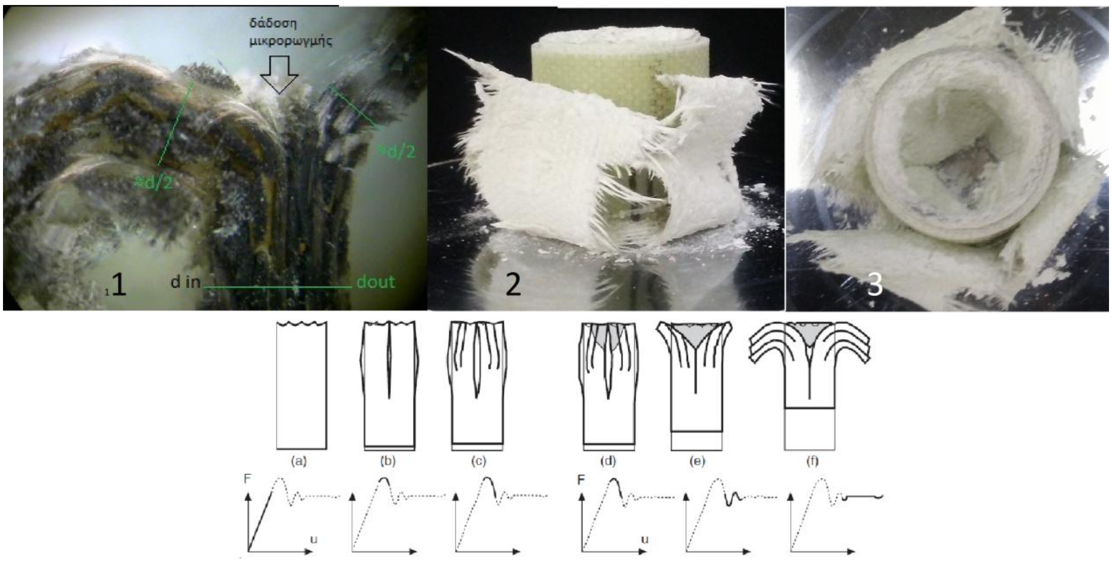
1.8.4 Progressive crushing

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 τρείς 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**

1.8.4.1 Mushrooming failure

Η πρώτη μορφή κατάρρευσης, αναφέρεται σαν αστοχία με μορφή μανιταριού (Εικ.1.5.2, 1.5.3) 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 (Εικ.1.5.2). Στα στρεφόμενα προς τα μέσα φύλλα του συνθέτου προκύπτουν θλιπτικά φορτία (Εικ.1.5.3), για τον λόγω αυτό εμφανίζεται μόνο θραύση και όχι διάρρηξη της συνέχειας τους υλικού μέσω διάδωσης ρωγμών. Η διαστρωματική αποκόλληση που λαμβάνει χώρα στο τοίχωμα του υλικού προκύπτει στο μισό του πάχους τοιχώματος (Εικ.1.5.1), και διαδίδεται κατακόρυφα μέσω σφήνα θρυμματισμένου/συμπιεσμένου υλικού (Εικ.1.5.1 και 1.5 διαγραμματική απεικόνιση φαινομένου).



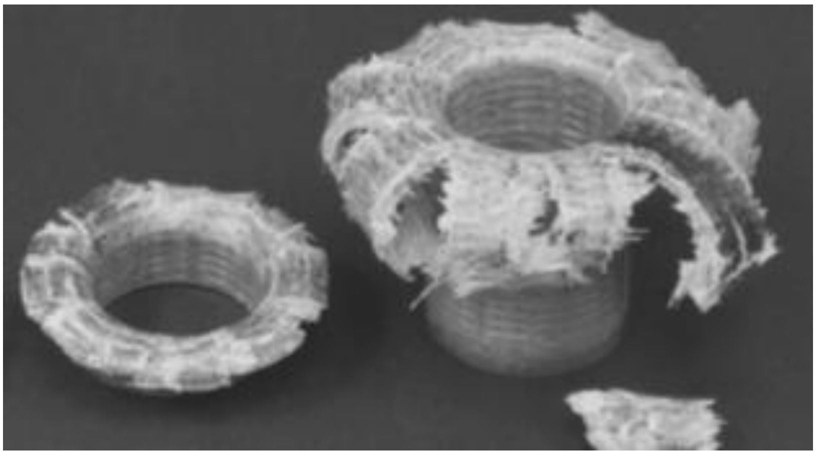
Εικόνα 1.5: Στις εικόνες 1έως 3 παρουσιάζεται η θραύση με μορφή μανιταριού. Στο κάτω μέρος της εικόνας, παρατίθεται τυπικό διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης, με τα στάδια δημιουργίας της εν λόγω δομής.[5]

1.8.4.2 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.

1.8.4.3 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 1.6). Οι εν λόγω ρηγματώσεις προκύπτουν λόγω των καμπτικών και εφελκυστικών φορτίων που επιδρούν στην καταρρέουσα επιφάνεια .



Εικόνα 1.6: Χαρακτηριστική απεικόνιση κατάρρευσης συνθέτου κελύφους προς τα έξω.[6]

1.9 Μηχανισμοί αστοχίας μεταλλικών λεπτότοιχων κελυφών υπό αξονική φόρτιση

Οι τρόποι κατάρρευσης λεπτότοιχων μεταλλικών κελυφών σε αξονική φόρτιση, ήταν οι πρώτοι που ερευνήθηκαν στα πλαίσια διερεύνησης των crasworthines χαρακτηριστικών των υλικών. Η αιτία πηγάζει από την ικανότητα των όλκιμων μεταλλικών υλικών να απορροφούν μεγάλα ποσά ενέργειας, μέσω της μετατροπής της σε πλαστική παραμόρφωση. Τα προκύπτοντα ερευνητικά συμπεράσματα συνοψίζονται σε τέσσερεις τρόπους κατάρρευσης (κεφ 1.9.1-1.9.4) οι οποίοι εξαρτώνται από τις γεωμετρικές διαστάσεις του δοκιμίου, την σύσταση και την μικροδομή του φορτιζόμενου μετάλλου.

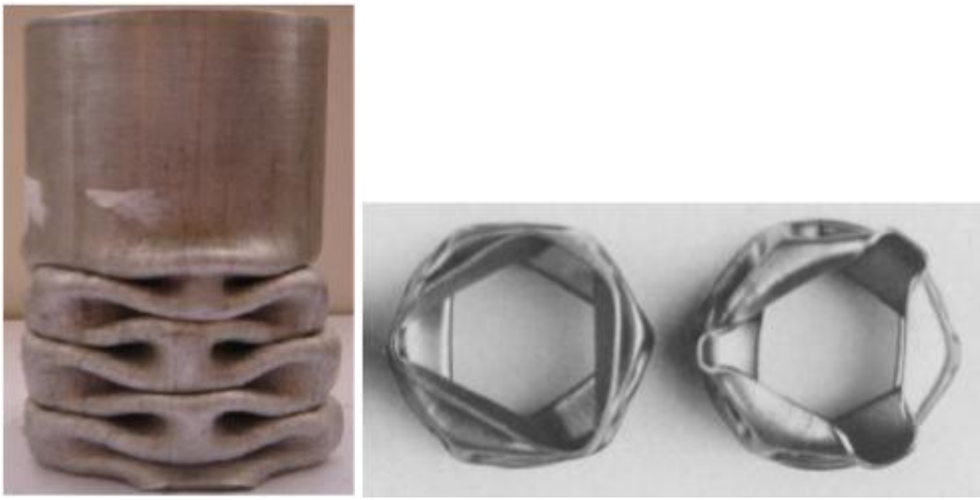
1.9.1 Αξονοσυμμετρικός τρόπος κατάρρευσης

Ο αξονοσυμμετρικός ή εκτατός τρόπος κατάρρευσης χαρακτηρίζεται από την δημιουργία συμμετρικών λοβών κατά την άσκηση φορτίου και πλαστική παραμόρφωση με εκτατό τρόπο. Κατά τον σχηματισμό των λοβών, παρατηρείται έκταση κατά πλάτος του δοκιμίου με αποτέλεσμα την αύξηση της τελικής διαμέτρου του δοκιμίου (Εικ 1.7). Αυτού του είδους κατάρρευση, παρουσιάζει εν γένει την μεγαλύτερη ικανότητα απορρόφηση ενέργειας σε μία πρόσκρουση.

Εικόνα 1.7: Αξονοσυμμετρικός τρόπος κατάρρευσης. Παρουσιάζεται η δομή του δοκιμίου πριν και μετά την επιβολή θλιπτικού φορτίου.

1.9.2 Μη αξονοσυμμετρικός τρόπος κατάρρευσης (diamond)

Κατά την κατάρρευση ενός μεταλλικού κελύφους μη αξονοσυμμετρικά, η συνολική διάμετρος του φορτιζόμενου δοκιμίου παραμένει σταθερή. Η διαμόρφωση των σχηματιζόμενων λοβών είναι μη συμμετρική . Λόγω της μορφής που παίρνουν τα δοκίμια μετά την πλαστική τους παραμόρφωση ο εν λόγω τρόπος κατάρρευσης ονομάζεται και diamond (Εικ 1.8). Στις παρακάτω φωτογραφίες, φαίνεται ο σχηματισμός διαμαντοειδούς δομής τριών ακμών (3D diamond). Ανάλογα με τον αριθμό των ακμών ανά επίπεδο προκύπτει ο χαρακτηρισμός της διαμαντοειδούς δομής .



Εικόνα 1.8: Μη εκτατός τρόπος κατάρρευσης μεταλλικών κελυφών(diamond)

Κάθε λοβός που σχηματίζεται έχει την ίδια δομή με τον προηγούμενο. Λόγω της αλλαγής της γεωμετρίας του υποβάθρου όμως , σχηματίζεται υπό μια γωνία σε σχέση με τον προηγούμενο. Η γωνία περιστροφής εξαρτάται από την μορφή του λοβού με βάσει τον εξής τύπο:

Γωνία περιστροφής = $\frac{\pi}{\chi} rad$

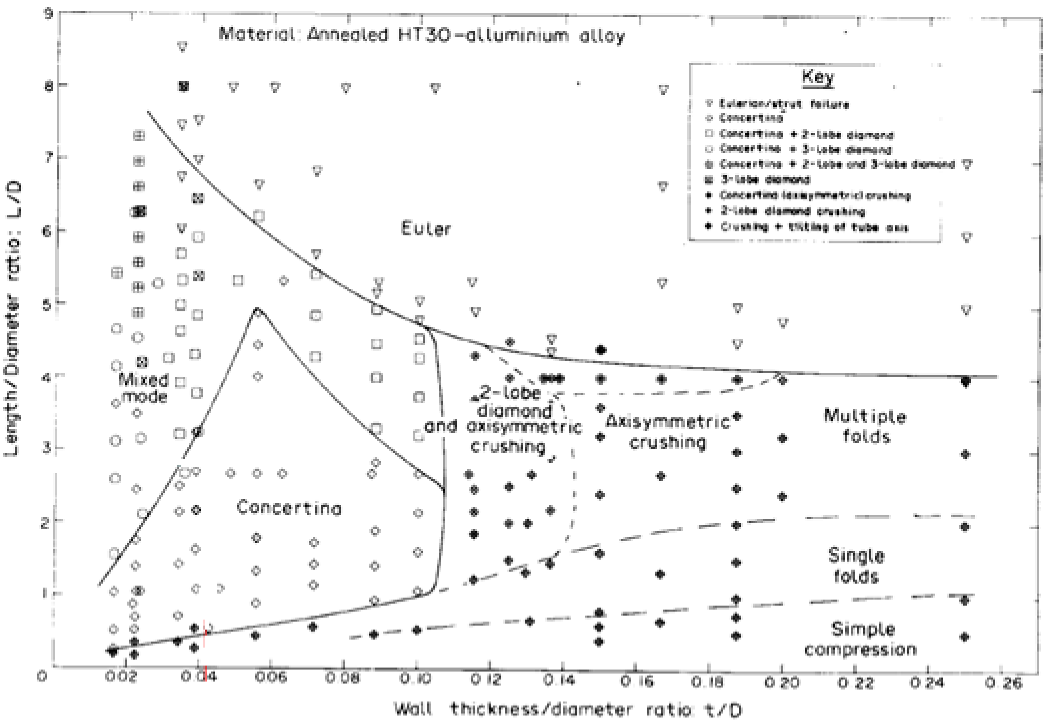
Όπου χ, ο αριθμός των δημιουργηθέντων ακμών .

Γενικά πρόκειται για έναν τρόπο κατάρρευσης που οδηγεί σε χαμηλότερα ποσά απορροφημένης ενέργειας σε σχέση με τον εκτατό. Ο λόγος εντοπίζεται, στο ότι για δεδομένη βράχυνση, με εκτατό τρόπο παραμόρφωσης απορροφάται ενέργεια μέσω θλίψης και έκτασης (Είκ 1.7:αρχική διάμετρος < τελική διάμετρο) ενώ για τον diamond τρόπο κατάρρευσης η ενέργεια απορροφάται μόνο μέσω θλίψης (Εικ 1.8: διάμετρος απαραμόρφωτου τμήματος = διάμετρο παραμορφωμένου)

1.9.3 Μικτός τρόπος κατάρρευσης

Όπως καταδεικνύει η ονομασία του εν λόγω τρόπου κατάρρευσης, αποτελεί τον συνδυασμό του αξονοσυμμετρικού και μη αξονοσυμμετρικού τρόπου. Ο μικτός τρόπος κατάρρευσης, προκύπτει συχνά όταν οι γεωμετρικές διαστάσεις του δοκιμίου είναι στο οριακό σημείο μεταξύ των δύο τρόπων (Εικ 1.9). Σε άλλες περιπτώσεις, η ύπαρξη δομικών και κατασκευαστικών ατελειών ευνοεί τα φαινόμενα σχισμού του υλικού. Αυτό το φαινόμενο έχει σαν αποτέλεσμα την αλλαγή του προβλεπόμενου (και πιθανόν σχηματισμένου κατά ένα ποσοστό) τρόπου κατάρρευσης ενός δοκιμίου σε μικτό τρόπο κατάρρευσης. Στην εικόνα 1.9 παρουσιάζεται ένα δοκίμιο που έχει παραμορφωθεί με μικτό τρόπο σχηματίζοντας τρείς πλήρως ανεπτυγμένους αξονοσυμμετρικούς λοβούς στην βάση του και δομή 2D διαμαντιού στους από πάνω τέσσερεις σχηματισθέντες λοβούς. Ακολουθεί διάγραμμα κατάταξης των μορφών κατάρρευσης (deformation mode) κυλινδρικών σωλήνων από κράμα αλουμινίου (Εικ 1.10).

Εικόνα 1.9: Μικτός τρόπος κατάρρευσης δοκιμίου



Εικόνα 1.10: Διάγραμμα κατάταξης των μορφών κατάρρευσης (deformation mode) κυλινδρικών σωλήνων από κράμα αλουμινίου. [7]

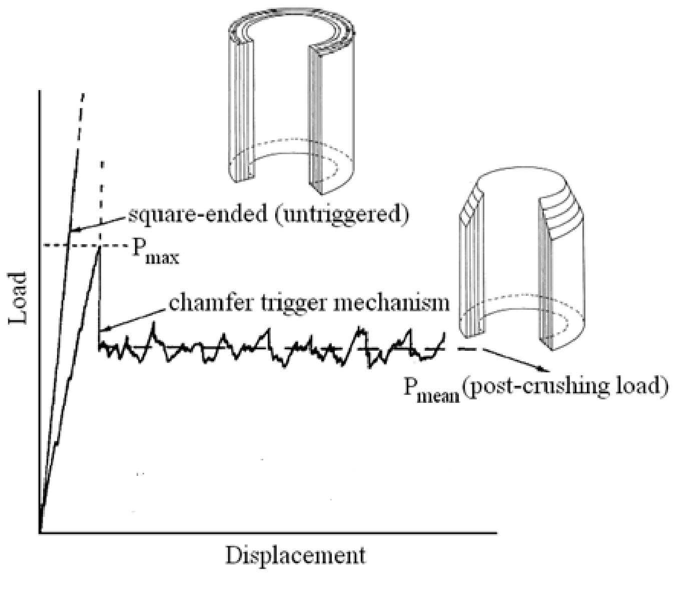
1.9.4 Κατάρρευση μέσω λυγισμού Euler

Η κατάρρευση μέσω λυγισμού, εμφανίζεται σε δοκίμια μεγάλου μήκους, σε σχέση με την διάμετρο και το πάχος τοιχώματος. Χαρακτηρίζεται από ξαφνική κατάρρευση του δοκιμίου, χωρίς να έχει ξεπεραστεί το όριο αντοχής αυτού. Ακόμα, είναι πιθανόν μια κατάρρευση η οποία προοδεύει αρχικά εκτατά ή μη να μετατραπεί σε λυγισμό.

1.10 Διαμόρφωση άκρου (μηχανισμός triggering)

Η διαμόρφωση άκρου είναι μια τεχνική βελτιστοποίησης της ενεργειακής απορρόφησης λεπτότοιχων κελυφών και μπορεί να εφαρμοστεί ανεξάρτητα από το υλικό του κελύφους. Μέσω της προοδευτικής μείωσης του πάχους τοιχώματος στο άκρο (Εικ. 1.11) μπορούν να επιτευχθούν τα εξής χαρακτηριστικά:

- Αποφυγή κατάρρευσης μέσω λυγισμού
- Αποφυγή κατάρρευσης μέσω catastrophic failure (σύνθετα κελύφη)
- Επίτευξη μείωσης αρχικού μεγίστου φορτίου προς βελτίωσης δείκτη CFE



Εικόνα 1.11: Διαγραμματική απεικόνιση μηχανισμού triggering[7].

Βιβλιογραφία Κεφαλαίου 1

[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]Mamalis AG, Manolakos DE, Demosthenous GA and Ioannidis MB, Crashworthiness of Composite Thin-Walled Structural Components, Technomic Publishing Company, Lancaster, Pennsylvania, 1998.

Κεφάλαιο 2 Μέθοδος χειρισμού τεχνικών υλικών απουσία κενού

Σύνοψη

Στο παρακάτω κεφάλαιο παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για την δημιουργία των συνθέτων υλικών της παρούσας εργασίας. Ακόμα, αναφέρεται μια σειρά παραμέτρων, που συντιθέμενες, οδηγούν στην βέλτιστη εφαρμογή των εν λόγω υλικών στην παραγωγή συνθέτων κελυφών (χειροποίητα)εν απουσία κενού.

2.1 Εποξειδική ρητίνη δύο συστατικών- Χαρακτηριστικά

Ως εποξειδική ρητίνη ορίζεται κάθε ένωση χαμηλού μοριακού βάρους που περιέχει ολιγομερή, τα οποία μπορούν να μετατραπούν με περαιτέρω αντίδραση σε δικτυωμένο πολυμερές (συστατικό Α). Ο όρος εποξειδική ρητίνη μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για το αντίστοιχο δικτυωμένο πολυμερές. Η διεργασία μετατροπής του χαμηλού μοριακού βάρους ολιγομερούς σε ένα υψηλώς δικτυωμένο πολυμερές καλείται σκλήρυνση και επιτελείται με την χρησιμοποίηση μιας χαρακτηριστικής ένωσης που καλείται σκληρυντής (συστατικό Β). Η συνηθέστερη εμπορική τους μορφή είναι σε δύο δοχεία (βάση και σκληρυντής). Όταν τα δύο συστατικά αναμειχθούν εκτείνεται η αντίδραση σκλήρυνσης.[1]

Οι εποξειδικές κόλλες μπορούν να κολλήσουν ένα μεγάλο πλήθος υλικών όπως ξύλο, γυαλί, κεραμικά, τα περισσότερα πλαστικά και μέταλλα. Ένα από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα τους είναι η μηδενική αλλαγή όγκου κατά την αντίδραση σκλήρυνσης και η ανάπτυξη μεγάλων τελικών μηχανικών αντοχών. Ακόμα, παρουσιάζουν μεγάλη τελική σκληρότητα χωρίς να είναι εύθραυστες.

Στην συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκε η εποξειδική ρητίνη SUPERFIX 50 της εταιρίας BAUER. Επιλέχθηκε η λεπτόρρευστη έκδοση αυτής λόγω του ότι χρησιμοποιήθηκε στον εμποτισμό υαλοϋφασμάτων, εφαρμογή που απαιτεί μέγιστη διεισδυτικότητα προς επίτευξη πληρέστερου εμποτισμού. Στον παρακάτω πίνακα (πίνακας 2.1) παρατίθενται τα κύρια χαρακτηριστικά της εν λόγω ρητίνης όπως αυτά προκύπτουν από το εγχειρίδιο που προσφέρει ο κατασκευαστής.

Οι σημαντικότερες παράμετροι στην επιτυχή χρήση εποξειδικής ρητίνης δύο συστατικών είναι κατά κύριο λόγο δύο. Η πλήρης ανάμιξη των συστατικών και η αυστηρή τήρηση των αναλογιών που προβλέπει ο κατασκευαστής μεταξύ Α και Β συστατικού. Η τρίτη σε σειρά σημαντικότητας παράμετρος αλλά με μεγάλη σημασία για τις τελικές μηχανικές ιδιότητες και την ερασμιότητα της ρητίνης είναι η θερμοκρασία. Η πλήρης και μεθοδική ανάμιξη των δύο συστατικών, εξασφαλίζει τον κατά τω δυνατό ομόρυθμο πολυμερισμό της ρητίνης κατά την διάρκεια της σκλήρυνσης, που έχει σαν αποτέλεσμα την τελική μηχανική ομοιογενή συμπεριφορά του υλικού. Ακόμα, αποφεύγεται ο κίνδυνος δημιουργίας περιοχών διαβαθμισμένης σκληρότητας στην μάζα της σκληρυμένης ρητίνης. Η αυστηρή τήρηση των περιεκτικοτήτων σε Α και Β συστατικό είναι κρίσιμης σημασίας, λόγω του ότι έτσι διαμορφώνεται ο χρόνος σκλήρυνσης (είναι σε συνάρτηση επίσης της θερμοκρασίας) και οι τελικές μηχανικές αντοχές.

Πίνακας 2.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά εποξειδικής ρητίνης BAUER SUPERFIX 50.[2]

Χημική βάση: εποξειδική ρητίνη 2 συστατικών
Πυκνότητα (Α + Β) : 1,10 kg/lit
Συνιστώμενη θερμοκρασία εφαρμογής: > 10 °C
Συρρίκνωση: μηδενική
Ιξώδες: 10 °C →1150 MPa.S 20 °C → 420 MPa.S 30 °C → 200 MPa.S
Χρόνος εργασιμότητας: 5 °C → 130 min 10 °C → 85 min 30 °C →15 min
Αντοχή σε θλίψη: 72 N/mm^2 μετά από 7 ημέρες στους 23 °C σύμφωνα με DIN EN 196-1
Αντοχή σε κάμψη: 64N/mm^2 μετά από 7 ημέρες στους 23 °C σύμφωνα με DIN EN 196-1
Αντοχή σε εφελκυσμό: 35 N/mm^2 μετά από 7 ημέρες στους 23°C σύμφωνα με ISO 527
Πρόσφυση σε σκυρόδεμα: ≥ 4 N/mm^2 (100% θραύση του σκυροδέματος)
Μέτρο ελαστικότητας , καμπτική αντοχή: 1600 N/mm^2 μετά από 7 ημέρες, 23°C σύμφωνα με DIN 53452

2.2 Βελτιστοποίηση συνάφειας των επιφανειών αλουμινίου-συνθέτου (προς κατασκευή υβριδικών δοκιμίων)

Κατά την άσκηση μηχανικού φορτίου σε μία κατασκευή, οι πιο ευάλωτες περιοχές αυτού προς αστοχία είναι οι μεσοεπιφάνειες αλλαγής υλικού. Στην περίπτωση των υβριδικών δοκιμίων αλουμινίου με επένδυση συνθέτου ρητίνης-υαλοϋφάσματος είναι η διεπιφάνεια του κοίλου κυλίνδρου αλουμινίου με αυτή του συνθέτου υλικού. Για να επιτευχθεί η καλύτερη συνοχή, η επιφάνεια επαφής του αλουμινίου με το σύνθετο καθαρίστηκε επιμελώς με σαπούνι και νερό. Έπειτα ακολούθησε μια ήπια κατεργασία αποβολής υλικού με γυαλόχαρτο (320 κορυφές/ ιντζα^2) με στόχο τον βέλτιστο καθαρισμό της επιφάνειας αλουμινίου, χωρίς την μείωση των γεωμετρικών του διαστάσεων. Με αυτήν την μέθοδο το αλουμίνιο είχε την καλύτερη δυνατή επιφάνεια πρόσφυσης για την υποδοχή του εμποτισμένου συνθέτου υφάσματος σε κατάσταση σκλήρυνσης.

2.3 Βελτιστοποίηση εμποτισμού υαλοϋφάσματος με ρητίνη εν απουσία κενού

Η πλήρης διαβροχή του υαλοϋφάσματος κατά την διάρκεια του εμποτισμού αυτού με ρητίνη είναι πρακτικά ακατόρθωτη χωρίς την χρήση αντλίας κενού. Ακόμα, ο εγκλωβισμός αέρα εντός των ινών και της πλέξης του υαλοϋφάσματος μεταφράζεται στον όγκο του σκληρυμένου σύνθετου υλικού σαν ασυνέχεια ύλης και μέσο διάδοσης ρηγματώσεων κατά την μηχανική καταπόνηση.

Για την κατά τω δυνατόν αποφυγή των παραπάνω παραμέτρων, χρησιμοποιήθηκε μια σειρά τεχνικών βελτιστοποίησης εμποτισμού του υαλοϋφάσματος και μορφοποίησης του συνθέτου υλικού. Προς αυτήν την κατεύθυνση, αξιοποιήθηκε ο μεγάλος χρόνος παραμονής της ρητίνης στην υγρή (κατεργάσιμη) κατάσταση.

Αρχικά, το προς περιέλιξη εμβαδόν υαλοϋφάσματος απλωνόταν σε οριζόντια, επίπεδη και λεία επιφάνεια . Με αυτόν τον τρόπο μεγιστοποιήθηκε η ελεύθερη επιφάνεια προς εμποτισμό. Έχοντας την γνώση του ότι το πάχος υαλοϋφάσματος είναι ελάχιστο (0.2 mm μετρούμενο πειραματικά) σε σχέση με το μήκος και το πλάτος, η οριζόντια θέση εμποτισμού ήταν η βέλτιστη για την προσπάθεια πλήρους εμποτισμού αυτού.

Μια εμπειρική γνώση αναγνώρισης του πλήρους εμποτισμένου υαλοϋφάσματος, είναι η αλλαγή του χρώματος του κατά τον εμποτισμό. Το χρώμα του υαλοϋφάσματος όταν δεν έχει εμποτιστεί είναι λευκό και αδιαφνές. Όταν ξεκινήσει η διαβροχή αυτού, παρατηρείται σταδιακή αλλαγή των οπτικών του ιδιοτήτων και ύπαρξη διαφάνειας. Ο εμποτισμός και κατά συνέπεια η διαφάνεια, αρχικά είναι επιφανειακός σε επίπεδο πλέξης. Όταν η επάλειψη γίνει μεθοδικά, η ρητίνη διεισδύει στην πλέξη και αρχίζει να διαβρέχει τις υαλοϊνες που αποτελούν τις στοιχειώδεις μονάδες (κλωστές) του υαλούφάσματος και το φαινόμενο διαφάνειας μεγιστοποιείται. Συνεπώς, προκύπτει το συμπέρασμα ότι η αλλαγή του επιπέδου διαφάνειας του υλικού συνάδει με τον βαθμό εμποτισμού αυτού.

2.4 Πλεονεκτήματα της τεχνικής περιέλιξης υαλοϋφάσματος στην κατασκευή συνθέτων κοίλης γεωμετρίας

Η τεχνική της περιέλιξης στην δημιουργία συνθέτων υλικών έχει μία σειρά πλεονεκτημάτων που προκύπτουν από την φύση της τεχνικής. Αξίζει όμως να τονιστεί ξανά ότι ο βέλτιστος προεμποτισμός του υαλοϋφάσματος πριν την περιέλιξη στο καλούπι διαμόρφωσης είναι κεφαλαιώδους σημασίας για τις τελικές μηχανικές ιδιότητες του συνθέτου (Κεφ 2.3).

Κατά την περιέλιξη, είναι απαραίτητη η άσκηση πίεσης, μέσω του καλουπιού διαμόρφωσης στο εμποτισμένο υαλοϋφασμα Με αυτόν τον τρόπο αποβάλλεται ο εναπομείναντας εγκλωβισμένος αέρας από την πλέξη του υφάσματος ενώ ταυτόχρονα αποβάλλεται η περίσσεια ρητίνης από την σχηματιζόμενη μάζα συνθέτου (Εικ 2.1). Έτσι, μειώνεται η απόσταση των υαλοϋφασμάτινων επικαλύψεων σπειροειδούς δομής. Λόγω της σκόπιμης αποβολής ρητίνης, σε δεδομένο τελικό όγκο συνθέτου, υπάρχει η δυνατότητα διαβάθμισης της επί τοις εκατό περιεκτικότητας σε ενίσχυση.

Εικόνα 2.1: Αποβολή περίσσειας ρητίνης και εναπομείναντα αέρα, από την σχηματιζόμενη μέσω περιέλιξης, κοίλη κυλινδρική δομή συνθέτου.

Μέσω της τεχνικής της περιέλιξης, ο κοίλος κυλινδρικός σωλήνας συνθέτου που σχηματίζεται, έχει την δυνατότητα να αποτελείται από ένα μονοκόμματο εμβαδόν υαλοϋφάσματος. Το γεγονός αυτό λύνει τα ζητήματα διάδοσης ρωγμών μέσω ασυνεχειών του πλέγματος ενίσχυσης κατά την μηχανική φόρτιση.

Επιπρόσθετα, καθίσταται πολύ εύκολη η δημιουργία συνθέτων σωλήνων από διαφορετικούς τύπους υφασμάτων εγκιβωτισμένους στην ίδια πολυμερική μήτρα και απόλυτα διατεταγμένων σε ομόκεντρους δακτυλίους.

Τέλος, μέσω της τεχνικής της περιέλιξης μπορεί να ελεγχθεί με μεγάλη ακρίβεια το πάχος του σχηματιζόμενου τοιχώματος (βάσει του αριθμού περιελίξεων και του στοιχειώδους πάχους του χρησιμοποιούμενου υφάσματος) όπως και να ενισχυθούν τοπικά σωλήνες μέσω επιπλέον περιελίξεων κατά περιοχές.

Βιβλιογραφία Κεφαλαίου 2

[1] Διπλωματική εργασία Ιωάννη Σ. Τσαγκαλιά, Μελέτη της κινητικής σκλήρυνσης με FT-IR και DSC και δυναμικές μηχανικές ιδιότητες με DMA της εποξειδικής κόλλας HXTAL NYL-1 Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσαλλονίκης, Τμήμα Χημείας 2014.

[2] *[http://anak.gr/wp-content/uploads/2014/10/SUPERFIX-50.pdf]*

Κεφάλαιο 3 Κατασκευή – προετοιμασία δοκιμίων

Σύνοψη

Στο παρακάτω κεφάλαιο παρουσιάζεται η πειραματική διαδικασία κατασκευής της εκάστοτε κατηγορίας δοκιμίων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία. Ανάλογα με τις ανάγκες διαμόρφωσης του συνθέτου μέρους των δοκιμίων η τεχνική κατασκευής παραλλασσόταν προς επίτευξη ομοιογενούς δομής ενίσχυσης και επιθυμητής γεωμετρίας τελικού δοκιμίου.

3.1 Κοίλα κυλινδρικά δοκίμια αλουμινίου

Η συγκεκριμένη κατηγορία δοκιμίων αποτελείται από κοίλα κυλινδρικά δοκίμια βιομηχανικής παραγωγής (Εικ 3.1) μήκους 100 mm, εξωτερικής διαμέτρου 38.56 mm, και πάχους τοιχώματος 1.5 mm. Ο λόγος κατασκευής και μέτρησης της θραυστομηχανικής συμπεριφοράς αυτών σε αξονική καταπόνηση, είναι κυρίως, προς την δημιουργία ενός σημείου αναφοράς, για την αξιολόγηση των μηχανικών ιδιοτήτων συνθέτων και υβριδικών δοκιμίων που αποτέλεσαν το κύριο ενδιαφέρον της συγκεκριμένης εργασίας.

Η κατασκευή των δοκιμίων εμπεριείχε τις ακόλουθες δύο κατεργασίες:

- Κοπή δοκιμίων μήκους 100mm στην δισκοτόμο (ονομαστικό μήκος αναφοράς όλων των παραχθέντων δοκιμίων)
- Εξομάλυνση προκυπτουσών ατελειών στις περιοχές κοπής με χρήση τόρνου.

Εικόνα 3.1: Κοίλα κυλινδρικά δοκίμια βιομηχανικής παραγωγής με εμφανή τα σημάδια τόρνευσης στα κατεργασμένα άκρα.

3.2 Κοίλα κυλινδρικά δοκίμια αλουμινίου με εξωτερική επένδυση ενίσχυσης εποξικής ρητίνης -υαλοϋφάσματος

Η συγκεκριμένη κατηγορία δοκιμίων δημιουργήθηκε, χρησιμοποιώντας ως πυρήνα και ταυτόχρονα καλούπι διαμόρφωσης, τμήμα ομοίου σωλήνα αλουμινίου με αυτόν που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των δοκιμίων του κεφαλαίου 3.1. Στην εξωτερική επιφάνεια αυτού, περιελίχθηκε υαλοϋφασμα, εμποτισμένο με εποξική ρητίνη δύο συστατικών.

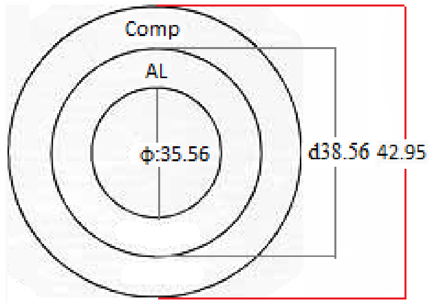
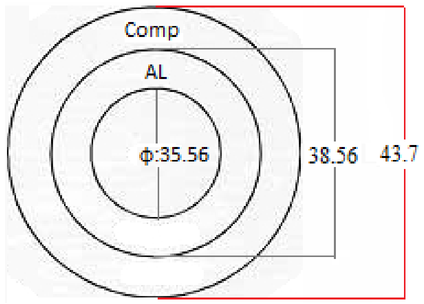
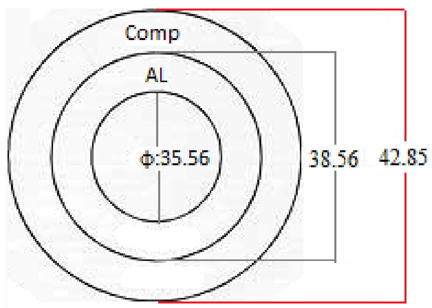
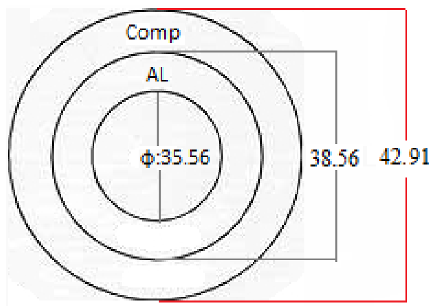
3.2.1 Λεπτομέρειες κατασκευής δοκιμίων

Πρωταρχικός στόχος κατά την κατασκευή αυτής της κατηγορίας δοκιμίων, ήταν η ομοιογένεια, μεταξύ των δοκιμίων ιδίας κατηγορίας. Η επίτευξη αυτής, ήταν κρίσιμης σημασίας για την τελική επαναληψιμότητα των πειραματικών αποτελεσμάτων. Για τον λόγο αυτό και συνάμα, για την μείωση του χρόνου εργασίας παραγωγής δοκιμίων και την ευκολία χειρισμού, χρησιμοποιήθηκε συνεχής σωλήνας αλουμινίου, μήκους 500mm. Εφόσον καθαρίστηκε η εξωτερική του επιφάνεια επιμελώς (Κεφ 2.2), ακολούθησε περιέλιξη του υαλοϋφάσματος σε αυτή (εικόνα 3.2α). Η μέθοδος εμποτισμού του υαλοϋφάσματος με ρητίνη και περιέλιξης αυτού στον αλουμινένιο κοίλο κύλινδρο, πραγματοποιήθηκε ακλουθώντας την τεχνική που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 2. Μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής προέκυψαν έπειτα από διαδοχικές κοπές, δοκίμια ονομαστικού μήκους 100mm (Εικ 3.2β).

Εικόνα 3.2: α) Σωλήνας αλουμινίου, περιελιγμένος με υαλοϋφασμα εμποτισμένο με ρητίνη (σε κατάσταση σκλήρυνσης). **β)**Τελική εικόνα δοκιμίων έπειτα από κοπή και φινίρισμα των άκρων στον τόρνο.

Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται τα ακριβή χαρακτηριστικά των δοκιμίων όπως αυτά μετρήθηκαν πειραματικά:

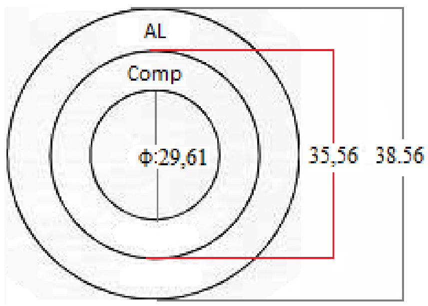
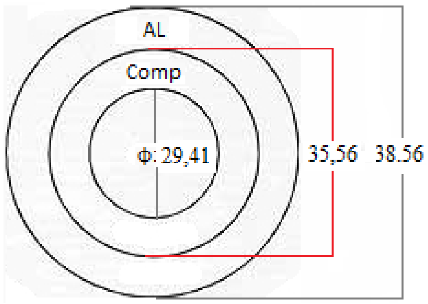
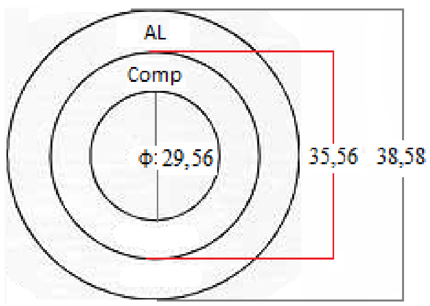
Πίνακας 3.1: Χαρακτηριστικά υβριδικών δοκιμίων (Al-in)

Αριθμός δοκιμίου	Σύσταση (≅ % κ.β.)	Γεωμετρικές διαστάσεις (mm)
405	Al: 45.2 Glass: 25.4 Ρητίνη epoxy: 16.1 Σύνολο:86.7	L:100 
406	Al: 45.2 Glass: 25.4 Ρητίνη epoxy: 17.3 Σύνολο: 87.9	L: 99.9 
407	Al: 45.2 Glass: 25.4 Ρητίνη epoxy: 16.5 Σύνολο: 87.1	L: 100.13 
408	Al: 45.2 Glass: 25.4 Ρητίνη epoxy: 17.1 Σύνολο: 87.5	L: 100.09 

3.3 Κοίλα κυλινδρικά δοκίμια αλουμινίου με εσωτερική επένδυση ενίσχυσης εποξικής ρητίνης -υαλονήματος

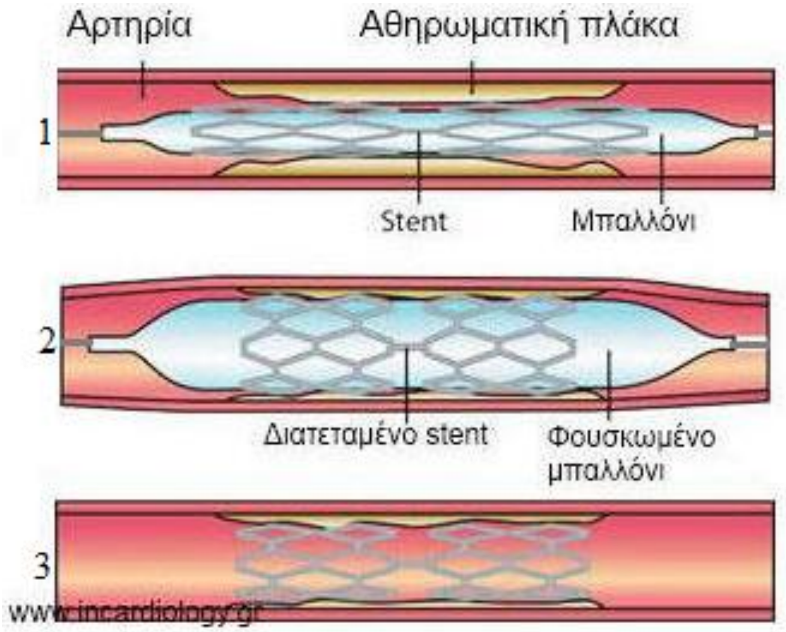
Η συγκεκριμένη κατηγορία δοκιμίων δημιουργήθηκε, αποσκοπώντας στην μελέτη των εν λόγω δοκιμίων αλλά και την σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων μεταξύ δοκιμίων ιδίας σύστασης αλλά διαφορετικής γεωμετρίας ενίσχυσης. Για τον παραπάνω λόγο το ενισχυτικό μέρος, δηλαδή το σύνθετο υαλοϋφάσματος – ρητίνης περιελίχτηκε στην εσωτερική επιφάνεια αλουμινένιου κοίλου κυλίνδρου αρχικού μήκους 400mm. Μετά το πέρας της διαδικασίας κατασκευής (κεφ 3.3.1) δημιουργήθηκαν δοκίμια ονομαστικού μήκους 100mm (Εικ 3.4.5). Οι κοπές του σωλήνα πραγματοποιήθηκαν στην δισκοτόμο, ενώ ακολούθησε κατεργασία φινιρίσματος άκρων με χρήση τόρνου. Τα πειραματικά μετρούμενα χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης κατηγορίας δειγμάτων αποδίδονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 3.2: Χαρακτηριστικά υβριδικών δοκιμίων (Al-out)

Αριθμός δοκιμίου	Σύσταση (σε % κ.β.)	Γεωμετρικές διαστάσεις (mm)
413	Al: 45.2 Glass: 21,1 Ρητίνη epoxy: 17.1 Σύνολο: 91,7	L: 99.9 
414	Al: 45.2 Glass: 25,4 Ρητίνη epoxy: 22,0 Σύνολο: 92,6	L: 100,15 
415	Al: 45,2 Glass: 25,4 Ρητίνη epoxy: 21,2 Σύνολο: 91,8	L: 99,9 

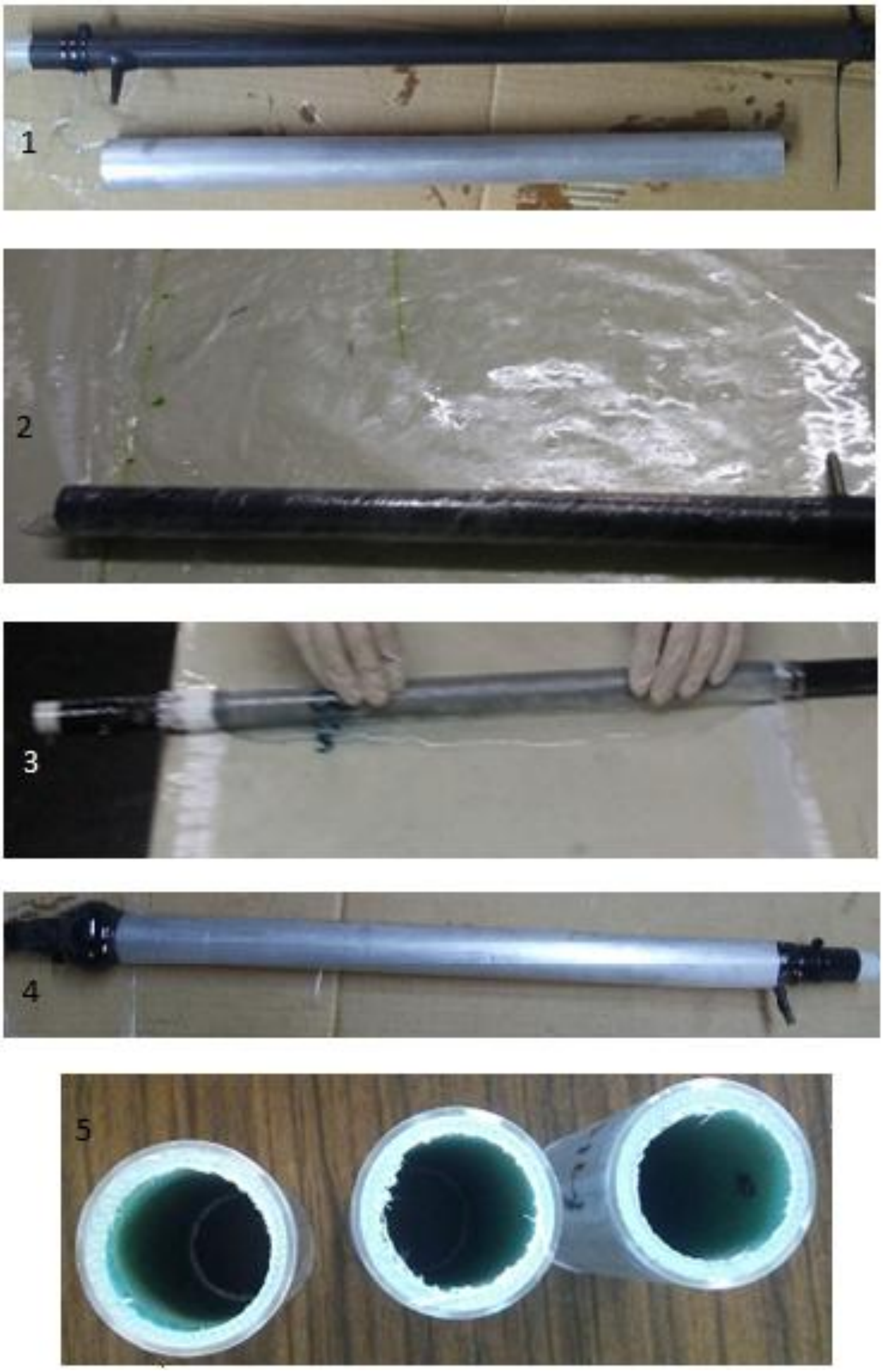
3.3.1 Διάταξη επένδυσης εσωτερικής επιφάνειας κοίλων κυλινδρικών δοκιμίων με σύνθετο ρητίνης- υαλοϋφάσματος

Η έμπνευση της εν λόγω διάταξης προέκυψε από την τεχνική τοποθέτησης καρδιολογικών στεντ προς διάνοιξη φραγμένων αρτηριών. Όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 3.3.. Η διάταξη αποτελείται από έναν οδηγό, ώστε να μπορεί ενδοαρτηριακά να προσεγγιστεί το φραγμένο σημείο. Στο ακραίο τμήμα του οδηγού είναι τοποθετημένα μπαλόνι διόγκωσης και επί αυτού το πλέγμα στεντ. Με αυτόν τον τρόπο ο γιατρός προσεγγίζοντας το φραγμένο σημείο διογκώνει το μπαλόνι. Αυτό με την σειρά του εκτείνει το στεντ το οποίο (κλειδώνει) στην τεταμένη θέση διανοίγοντας την αρτηρία.(Εικ. 3.3.2). Ακολούθως, το μπαλόνι συστέλλεται και αποσύρεται μαζί με τον οδηγό αφήνοντας το στέντ να επενδύει την εσωτερική διάμετρο της διανοιγμένης πλέον αρτηρίας.



Εικόνα 3.3: Συνοπτική παρουσίαση τοποθέτησης καρδιολογικού στεντ.

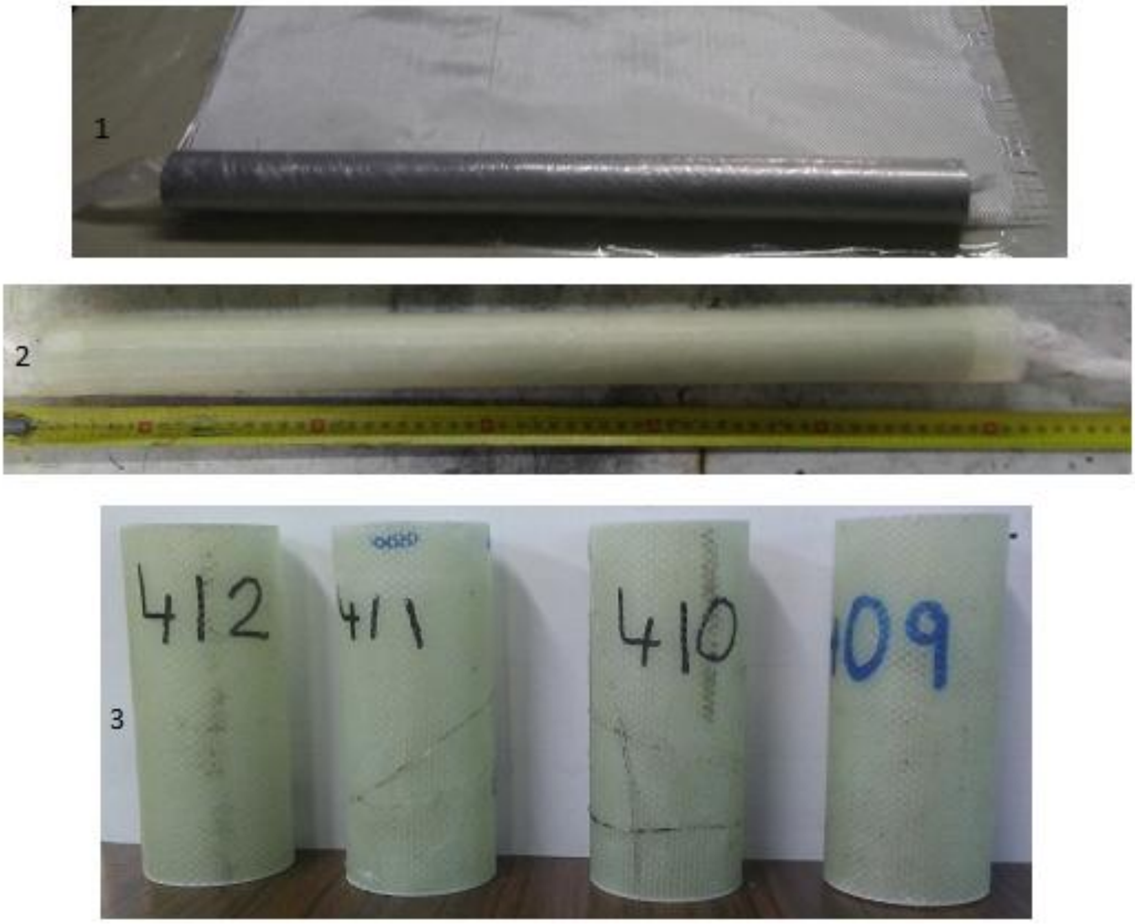
Κατ΄ αντιστοιχία, προέκυψε η διάταξη μορφοποίησης του συνθέτου στην εσωτερική επιφάνεια του κοίλου κυλίνδρου αλουμινίου. Αντί οδηγού, χρησιμοποιήθηκε πλαστικός κοίλος κύλινδρος μήκους 500mm και εξωτερικής διαμέτρου 25mm. Έπειτα, ο πλαστικός κύλινδρος επενδύθηκε με τμήμα αεροθαλάμου ποδηλάτου τα άκρα του οποίου στεγανοποιήθηκαν (Εικ. 3.4.1). Η επιφάνεια του αεροθαλάμου επικαλύφθηκε με απειροστού πάχους πλαστική μεμβράνη (Εικ. 3.4.2). Ακολούθως, επί αυτής της διάταξης περιελίχθηκε χαλαρά το απαραίτητο εμβαδόν εμποτισμένου υαλοϋφάσματος σε κατάσταση έναρξης σκλήρυνσης με ελαφρά περίσσια ρητίνης (Εικ. 3.4.3). Σε τελικό στάδιο, η εν λόγω διάταξη τοποθετήθηκε εντός του προς επένδυση σωλήνα αλουμινίου. Μέσω της βαλβίδας εισαγωγής αέρα, διογκώθηκε ο αεροθάλαμος (Εικ. 3.4.4). Με τον τρόπο αυτό, επιτεύχθηκε αποβολή της περίσσειας ρητίνης και του εναπομείναντα αέρα από το εσωτερικό της διάταξης. Εφόσον σκληρύνθηκε το σύνθετο μέρος του υβριδικού πλέον δοκιμίου, ο αεροθάλαμος αποσυμπιέστηκε, αποδίδοντας ελευθερία χειρισμού για την απομάκρυνση του εσωτερικού καλουπιού διαμόρφωσης. Ακολούθησε μία σειρά κοπών και φινιρίσματος άκρων, ώστε να δημιουργηθούν τα δοκίμια (Εικ. 3.4.5) των οποίων τα χαρακτηριστικά παρατέθηκαν στον πίνακα 3.2.



Εικόνα 3.4: Συνοπτική παρουσίαση της παραγωγής υβριδικών δοκιμίων (Al-out).

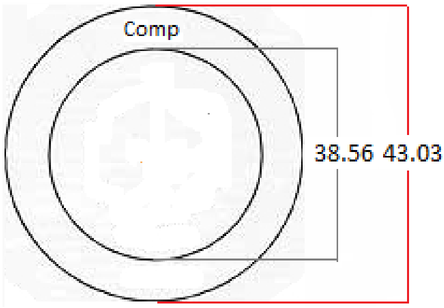
3.4 Κοίλα κυλινδρικά δοκίμια συνθέτου

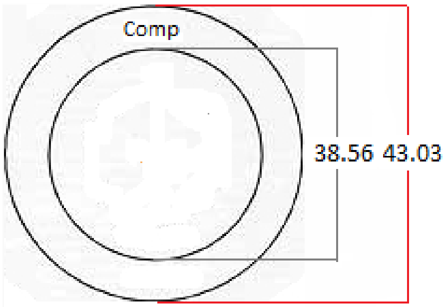
Η συγκεκριμένη κατηγορία δοκιμίων αποτελείται από σύνθετο υλικό ιδίας μάζας με αυτήν που χρησιμοποιήθηκε ως ενισχυτικό μέρος στα υβριδικά δοκίμια. Σαν καλούπι διαμόρφωσης επιλέχθηκε κοίλος κύλινδρος αλουμινίου εξωτερικής διαμέτρου 38,5 mm και μήκους 500 mm. Η εξωτερική επιφάνεια αυτού περιελίχθηκε με πλαστική μεμβράνη απειροστού πάχους (Εικ. 3.5.1). Με αυτόν τον τρόπο αποφεύχθηκε σε επόμενο στάδιο της κατασκευής, η κόλληση του συνθέτου στο καλούπι. Έπειτα, ακολούθησε πλήρης εμποτισμός του υαλοϋφάσματος με ρητίνη και περιέλιξη αυτού στο κυλινδρικό καλούπι (Εικ. 3.5.2). Κατόπιν της σκλήρυνσης της ρητίνης ακολούθησε κοπή σε διαστήματα ονομαστικού μήκους 100mm, μόνο του δημιουργηθέντος σύνθετου περιβλήματος. Τέλος, τα κοίλα κυλινδρικά τμήματα συνθέτου αποσυναρμολογήθηκαν (συρταρωτά) από το καλούπι αλουμινίου. Με αυτόν τον τρόπο προκύψαν τα δοκίμια συνθέτου που παρουσιάζονται στην (Εικ. 3.5.3). Τα ακριβή χαρακτηριστικά των δοκιμίων παρατίθενται παρακάτω (πίνακας 3.3).

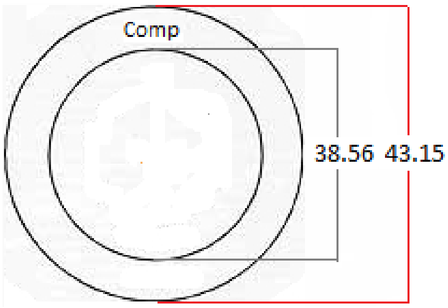


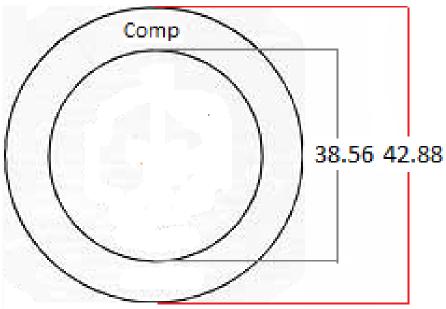
Εικόνες 3.5.1-3.5.3: Στάδια κατασκευής κοίλων κυλινδρικών δοκιμίων συνθέτου. **1** Αλουμινένιο καλούπι διαμόρφωσης επικαλυμμένο με αντικολλητική μεμβράνη. **2** Καλούπι περιελλιγμένο με σύνθετο υλικό υαλοϋφάσματος-ρητίνης.**3** Τελικά δοκίμια συνθέτου υλικού.

Πίνακας 3.3: Χαρακτηριστικά δοκιμίων συνθέτου.

Αριθμός δοκιμίου	Σύσταση (στ % κ.β.)	Γεωμετρικές διαστάσεις (mm)
409	Glass: 25.4	L:99.7 
	Ρητίνη:15.8	
	Sum: 41.2	

Αριθμός δοκιμίου	Σύσταση (στ % κ.β.)	Γεωμετρικές διαστάσεις (mm)
410	Glass: 25.4	L: 99.8 
	Ρητίνη:15.8	
	Sum: 41.2	

Αριθμός δοκιμίου	Σύσταση (στ % κ.β.)	Γεωμετρικές διαστάσεις (mm)
411	Glass: 25.4	L: 100.3 
	Ρητίνη: 18.4	
	Sum: 43.8	

Αριθμός δοκιμίου	Σύσταση (στ % κ.β.)	Γεωμετρικές διαστάσεις (mm)
412	Glass: 25.4	L: 100.1 
	Ρητίνη: 16.2	
	Sum: 41.6	

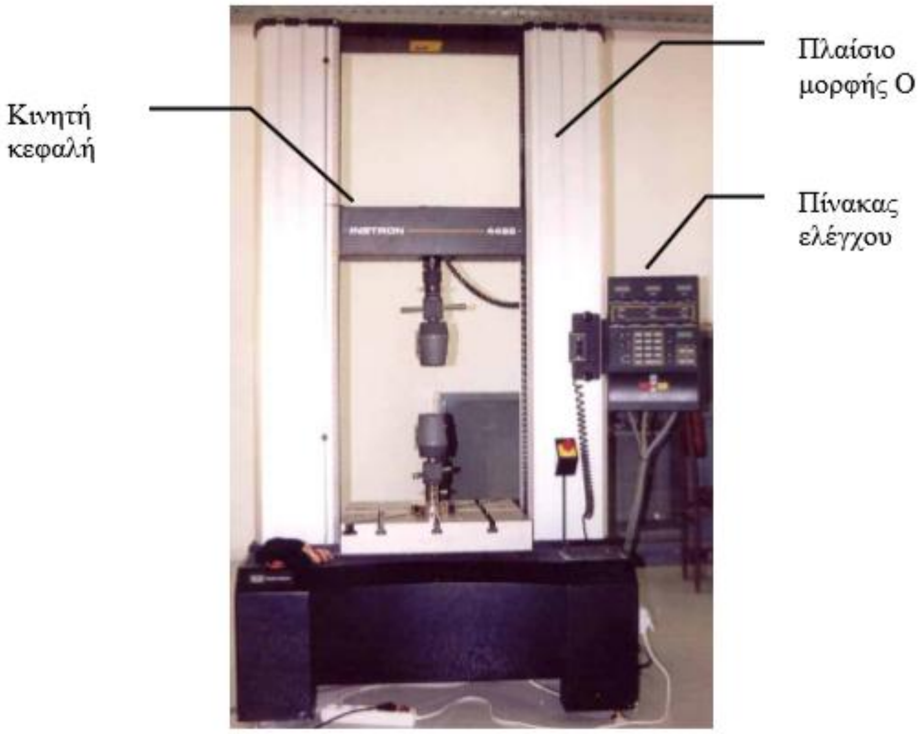
Κεφάλαιο 4 Πειραματική διαδικασία

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.

4.1.1 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.

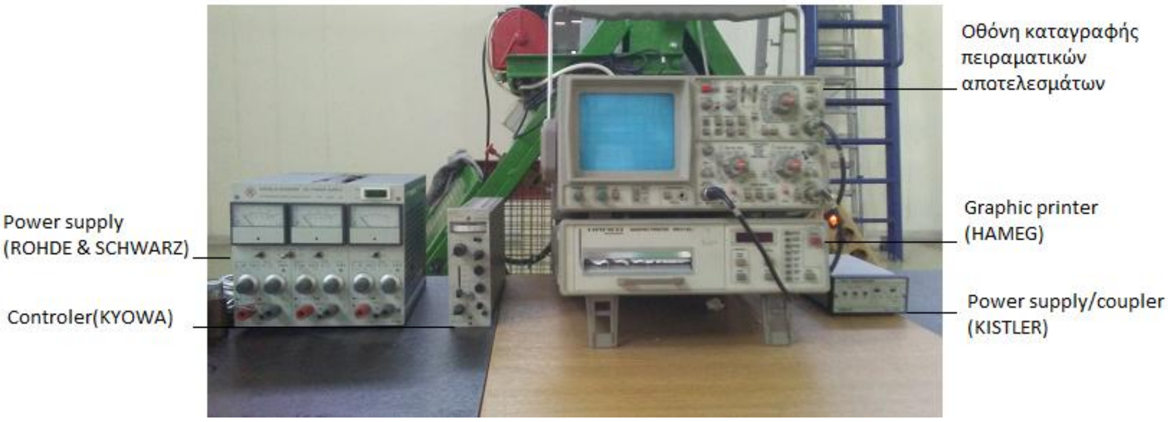
Τα βασικά λειτουργικά χαρακτηριστικά της πρέσας είναι:

- 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.

4.1.2 Πειραματικός εξοπλισμός- Σφύρα

Για την αξονική δυναμική καταπόνηση των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε η η σφύρα δοκιμών του εργαστηρίου. Το μέγιστο ύψος πτώσης πίπτουσας μάζας αυτής είναι 5m. Στις εικόνες 4.2 και 4.3 παρουσιάζονται τα επιμέρους τμήματα και μετρητικά συστήματα αυτής.

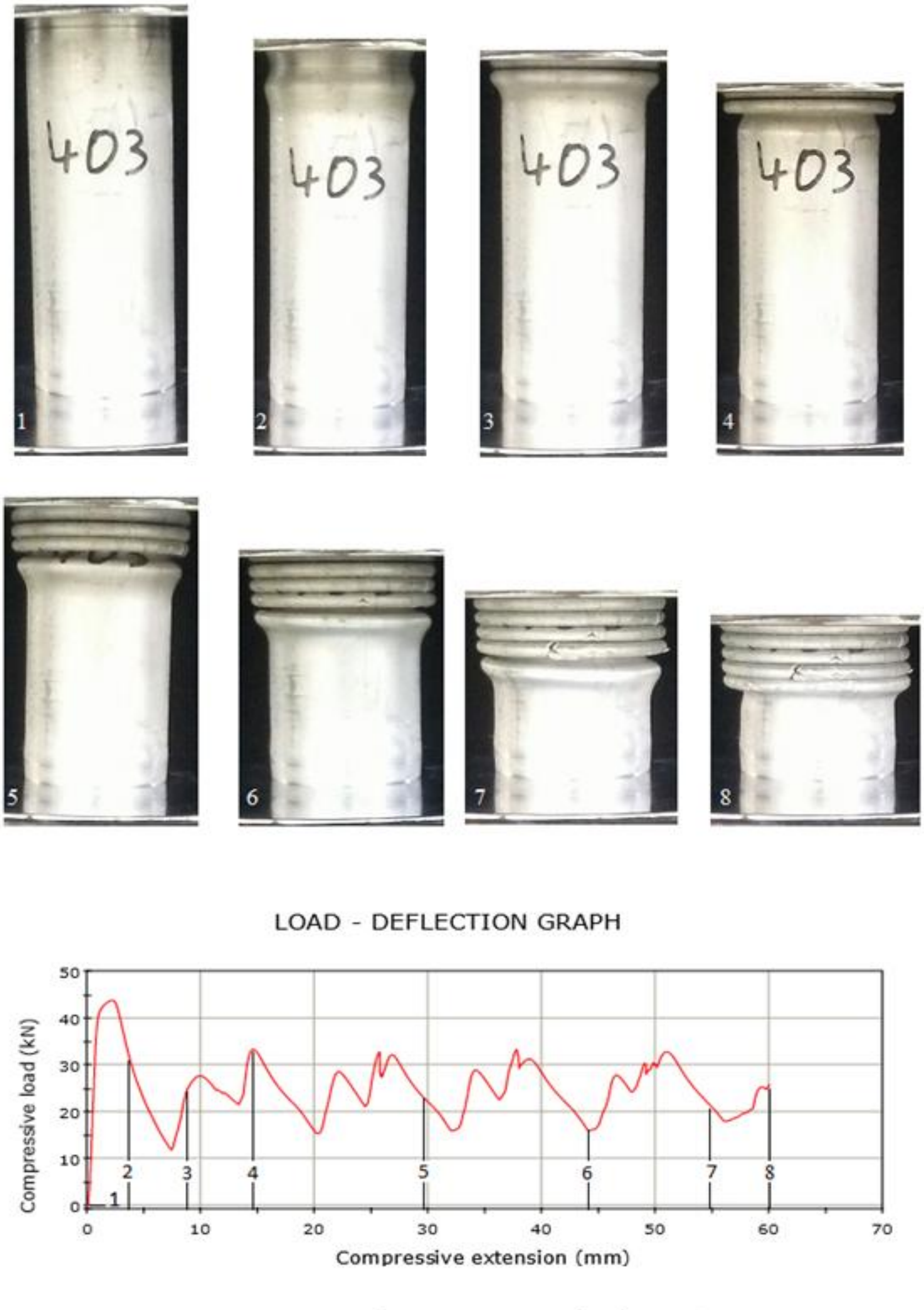
Εικόνα 4.2: Διάταξη σφύρας δυναμικών δοκιμών.



Εικόνα 4.3: Μετρητική διάταξη (ενισχυτές-καταγραφικό).

4.2.1 Πειραματικές μετρήσεις και αποτελέσματα δοκιμίων αλουμινίου

- Δοκίμιο 403 (Στατικές συνθήκες αξονικής συμπίεσης)

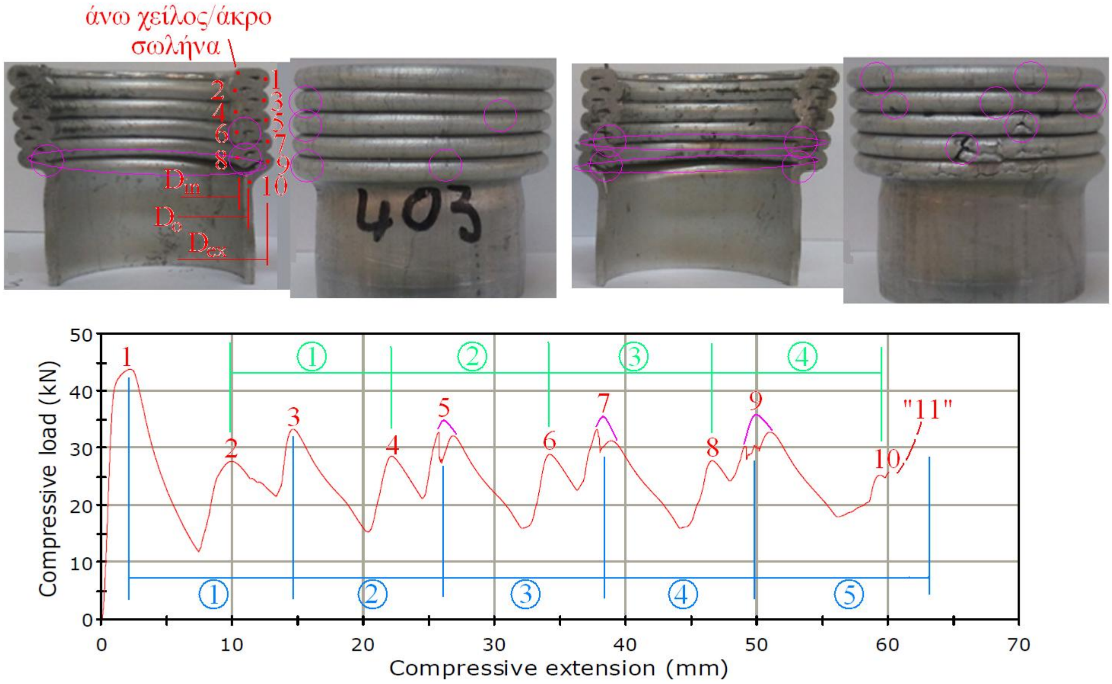


Εικόνα 4.4: Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης δοκ.403 και καμπύλη φορτίου-μετατόπισης. Η αρίθμηση (1-8) στην καμπύλη δηλώνει τις θέσεις των στιγμιότυπων.

Πίνακας 4.1: Πειραματικά δεδομένα και αποτελέσματα (403)

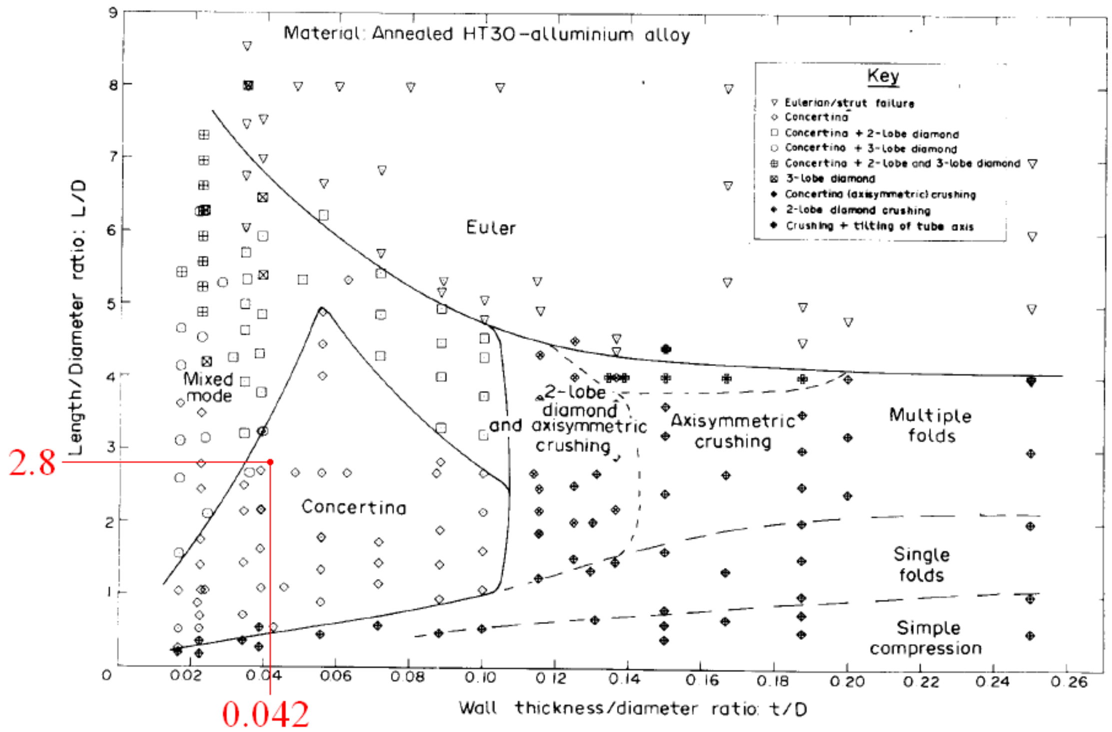
Διαδρομη εμβόλου:	S= 60 mm
Μέσο φορτίο:	P mean=24.88 KN
Μέγιστο φορτίο:	Pmax=43.61 KN
Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου:	c.f.e=0.57 %
Ενέργεια απορρόφησης:	Eabs=1492 Joule
Ειδική ενέργεια απορρόφησης:	Ws= 55.12 Joule/gr

Εικόνες 4.5.1-4.5.4: Κοίλο κυλινδρικό δοκίμιο αλουμινίου μετά από αξονική συμπίεση. Οι φωτογραφίες 1,2 απεικονίζουν την πρόσοψη του δοκιμίου και η φωτογραφία 3 την κάτοψη. Η φωτογραφία 4 παρουσιάζει την τομή. Το άνω μέρος του δοκιμίου ήταν σε επαφή με το κινούμενο έμβολο συμπίεσης.



Εικόνα 4.6: Χαρακτηριστικά σημεία της καμπύλης φορτίου-μετατόπισης και συσχέτιση με τους εξωτερικούς (1,3,5,7,9) και εσωτερικούς (2,4,6,8,10) κυκλικούς πλαστικούς αρμούς που οριοθετούν τους λοβούς (αριστερή φωτογραφία). Τα πρόσθετα μωβ καμπύλα τμήματα στα σημεία 5, 7 και 9 απεικονίζουν την αναμενόμενη μορφή της καμπύλης στα αντίστοιχα σημεία κατά την απουσία θραύσης (ολκιμότερο υλικό σωλήνα) στους προηγηθέντες - για κάθε περίπτωση - πλαστικούς αρμούς. Σχηματισμός εξωτερικών (γαλάζια σήμανση) και εσωτερικών (πράσινη σήμανση) λοβών. Από αριστερά προς δεξιά απεικονίζονται η εσωτερική και εξωτερική όψη των δύο ημίσεων - σε αξονική τομή - του σωλήνα (με μωβ περίγραμμα εντοπίζονται οι θραύσεις).

Το κέλυφος συμπιέζεται αξονικά μεταξύ της άνω (κινούμενης προς τα κάτω) πλάκας συμπίεσης και της κάτω ακίνητης πλάκας της μηχανής δοκιμών. Ο τρόπος κατάρρευσης του κυλινδρικού κελύφους (Εικ.4.4 με τις προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης, Εικ.4.5 με τελικές όψεις) είναι αξονοσυμμετρικός (ή εκτατός ή concertina), σχηματίζοντας λοβούς που οριοθετούνται από εξωτερικούς (1,3,5,7,9 - αριστερή φωτογραφία Εικ.4.6) και εσωτερικούς κυκλικούς πλαστικούς αρμούς (2,4,6,8,10 - αριστερή φωτογραφία Εικ.4.6). Ο αξονοσυμμετρικός τρόπος κατάρρευσης (concertina) του κυλινδρικού κελύφους από κράμα αλουμινίου ήταν αναμενόμενος (Εικ. 4.7), όπως προκύπτει από εκτεταμένη βιβλιογραφία [1,2] και τις σχετικές διαστάσεις του σωλήνα, $t/D_{εσ}=0.042$ και $L/D_{εσ}=2.8$, όπου: $D_{εσ}$=εσωτερική διάμετρος του κελύφους, L=μήκος του κελύφους και t=πάχος του τοιχώματος ($D_{εσ}$=35.56 mm, L=100 mm, t=1.5 mm).



Εικόνα 4.7:Διάγραμμα κατάταξης των μορφών κατάρρευσης (deformation mode) κυλινδρικών σωλήνων από κράμα αλουμινίου [1]

Ένας πλήρως σχηματισμένος λοβός οριοθετείται μεταξύ δύο διαδοχικών εξωτερικών πλαστικών αρμών, διερχόμενος (περιλαμβάνοντας) τον ενδιάμεσο εσωτερικό αρμό (π.χ. 1-2-3, 3-4-5 κλπ στην αριστερή φωτογραφία της Εικ.4.6) ή μεταξύ δύο εσωτερικών διαδοχικών πλαστικών αρμών, διερχόμενος (περιλαμβάνοντας) τον ενδιάμεσο εξωτερικό αρμό (π.χ. 2-3-4, 4-5-6 κλπ στην αριστερή φωτογραφία της Εικ.4.6), και παρουσιάζει απόλυτη συμμετρία ως προς το εγκάρσιο επίπεδο που διέρχεται από τον ενδιάμεσο αρμό. Το μήκος του τοιχώματος που διατάσσεται μεταξύ των δύο οριακών πλαστικών αρμών αναφέρεται ως «μήκος λοβού», ενώ εκείνο μεταξύ του ενός οριακού και του ενδιάμεσου αρμού αναφέρεται ως «ημι-μήκος λοβού». Είναι προφανές (μηχανική λυγισμού/κάμψης) ότι το ημι-μήκος του σχηματιζόμενου λοβού δεν μπορεί να είναι μικρότερο από το πάχος του (πάχος τοιχώματος). Σε κάθε εγκάρσια διατομή του παραμορφωμένου τμήματος του κελύφους, το υλικό διατάσσεται κυκλικά (διατηρεί δηλαδή το ίδιο σχήμα με την αρχική διατομή), αλλά μεταβάλλει τη διάμετρό του (μήκος περιφέρειας). Στις περισσότερες θέσεις (στο περισσότερο υλικό του τοιχώματος) αυξάνεται σημαντικά η περίμετρός του (έκταση), παρουσιάζοντας τη μέγιστη περίμετρο στην κορυφή των εξωτερικών πλαστικών αρμών, ενώ σε λιγότερες θέσεις (στο λιγότερο υλικό του τοιχώματος) η περίμετρος μειώνεται σχετικά πολύ λιγότερο. Το ενδιάμεσο υλικό του τοιχώματος διατάσσεται σε διάμετρο ίση με την αρχική του σωλήνα (μεταξύ της αρχικής εσωτερικής και εξωτερικής διαμέτρου). Στην αρχική του θέση/διάμετρο παραμένει και το άνω χείλος/άκρο του σωλήνα, χωρίς ουσιαστικά να έχει υποστεί περιφερική έκταση/παραμόρφωση (αριστερή φωτογραφία Εικ. 4.6)

Στην Εικ.4.4 (προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης) παρουσιάζονται διαδοχικά στιγμιότυπα (φάσεις) της προοδευτικής αξονικής κατάρρευσης του κελύφους και στη συνέχεια το σχετικό διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης του εμβόλου (ή βράχυνσης του σωλήνα), στο οποίο αντιστοιχίζονται τα σχετικά στιγμιότυπα (1 έως 8). Η μορφή της καμπύλης με τις ομαλές διακυμάνσεις του φορτίου (όχι απότομες/οδοντωτές διακυμάνσεις) υποδηλώνει την παραμόρφωση/κατάρρευση κελύφους από όλκιμο (και όχι ψαθυρό) υλικό, όπως είναι εν προκειμένω το κράμα αλουμινίου των σωλήνων. Οι διακυμάνσεις του φορτίου σχετίζονται ευθέως με τον σχηματισμό των διαδοχικών κυκλικών πλαστικών αρμών (και των οριοθετούμενων μεταξύ τους λοβών), καθώς τα τοπικά μέγιστα και ελάχιστα σηματοδοτούν την έναρξη και την ολοκλήρωση του σχηματισμού τους. Ο πρώτος (εξωτερικός) πλαστικός αρμός δημιουργείται στο άνω άκρο του δοκιμίου, με τον σχηματισμό του (τοπικός λυγισμός) να εκκινεί στην πρώτη - και υψηλότερη - κορυφή της καμπύλης του φορτίου (αρχικό/μέγιστο φορτίο, σημείο 1 στο διάγραμμα και την αριστερή φωτογραφία στην Εικ.4.6) και να ολοκληρώνεται κατά την αμέσως επόμενη ελάχιστη τιμή του (μεταξύ των σημείων 1 και 2 στην καμπύλη του φορτίου). Ταυτόχρονος είναι και ο πλήρης σχηματισμός του πρώτου λοβού, που θεωρείται ημιτελής (αρχική/μεταβατική φάση) καθώς στο άνω μέρος του δε βρίσκεται (εσωτερικός) πλαστικός αρμός, αλλά το (άνω) χείλος/άκρο του κελύφους. Με τη δημιουργία του πρώτου λοβού σχηματίζεται το λεγόμενο «μέτωπο κατάρρευσης», καθώς το κέλυφος έχει υποστεί πλέον την πρώτη τοπική αστοχία/βλάβη (υποβάθμιση της δομικής ακεραιότητάς του) και συνεχίζει να καταρρέει προοδευτικά κατά τον ίδιο τρόπο από το συγκεκριμένο άκρο (μόνιμη φάση), υποκείμενο εκ νέου σε τοπικό πλαστικό λυγισμό σε διαδοχικά - προς τα κάτω - τμήματα του τοιχώματός και τις αντίστοιχες εγκάρσιες διατομές. Στη στατική (πολύ μικρή ταχύτητα επιβολής φορτίου) αξονική θλιπτική καταπόνηση κελυφών ομοιόμορφης διατομής η εκκίνηση της κατάρρευσης λαμβάνει χώρα στο ένα από τα δύο άκρα του κελύφους με τυχαίο ουσιαστικά τρόπο. Κάποια διαφοροποίηση στις συνοριακές συνθήκες επαφής με τις δύο πλάκες συμπίεσης (παραλληλότητα, τριβή), στην κατεργασία μορφοποίησης των άκρων του κελύφους κατά την κατασκευή του, στην κατανομή του πάχους του τοιχώματος, καθώς και τοπικές ατέλειες στη δομική ακεραιότητα ή στο υλικό του κελύφους μπορούν να επηρεάσουν την εκκίνηση της κατάρρευσης ως προς τη θέση της.

Κατά την εξέλιξη της αξονικής καταπόνησης δημιουργούνται νέοι πλαστικοί κυκλικοί αρμοί, που σχηματίζουν τους αντίστοιχους λοβούς και η καμπύλη του φορτίου παρουσιάζει τις αντίστοιχες διακυμάνσεις. Οι κορυφές (τοπικά μέγιστα) του διαγράμματος σηματοδοτούν την έναρξη σχηματισμού των αντίστοιχων πλαστικών αρμών, ενώ οι αμέσως επόμενες τοπικά ελάχιστες τιμές δηλώνουν τον πλήρη σχηματισμό τους, δηλ. την ολοκληρωτική κατάρρευση του τοιχώματος τοπικά. Στην Εικ.4.6 σημειώνονται οι εξωτερικοί (1, 3, 5, 7, 9) και εσωτερικοί (2, 4, 6, 8, 10-μη ολοκληρωμένος) πλαστικοί αρμοί (στην αριστερή φωτογραφία), ενώ στην καμπύλη του φορτίου σημειώνονται οι αντίστοιχες θέσεις (κορυφές 1 έως 10) έναρξης του σχηματισμού τους. Τα τοπικά μέγιστα φορτία που παρουσιάζονται μετά το αρχικό (ολικό μέγιστο) είναι μικρότερα από αυτό, καθώς λαμβάνουν χώρα σε ένα ήδη παραμορφωμένο κέλυφος στο μέτωπο κατάρρευσης, άρα λιγότερο στιβαρό (δομικά αλώβητο). Τα τοπικά μέγιστα φορτία που απαιτούνται για την έναρξη σχηματισμού των εξωτερικών αρμών (σημεία 3,5,7,9 στην καμπύλη του φορτίου) εμφανίζονται μεγαλύτερα από τα αντίστοιχα απαιτούμενα για τους εσωτερικούς αρμούς. Αυτό συμβαίνει γιατί ένας εξωτερικός αρμός αρχίζει να σχηματίζεται ακριβώς κάτω (και διαδοχικά) από έναν εσωτερικό. Επομένως, πρέπει να συμπιεστεί αξονικά η ευρύτερη καμπύλη - προς το εσωτερικό του σωλήνα - ζώνη του εσωτερικού αρμού ανάμεσα στην κινούμενη πλάκα συμπίεσης και το αλώβητο (απαραμόρφωτο) τρεχόντως κάτω τμήμα του κελύφους. Όμως, όπως περιγράφηκε προηγουμένως (αριστερή φωτογραφία Εικ.4.6) και θα αναφερθεί και στη συνέχεια, οι εσωτερικοί αρμοί και η καμπύλη περιοχή κοντά σε αυτούς διατάσσονται - κυκλικά - πάνω ουσιαστικά από το απαραμόρφωτο τοίχωμα του σωλήνα (στην κατακόρυφη προέκτασή του) σε μια μέση διάμετρο D_{in} που είναι ελάχιστα μικρότερη από τη μέση διάμετρο D_o του τοιχώματος. Η σχετική αυτή διάταξη καθιστά το κέλυφος ιδιαίτερα στιβαρό σε σχέση με την αντίστοιχη περίπτωση έναρξης σχηματισμού εσωτερικού αρμού κάτω (και διαδοχικά) από τον προηγούμενο εξωτερικό αρμό. Οι τελευταίοι διατάσσονται κυκλικά σε μία μέση διάμετρο D_{ex} (αριστερή φωτογραφία Εικ.4.6), αρκετά μεγαλύτερη της μέσης διαμέτρου D_o του απαραμόρφωτου τοιχώματος, με αποτέλεσμα να γεννάται τοπικά (μεταξύ D_o και D_{ex}) μια καμπτική ροπή που υποβοηθά την έναρξη του λυγισμού του τοιχώματος, μειώνοντας ταυτόχρονα το απαιτούμενο για αυτήν αξονικό φορτίο. Η μεγάλη διαφορά μεταξύ της απόστασης των εξωτερικών αρμών από το κατακόρυφο τοίχωμα του κελύφους, $(D_{ex}- D_o)/2$ και της απόστασης των εσωτερικών αρμών από αυτό, $(D_o- D_{in})/2$ εξηγούν και την σαφώς μεγαλύτερη διαδρομή που απαιτείται να διανύσει η κινούμενη πλάκα συμπίεσης προκειμένου να σχηματιστεί πλήρως ένας εξωτερικός αρμός σε σχέση με έναν εσωτερικό, γεγονός που αποτυπώνεται και στην καμπύλη φορτίου-μετατόπισης (Εικ.4.6). Η οριζόντια απόσταση - διαδρομή εμβόλου - από ένα τοπικό μέγιστο φορτίο (σημεία 3,5,7,9 - έναρξη σχηματισμού εξωτερικού αρμού) προς το αμέσως επόμενο τοπικό ελάχιστο φορτίο είναι σημαντικά μεγαλύτερη σε σχέση με την απόσταση από τα υπόλοιπα τοπικά μέγιστα φορτία (σημεία 2,4,6,8 - έναρξη σχηματισμού εσωτερικού αρμού) προς το αμέσως επόμενο τοπικό ελάχιστο φορτίο. Στην οριακή/εξιδανικευμένη κατάσταση όπου οι εσωτερικοί αρμοί διατάσσονταν ακριβώς πάνω (στην κατακόρυφη προέκταση) από το κυλινδρικό τμήμα του αλώβητου τμήματος του σωλήνα (δηλ. αν ήταν $D_{in}=D_o$), θα απουσίαζαν ολοσχερώς από την καμπύλη φορτίου-μετατόπισης τα τμήματα/επάρματα που αντιστοιχούν στον σχηματισμό εσωτερικών πλαστικών αρμών (κορυφές 2,4,6,8 και 10) και θα εμφανίζονταν αποκλειστικά τα τοπικά μέγιστα φορτία σχηματισμού των εξωτερικών πλαστικών αρμών (κορυφές 1,3 5,7 και 9).

Όσον αφορά στα ανωφερή τμήματα της καμπύλης (εκείνα που προηγούνται των τοπικών μέγιστων φορτίων), παρουσιάζουν πολύ μικρή/απότομη κλίση σε σχέση με την κατακόρυφο και διαρκούν ελάχιστα σε διαδρομή εμβόλου (αντίθετα με τα κατωφερή του σχηματισμού των πλαστικών αρμών, που ακολουθούν τα τοπικά μέγιστα), καθώς απεικονίζουν την εκ νέου αξονική φόρτιση του κελύφους μετά τον πλήρη σχηματισμό του προηγηθέντος πλαστικού αρμού (τοπικά ελάχιστα φορτία). Αυτό συμβαίνει επειδή εμπεριέχουν σημαντικό τμήμα ελαστικής παραμόρφωσης του κελύφους, μαζί βέβαια με μικρό τμήμα περαιτέρω αξονικής πλαστικής παραμόρφωσης/σύνθλιψης των ήδη σχηματισθέντων λοβών (γι' αυτό και δεν απεικονίζονται απολύτως γραμμικά). Η κλίση των τμημάτων αυτών δεν είναι τόσο απότομη όσο του πρώτου γραμμικού τμήματος (πριν την κορυφή 1) που αντιστοιχεί στην αρχική ελαστική παραμόρφωση του αλώβητου/στιβαρότερου κελύφους, γιατί το κέλυφος πλέον - προϊούσης της κατάρρευσής του - καθίσταται λιγότερο στιβαρό, αφού περιέχει - σε σειρά «συνδεδεμένο» με το αλώβητο τρεχόντως κυλινδρικό τμήμα του - και το μέτωπο κατάρρευσης.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι μπορούμε να χαρακτηρίσουμε/διακρίνουμε τους σχηματισμένους λοβούς (αριστερή φωτογραφία στην Εικ.4.6) σε εξωτερικούς (κατεύθυνση προς το εξωτερικό του σωλήνα), όταν ο ενδιάμεσος πλαστικός αρμός είναι εξωτερικός και οι δύο οριακοί είναι εσωτερικοί (πχ. άνω χείλος σωλήνα-1-2, 2-3-4 κλπ), και εσωτερικούς (κατεύθυνση προς το εσωτερικό του σωλήνα), όταν ο ενδιάμεσος πλαστικός αρμός είναι εσωτερικός και οι δύο οριακοί είναι εξωτερικοί (πχ. 1-2-3, 3-4-5 κλπ). Επομένως, με βάση τον μηχανισμό σχηματισμού πλαστικών αρμών και λοβών που αναπτύχθηκε, προκύπτει ότι στην καμπύλη φορτίου-μετατόπισης (Εικ.4.6) αποτυπώνεται η διαμόρφωση των πλήρως σχηματισθέντων λοβών, μέσω των χαρακτηριστικών τοπικών μέγιστων φορτίων και της γενικότερης περιοδικότητας της καμπύλης, ως εξής: Οι εξωτερικοί λοβοί απεικονίζονται μεταξύ διαδοχικών φορτίων έναρξης σχηματισμού των εξωτερικών πλαστικών αρμών (1-3, 3-5, 5-7, 7-9, 9-το επόμενο σημείο «11» που δεν έχει προλάβει να καταγραφεί, καθώς δεν έχει συμπιεστεί/σχηματιστεί πλήρως περιφερικά ο εσωτερικός αρμός 10, βλ. αμέσως παρακάτω). Οι εσωτερικοί λοβοί απεικονίζονται μεταξύ διαδοχικών φορτίων έναρξης σχηματισμού των εσωτερικών πλαστικών αρμών (2-4, 4-6, 6-8, 8-10). Ως εκ τούτου, όπως φαίνεται και στην πρώτη φωτογραφία και στο διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης της Εικ. 4.6, έχουν σχηματιστεί 5 εξωτερικοί και 4 εσωτερικοί λοβοί (γαλάζια και πράσινη σήμανση, αντίστοιχα). Στο διάγραμμα φαίνεται επίσης, ότι όλοι οι λοβοί απαιτούν την ίδια διαδρομή εμβόλου για να σχηματιστούν, γεγονός αναμενόμενο, καθώς είναι ίδιοι μεταξύ τους.

Παρατηρώντας τις αξονικές τομές του παραμορφωμένου κυλινδρικού κελύφους (πρώτη και τρίτη φωτογραφία στην Εικ.4.6), φαίνεται ότι ο πέμπτος εξωτερικός λοβός (8-9-10) δεν έχει σχηματιστεί πλήρως και ομοιόμορφα σε όλη την περιφέρεια του κελύφους (είναι εμφανής η ύπαρξη αξονοσυμμετρίας). Το γεγονός αυτό θα μπορούσε να υποδηλώνει την απουσία παραλληλότητας, είτε μεταξύ των πλακών συμπίεσης, είτε μεταξύ των μετώπων/άκρων του απαραμόρφωτου/αρχικού κελύφους, είτε και τα δύο μαζί. Μετά από έλεγχο και μετρήσεις διαπιστώθηκε ότι τίποτα από τα παραπάνω δεν συνέβαινε. Απλώς, δεν υπήρχε απόλυτα ομοιόμορφη κατανομή του πάχους του τοιχώματος στην περιφέρεια του κυλινδρικού κελύφους εκ κατασκευής (έλλειψη ακρίβειας τοποθέτησης των εργαλείων της διέλασης του σωλήνα). Υπήρξε δηλ. ελάχιστη εκκεντρότητα (πεπερασμένη απόσταση κέντρων) μεταξύ εσωτερικής και εξωτερικής κυκλικής περιφέρεια του τοιχώματος του σωλήνα. Στη μία πλευρά φαίνεται πλήρως σχηματισμένος (συμπιεσμένος) ο πέμπτος λοβός, ενώ απέναντι φαίνεται ημιτελής και ασυμπίεστος. Επομένως, στην πλευρά του πλήρους σχηματισμού το πάχος του τοιχώματος ήταν λίγο μεγαλύτερο από ότι στην απέναντι, καθώς στο διαθέσιμο ύψος μεταξύ άνω πλάκας συμπίεσης και εναπομείναντος κυλινδρικού τμήματος του κελύφους χώρεσαν οριακά 5 πλήρως σχηματισμένοι εξωτερικοί λοβοί. Άρα: διαθέσιμο ύψος = 10 (δηλ. 5 λοβοί Χ 2 τοιχώματα ο καθένας) Χ (πάχος του τοιχώματος της συγκεκριμένης πλευράς). Ενώ στην απέναντι πλευρά, στο συγκεκριμένο (ίδιο) ύψος, χώρεσαν 4 πλήρως σχηματισμένοι και ένας - πέμπτος - ημιτελής λοβός. Επομένως, 10 Χ (πάχος του τοιχώματος της συγκεκριμένης πλευράς) < διαθέσιμο ύψος. Άρα το «δεύτερο» πάχος είναι μικρότερο από το «πρώτο».

Στο διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης τα σημεία τοπικού μέγιστου φορτίου 5, 7 και 9, που αντιστοιχούν στην έναρξη σχηματισμού των αντίστοιχων εξωτερικών αρμών (άρα προκύπτουν από την αξονική συμπίεση των αμέσως προηγούμενων εσωτερικών αρμών, όπως περιγράφηκε προηγουμένως) εμφανίζουν τραχιά και απότομη διακύμανση σε σχέση με τα πολύ ομαλά υπόλοιπα τοπικά μέγιστα φορτία. Αυτό οφείλεται στις ρηγματώσεις/θραύσεις που λαμβάνουν χώρα στα καμπύλα τμήματα (στη γειτονιά των πλαστικών αρμών) των προηγηθέντων λοβών, που αποτελούνται πλέον από υλικό εξαιρετικά παραμορφωμένο (στα όρια της αντοχής του σε θραύση). Η εκ νέου συμπίεση στην οποία υπόκεινται οδηγεί σε περιορισμένη ή εκτεταμένη, αβαθή ή διαμπερή, ρηγμάτωση του υλικού. Δεν είναι άλλωστε τυχαίο ότι αυτό συμβαίνει στα υψηλότερα τοπικά αξονικά φορτία, που αντιστοιχούν στην έναρξη σχηματισμού εξωτερικών λοβών, και όχι στα μικρότερα τοπικά μέγιστα φορτία, που αντιστοιχούν στην έναρξη σχηματισμού εσωτερικών λοβών (βλ. περιγραφή μηχανισμού κατάρρευσης). Αν δεν συνέβαιναν ρηγματώσεις (ολκιμότερο υλικό), η μορφή της καμπύλης στα σημεία αυτά αναμενόταν όπως φαίνεται στην Εικ.4.6 (πρόσθετα μωβ καμπύλα τμήματα στα σημεία 5, 7 και 9). Γενικά, τα τοπικά μέγιστα φορτία (στην περίπτωση ολκιμότερου υλικού χωρίς ρωγμές στους λοβούς κατά την αξονική συμπίεση) θα έβαιναν συνεχώς αυξανόμενα, καθώς το κέλυφος αυξάνει συνεχώς τη στιβαρότητά του σε τοπικό λυγισμό κατά τη βράχυνσή του. Η περιγραφή του μηχανισμού των παρατηρούμενων θραύσεων ακολουθεί αμέσως παρακάτω.

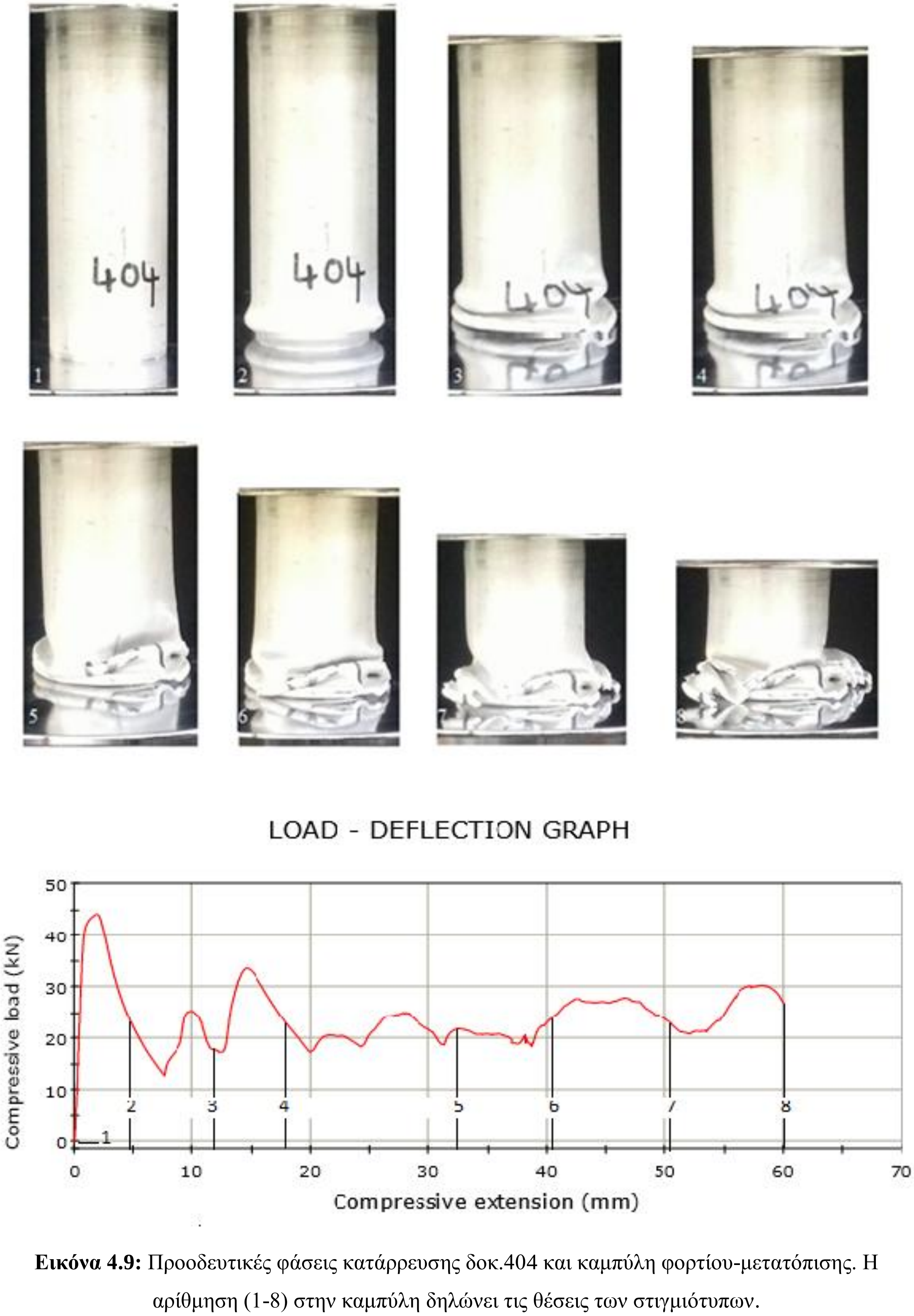
Αβαθείς - κυρίως - ρωγμές σχηματίζονται στις κυρτές (εξωτερικές), έντονα εφελκυόμενες ζώνες των εξωτερικών πλαστικών αρμών (Εικ.4.6 , αρμοί 1, 3, 5, 7, 9), που διακρίνονται ως εξής: περιορισμένες ή εκτεταμένες κατακόρυφες ρωγμές λόγω περιφερικής έκτασης/εφελκυσμού (αναπτύσσονται σε περιφέρεια με διάμετρο D_{ex} μεγαλύτερη από την αρχική D_o) και οριζόντιες ρωγμές λόγω κάμψης στα κατακόρυφα (αξονικά) επίπεδα (Εικ.4.6). Οι οριζόντιες ρωγμές σχηματίζονται κατά μήκος του κέντρου της κυρτής (εξωτερικής) ζώνης των αρμών, δηλ. στη μέγιστη περιφέρεια/διάμετρο. Σε κάποια μεμονωμένα σημεία οι κατακόρυφες ρωγμές έχουν εξελιχθεί σε διαμπερείς, καθώς η κοίλη ζώνη των εξωτερικών αρμών υποβάλλεται επίσης σε περιφερική έκταση. Σε αυτά τα σημεία μάλιστα συγκλίνουν οριζόντιες και κατακόρυφες ρωγμές, επιδεινώνοντας τοπικά την αστοχία.

Στους εσωτερικούς πλαστικούς αρμούς σχηματίζονται επίσης αβαθείς και εκτεταμένες οριζόντιες - μόνο – ρωγμές (Εικ.4.6 , αρμοί 2, 4, 6, 8). Οι εσωτερικοί αρμοί δεν υφίστανται έκταση/εφελκυσμό περιφερικά (αντίθετα, υπόκεινται σε θλίψη), αφού αναπτύσσονται σε περιφέρεια με διάμετρο D_{in} μικρότερη από την αρχική $D_{o,}$ οπότε ο εφελκυσμός λόγω κάμψης στα κατακόρυφα (αξονικά) επίπεδα, που είναι έντονος στους εξωτερικούς αρμούς, εδώ είναι ιδιαίτερα περιορισμένος σε σχέση με το απαραμόρφωτο υλικό (Εικ.4.8). Γι’ αυτό και οι ρωγμές δεν σχηματίζονται κατά μήκος του κέντρου της κυρτής (εσωτερικής) ζώνης των αρμών (ελάχιστη διάμετρος υλικού σωλήνα μετά την κατάρρευση, μέγιστη εφελκυστική παραμόρφωση σε αξονικό επίπεδο), αλλά πιο κάτω, σε περιφέρεια/διάμετρο λίγο μεγαλύτερη. Οι ρωγμές σχηματίζονται στην προς τα επάνω προέκταση του αλώβητου/απαραμόρφωτου τοιχώματος του κατακόρυφου κάτω τμήματος του σωλήνα και μεταξύ της εσωτερικής και της εξωτερικής διαμέτρου του. Το υλικό των λοβών που διατάσσεται σε αυτή τη ζώνη υπόκειται σε εξαιρετικά υψηλή συμπίεση λόγω του πολύ στιβαρού όρθιου κάτω τμήματος του σωλήνα και οδηγείται σε διάτμηση και θραύση σε κεκλιμένη διεύθυνση. Λόγω της έντονης αυτής εντατικής κατάστασης, σε κάποια σημεία οι ρωγμές αναπτύσσονται πλήρως περιφερικά και καθίστανται διαμπερείς τοπικά.

Εικ.4.8:Εντατική κατάσταση της κυρτής πλευράς των εξωτερικών (αριστερά) και εσωτερικών πλαστικών αρμών

Από την ανάλυση που προηγήθηκε, καθίσταται σαφές ότι η εντατική κατάσταση στην οποία υποβάλλεται το κυλινδρικό κέλυφος κατά την αξονική συμπίεση/κατάρρευση είναι ιδιαίτερα σύνθετη και ποιοτικά και εκτατικά και όχι μονοσήμαντη και τοπικά εντοπισμένη. Το φορτίο που καταγράφεται σε κάθε φάση της κατάρρευσης αποτελεί τη συνισταμένη των επιμέρους φορτίων που απαιτούνται για την πλαστική - κυρίως - παραμόρφωση που λαμβάνει χώρα ταυτόχρονα στις διάφορες ζώνες του μετώπου κατάρρευσης.

- Δοκίμιο 404 (στατικές συνθήκες αξονικής συμπίεσης)



Εικόνα 4.9: Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης δοκ.404 και καμπύλη φορτίου-μετατόπισης. Η αρίθμηση (1-8) στην καμπύλη δηλώνει τις θέσεις των στιγμιότυπων.

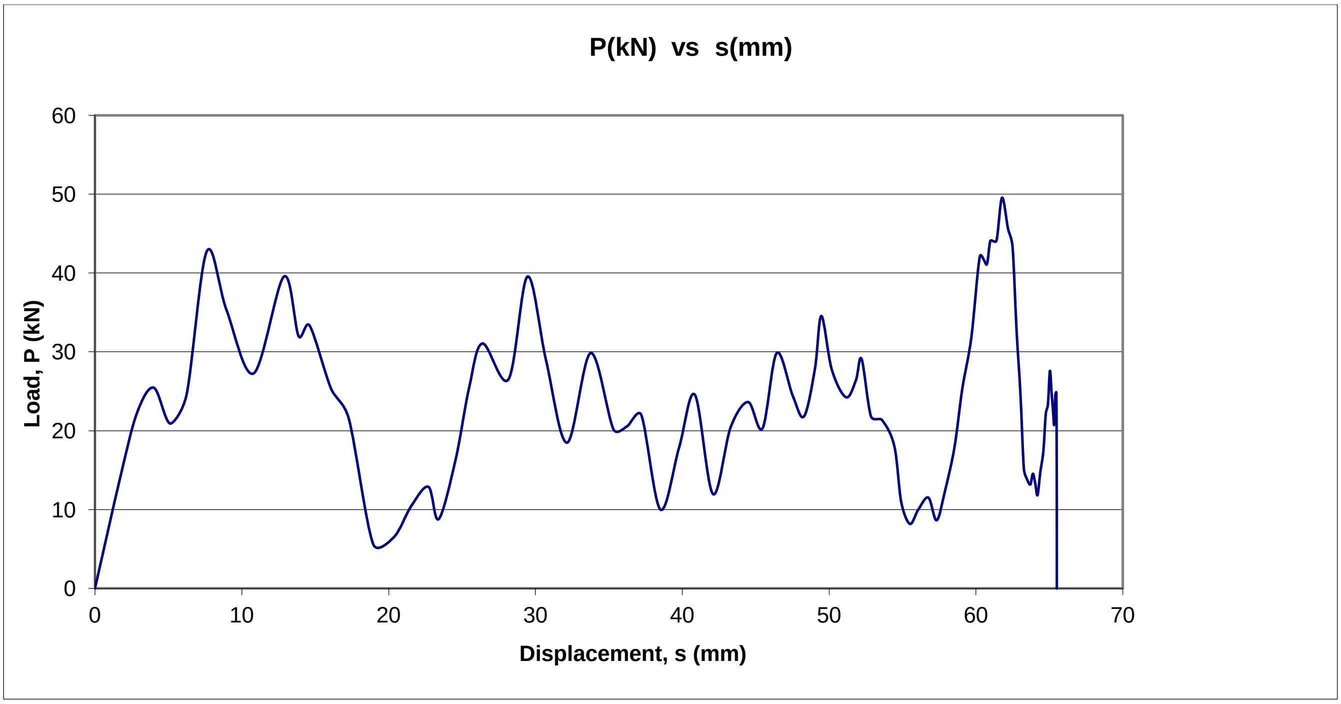
Πίνακας 4.2: Πειραματικά δεδομένα και αποτελέσματα (404)

Διαδρομη εμβόλου:	S= 60 mm
Μέσο φορτίο:	P mean=24.07 KN
Μέγιστο φορτίο:	Pmax=44.19KN
Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου:	c.f.e=0.54 %
Ενέργεια απορρόφησης:	Eabs=1444.2 Joule
Ειδική ενέργεια απορρόφησης:	Ws= 53.47 Joule/gr

Εικόνες 4.10.1-4.10.4: Κοίλο κυλινδρικό δοκίμιο αλουμινίου μετά από αξονική συμπίεση. Οι φωτογραφίες 1,2 απεικονίζουν την πρόσοψη του δοκιμίου και η φωτογραφία 3 την κάτοψη. Η φωτογραφία 4 παρουσιάζει την τομή. Το άνω μέρος του δοκιμίου ήταν σε επαφή με το κινούμενο έμβολο συμπίεσης.

- Δοκίμιο 401 (δυναμικές συνθήκες αξονικής συμπίεσης)

Εικόνες 4.11.1-4.11.4: Δοκίμιο αλουμινίου, κοίλης κυλινδρικής γεωμετρίας. Στην εικόνα 1 παρατίθεται το δοκίμιο πριν του ασκηθεί φορτίο μέσω της σφύρας. Στην εικόνα 2 παρουσιάζεται όψη του δοκιμίου μετά από την άσκηση κρουστικού φορτίου. Η εικόνα 3 παρουσιάζει την κάτοψη του συντεθλιμμένου δοκιμίου από την πλευρά επαφής με την σφύρα. Η εικόνα 4 αποτελεί την τομή του δοκιμίου.



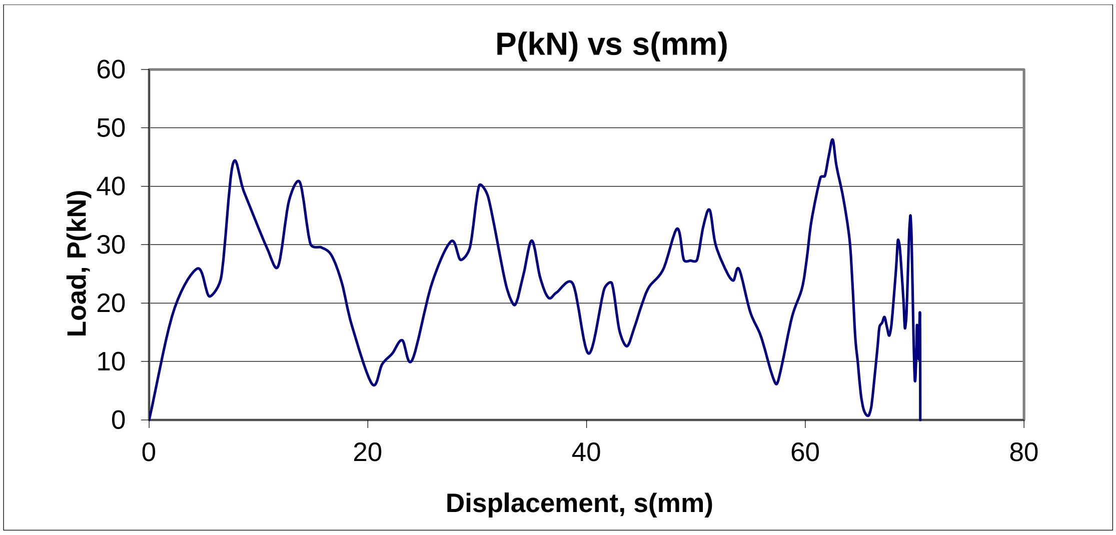
Εικόνα 4.12: Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης Δοκ.401(Δυναμική φόρτιση)

Πίνακας 4.3: Πειραματικά δεδομένα και αποτελέσματα (401)

Μετατόπιση:	S= 65,5 mm
Μέσο φορτίο:	P mean= 23,14 KN
Μέγιστο φορτίο:	Pmax= 49,54KN
Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου:	c.f.e= 0,47%
Ενέργεια απορρόφησης:	Eabs= 1515.38 Joule
Ειδική ενέργεια απορρόφησης:	Ws= 51,18 Joule/gr

- Δοκίμιο 402 (δυναμικές συνθήκες αξονικής συμπίεσης)

Εικόνες 4.13.1-4.13.4: Δοκίμιο αλουμινίου, κοίλης κυλινδρικής γεωμετρίας. Στην εικόνα 1 παρατίθεται το δοκίμιο πριν του ασκηθεί μηχανικό φορτίο μέσω της σφύρας. Στην εικόνα 2 παρουσιάζεται όψη του δοκιμίου μετά από την άσκηση κρουστικού φορτίου. Η εικόνα 3 παρουσιάζει την κάτοψη του συντεθλιμμένου δοκιμίου από την πλευρά επαφής με την σφύρα. Η εικόνα 4 αποτελεί την τομή του δοκιμίου.



Εικόνα 4.14 Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης Δοκ.402(Δυναμική φόρτιση).

Πίνακας 4.4: Πειραματικά δεδομένα και αποτελέσματα (402)

Μετατόπιση:	S= 70,5 mm
Μέσο φορτίο:	P mean= 23,42KN
Μέγιστο φορτίο:	Pmax= 47,95 KN
Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου:	c.f.e= 0,49%
Ενέργεια απορρόφησης:	Eabs= 1651,44 Joule
Ειδική ενέργεια απορρόφησης:	Ws=51.82 Joule/gr

Η αξονική δυναμική συμπίεση των δοκιμίων αλουμινίου (δοκ 401 και 402), είχε σαν αποτέλεσμα την κατάρρευση αυτών με εκτατό τρόπο. Συγκρίνοντας τις γεωμετρικές διαστάσεις και το είδος του υλικού με τα βιβλιογραφικά δεδομένα, ο εν λόγω τρόπος κατάρρευσης επαληθεύεται πλήρως. Το μέγιστο φορτίο που καταγράφηκε κατά την δοκιμή ήταν 49.54 KN (δοκ 401) και 47.95 KN (δοκ 402). Η εν λόγω μέγιστη τιμή φορτίου καταγράφηκε κατά την ολοκλήρωση της δυναμικής φόρτησης και στην τιμή βράχυνσης των 63mm (δοκ 401) και 70.5mm (δοκ 402). Το γεγονός αυτό πιθανότατα οφείλεται στην αυξάνουσα σκλήρυνση του υλικού κατά την προοδευτική (σε διαστημα ms) βράχυνση που υπέστει.

Μορφολογικά, η εκκίνηση κατάρευσης των δοκιμίων έλαβε χώρα στο άνω άκρο αυτών (τυχαία). Παρατειρούνται πέντε πλήρως σχηματισμένοι εξωτερικοί λοβοί (Εικ 4.11, 4.13) και η έναρξη δημιουργίας ενός έκτου που παρέμεινε ημιτελής. Ακόμα, στα σημεία μέγιστης περιφεριακής παραμόρφωσης (εξωτερική περίφέρεια εξωτερικών λοβών, εσωτερική περιφέρια εσωτερικών λοβών μέγιστης κάμψης) παρατηρούνται μικρορωγματώσεις λόγω τοπικής μεγιστοποίησης των εφελκιστικών και θλιπτικών φορτίων αντίστοιχα.

Μελετόντας τα παραχθέντα διάγραμματα φορτίου-μετατόπισης, είναι σαφής η έντονη αυξομείωση του φορτίου σχετικά με την προκύπτουσα μετατόπηση κατά την δημιουργία των πλαστικών αρμών. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην δυναμική φύση της δοκιμής, η οποία εμπεριέχει εκτεταμένη παραμόρφωση δοκιμίου σε απειροελάχιστο χρονικό διάστημα (λιγότερα των πέντε ms). Ένα ακόμα αποτέλεσμα αυτής, είναι η οξύτητα των δημιουργηθέντων ριγματώσεων και η απελευθέρωση ενέργειας με την μορφή θερμότητας (αύξηση της θερμοκρασίας του δοκιμίου αμεσως μετα την δοκιμή)

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 4.2.1

[1] Andrews KRF, England GL and Ghani E (1983) Classification of the Axial Collapse of Cylindrical Tubes Under Quasi-Static Loading, International Journal of Mechanical Sciences, 25 (9-10), 687-696.

[2] Guillow SR, Lu G and Grzebieta RH (2001) Quasi-Static Axial Compression of Thin-Walled Circular Aluminium Tubes, International Journal of Mechanical Sciences, 43, 2103-2123.

[3] Al Galib D and Liman A (2004) Experimental and Numerical investigation of Static and Dynamic Crushing of Circular Aluminum Tubes, Thin-Walled Structures, 42, 1103-1137.

[4] Abramowicz W and Jones N (1997) Transition from Initial Global Bending to Progressive Buckling of Tubes Loaded Statically and Dynamically, International Journal of Impact Engineering, 19(5-6), 415-437.

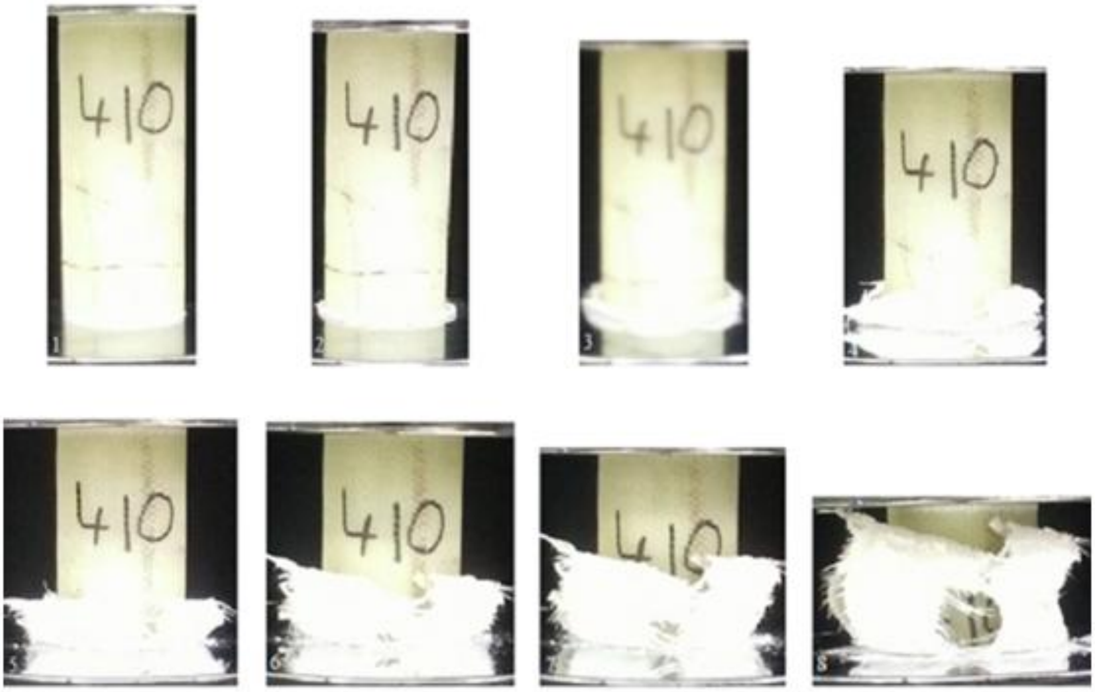
[5] Olabi AG, Morris E and Hashmi MSJ (2007) Metallic Tube Type Energy Absorbers: A Synopsis, Thin-Walled Structures, 45, 706-726.

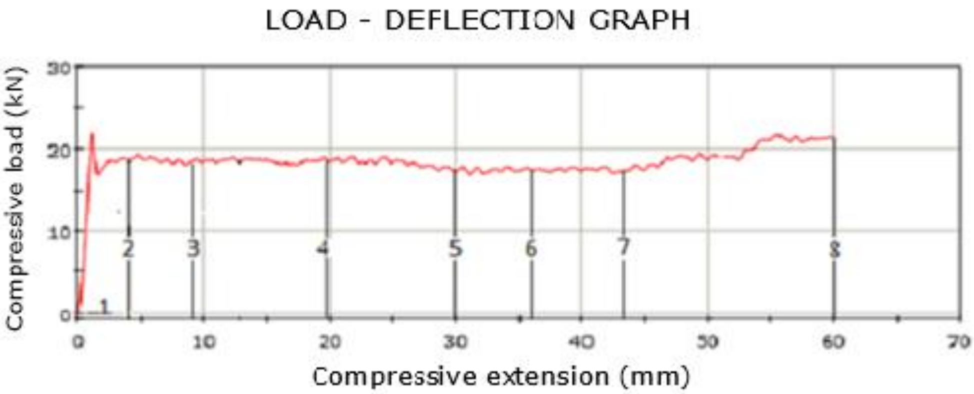
[6] Alghamdi AAA (2001) Collapsible Impact Energy Absorbers: An Overview, Thin-Walled Structures, 39, 189-213.

[7] Hanssen AG, Langseth M and Hopperstad OS (2000) Static and dynamic crushing of circular aluminium extrusions with aluminium foam filler, International Journal of Impact Engineering, 24, 475-507.

4.2.2 Πειραματικές μετρήσεις και αποτελέσματα δοκιμίων συνθέτου υλικού

- Δοκίμιο 410 (στατικές συνθήκες αξονικής συμπίεσης)





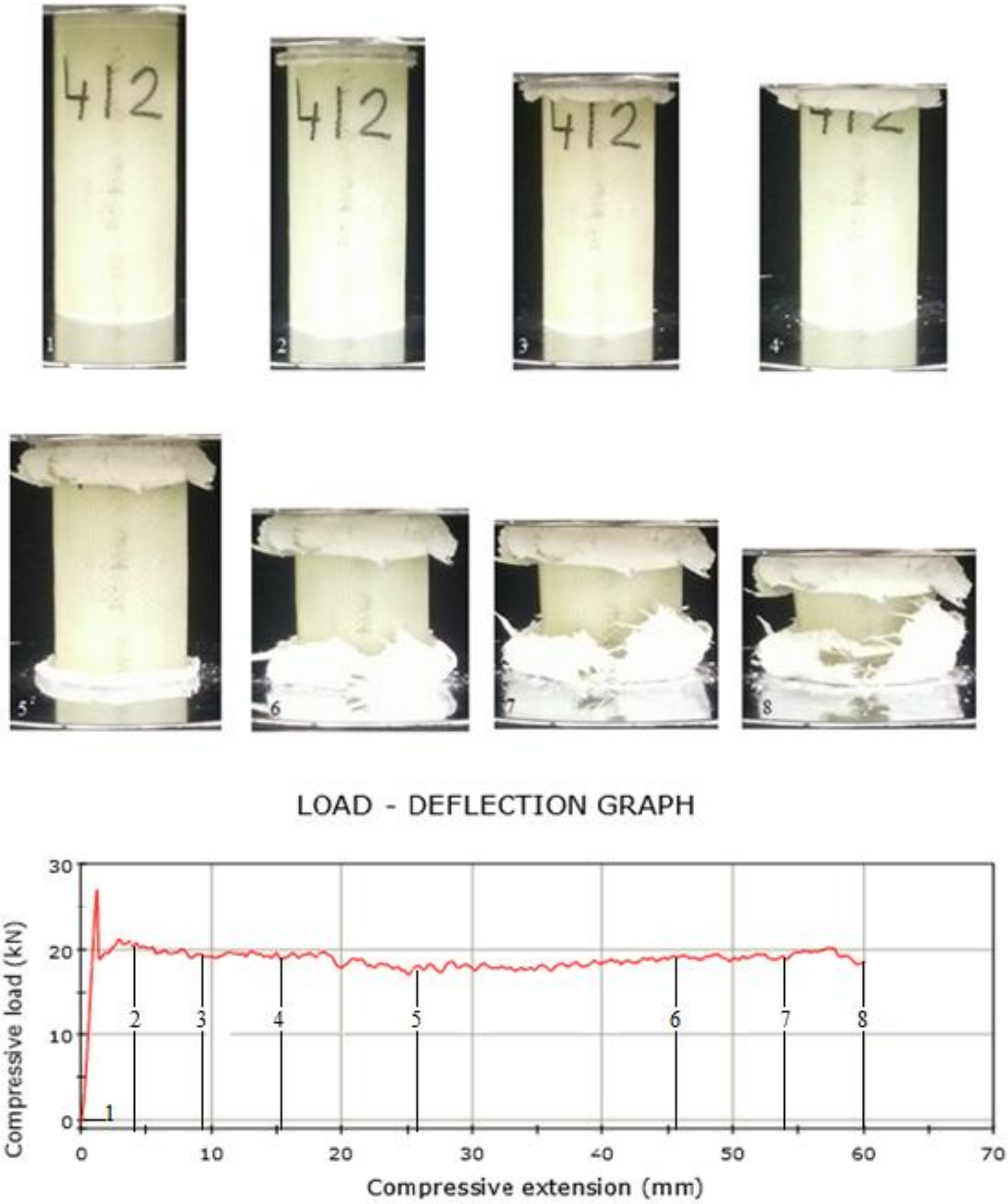
Εικ.4.15: Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης δοκ.410 και καμπύλη φορτίου-μετατόπισης. Η αρίθμηση (1-8) στην καμπύλη δηλώνει τις θέσεις των στιγμιότυπων

Πίνακας4.5: Πειραματικά δεδομένα και αποτελέσματα (410)

Διαδρομη εμβόλου:	S= 60 mm
Μέσο φορτίο:	P mean=18.34 KN
Μέγιστο φορτίο:	Pmax=22.05 KN
Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου:	c.f.e=0.83 %
Ενέργεια απορρόφησης:	Eabs=1100.4 Joule
Ειδική ενέργεια απορρόφησης:	Ws=44.43 Joule/gr

Εικ.4.16.1-4.16.6:Τελικές όψεις δοκ.410 (μετά την αξονική συμπίεση και κατάρρευση). Οι φωτογραφίες 1-3 απεικονίζουν πλευρικές όψεις. Η φωτογραφία 4, την κάτοψη από την πλευρά άσκησης φορτίου μέσω του κινούμενου εμβόλου, ενώ η φωτογραφία 5 την κάτοψη από την πλευρά της σταθερής πλάκας. Στη φωτογραφία 6 παρουσιάζεται η τομή του συντεθλιμμένου δοκιμίου.

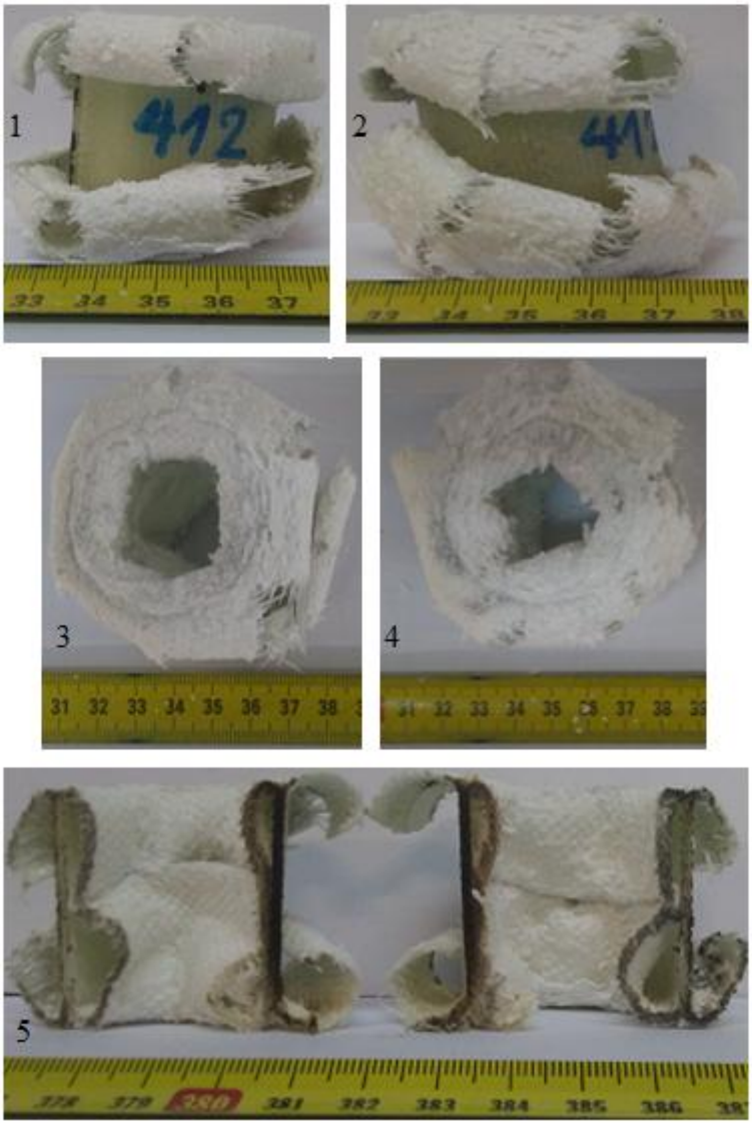
- Δοκίμιο 412 (στατικές συνθήκες συμπίεσης)



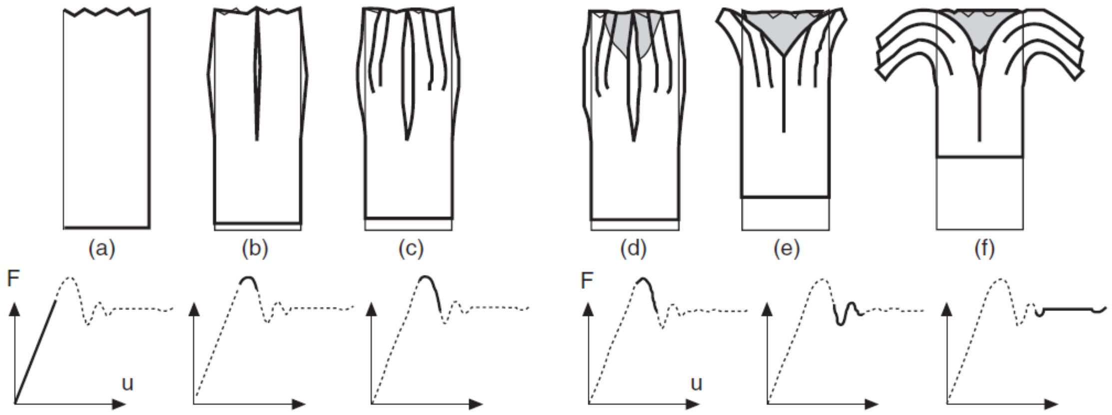
Εικ.4.17:Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης δοκ. 412 και καμπύλη φορτίου-μετατόπισης. Η αρίθμηση (1-8) στην καμπύλη δηλώνει τις θέσεις των στιγμιότυπων.

Πίνακας 4.6: Πειραματικά δεδομένα και αποτελέσματα (412)

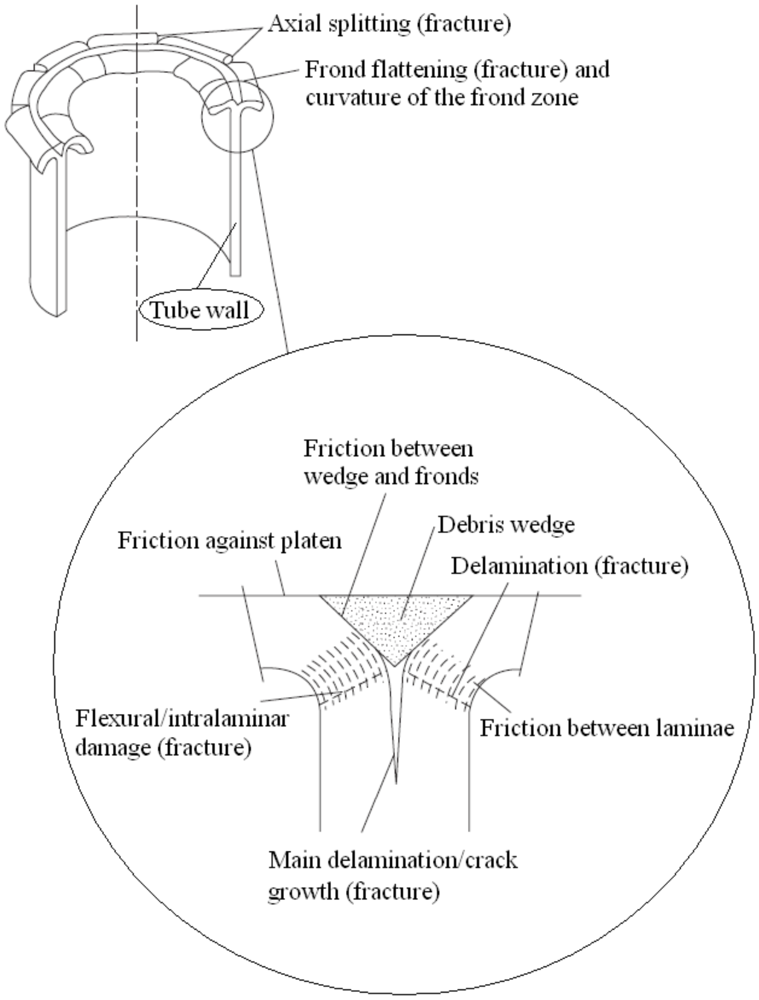
Διαδρομη εμβόλου:	S= 60 mm
Μέσο φορτίο:	P mean=18.78 KN
Μέγιστο φορτίο:	Pmax=27.02KN
Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου:	c.f.e=0.69 %
Ενέργεια απορρόφησης:	Eabs=1126.8 Joule
Ειδική ενέργεια απορρόφησης:	Ws= 45.18 Joule/gr



Εικ. 4.18.1-4.18.5: *Τελικές όψεις δοκ 412 (μετά την αξονική συμπίεση και κατάρρευση). Οι φωτογραφίες 1-2 απεικονίζουν πλευρικές όψεις. Η φωτογραφία 3, την κάτοψη από την πλευρά άσκησης φορτίου μέσω του κινούμενου εμβόλου, ενώ η φωτογραφία 4 την κάτοψη από την πλευρά του σταθερής πλάκας. Στη φωτογραφία 5 παρουσιάζεται η τομή του συντεθλιμμένου δοκιμίου.*



Εικ.4.19: Μηχανισμός ανάπτυξης μετώπου (ευσταθούς) κατάρρευσης (crash-front) σύνθετου κυλινδρικού σωλήνα (τοίχωμα) σε αξονική συμπίεση (σχηματικά) και συσχέτιση με τα αντίστοιχα τμήματα του διαγράμματος φορτίου-μετατόπισης [6]



Εικ.4.20:Σχηματική αναπαράσταση της ζώνης θραύσης (μέτωπο κατάρρευσης) σύνθετου κυλινδρικού σωλήνα (τοίχωμα) σε αξονική συμπίεση, με απεικόνιση των παραγόντων απορρόφησης ενέργειας [1, 6]

Στην παρούσα παράγραφο εξετάζεται η κατάρρευση των κυλινδρικών κελυφών σύνθετου υλικού (δοκ. 410 και 412) σε συνθήκες στατικής αξονικής συμπίεσης (ταχύτητα παραμόρφωσης δοκιμίων - ή ταχύτητα κινούμενης πλάκας - 10 mm/min). Στην Εικ. 4.15 παρουσιάζονται φωτογραφίες των διαδοχικών φάσεων κατάρρευσης του δοκ. 410 μαζί με το αντίστοιχο διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης της πλάκας συμπίεσης (ή αξονικής βράχυνσης του κελύφους), ενώ στην Εικ.4.16 φαίνονται οι τελικές όψεις του δοκιμίου καθώς και διαμήκεις/αξονικές τομές του. Στον Πιν.4.5 καταγράφονται οι τιμές των κύριων χαρακτηριστικών αξιολόγησης της συμπεριφοράς του κελύφους στη συγκεκριμένη δοκιμή (crashworthy characteristics). Στο δοκ. 412 αναφέρονται οι Εικ.4.17,4.18 και ο Πιν.4.6, αντίστοιχα.

Στα δύο σύνθετα κυλινδρικά κελύφη, υπό συνθήκες αξονικής συμπίεσης, διαπιστώθηκε ευσταθής, προοδευτικός και ελεγχόμενος τρόπος (μοτίβο) κατάρρευσης (Εικ. 4.15-4.18). 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 κυλινδρικού κελύφους (δοκ. 410 και 412 αντίστοιχα), 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 κυλινδρικού κελύφους με κριτήριο την απορρόφηση ενέργειας και τα επιμέρους χαρακτηριστικά αξιολόγησής της. [1-4].

Συγκεκριμένα, τα κύρια χαρακτηριστικά του παραπάνω μηχανισμού μικρο-θραύσεων είναι (Εικ.4.19 και 4.20) [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-ρωγμή 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 διαμήκους ρωγμής και της εσωτερικής και εξωτερικής αντίστοιχα κυλινδρικής 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 κυλινδρικού 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. 4.19 και 4.20 [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/σχίσιμο 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 διείσδυσή 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 κυλινδρικών κελυφών, όπως η συγκεκριμένη, με τους μηχανισμούς και τη μορφολογία που περιγράφηκε 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 (Εικ.4.15 και 4.17). Στο σημείο αυτό καταγράφεται ουσιαστικά η αντοχή του κελύφους σε αξονική συμπίεση, αφού η αρχική αυτή κορυφή του φορτίου συνιστά και τη μέγιστη τιμή (Pmax) 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 (περίπου μετά τα 55 mm) καταγράφεται μια σχεδόν ανεπαίσθητη αύξηση του φορτίου (Εικ. 4.15 και 4.17), στην οποία φαίνεται να συμβάλλει - πέραν του γεγονότος ότι τα κυλινδρικά 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 κυλινδρικού κελύφους, προς την απέναντι πλάκα συμπίεσης (βλ. αξονικές τομές δοκιμίων 410 και 412 στις Εικ. 4.16.5 και 4.18.5 αντίστοιχα). Θεωρητικά, το ελεύθερο μήκος τους στο τέλος της διαδρομής φόρτισης είναι περίπου 60 mm (βέβαια σε μη ευθύγραμμη διάταξη), γεγονός που οδηγεί - λόγω του τελικού ενδιάμεσου ύψους 40 mm των δύο πλακών συμπίεσης - στο προαναφερθέν συμπέρασμα. Η απουσία - ουσιαστικά - αξονικών σχισιμάτων 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 (παρόλο το ίδιο θεωρητικό ελεύθερο μήκος τους των 60 mm) με την απέναντι πλάκα συμπίεσης. Μάλιστα, στην περίπτωση του δοκ. 410, όπου η κατάρρευση εκκίνησε και περατώθηκε μόνο στο ένα άκρο, η αύξηση του φορτίου είναι περισσότερο εμφανής, καθώς η επαφή των εσωτερικών δεσμών με την απέναντι πλάκα είναι μετωπική ουσιαστικά (στιβαρή αλληλεπίδραση). Στο δοκ. 412, που σχηματίστηκε μέτωπο κατάρρευσης και στα δύο άκρα, και η συνολική διαδρομή κατάρρευσης μοιράστηκε σε αυτά, το ελεύθερο μήκος της εσωτερικής δέσμης στρώσεων του κάθε μετώπου δεν επαρκεί για να έρθει αυτή σε επαφή με την αντίστοιχη απέναντι πλάκα. Το αποτέλεσμα, είτε οι αντίθετα κινούμενες στο διαθέσιμο χώρο δέσμες συναντηθούν μεταξύ τους μετωπικά (λιγότερο στιβαρή αλληλεπίδραση σε σχέση με τη μετωπική αλληλεπίδραση της δέσμης στρώσεων με την απαραμόρφωτη πλάκα συμπίεσης), είτε ολισθήσουν μεταξύ τους (σχεδόν μηδενική δύναμη αλληλεπίδρασης), είναι σαφώς μικρότερης έντασης.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η χαρακτηριστική διαφορά στο δοκ. 412 - σε σχέση με το δοκ. 410 - ήταν ότι σχηματίστηκαν δύο μέτωπα θραύσης (στο δοκ. 410 σχηματίστηκε ένα) κατά την αξονική του κατάρρευση, με το δεύτερο - στο κάτω άκρο - να ξεκινά να σχηματίζεται λίγο μετά τα 15mm μετατόπισης του εμβόλου συμπίεσης (Εικ.4.15 και 4.17). Φαίνεται ότι κάποιες μεμονωμένες μικρορωγμές αναπτύχθηκαν τοπικά σε αυτό κατά το πρώτο στάδιο της κατάρρευσης από το άνω άκρο, οι οποίες αναπτύχθηκαν ευρύτερα προϊούσης της συμπίεσης, καθιστώντας τη διατομή του κάτω άκρου ενδοτικότερη από την ήδη σχηματισμένη ζώνη θραύσης του άνω άκρου στη συγκεκριμένη φάση της κατάρρευσης. Από το σημείο εκείνο και μετά, η σύνθλιψη του κελύφους συνεχίζεται και ολοκληρώνεται αποκλειστικά στη νέα ζώνη θραύσης του κάτω άκρου (βλ. διαδοχικά στιγμιότυπα Εικ. 4.17). Βέβαια, η εξέλιξη αυτή δεν είχε τελικά καμία αρνητική επίδραση στη συνολική - εξαιρετική - απόδοση του δοκ. 412 σε συνθήκες αξονικής κατάρρευσης. Το μοτίβο παραμόρφωσης, το διάγραμμα φορτίου μετατόπισης και οι τιμές των χαρακτηριστικών μεγεθών αξιολόγησης της συμπεριφοράς του ήταν σαφώς εφάμιλλα των αντίστοιχων του δοκ. 410 (Εικ. 4.15, 4.16 Πιν. 4.5 και Εικ.4.17, 4.18 Πιν. 4.6, αντίστοιχα). Η μικρή διαφοροποίηση μόνο στο αρχικό/μέγιστο φορτίο, Pmax και - ως εκ τούτου - στον δείκτη ανομοιομορφίας φορτίου, c.f.e οφείλεται αποκλειστικά σε κάποια μεμονωμένη/τοπική γεωμετρική ή/και δομική απόκλιση μεταξύ των δύο (χειροποίητων σύνθετων) κελυφών, εντός των αναμενόμενων/αποδεκτών ορίων.

Συνολικά, τα μεταβατικά φαινόμενα σύνθλιψης και θραύσης, καθώς και ο σχηματισμός και η ανάπτυξη του μηχανισμού κατάρρευσης, σχετικά με την αξονική συμπίεση κυλινδρικών 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].

Συμπερασματικά, τα συγκεκριμένα (χειροποίητα) σύνθετα κυλινδρικά κελύφη παρουσίασαν την αποδοτικότερη (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 (Pmax) 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 κυλινδρικών 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 δοκιμίων από το διαμορφωθέν άκρο (η διατομή των δοκιμίων στα άκρα τους δηλαδή ήταν πλήρης και τα άκρα τετραγωνισμένα).

Βιβλιογραφία κεφαλαίου 4.2.2

[1] Mamalis AG, Manolakos DE, Demosthenous GA and Ioannidis MB, Crashworthiness of Composite Thin-Walled Structural Components, Technomic Publishing Company, Lancaster, Pennsylvania, 1998.

[2] Hull D (1991) A Unified Approach to Progressive Crushing of Fibre-Reinforced Composite Tubes, Composites Science and Technology, 40, 377-421.

[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.

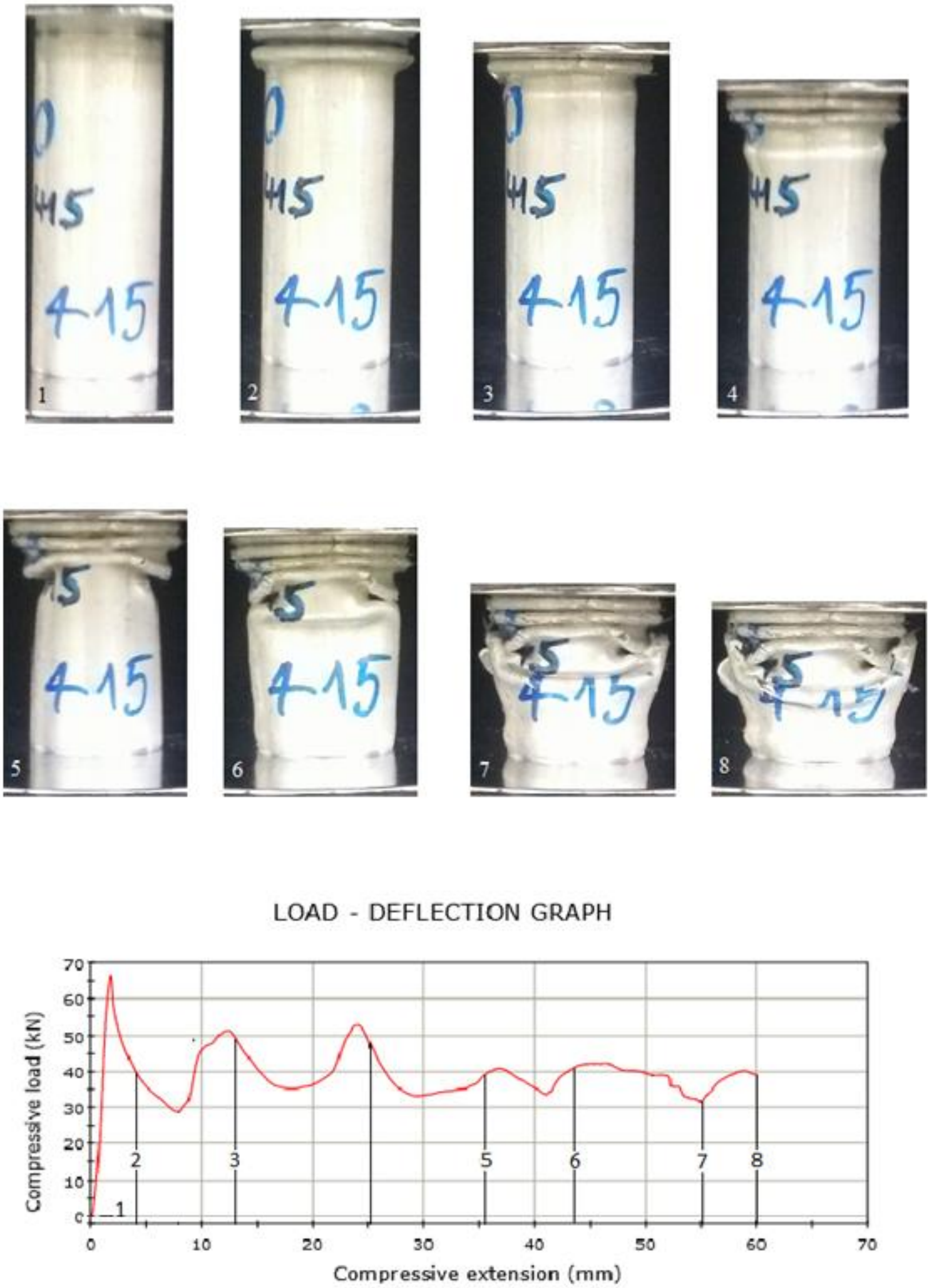
[4] Kindervater CM and Georgi H, Composite Strength and Energy Absorption as an Aspect of Structural Crash Resistance, in Structural Crashworthiness and Failure, Jones N and Wierzbicki T (eds), Taylor & Francis, London, 2010, pp. 162-203.

[5] Haug E and De Rouvray A, Crash Response of Composite Structures, in Structural Crashworthiness and Failure, Jones N and Wierzbicki T (eds), Taylor & Francis, London, 2010, pp. 204-256.

[6] 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.

4.2.3 Πειραματικές μετρήσεις και αποτελέσματα υβριδικών δοκιμίων (Al-out)

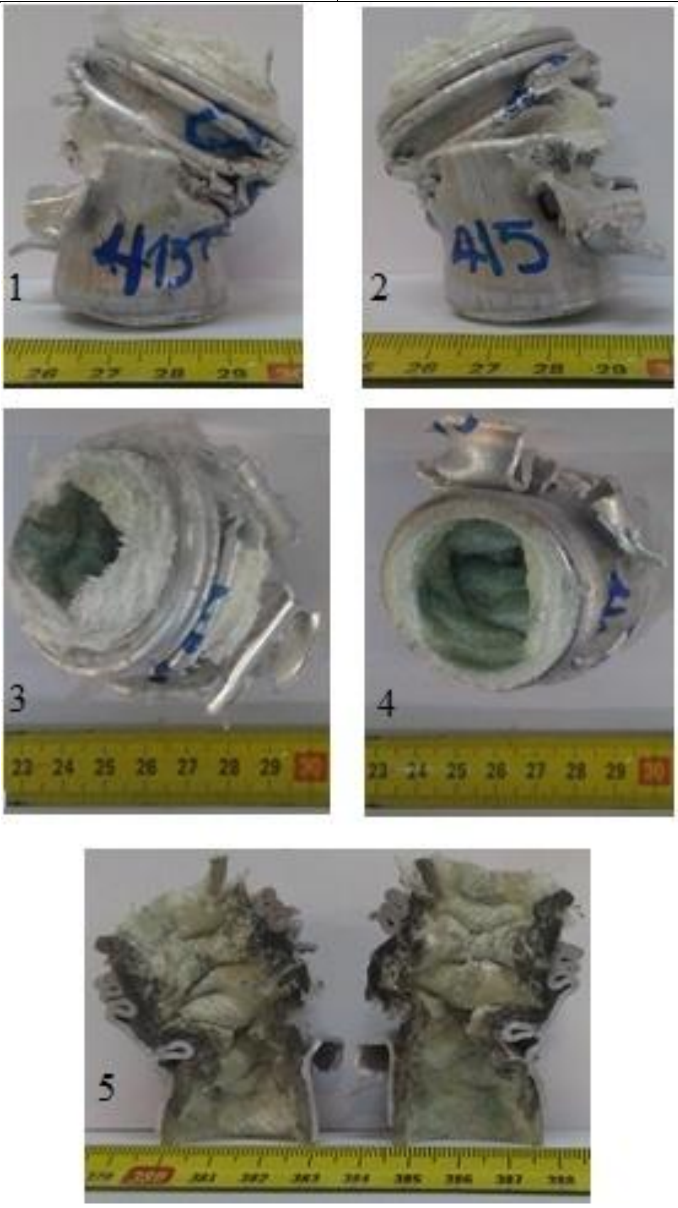
- Δοκίμιο 415 (στατικές συνθήκες αξονικής συμπίεσης)



Εικ.4.21:Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης δοκ. 415 και καμπύλη φορτίου-μετατόπισης. Η αρίθμηση (1-8) στην καμπύλη δηλώνει τις θέσεις των στιγμιότυπων.

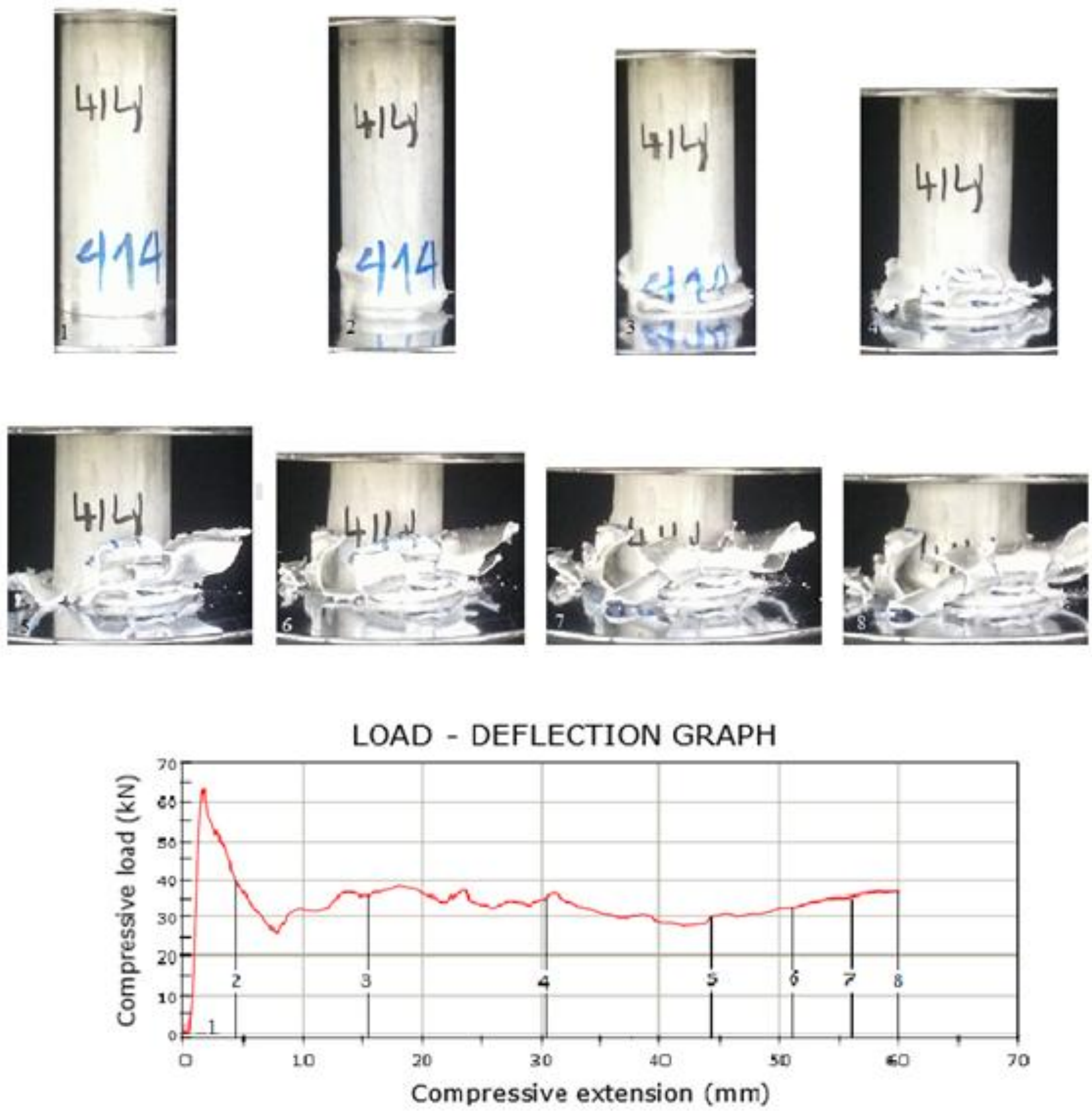
Πίνακας 4.7: Πειραματικά δεδομένα και αποτελέσματα (415)

Διαδρομη εμβόλου:	S= 60 mm
Μέσο φορτίο:	P mean=39.01KN
Μέγιστο φορτίο:	Pmax=65.61KN
Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου:	c.f.e=0.59 %
Ενέργεια απορρόφησης:	Eabs=2340 Joule
Ειδική ενέργεια απορρόφησης:	Ws= 42.44 Joule /gr



Εικόνες 4.22.1-4.22.5: Υβριδικό δοκίμιο κοίλης κυλινδρικής γεωμετρίας μετά από αξονική συμπίεση. Οι φωτογραφίες 1,2 απεικονίζουν την πρόσοψη του δοκιμίου. Η φωτογραφία 3, την κάτοψη από την πλευρά άσκησης φορτίου μέσω του κινούμενου εμβόλου ενώ η φωτογραφία 4 την κάτοψη από την πλευρά του σταθερής πλάκας. Στην φωτογραφία 5 παρουσιάζεται η τομή του συντεθλιμμένου δοκιμίου.

- Δοκίμιο 414 (στατικές συνθήκες αξονικής συμπίεσης)



Εικ.4.23:Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης δοκ. 414 και καμπύλη φορτίου-μετατόπισης. Η αρίθμηση (1-8) στην καμπύλη δηλώνει τις θέσεις των στιγμιότυπων.

Πίνακας 4.8: Πειραματικά δεδομένα και αποτελέσματα (414)

Διαδρομη εμβόλου:	S= 60 mm
Μέσο φορτίο:	P mean=33.91KN
Μέγιστο φορτίο:	Pmax=63.79KN
Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου:	c.f.e=0.53 %
Ενέργεια απορρόφησης:	Eabs=2034.6 Joule
Ειδική ενέργεια απορρόφησης:	Ws= 36.67 Joule/gr

Εικόνες 4.24.1-4.24.5: Υβριδικό δοκίμιο κοίλης κυλινδρικής γεωμετρίας μετά από αξονική συμπίεση. Οι φωτογραφίες 1,2 απεικονίζουν την πρόσοψη του δοκιμίου. Η φωτογραφία 3, την κάτοψη από την πλευρά άσκησης φορτίου μέσω του κινούμενου εμβόλου ενώ, η φωτογραφία 4 την κάτοψη από την πλευρά του σταθερής πλάκας. Στην φωτογραφία 5 παρουσιάζεται η τομή του συντεθλιμμένου δοκιμίου.

Το κέλυφος του δοκιμίου 415 συμπιέζεται αξονικά μεταξύ της άνω (κινούμενης προς τα κάτω) πλάκας συμπίεσης και της κάτω ακίνητης πλάκας της μηχανής δοκιμών. Ο τρόπος κατάρρευσης του υβριδικού δοκιμίου χαρακτηρίζεται ως μικτός. Ο λόγος εντοπίζεται στα διαφορετικά χαρακτηριστικά κατάρρευσης που παρουσιάστηκαν κατά την προοδευτική συμπίεση.

Σε αρχικό στάδιο της συμπίεσης (για τα πρώτα 25mm) το υβριδικό δοκίμιο παρουσιάζει αξονοσυμμετρικό τρόπο κατάρρευσης (Εικ4.21 προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης Εικ 4.22.5 τελικές όψεις σε τομή). Εξετάζοντας την αρχική/ελαστική περιοχή του διαγράμματος δύναμης-μετατόπισης (πρώτα2,00 mm βράχυνσης δοκιμίου) καταγράφεται το μέγιστο φορτίο των 65.61 KN. Στην μέγιστη τιμή φορτίου εντοπίζεται η έναρξη δημιουργίας του πρώτου πλαστικού αρμού (Εικ 4.21, φωτογραφία 2, προοδευτικών φάσεων κατάρρευσης), η οποία ολοκληρώνεται στο σημείο τοπικού ελαχίστου της καμπύλης. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργήθηκε το μέτωπο κατάρρευσης του υβριδικού δοκιμίου. Ακολούθως, η κλίση της καμπύλης αυξάνεται έντονα έως το σημείο σχηματισμού ώμου (10mm βραχυνσης). Το συγκεκριμένο σημείο αντιστοιχεί στην έναρξη δημιουργίας του πρώτου εσωτερικού πλαστικού αρμού, ο σχηματισμός του οποίου ολοκληρώνεται στο τοπικό μέγιστο. Η ύπαρξη του τοπικού μεγίστου, σηματοδοτεί την έναρξη σχηματισμού του δεύτερου εξωτερικού αρμού, ο οποίος ολοκληρώνεται στο σημείο καμπής της καμπύλης προς τα άνω. Οι δύο σχηματισθέντες εξωτερικοί λοβοί απεικονίζονται στην φωτογραφία 4 της εικόνας 4.21. Στην ίδια εικόνα διαφαίνεται η έναρξη σχηματισμού του τρίτου εξωτερικού λοβού γεγονός που συνδυάζεται με την διαγραμματική απεικόνιση του φαινομένου και την αρνητική κλίση της καμπύλης στο δεδομένο σημείο. Ο τρίτος εξωτερικός λοβός ολοκληρώνεται, όταν το δοκίμιο έχει βραχυνθεί κατά περίπου 29mm. Στο σημείο αυτό, η συμπεριφορά κατάρρευσης του δοκιμίου σταματά να είναι αξονοσυμμετρική. Για το γεγονός αυτό ευθύνεται η ύπαρξη της εσωτερικής επένδυσης συνθέτου υλικού.

Το σύνθετο μέρος του υβριδικού δοκιμίου κατά το αξονοσυμμετρικό στάδιο κατάρρευσης (βράχυνση 28 mm) παρακολουθεί την πλαστική παραμόρφωση του αλουμινίου (Εικ 4.22.5). Τα θλιπτικά φορτία που ασκούν οι σχηματιζόμενοι λοβοί του αλουμινίου πλευρικά στο σύνθετο, σε συνδυασμό με το αξονικά εφαρμοζόμενο φορτίο της πρέσας, οδηγούν τον σύνθετο εσωτερικό μανδύα σε αντίστοιχες διαδοχικές αναδιπλώσεις (progressive folding). Ταυτόχρονα, λόγω του περιορισμένου εσωτερικού διαθέσιμου χώρου, στο σύνθετο λαμβάνουν χώρα μικροθραύσεις εντός του τοιχώματός του και εκτεταμένη διαστρωματική αποκόλληση, με αποτέλεσμα να αυξάνεται το πάχος του τοιχώματος. Η συνεχώς καταρρέουσα μάζα συνθέτου, συμπιέζεται και συσσωρεύεται με τον ρυθμό καθόδου της κινούμενης πλάκας στον διαθέσιμο όγκο που διατίθεται από το εξωτερικό καταρρέον αλουμίνιο. Όταν ο διαθέσιμος όγκος συμπίεσης συνθέτου περιοριστεί σημαντικά (φωτογραφία 5 από εικόνα 4.21 προοδευτικών φάσεων κατάρρευσης δοκιμίου), η πεπιεσμένη μάζα συνθέτου αρχίζει βαθμιαία να συμπιέζει τον αλουμινένιο σωλήνα πλευρικά προς τα έξω. Το φαινόμενο αυτό μεγιστοποιείται, στην περιοχή της εγκάρσιας διατομής του δοκιμίου που έχει συσσωρευτεί και συμπιεστεί το μεγαλύτερο μέρος της μάζας του συνθέτου που έχει καταρρεύσει. Απότοκο αυτού, είναι το αλουμίνιο να δέχεται μια συνδυασμένη φόρτιση προκύπτουσα από το αξονικό φορτίο της πρέσας και το πεπιεσμένο (λόγω πλήρους αστοχίας της μήτρας) σύνθετο που τείνει να μετατρέψει τον τρόπο κατάρρευσης.

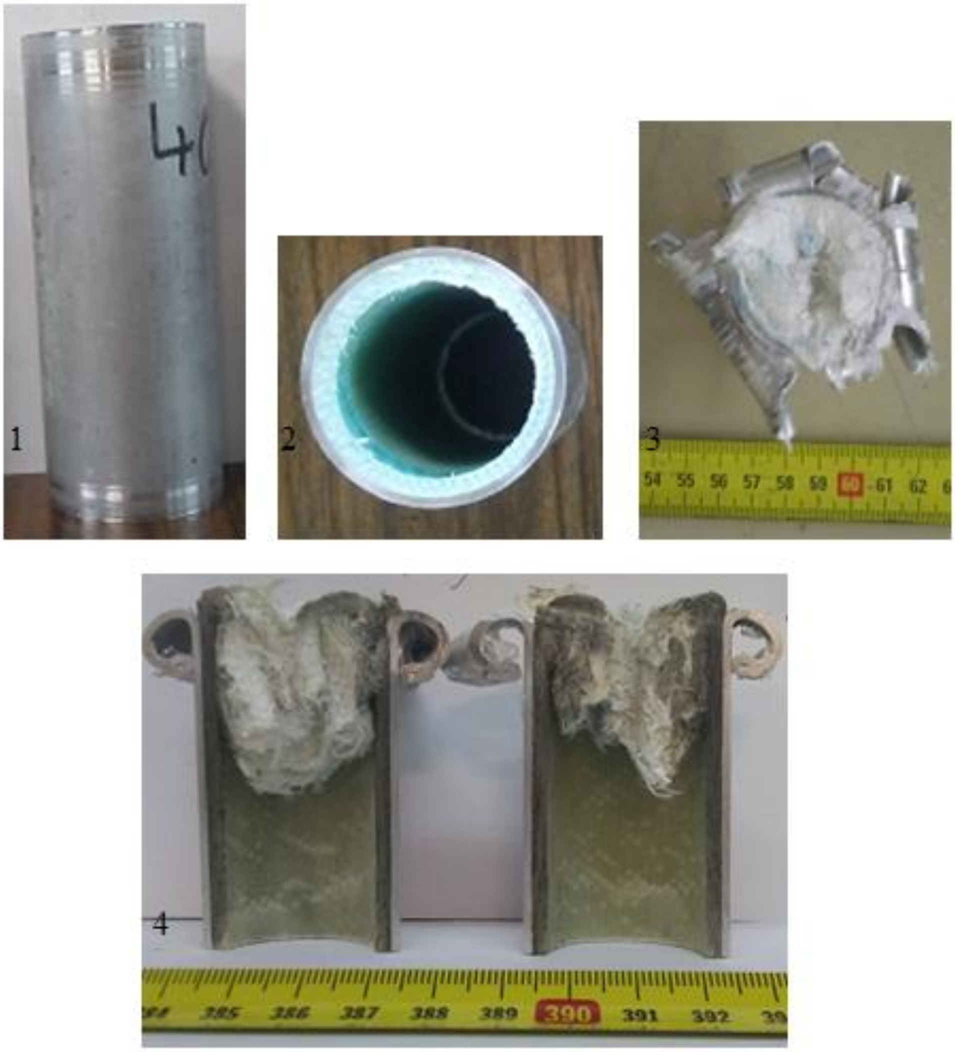
Όπως παρουσιάζεται στην έκτη φωτογραφία των προοδευτικών φάσεων της δοκιμής, ο αξονοσυμμετρικός τρόπος κατάρρευσης σταματά λόγω του φαινομένου που περιγράφηκε στην παραπάνω παράγραφο και μέχρι λήξης της δοκιμής παίρνει την θέση του ο μικτός. Οι αυξομειώσεις φορτίου που παρατηρούνται πέραν των 30mm συμπίεσης στο διάγραμμα (P-d), οφείλονται στην δημιουργία τυχαίων και ακαθόριστων πλαστικών αρμών (επηρεαζόμενων από την επάλληλη κατάρρευση του συνθέτου) στο μεταλλικό τμήμα της διάταξης. Σε κάποια σημεία των πλαστικών σχηματισθέντων αρμών (όπου το συνιστάμενο ασκούμενο φορτίο μεγιστοποιείτο) παρατηρήθηκε σχισμός του αλουμινίου κατά την κατάρρευση. Το αντίστοιχο τμήμα της καμπύλης του φορτίου πλέον δεν παρουσιάζει καμία απολύτως περιοδικότητα ή συγκεκριμένα χαρακτηριστικά σημεία.

Κατά την επαναληπτική διαδικασία του πειράματος (δοκ 414) διαπιστώθηκε, παρεμφερής απόκριση. Η κατάρρευση του δοκιμίου εκκίνησε αυτή τη φορά στο κάτω μέρος του δοκιμίου (φωτογραφία 2 προοδευτικών φάσεων κατάρρευσης Εικ 4.23) με τον σχηματισμό εξωτερικού πλαστικού αρμού ο οποίος προσομοίαζε σε αξονοσυμμετρικό τρόπο κατάρρευσης . Άμεσα όμως, η κατάρρευση του υβριδικού δοκιμίου μετατράπηκε σε μικτή. Πιθανότατα λόγω κάποιας κατασκευαστικής δομικής ατέλειας ή/και υψηλής φόρτισης τοπικά από το αναδιπλούμενο σύνθετο, ο μεταλλικός σωλήνας υπέστη ρωγμάτωση και εκτεταμένη θραύση στο τοίχωμά του (το φορτίο δεν κατανεμήθηκε ομοιόμορφα στη συγκεκριμένη διατομή (κάτω άκρο του αλουμινίου). Οι εν λόγω ρωγμές όπως ήταν αναμενόμενο διάνοιξαν το αλουμινένιο κέλυφος στην συνέχεια της δοκιμής. Το φαινόμενο αυτό μεγιστοποιήθηκε λόγω της επιστοίβασης μάζας θρυμματισμένου συνθέτου στην βάση του δοκιμίου.

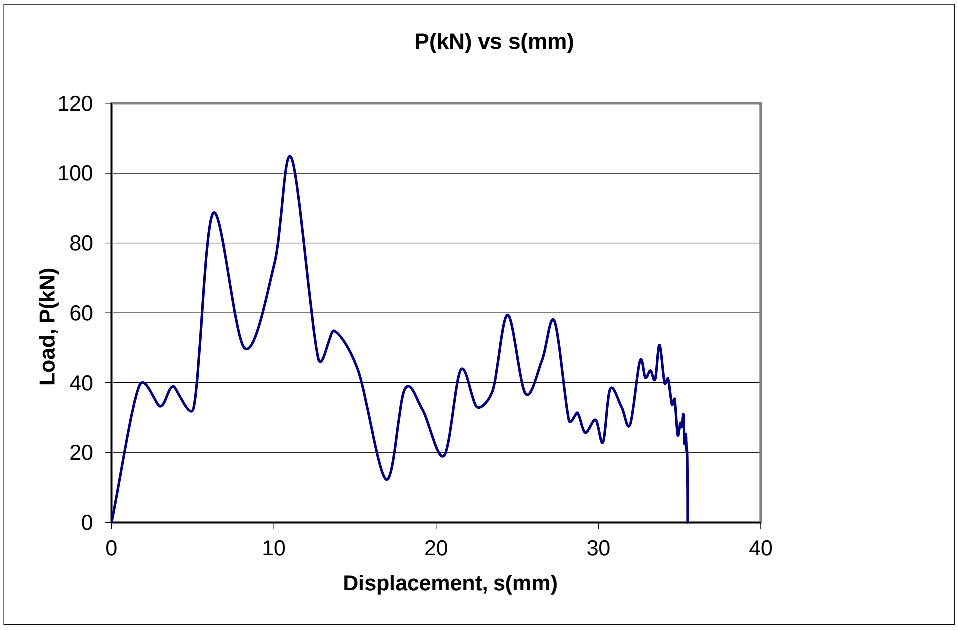
Συνολικά, η παρουσία του εξωτερικού μεταλλικού σωλήνα δεν επέτρεψε την αστοχία του σύνθετου με τον λεγόμενο splaying (mushrooming) τρόπο κατάρρευσης (εξωτερικός περιορισμός) που διαπιστώθηκε στα αντίστοιχα απλά σύνθετα κελύφη (δοκ. 410, 412).

Λόγω της ολοσχερούς θραύσης/αστοχίας της μήτρας του συνθέτου, η ενισχυτικές ίνες δεν θραύτηκαν σε μεγάλη έκταση, με αποτέλεσμα - και στα δύο δοκίμια παρατηρήθηκε σημαντική ανάταξη του σύνθετου τμήματος μετά την αποφόρτιση.

- Δοκίμιο 413(δυναμικές συνθήκες αξονικής συμπίεσης)



Εικόνες 4.25.1-4.25.4: Υβριδικό δοκίμιο κοίλης κυλινδρικής γεωμετρίας. Στην εικόνα 1 παρατίθεται το δοκίμιο πριν του ασκηθεί μηχανικό φορτίο μέσω της σφύρας. Στην εικόνα 2 παρουσιάζεται η κάτοψη του δοκιμίου και διακρίνεται η εσωτερική επένδυση συνθέτου. Η εικόνα 3 παρουσιάζει την κάτοψη του συντεθλιμμένου δοκιμίου από την πλευρά εφαρμογής του φορτίου . Η εικόνα 4 αποτελεί την τομή του δοκιμίου.



Πίνακας 4.9: Πειραματικά δεδομένα και αποτελέσματα (413)

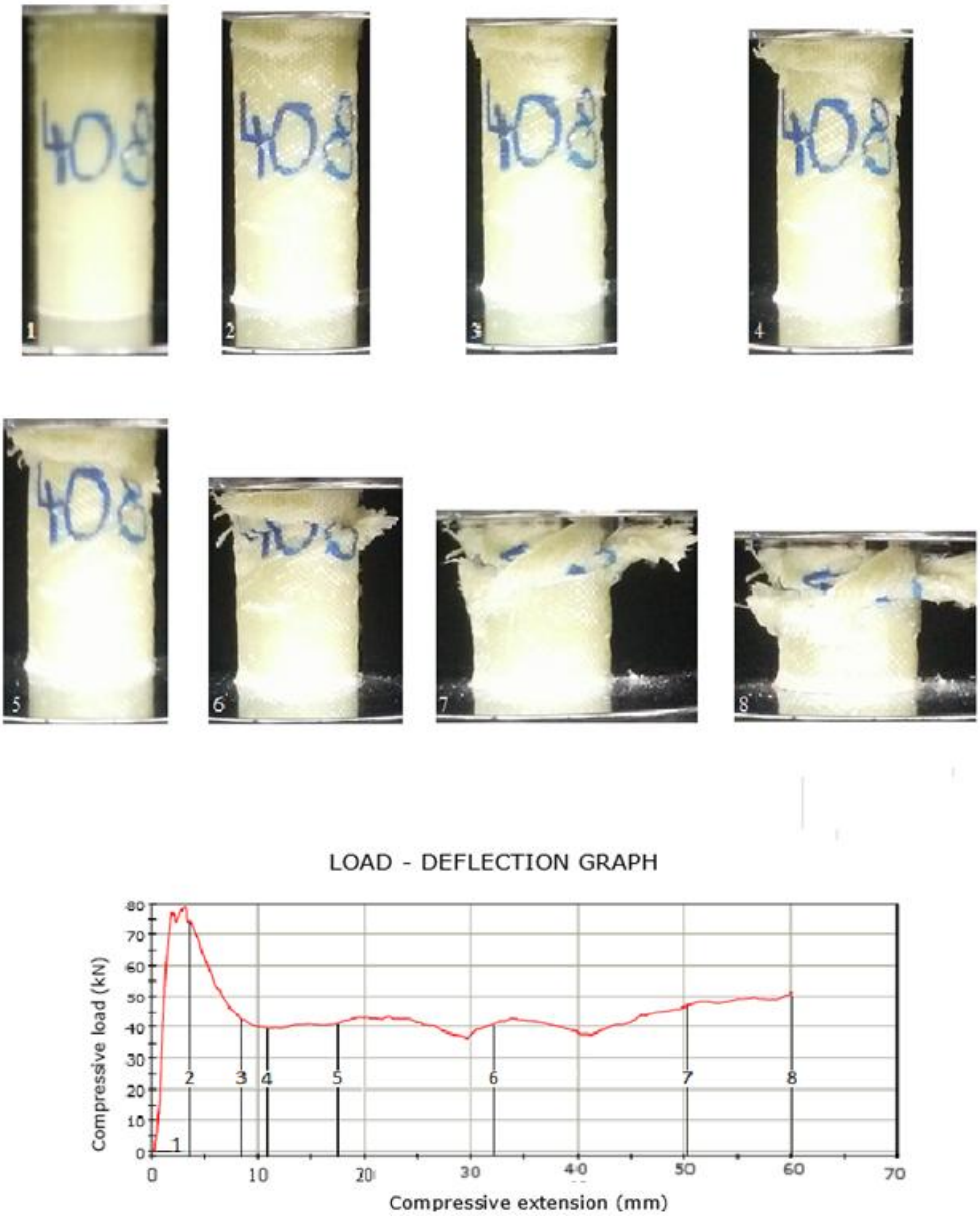
Μετατόπιση:	S= 35,50 mm
Μέσο φορτίο:	P mean= 43,31KN
Μέγιστο φορτίο:	Pmax= 104,31 KN
Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου:	c.f.e= 0,42%
Ενέργεια απορρόφησης:	Eabs= 1537,67 Joule
Ειδική ενέργεια απορρόφησης:	Ws= 46,81 Joule/gr

Κατά την δοκιμη δυναμικής άσκησης φορτίου στο υβριδικό δοκίμιο 413 καταγράφηκε το μέγιστο φορτίο στα 104,31KN για την τιμή βράχυνσης των 11.07mm, όπου σχηματίστηκε ο πρώτος και μοναδικός συνολικά πλαστικός αρμός στο άνω άκρο του μεταλλικού (εξωτερικού) κελύφους. Λόγω της ύπαρξης του εσωτερικού σύνθετου κελύφους που περιόριζε την προς το εσωτερικό παραμόρφωση του μεταλλικού σωλήνα, η κατάρρευση του δεν εξελίχθηκε με τη δημιουργία τακτικών διαδοχικών λοβών, αλλά με έντονη περιφερική έκταση του υλικού προς τα έξω και πολλαπλή διαμήκη ρωγμάτωσή του.

Όσον αφορά στον εσωτερικό σύνθετο σωλήνα (Εικ 4.25.4 αξονική τομή του δοκιμίου), το υλικό του που έχει αστοχήσει, συμπιέστηκε και στιβάχθηκε στραμένο προς τον εσωτερικό του διαθέσιμο χώρου, λόγω του περιορισμού εξωτερικά από τον αλουμινένιο σωλήνα. Το παραπάνω φαινόμενο, είχε σαν αποτέλεσμα την δημιουργία ενναίου μετώπου αντίστασης στην περαιτέρω κατάρρευση του δοκιμίου. Στο σύνθετο τμήμα του υβριδικού κελύφους είναι εμφανής η πλήρης αστοχία της πολυμερικής μήτρας μέχρι το τελικό μέτωπο κατάρρευσης. Ως εκτούτου, εμφανίζεται εκτεταμένη διαστρωματική αποκόλληση με περιορισμένη θραύση των ενυσχιτικών ινών, κυρίως λόγω τριβής στην πλάκα συμπίεσης και κάμψης τους προς το εσωτερικό.

4.2.4 Πειραματικές μετρήσεις και αποτελέσματα υβριδικών δοκιμίων (Al-in)

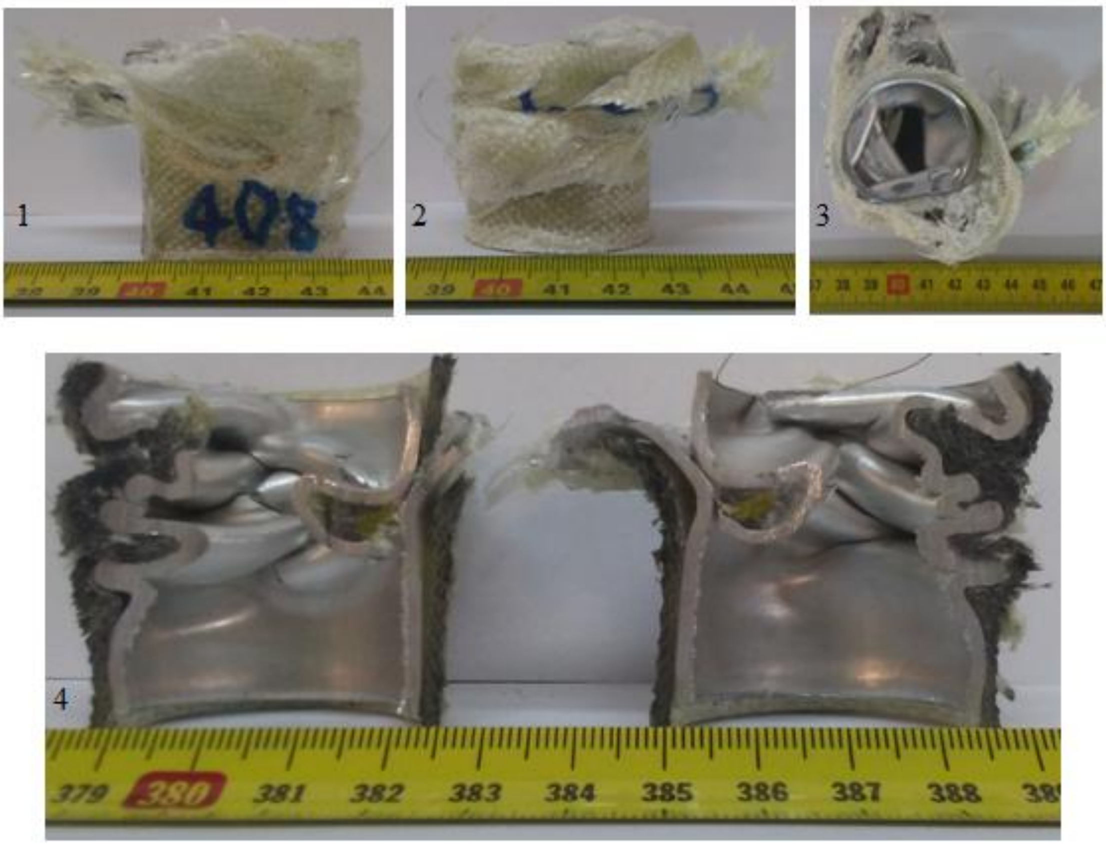
- Δοκίμιο 408 (στατικές συνθήκες αξονικής συμπίεσης)



Εικ.4.26:Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης δοκ. 408 και καμπύλη φορτίου-μετατόπισης. Η αρίθμηση (1-8) στην καμπύλη δηλώνει τις θέσεις των στιγμιότυπων.

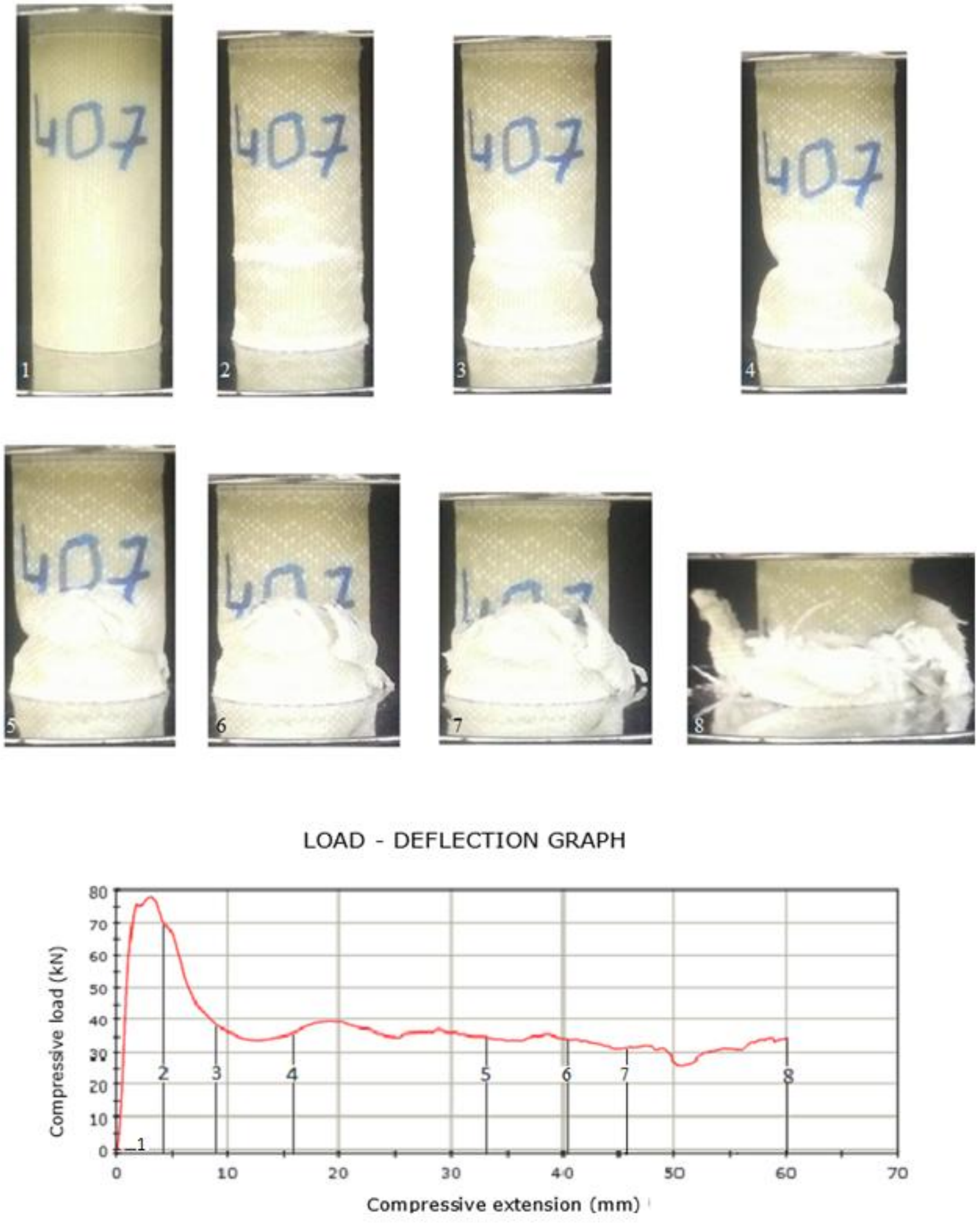
Πίνακας 4.10: Πειραματικά δεδομένα και αποτελέσματα (408)

Διαδρομη εμβόλου:	S= 60 mm
Μέσο φορτίο:	P mean=44.57 KN
Μέγιστο φορτίο:	Pmax=78.19KN
Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου:	c.f.e=0.57 %
Ενέργεια απορρόφησης:	Eabs=2674.2 Joule
Ειδική ενέργεια απορρόφησης:	Ws=50.99 Joule/gr



Εικόνες 4.27.1-4.27.4: Υβριδικό δοκίμιο κοίλης κυλινδρικής γεωμετρίας μετά από αξονική συμπίεση. Οι φωτογραφίες 1,2 απεικονίζουν την πρόσοψη του δοκιμίου. Η φωτογραφία 3 την κάτοψη, από την πλευρά του κινούμενου εμβόλου. Στην φωτογραφία 4 παρουσιάζεται η τομή του συντεθλιμμένου δοκιμίου.

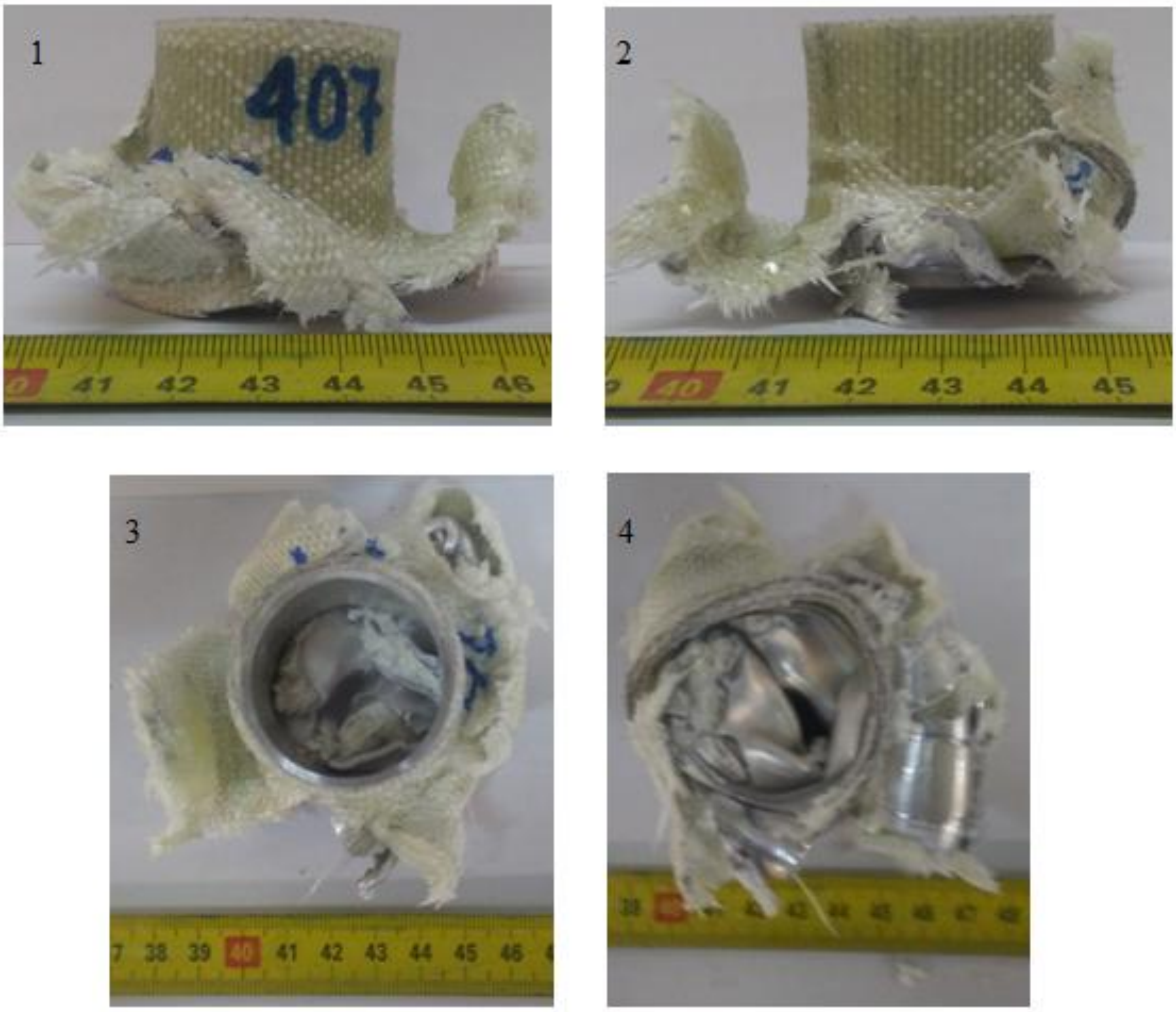
- Δοκίμιο 407 (στατικές συνθήκες αξονικής συμπίεσης)



Εικ.4.26:Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης δοκ. 407 και καμπύλη φορτίου-μετατόπισης. Η αρίθμηση (1-8) στην καμπύλη δηλώνει τις θέσεις των στιγμιότυπων

Πίνακας 4.11: Πειραματικά δεδομένα και αποτελέσματα (407)

Διαδρομη εμβόλου:	S= 60 mm
Μέσο φορτίο:	P mean=37.63 KN
Μέγιστο φορτίο:	Pmax=77.73KN
Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου:	c.f.e=0.48 %
Ενέργεια απορρόφησης:	Eabs=2257.8 Joule
Ειδική ενέργεια απορρόφησης:	Ws= 43.26 Joule/gr



Εικόνες 4.29.1-4.29.4: Υβριδικό δοκίμιο κοίλης κυλινδρικής γεωμετρίας μετά από αξονική συμπίεση. Οί φωτογραφίες 1,2 απεικονίζουν την πρόσοψη του δοκιμίου. Η φωτογραφία 3 την κάτοψη από την πλευρά επαφής με το κινούμενο εμβολο συμπίεσης . Στην φωτογραφία 4 παρουσιάζεται η κάτοψη του δοκιμίου που βρισκόταν σε επαφή με την σταθερή πλάκα της διάταξης θλίψης.

Κατά την δοκιμή αξονικής συμπίεσης του υβριδικού δοκιμίου 408 (Al-in) καταγράφηκε μέγιστο φορτίο (78,19 KN) στο τέλος της περιοχής ελαστικής παραμόρφωσης του υβριδικού δοκιμίου. Ακολούθως, ξεκίνησε προοδευτική αστοχία με μικτό τρόπο κατάρρευσης, η οποία εκκινήθηκε στο άνω άκρο (Εικ.4.26 φωτογραφία 1 προοδευτικής κατάρρευσης σε δοκιμής αξονικής φόρτισης).

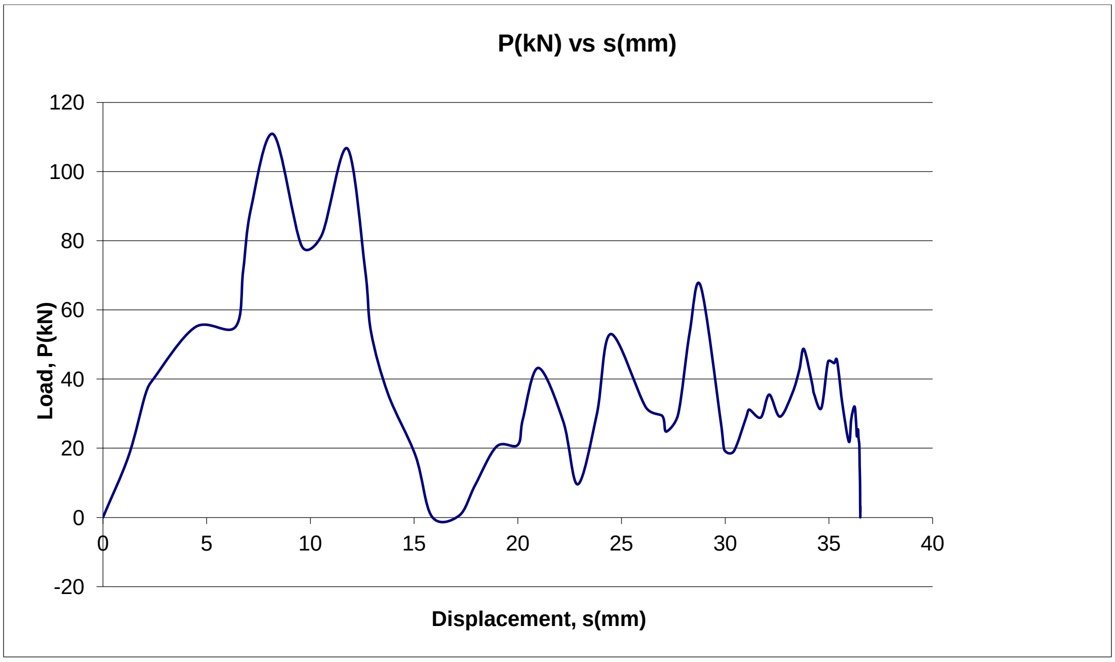
Η έναρξη πλαστικής παραμόρφωσης του εσωτερικού σωλήνα αλουμινίου κατόπιν της επίτευξης του μέγιστου φορτίου οδήγησε άμεσα στην αύξηση της συνολικής διαμέτρου αυτού, λόγω της δημιουργίας πλαστικού(ασύμμετρου) εκτατού αρμού(Εικ.4.26 φωτογραφία 2 προοδευτικής κατάρρευσης σε δοκιμής αξονικής φόρτισης). Η εν λόγω παραμόρφωση είχε σαν αποτέλεσμα την άσκηση εφελκυστικής καταπόνησης (έκταση) στην περιφέρεια του συνθέτου μανδύα που περιέβαλλε τον σωλήνα αλουμινίου. Λόγω αυτού, το περίβλημα συνθέτου, άρχισε να καταρρέει μέσω αξονικού διαχωρισμού της δομής του, στα σημεία που εσωτερικά σχηματιζόταν πλαστικός αρμός κατά στην πρόοδο της συμπίεσης. Η κατάρρευση του σύνθετου μανδύα συνεχίστηκε με εκτεταμένη συνδυασμένη θραύση, μέσω διάδοσης των αρχικών ρωγματώσεων στα σημεία που αυξανόταν τοπικά η διάμετρος του αλουμινίου λόγω της συμπίεσης. Συνολικά, η παρουσία του εσωτερικού μεταλλικού σωλήνα δεν επέτρεψε την αστοχία του σύνθετου με τον λεγόμενο splaying (mushrooming) τρόπο κατάρρευσης (εσωτερικός περιορισμός) που διαπιστώθηκε στα αντίστοιχα απλά σύνθετα κελύφη (δοκ. 410, 412).

Ταυτόχρονα λόγω της ύπαρξης του εξωτερικού σύνθετου μανδύα το αλουμινένιο κέλυφος παραμορφώθηκε άτακτα (χωρίς κάποιον σαφή ευδιάκριτο τρόπο κατάρρευσης) προς το εσωτερικό, σχηματίζοντας (εσωτερικούς) μη εκτατούς ευμεγέθεις λοβούς, σε διαδοχικές εγκάρσιες διατομές. Στις ζώνες συνάντησης των λοβών αυτών η παραμόρφωση τοπικά λάμβανε υψηλές τιμές, πέρα από το όριο θραύσης του υλικού, με αποτέλεσμα να δημιουργηθούν περιοχές ολοσχερούς θραύσης του μεταλλικού σωλήνα. Η επαλληλία πολλαπλών άτακτων τρόπων κατάρρευσης απεικονίστηκε στο διάγραμμα του φορτίου με ασαφή (μη περιοδικό) τρόπο, με την απουσία χαρακτηριστικών τοπικών μέγιστων και ελάχιστων τιμών, μετά την καταγραφή του αρχικού μέγιστου φορτίου της κατάρρευσης.

Το επαναληπτικό δοκίμιο 407 ακολούθησε την ίδια συμπεριφορά κατάρρευσης με το 408, Το μέγιστο φορτίο για το δοκίμιο 407 (Al-in) καταγράφηκε κατ αντιστοιχία στη λήξη της ελαστικής περιοχής και στην τιμή των 77.73KN. Η εκκίνηση της θραύσης προέκυψε από το κάτω άκρο (τυχαία) και η κατάρρευση του εν λόγω δοκιμίου περιείχε συνεχώς αυξανόμενες ρηγματώσεις στο μεταλλικό κέλυφος κατά την πρόοδο της συμπίεσης. Οι άτακτοι σχηματισθέντες πλαστικοί αρμοί που μετεξελίσσονταν σε σχισμές του αλουμινένου κελύφους, επηρέασαν και οδήγησαν στην άτακτη θραύση του σύνθετου μανδύα.

- Δοκίμιο 406 (δυναμικές συνθήκες αξονικής συμπίεσης)

Εικόνες 4.30.1-4.30.4: *Υβριδικό δοκίμιο κοίλης κυλινδρικής γεωμετρίας. Στην εικόνα 1 παρατίθεται το δοκίμιο πριν του ασκηθεί μηχανικό φορτίο μέσω της σφύρας. Στην εικόνα 2 παρουσιάζεται όψη του δοκιμίου μετά από την άσκηση κρουστικού φορτίου. Η εικόνα 3 παρουσιάζει την κάτοψη του συντεθλιμμένου δοκιμίου από την πλευρά επαφής με την ακίνητη πλάκα έδρασης. Η εικόνα 4 αποτελεί την τομή του δοκιμίου.*

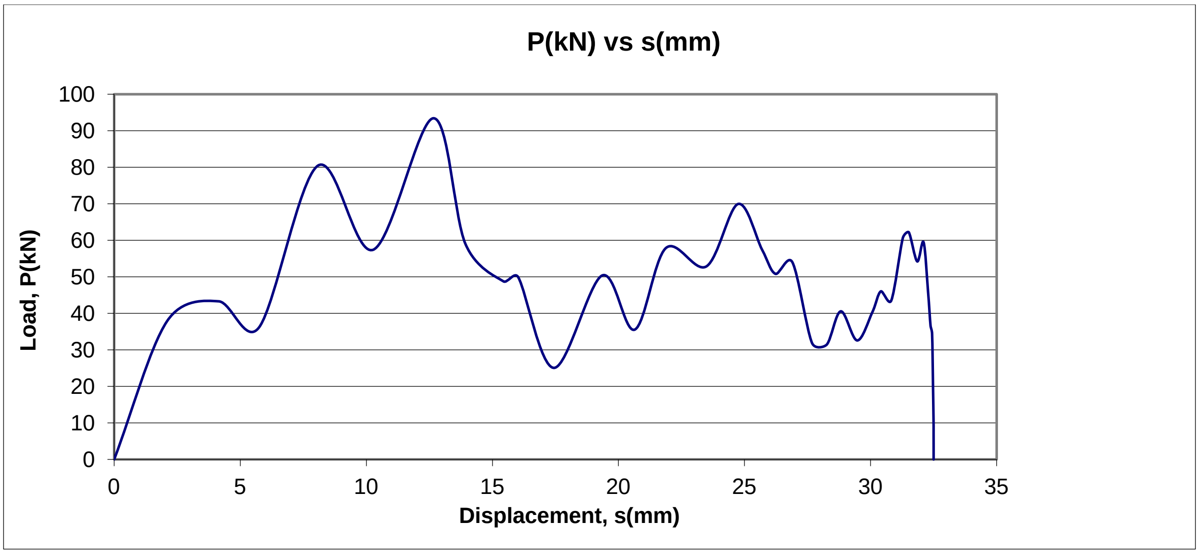


Πίνακας 412: Πειραματικά δεδομένα και αποτελέσματα (406)

Μετατόπιση:	S= 36,5 mm
Μέσο φορτίο:	P mean= 41.57KN
Μέγιστο φορτίο:	Pmax= 110,74 KN
Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου:	c.f.e= 0,38%
Ενέργεια απορρόφησης:	Eabs= 1517,40 Joule
Ειδική ενέργεια απορρόφησης:	Ws=47,24 Joule/gr

- Δοκίμιο 405 (δυναμικές συνθήκες αξονικής συμπίεσης)

Εικόνες 4.31.1-4.31.4: *Υβριδικό δοκίμιο κοίλης κυλινδρικής γεωμετρίας. Στην εικόνα 1 παρατίθεται το δοκίμιο πριν του ασκηθεί μηχανικό φορτίο μέσω της σφύρας. Στην εικόνα 2 παρουσιάζεται όψη του δοκιμίου μετά από την άσκηση κρουστικού φορτίου. Η εικόνα 3 παρουσιάζει την κάτοψη του συντεθλιμμένου δοκιμίου από την πλευρά επαφής με την ακίνητη πλάκα έδρασης. Η εικόνα 4 αποτελεί την τομή του δοκιμίου.*



Πίνακας 413: Πειραματικά δεδομένα και αποτελέσματα (405)

Μετατόπιση:	S= 32,5 mm
Μέσο φορτίο:	P mean= 50,12KN
Μέγιστο φορτίο:	Pmax= 93,38KN
Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου:	c.f.e= 0,54%
Ενέργεια απορρόφησης:	Eabs= 1628,87 Joule
Ειδική ενέργεια απορρόφησης:	Ws=57,81 Joule/gr

Η δυναμική αξονική καταπόνηση του υβριδικού δοκιμίου 406, είχε σαν αποτέλεσμα την πλαστική παραμόρφωση αυτου. Το μέγιστο φορτίο καταγράφηκε στην τιμή των 110,74 KN, στα 7.56 mm βράχυνσης.

Το μεταλλικό (εσωτερικό) κέλυφος του δοκιμίου παραμορφώθηκε με τακτικό/σαφή μη αξονοσυμμετρικό 2D diamond τρόπο, οι σχηματισθέντες λοβοί του οποίου σχηματίστηκαν διαδοχικά υπό γωνία 90^o (Εικ 4.30.4). Οι σχετικές διαστάσεις του μεταλλικού κελύφους, όπως προέκυψε στις αντίστοιχες στατικές και δυναμικές δοκιμές, «προβλέπουν» αξονοσυμμετρικό τρόπο κατάρρευσης. Η αλληλεπίδραση όμως του αλουμινίου με το σύνθετο εξωτερικό κέλυφος και τον περιορισμένο χώρο που αυτό παρείχε οδήγησε στην προαναφερθείσα κατάρρευση .

Το σύνθετο μέρος του δοκιμίου παρακολούθησε επακριβώς την παραμόρφωση του μεταλλικού δοκιμίου και υπέστη περιφερική διάρρηξη, μόνο στα σημεία που επηρεάστηκαν από τις προεξοχές των λοβών του εσωτερικά τοποθετημένου αλουμινίου.

Το δοκίμιο 405, παρουσίασε όμοια χαρακτηριστικά κατάρρευσης με το 406. Η διαφορά στην απόκριση των δύο δοκιμίων στο αξονικά εφαρμοζόμενο φορτίο έγκειται στο ότι το μεταλλικό τμήμα του δοκιμίου κατέρρευσε με άτακτο diamond τρόπο (χωρίς την ύπαρξη σαφούς διαδοχής στους σχηματισθέντες λοβούς). Στις ζώνες σύγκλισης των λοβών παρατηρήθηκε θραύση του υλικού λόγω της υψηλής παραμόρφωσης τοπικά.

Η μορφή των διαγραμμάτων του φορτίου και στα δύο δοκίμια παρουσιάζει τα πολλαπλά μέγιστα και ελάχιστα της κρουστικής καταπόνησης και της απουσίας φιλτραρίσματος των τιμών. Η συνολική διακύμανση όμως απεικονίζει ευδιάκριτα τον τρόπο κατάρρευσης.

Βιβλιογραφία κεφαλαίου 4.2.3, 4.2.4

1 Simonetta Boria, Alessandro Scattina, Giovanni Belingardi. Axial Crushing of Metal-Composite Hybrid Tubes: Experimental Analysis. Procedia Structural integrity (2018) 102-117.

2 J.Bouchet, E.Jacquelin, P.Hametin. Dynamic Axial Crushing of Combined Composite Aluminum Tube: The Role of Both Reinforcement and Surface Treatments. Composite Structures 56 (2002) 87-96.

3 Hee Chul Kim, Dong Kil Shin, Jung Ju Lee, Jun Beom Kwon. Chrashworthiness of Alouminioum/ CFRP Square Hollow Section Beam Under Axial Impact Loading for Crash Box Application, Composite Structures 112 (2014) 1-10.

4 Guohua Zhu, Guangyong Sun, Qiang Liu, Guangyao Li, Qing Li. On Chrushing Characteristics of Different Configurations if Metal- Composites Hybrid Tubes. Composite Structures 175 (2017) 58-69.

5 Guangyong Sun, Zhen Wang, Jiaying Hong, Kai Song, Qing Li. Experimental investigation of the Quasi-Static Axial Crushing Behavior of Filament- Wound CFRP Hybrid Tubes.

6 Guangyong Sun, Shunfeng Li, Guangyao Li, Qing Li. On Crashing Behaviors of Aluminioum/CFRP Tubes Subjected to Axial and Oblique Loading: An Experimental Study. Composites Part B 145 (2018) 47-56.

7 A.B.M Supian, S.M.Sapuan, M.Y.M Zuhri, Z.E.Syams, H.Hj.Ya. Hybrid Reinforced Thermoset Polymer Composite in Energy Absorption Tube. Defense Technology (2018)

8 M.Stameovic, S.Putic, M.Zricic, Lj.Milovic, J.Pavlovic. Specific Energy Absorption Capacity of Glass-Polyester Composite Tubes Under Static Compressive Loading (2010)

Κεφάλαιο 5 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

5.1 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων και συγκριτικά σχόλια

Η μεγάλη διαφορά που εμφανίζουν οι διακυμάνσεις του φορτίου μεταξύ της κατάρρευσης των σύνθετων (ψαθυρών) κελυφών (δοκ.410 και 412) και εκείνης των μεταλλικών (όλκιμων) κελυφών (δοκ.403 και 404) είναι εμφανέστατη. Στην πρώτη περίπτωση λαμβάνει χώρα προοδευτική σύνθλιψη με αλλεπάλληλες μικρο-θραύσεις του υλικού (progressive crushing), με αποτέλεσμα η καμπύλη του φορτίου να παρουσιάζεται με αυξομειώσεις πολύ μικρού εύρους και πολύ υψηλής συχνότητας, ενώ αντίθετα, στη δεύτερη περίπτωση λαμβάνει χώρα υψηλή πλαστική παραμόρφωση με σχηματισμό διαδοχικών αναδιπλώσεων (λοβών) σχετικά μεγάλου μήκους (progressive folding), με αποτέλεσμα η καμπύλη του φορτίου να εμφανίζει αυξομειώσεις μεγάλου εύρους και μικρής συχνότητας.

Το ύψος πτώσης της σφύρας στις δυναμικές δοκιμές επιλέχθηκε στα 2.5 m καθώς για την συγκεκριμένη επιλογή αλουμινένιων σωλήνων απέδωσε ένα σημαντικό μήκος βράχυνσης τους για πλήρη ανάπτυξη κατάρρευσης. Κρατώντας λοιπόν σαν δεδομένο το ύψος πτώσης της σφύρας, άρα την κινητική ενέργεια πρόσκρουσης πραγματοποιήθηκαν οι δυναμικές δοκιμές και των υπόλοιπων υβριδικών κελυφών. Τα σύνθετα κελύφη δεν ήταν δυνατόν να διατηρηθούν σε όρθια θέση μετά την πρόσκρουση της σφύρας , αφού περιστρεφόντουσαν ακαριαία και η πρόσκρουση μετατρεπόταν σε πλευρική. Έτσι, τα σύνθετα λόγω και της περιορισμένης διαθεσιμότητάς τους για περισσότερες δυναμικές καταπόνησει,ς δεν υπέστησαν τελικά τέτοιου είδους δοκιμή. Όπως ήταν αναμενόμενο, τα υβριδικά κελύφη (ως περισσότερο ενισχυμένα) υπέστησαν πολύ μικρότερη βράχυνση, οπότε η συγκριτική αξιολόγηση τους δεν έγινε με βάση την ενέργεια απορρόφησης, αλλά τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά της συμπεριφοράς τους (μέσο φορτίο, ειδική ενέργεια απορρόφησης).

Όσον αφορά τις στατικές δοκιμές, και με δεδομένο το ύψος όλων των δοκιμίων (100mm) επιλέχθηκε συνολική (ελεγχόμενη) βράχυνση 60 mm προκειμένου να αναπτυχθεί πληρέστερα η απόκρισή τους στη στατική φόρτιση και η σχετική αξιολόγηση. Επομένως, συνολικά επιλέχθηκε για τη δυναμική καταπόνηση ύψος πτώσης της σφύρας 2,5 m και μήκος βράχυνσης 60 mm με ταχύτητα φόρτισης 10mm/min.

Η συγκριτική αξιολόγηση που ακολουθεί βασίζεται στις αριθμητικές τιμές των χαρακτηριστικών κατάρρευσης που προέκυψαν και έχουν ήδη αναφερθεί στους πίνακες των αντίστοιχων δοκιμίων που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Σε περιπτώσεις που οι βραχύνσεις των αντίστοιχων δοκιμίων είναι διαφορετικές, ο πιο ασφαλής τρόπος σύγκρισης είναι η χρήση των τιμών μέσου φορτίου και ειδικής ενέργειας απορρόφησης

Οι τιμές των χαρακτηριστικών αξόνων κατάρρευσης για τους σωλήνες αλουμινίου είναι εφάμιλλες τόσο μεταξύ των επαναληπτικών δοκιμών σε στατικές καταπονήσεως μεμονωμένα όσο και μεταξύ της στατικής και δυναμικής καταπόνησης. Η κυριότερη διαφορά μεταξύ στατικής και δυναμικής καταπόνησης έχει να κάνει με το αρχικό /μέγιστο φορτίο που παρουσιάζεται λίγο μεγαλύτερο στην δυναμική καταπόνηση λόγω της κρουστικής φύσης της, και ως εκ τούτου στους αντίστοιχους σωλήνες. Γενικά, οι τιμές της δυναμικής καταπόνησης επηρεάζονται σχετικά από την ταλαντωτική συμπεριφορά και την απουσία φιλτραρίσματος στην καμπύλη του φορτίου. Χαρακτηριστική είναι η διαφορά των πέντε mm βράχυνσης που προέκυψε μεταξύ των δυναμικών δοκιμών των δύο αλουμινένιων κελυφών. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε διαφορά στις συνοριακές συνθήκες επαφής των άκρων των δοκιμίων με την αντίστοιχη κάτω πλάκα (στήριξης) της σφύρας, σε συνδυασμό με τις δυναμικές συνθήκες και τα απότοκα αδρανειακά φαινόμενα των σχετικών δοκιμίων.

Στα αμιγώς σύνθετα κελύφη, όπως προαναφέρθηκε διεξήχθησαν μόνο στατικές δοκιμές . Μεταξύ των δύο δοκιμίων διακρίνουμε σχεδόν πλήρη επαναληψιμότητα, με την μόνη διαφορά στην τιμή του αρχικού φορτίου, και ως εκ τούτου στον συντελεστή ομοιομορφίας φορτίου. Οι λόγοι της διαφοροποίησης έχουν αναπτυχθεί πλήρως στο εδάφιο του προηγουμένου κεφαλαίου (συνοριακές συνθήκες επαφής, τοπική δομική ατέλεια του υλικού)

Στα υβριδικά κελύφη με εσωτερικά τοποθετημένο τον σωλήνα αλουμινίου, διαπιστώθηκαν διαφορές μεταξύ των δύο στατικών δοκιμών, με εξαίρεση τα τοπικά φορτία που ήταν εφάμιλλα. Είναι προφανές ότι σε μία τέτοια περίπτωση, οι διαφοροποιήσεις στα υπόλοιπα μεγέθη είναι αναμενόμενες καθώς εξ ορισμού είναι αλληλένδετα. Το μέσο φορτίο ή για την ίδια βράχυνση η ενέργεια απορρόφησης είναι η βάση υπολογισμού των υπόλοιπων μεγεθών. Η διαφορά λοιπόν εδώ, στο μέσο φορτίο μπορεί να αποδοθεί στη δομική διαφορά μεταξύ των δύο χειροποίητων συνθέτων τμημάτων και την ποιότητα συνάφειας σύνδεσης αυτών με το αντίστοιχο μεταλλικό τμήμα. Η διαφοροποίηση, επιπλέον των χαρακτηριστικών της δυναμικής δοκιμής σε σχέση και με τις δύο αντίστοιχες στατικές, επίσης μπορεί να αποδοθεί στους παραπάνω λόγους καθώς και στα ποιοτικά χαρακτηριστικά της δυναμικής δοκιμής (αδρανειακά φαινόμενα, απουσία φιλτραρίσματος καμπύλης φορτίου).

Επικαλούμενοι τους ίδιους λόγους μπορούμε να ερμηνεύσουμε και τις διαφορές που καταγράφηκαν τόσο μεταξύ των στατικών και μεταξύ των δυναμικών δοκιμών, όσο και μεταξύ στατικών και δυναμικών δοκιμών στα υβριδικά κελύφη με εξωτερικά διατεταγμένο τον σύνθετο κυλινδρικό μανδύα.

Συγκρίνοντας τα δοκίμια αλουμινίου με τα υβριδικά δοκίμια εξωτερικού αλουμινίου προκύπτουν οι εξής παρατηρήσεις. Το μέγιστο φορτίο των δοκιμίων αλουμινίου καταγράφεται σε αμβλεία κορυφή σε αντίθεση με τα Al-out δοκίμια που το μέγιστο φορτίο καταγράφεται σε αιχμηρή κορυφή λόγω της συνύπαρξης με το εσωτερικό σύνθετο. Ο πρώτος πλαστικός αρμός, δεν διαμορφώνεται ελεύθερα/ απρόσκοπτα, όπως στα σκέτα αλουμίνια καθώς, η ταυτόχρονη παρουσία εσωτερικού συνθέτου μεταβάλει τις συνθήκες παραμόρφωσης/κατάρρευσης. Ο πρώτος πλαστικός αρμός διαμορφώνεται πιο σύντομα και το φορτίο στην περιοχή αυτή της καμπύλης εμπεριέχει και την ταυτόχρονη φόρτιση του εσωτερικού συνθέτου.

Η συγκριτική αξιολόγηση μεταξύ των μεταλλικών και συνθέτων κελυφών αθροιστικά και των υβριδικών κελυφών θα γίνει με βάσει τις στατικές δοκιμές , καθώς δυναμικές δοκιμές στα σύνθετα όπως προαναφέρθηκε, δεν διεξάχθηκαν.

Μεσοσταθμικά, δηλαδή συγκρίνοντας τις μέσες τιμές των δύο δοκιμίων ανά περίπτωση δεν προκύπτει καλύτερη επίδοση των υβριδικών κελυφών, θεωρώντας ως σημείο αναφοράς τον βασικό παράγοντα του μέσου φορτίου. Διαπιστώνεται ότι το άθροισμα των μέσων μεσοσταθμικών φορτίων των απλών αλουμινένιων και συνθέτων σωλήνων είναι σχετικά μεγαλύτερο από το μεσοσταθμικό μέσο φορτίο και των δύο ειδών υβριδικού κελύφους (εξωτερικά αλουμίνιο, εσωτερικά αλουμίνιο).

Στα υβριδικά κελύφη με εξωτερικά τοποθετημένο το αλουμίνιο, το σύνθετο έχει λίγο μικρότερες διαστάσεις (ενεργή διατομή) από το απλό σύνθετο, αφού αυτό κατασκευάστηκε με εσωτερικό καλούπι τον αλουμινένιο σωλήνα. Οπότε η πλέον αξιόπιστη σύγκριση των μεμονομένων κελυφών αθροιστικώς είναι με τα υβριδικά κελύφη του εξωτερικά τοποθετημένου σύνθετου σωλήνα. Και πάλι μεσοσταθμικά υστερούν τα υβριδικά κελύφη. Το δοκ408 όμως, παρουσιάζει μέσο φορτίο (έστω και οριακά) μεγαλύτερο από το άθροισμα των υψηλότερων μέσων φορτίων των μεμονωμένων. Πρόκειται για το υβριδικό κέλυφος στο οποίο ο αλουμινένιος σωλήνας κατέρρευσε αποκλειστικά προς τον εσωτερικό χώρο του σύνθετου περιβλήματος σχηματίζοντας αξονικά πυκνούς άτακτους μη εκτατούς λοβούς, ενώ το σύνθετο κατέρρευσε προοδευτικά εκτεινόμενο προς τα έξω και διατηρούμενο αλώβητο κάτω από το μέτωπο κατάρρευσης. Δεν παρουσιάστηκαν δηλαδή, εκτεταμένες διαμήκης ρωγμές στο αλουμινένιο κέλυφος , έκτασή του προς τα έξω και ταυτόχρονη πολλαπλή διάρρηξη του σύνθετου μανδύα (όπως στο όμοιο δοκ407, με το σχετικά μειωμένο μέσο φορτίο). Επομένως, πολύ σημαντικό ρόλο φαίνεται ότι παίζουν η καλή ποιότητα κατασκευής του συνθέτου κελύφους (απουσία δομικών ασυνεχειών) και σύνδεσής του με το μεταλλικό ζευγάρι του. Επειδή όμως τα συγκεκριμένα δοκίμια είναι χειροποίητα, απαιτούνται επανειλημμένες απόπειρες κατασκευής, με αντίστοιχες δοκιμές αξιολόγησης, ώστε να προκύπτει ένας μόνιμος και ασφαλής τρόπος κατάρρευσης. Εξάλλου , η σημαντικότερη «απώλεια» που προκύπτει στην αξονική κατάρρευση των υβριδικών κελυφών φαίνεται ότι είναι η προοδευτική κατάρρευση του συνθέτου κελύφους με τον αποδοτικότερο τρόπο απορρόφησης ενέργειας (splaying/mushrooming mode) που παρατηρήθηκε στα απλά σύνθετα κελύφη. Αυτό αποδίδεται στην έλλειψη διαθέσιμου χώρου είτε εξωτερικά είτε εσωτερικά, λόγω της ταυτόχρονης ύπαρξης του εξωτερικού ή εσωτερικού, αντίστοιχα αλουμινένιου σωλήνα. Κάτι τέτοιο όμως είναι αναπόφευκτο από την γεωμετρία/ διάταξη της συγκεκριμένης υβριδικής κατασκευής. Μία επιλογή διαφορετικής διάταξης ενισχυτικών ινών, που θα οδηγούσε σε κατάρρευση τύπου (περιορισμένου στην ενεργό διατομή) fragmentation crushing (ο δεύτερος εξ ίσου αποδοτικός τρόπος progressive crushing που αναφέρεται στην βιβλιογραφία) θα είχε ενδιαφέρον να δοκιμαστεί σχετικά. Ο τρόπος αυτός κατάρρευσης (Fragmentation mode) δεν προϋποθέτει έκταση (splaying) αποχωριζόμενων μεταξύ τους στρώσεων, οπότε δεν είναι ζωτικής σημασίας η ύπαρξη διαθέσιμου χώρου για αυτό.

5.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Το ενδιαφέρον επικεντρώνεται κυρίως στο σύνθετο τμήμα του υβριδικού κελύφους:

- Επανάληψη της ίδιας διαδικασίας για εξασφάλιση καλύτερης ποιότητας υβριδικών δοκιμίων
- Χρήση εναλλακτικών διατάξεων και υλικών ενισχυτικών ινών, καθώς και αριθμού στρώσεων και αλληλουχίας επιστοίβασης.
- Χρήση καλύτερης ποιότητας συνθετικής μήτρας.
- Διαμόρφωση άκρου (triggering) συνολικά στο υβριδικό κέλυφος, η διαφοροποίηση του μήκους των δύο συστατικών (συνθέτου και μεταλλικού), καθιστώντας το μεταλλικό κατά τι κοντύτερο από το σύνθετο, προκειμένου να διατεθεί στο τελευταίο ο απαιτούμενος χώρος για ανάπτυξη μετώπου κατάρρευσης με τον splaying mode.