



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Δ.Ε. ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΞΟΝΙΚΗ ΣΥΜΠΙΕΣΗ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΕΛΥΦΩΝ
ΕΠΕΝΔΥΜΕΝΩΝ ΕΣΩΤΕΡΙΚΑ ΜΕ ΠΟΛΥΜΕΡΕΣ ΥΛΙΚΟ

Axial compression of metallic shells with internal polymeric coating

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΚΟΚΟΤΟΣ

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2012

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	6
---------------	---

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΑΞΟΝΙΚΗΣ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΩΝ ΚΕΛΥΦΩΝ

1.1. Γενική περιγραφή της αξονικής κατάρρευσης κυλινδρικών σωλήνων.....	9
1.2. Αξονοσυμμετρικός τρόπος κατάρρευσης.....	12
1.2.1. Μοντέλο των <i>Gupta</i> και <i>Abbas</i> για την αξονική κατάρρευση κυλινδρικών σωλήνων.....	14
1.2.2. Μοντέλο των <i>Abbas</i> , <i>Gupta</i> , <i>Tyagi</i> και <i>Arif</i> για δημιουργία καμπύλων λοβών.....	20
1.2.3. Μοντέλο των <i>Abramowicz</i> και <i>Jones</i> για την αξονική κατάρρευση κυλινδρικών σωλήνων.....	27
1.3. Μη αξονοσυμμετρικός τρόπος κατάρρευσης.....	29
1.4. Μικτός τρόπος κατάρρευσης.....	30
1.5. Λυγισμός.....	32

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΑΞΟΝΙΚΗ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗ ΛΕΠΤΟΤΟΙΧΩΝ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΩΝ ΣΩΛΗΝΩΝ ΑΠΟ ΔΥΟ ΕΠΑΛΛΗΛΑ ΥΛΙΚΑ.....

34

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

3.1. Δοκίμια.....	39
3.2. Συνθήκες πειραμάτων.....	43

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

4.1. Επεξεργασία πειραματικών αποτελεσμάτων.....	46
4.2. Παρουσίαση αποτελεσμάτων.....	49
4.2.1. Δοκίμιο A1.....	49
4.2.2. Δοκίμιο P1.....	53
4.2.3. Δοκίμιο P2.....	57
4.2.4. Δοκίμιο A1P1.....	61
4.2.5. Δοκίμιο A1P2.....	65
4.2.6. Δοκίμιο A2.....	69
4.2.7. Δοκίμιο P3.....	73
4.2.8. Δοκίμιο P4.....	77
4.2.9. Δοκίμιο A2P3.....	81
4.2.10. Δοκίμιο A2P4.....	85

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

5.1. Εισαγωγικά στοιχεία – μεγέθη που εξετάζονται και παράγοντες ως προς τους οποίους γίνονται οι συγκρίσεις.....	89
5.2. Σύγκριση σωλήνων από δύο επάλληλα υλικά με τους σωλήνες από τους οποίους αποτελούνται.....	91
5.3. Σύγκριση μονών σωλήνων από το ίδιο υλικό μεταξύ τους.....	99

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

6.1. Συνοπτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων και συμπεράσματα.....	108
6.2. Προτάσεις για συνέχιση και επέκταση της μελέτης.....	110

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	112
--------------------------	------------

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών του ΕΜΠ, την περίοδο Μαρτίου/Ιουλίου του 2012 με σκοπό την ολοκλήρωση των σπουδών στο τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Η εργασία αφορά τη μελέτη της αξονικής συμπίεσης μεταλλικών κελυφών επενδυμένων εσωτερικά με πολυμερές υλικό. Στα πλαίσια της εργασίας κατασκευάστηκαν δοκίμια και έγιναν πειράματα στις εγκαταστάσεις του εργαστηρίου. Λήφθηκαν φωτογραφίες από την κατάρρευσή τους, ενώ αναλύθηκε και ο τρόπος που κατέρρευσαν. Ακόμα, υπολογίστηκαν τα βασικά μεγέθη της συμπίεσης και συγκρίθηκαν και αξιολογήθηκαν τα αποτελέσματα των πειραμάτων. Τέλος, έγινε η εξαγωγή των συμπερασμάτων από αυτή την πειραματική διερεύνηση.

Η δομή της εργασίας περιλαμβάνει δύο βασικά μέρη, το θεωρητικό και το πειραματικό. Το θεωρητικό μέρος αποτελείται από τα κεφάλαια ένα και δύο, ενώ το πειραματικό μέρος τα κεφάλαια τρία έως έξι.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μία γενική αναφορά στη θεωρία της αξονικής κατάρρευσης κυλινδρικών σωλήνων. Γίνεται εκτενής αναφορά στη βιβλιογραφία και παραπομπή στις μελέτες που έχουν διεξαχθεί σε αυτόν τον τομέα των καταστροφικών καταπονήσεων. Έτσι, περιγράφονται τα βασικά μοντέλα κατάρρευσης κυλινδρικών σωλήνων και η μαθηματική ανάλυση που τα διέπει.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρατίθεται το μοντέλο της αξονικής κατάρρευσης λεπτότοιχων κυλινδρικών σωλήνων από δύο επάλληλα υλικά. Αυτές οι διατάξεις αποτελούν και το κύριο αντικείμενο μελέτης για την παρούσα εργασία.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται η πειραματική διαδικασία. Γίνεται παρουσίαση των δοκιμίων που χρησιμοποιήθηκαν, των υλικών, του τρόπου κατασκευής και της γεωμετρίας τους. Έπειτα περιγράφονται οι συνθήκες των πειραμάτων, ο τρόπος που διεξήχθησαν και ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε.

Στη συνέχεια, στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων. Δηλαδή, αναλύεται ο τρόπος που κατέρρευσαν τα δοκίμια, υπολογίζονται τα βασικά μεγέθη της κατάρρευσης και παρατίθενται οι φωτογραφίες από τη διαδικασία των πειραμάτων.

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται η σύγκριση και η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των πειραμάτων. Η ανάλυση του κεφαλαίου αυτού αποσκοπεί στο συσχετισμό των μεγεθών της κατάρρευσης των δοκιμίων

με τα χαρακτηριστικά τους. Η σύγκριση γίνεται μετά από κατάλληλη ομαδοποίηση των δοκιμίων και ερμηνεύονται και αξιολογούνται τα αποτελέσματά της.

Στο έκτο κεφάλαιο καταγράφονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τα αποτελέσματα των πειραμάτων. Αυτά κυρίως αφορούν την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας των επενδυμένων εσωτερικά μεταλλικών σωλήνων και τις περιπτώσεις στις οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν τέτοιες διατάξεις. Ακόμα, γίνονται ορισμένες προτάσεις για συνέχιση και επέκταση της έρευνας πάνω στο αντικείμενο της εργασίας.

Τέλος, ακολουθεί η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε, η οποία αφορά το θέμα της διπλωματικής εργασίας αλλά και γενικότερα το αντικείμενο των διατάξεων απορρόφησης ενέργειας.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τα πρόσωπα που συνέβαλαν στην περάτωση της διπλωματικής μου εργασίας και κυρίως τον επιβλέποντα καθηγητή και διευθυντή του εργαστηρίου κ. Δημήτριο Ε. Μανωλάκο, ο οποίος μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με αυτό το ενδιαφέρον θέμα και ήταν πάντα πρόθυμος να βοηθήσει όπου χρειαζόταν.

Επιπλέον, ιδιαίτερες ευχαριστίες εκφράζονται προς τον υποψήφιο διδάκτορα και μέλος Ε.Ε.ΔΙ.Π. κ. Πρωτεσίλαο Κωστάζο για την άριστη συνεργασία που είχαμε το διάστημα της εκπόνησης της εργασίας. Με τη βοήθεια και τις υποδείξεις του τόσο κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων όσο και στην ανάλυση και στο σχολιασμό των αποτελεσμάτων τους, συνέβαλε σε μεγάλο βαθμό στην ολοκλήρωσή της εργασίας.

Ακόμα, ευχαριστώ το μέλος Ε.Τ.Ε.Π. του τομέα κ. Κωνσταντίνο Κερασιώτη καθώς επίσης το τεχνικό προσωπικό του εργαστηρίου και τον κ. Νίκο Μελισσά, ο οποίος κατασκεύασε τα δοκίμια. Η συμβολή τους υπήρξε καθοριστική διότι βοήθησαν στη διεξαγωγή των πειραμάτων όπως επίσης και σε όλες τις τεχνικές εργασίες που χρειάστηκαν.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για τη στήριξη που μου παρείχε τα χρόνια της φοίτησής μου στη σχολή.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στις μέρες μας, η κοινωνία επιδεικνύει ολοένα και περισσότερο ενδιαφέρον για τον ασφαλή σχεδιασμό κατασκευών και συστημάτων που σκοπό έχουν να προστατέψουν την ανθρώπινη ζωή και να μην επιβαρύνουν οικονομικά την ίδια την κοινωνία και το περιβάλλον. Τελευταία, υπάρχει η αντίληψη ότι μπορεί να επιτευχθεί μεγάλη πρόοδος ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι κίνδυνοι από τα ατυχήματα που αφορούν τις συγκρούσεις.

Με τη ραγδαία ανάπτυξη στον τομέα των μεταφορών, επίγειων, εναέριων και θαλάσσιων, που συνέβη τις τελευταίες δεκαετίες καθώς και με την αύξηση των συγκρούσεων που έχει επιφέρει η ευρεία χρήση τους το ενδιαφέρον των κοινωνιών και των επιστημόνων για τις συγκρούσεις τα τελευταία χρόνια αυξήθηκε σημαντικά.

Για την κατασκευή των κελυφών σχεδόν όλων των μέσων μεταφοράς όπως είναι τα μηχανοκίνητα οχήματα, τα πλοία, τα αεροσκάφη και οι σιδηροδρομικές συγκοινωνίες κατά κύριο λόγο χρησιμοποιούνται δομές από ελάσματα. Κατά τη διάρκεια των συγκρούσεων των κατασκευών, τα ελασμάτινα κελύφη τους υπόκεινται σε μεγάλα θλιπτικά φορτία που οδηγούν σε μεγάλες παραμορφώσεις.

Η μελέτη λοιπόν των επιστημόνων έχει επικεντρωθεί στο σχεδιασμό κατασκευών που μπορούν να απορροφήσουν αποτελεσματικά τα φορτία των συγκρούσεων για την προστασία των ανθρώπων και του περιβάλλοντος [1],[2]. Ακόμα, τα αποτελέσματα των μελετών για διατάξεις απορρόφησης ενέργειας μπορούν να αξιοποιηθούν σε ένα ευρύ φάσμα μηχανολογικών κατασκευών όπως συγκεκριμένα μέρη πλοίων που είναι πιθανό να συναντήσουν υφάλους, ιδιαίτερα όταν είναι πλοία μεταφοράς υγρών καυσίμων, δεξαμενές πετρελαίου αλλά και για ασφαλείς πυρηνικούς αντιδραστήρες.

Διάταξη απορρόφησης ενέργειας ορίζεται ως το σύστημα το οποίο μετατρέπει ολικά ή μερικά την κινητική ενέργεια της κρούσης σε κάποια άλλη μορφή ενέργειας. Η μετατροπή αυτή μπορεί να είναι είτε αναστρέψιμη, όπως συμβαίνει με τη συμπίεση στα συμπιεστά ρευστά και η ενέργεια από την ελαστική παραμόρφωση στα στερεά, είτε μη αναστρέψιμη, όπως η ενέργεια της πλαστικής παραμόρφωσης. Σκοπός των σχεδιαστών συστημάτων απορρόφησης ενέργειας είναι η απορρόφηση μεγάλου ποσοστού της κινητικής ενέργειας σε μη αντιστρεπτή μορφή ώστε οι άνθρωποι τραυματισμοί και οι υλικές ζημιές να ελαχιστοποιούνται.

Τα τελευταία χρόνια έχει διεξαχθεί ένα πλήθος μελετών για αποτελεσματικές διατάξεις απορρόφησης ενέργειας διαφόρων γεωμετριών και υλικών. Συγκεκριμένα έχουν μελετηθεί κυλινδρικοί

σωλήνες, τετραγωνικοί και ορθογωνικοί σωλήνες όπως επίσης και κεκλιμένοι, κωνικοί, πολυγωνικοί ή σωλήνες με κατάλληλα διαμορφωμένα άκρα. Ακόμα οι μελετήθηκε η πλήρωση σωλήνων με υγρά, αφρούς ή άμμο για τη μεγιστοποίηση της απόδοσής τους. Επιπλέον έχει αναλυθεί η απόκριση κατασκευών σε αξονικά αλλά και πλάγια κρουστικά φορτία.

Η πλειοψηφία των συγκρούσεων συμβαίνει σε δυναμικές συνθήκες. Πολλοί μελετητές όμως διεξάγουν πειράματα σε στατικές συνθήκες ώστε να είναι πιο εύκολη η παρατήρηση των διαδικασιών της κατάρρευσης και της ανάλυσης των αποτελεσμάτων που προκύπτουν. Έτσι στη βιβλιογραφία οι αναλύσεις των μηχανικών αφορούν στατικές αλλά και δυναμικές συνθήκες σύγκρουσης.

Κρίσιμη παράμετρο στην απόκριση ενός συστήματος σε κρουστικά φορτία αποτελεί το υλικό της κατασκευής. Κατά καιρούς έχει χρησιμοποιηθεί πληθώρα υλικών στη μελέτη διατάξεων απορρόφησης ενέργειας. Κυρίως χρησιμοποιούνται μεταλλικά υλικά, για παράδειγμα κράματα χάλυβα ή αλουμινίου αλλά και άλλα υλικά όπως πολυμερή ή σύνθετα. Στην παρούσα εργασία τα δοκίμια που μελετήθηκαν αποτελούνταν από αλουμίνιο και πλαστικό.

Επίσης, η εξέλιξη στο χώρο των ηλεκτρονικών υπολογιστών έχει συντελέσει σημαντικά στην ανάπτυξη της μελέτης διατάξεων απορρόφησης ενέργειας. Παράλληλα με τα αποτελέσματα των πειραμάτων που γίνονται, οι συγκρούσεις μπορούν να προσομοιωθούν με τη βοήθεια των υπολογιστών και να αναλυθούν περαιτέρω. Ακόμα, με αυτόν τον τρόπο είναι εύκολο να μελετηθεί η επίδραση της μεταβολής των διαφόρων μεγεθών των κατασκευών στη διαδικασία της κατάρρευσής τους. Βέβαια, τα πειραματικά δεδομένα παραμένουν απαραίτητα για την ανάλυση των συγκρούσεων γιατί σε αυτά υπεισέρχονται ένα πλήθος αστάθμητων παραγόντων όπως διάφορες ατέλειες στο υλικό ή στη στήριξη των προς κατάρρευση δοκιμίων.

Τα πειράματα που έγιναν για το σκοπό της εργασίας αφορούσαν κυλινδρικούς σωλήνες. Από τη σκοπιά της ικανότητας για απορρόφηση ενέργειας έχει βρεθεί ότι οι κυλινδρικοί σωλήνες αποκρίνονται πολύ καλά στα αξονικά φορτία. Αυτή τους η ιδιότητα ίσως εξηγεί το γιατί αποτελούν τις πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες διατάξεις για συστήματα απορρόφησης ενέργειας. Κατά τη διάρκεια της κατάρρευσης παρέχουν μια αρκετά σταθερή καμπύλη φορτίου, ανάλογα βέβαια με το υλικό και τις διατάξεις, κάτι που είναι ένα από τα βασικά ζητούμενα σε τέτοια συστήματα. Τέλος, αποτελούν απλές σχετικά κατασκευές με χαμηλό κόστος και αρκετά καλή συμπεριφορά.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω ένα από τα δύο υλικά που χρησιμοποιήθηκαν είναι το αλουμίνιο. Τα κράματα του αλουμινίου χρησιμοποιούνται πολύ συχνά στις μηχανολογικές κατασκευές κυρίως

λόγω της χαμηλής τους πυκνότητας $2,7 \text{ g/cm}^3$ και καλής αντίστασής τους στη διάβρωση. Το μειονέκτημα των κραμάτων αλουμινίου είναι η μικρή παραμορφωσιμότητα σε σχέση με το χάλυβα. Με ακριβείς υπολογισμούς και ελέγχους μπορούν να προκύψουν ελαφριές και σύνθετες μορφές αλουμινένιων μερών. Η κατεργασία του αλουμινίου λόγω των δυνατοτήτων που παρουσιάζει χρησιμοποιείται στην αυτοκινητοβιομηχανία για πολλά χρόνια για την παραγωγή μονάδων σύνθετων κατασκευών.

Η παρούσα εργασία αφορά την διερεύνηση της αξονικής κατάρρευσης μεταλλικών κυλινδρικών σωλήνων επενδυμένων εσωτερικά με πλαστικό σε στατικές συνθήκες. Τοποθετήθηκαν δηλαδή πλαστικοί σωλήνες μέσα σε αλουμινένιους ώστε να αποτελέσουν μία ενιαία κατασκευή. Αφού επιβλήθηκε η κατάρρευση δοκιμίων μόνο αποκλειστικά από αλουμίνιο και αποκλειστικά από πλαστικό, έγινε η σύνθεση δύο ειδών σωλήνων ως ενιαία δοκίμια και πραγματοποιήθηκε η κατάρρευσή τους. Μελετήθηκαν οι φάσεις της κατάρρευσης, η απορρόφηση ενέργειας και τα φορτία που αναπτύχθηκαν, ενώ λήφθηκαν φωτογραφίες των δοκιμίων πριν, κατά τη διάρκεια αλλά και μετά από τα πειράματα. Στη συνέχεια αναλύονται τα αποτελέσματα και προκύπτουν τα συμπεράσματα από τα πειράματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΑΞΟΝΙΚΗΣ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΩΝ ΣΩΛΗΝΩΝ

1.1 Γενική περιγραφή της αξονικής κατάρρευσης κυλινδρικών σωλήνων

Τα τελευταία χρόνια έχουν διατυπωθεί διάφορα μοντέλα για τη μαθηματική περιγραφή της αξονικής κατάρρευσης κυλινδρικών σωλήνων. Βέβαια κανένα από αυτά δεν ανταποκρίνεται πλήρως στην πραγματικότητα, αν και πολλά από αυτά προσεγγίζουν με αρκετή ακρίβεια το πραγματικό φαινόμενο. Έτσι, αρκετοί ερευνητές όπως οι Alexander, Abramowicz, Jones, Johnson, Gupta, Abbas, Μάμαλης, έχουν αναπτύξει διάφορα μοντέλα που έχουν συγκριθεί με πειραματικά δεδομένα και έχουν παρουσιάσει πολύ καλή σύγκλιση με αυτά.

Υπάρχουν τέσσερις βασικοί τρόποι κατάρρευσης των λεπτότοιχων σωλήνων που αναλύονται περιγραφικά αλλά και μαθηματικά στη συνέχεια. Αυτοί είναι ο αξονοσυμμετρικός (μορφή δακτυλίου), ο μη εκτατός (μορφή διαμαντιού), ο μικτός που είναι ο συνδυασμός των δύο προηγούμενων τρόπων και ο λυγισμός κατά τον οποίο η κατασκευή λυγίζει και δεν μπορεί πλέον να απορροφήσει σημαντικά ποσά ενέργειας όπως συνήθως απαιτείται.

Ο τρόπος κατάρρευσης μιας κατασκευής επηρεάζεται κατά κύριο λόγο από τη μορφή αλλά και από τις διαστάσεις της. Διάφοροι μελετητές παρατήρησαν και κατέγραψαν την επίδραση της διαμέτρου του σωλήνα προς το πάχος του, δηλαδή του μεγέθους D/t , στον τρόπο της κατάρρευσης [13], [14], [15], [5]. Ακόμα, ο Andrew [17] ερεύνησε την επίδραση του μήκους ενός σωλήνα στον τρόπο κατάρρευσης συσχετίζοντας τον λόγο μήκους προς πάχους L/t με τον λόγο D/t . Ένα γενικό συμπέρασμα είναι ότι σχετικά λεπτοί σωλήνες κατά την κατάρρευση κανονικά παρουσιάζουν μορφή διαμαντιού είτε από την αρχή είτε παρουσιάζοντας αρχικά ομαλή μορφοποίηση. Αντίθετα, οι σωλήνες με μεγαλύτερο πάχος γενικά μορφοποιούνται με ομαλό τρόπο.

Σε μία απλή δοκιμή αξονικής καταπόνησης, όπως συνέβη και στην πειραματική διαδικασία για την εργασία αυτή, το δοκίμιο τοποθετείται πάνω σε μια πλάκα που παραμένει στάσιμη. Πάνω από αυτή το έμβολο της μηχανής κινείται με μια ταχύτητα που αποτελεί το άθροισμα μιας στατικής ταχύτητας και μιας δυναμικής μεταβαλλόμενης ταχύτητας. Τα περισσότερα πειράματα γίνονται υπό στατικές συνθήκες, όπως ήδη

αναφέρθηκε, καθώς έτσι είναι πιο εύκολη η παρακολούθηση της εξέλιξης της διαδικασίας, ενώ η στατική φόρτιση δεν μεταβάλλει τον τρόπο κατάρρευσης.

Μετά την πρώτη επαφή του εμβόλου με το δοκίμιο το κέλυφος παραμορφώνεται ελαστικά και το φορτίο αυξάνεται σχεδόν γραμμικά μέχρι να φτάσει σε μια μέγιστη τιμή που συνήθως αποτελεί το ολικό μέγιστο του φορτίου. Κατά το τελευταίο στάδιο της ελαστικής περιοχής το φορτίο παύει να αυξάνεται γραμμικά και εμφανίζει μια καμπυλότητα μέχρι να αποκτήσει τη μέγιστη τιμή του. Το μέγεθος του μέγιστου φορτίου εξαρτάται από τη γεωμετρία του κελύφους και τα χαρακτηριστικά του υλικού. Στη συνέχεια, με την είσοδο του υλικού στην πλαστική περιοχή το φορτίο μειώνεται απότομα και η παραμόρφωσή του είναι φανερή και έντονη. Έπειτα καθώς συνεχίζεται η παραμόρφωση, το φορτίο παρουσιάζει αυξομειώσεις λόγω της διαμόρφωσης των λοβών ή άλλων στοιχείων της γεωμετρίας του. Η μορφή της καμπύλης του φορτίου εξαρτάται από τον τρόπο κατάρρευσης της κατασκευής και από τις συνθήκες φόρτισης. Σε μία κατασκευή επιθυμητό είναι το φορτίο να παρουσιάζει μία σχετικά σταθερή καμπύλη χωρίς μεγάλες αυξομειώσεις και με μία υψηλή μέση τιμή που αντιστοιχεί με μεγάλο ποσοστό απορρόφησης ενέργειας. Για τα πειράματα που ακολουθούν στο αντίστοιχο μέρος της εργασίας γίνεται ο σχολιασμός της συσχέτισης της καμπύλης του φορτίου με την διαδικασία κατάρρευσης του δοκιμίου και με τις πιο χαρακτηριστικές φωτογραφίες που λήφθηκαν κατά τη διάρκειά της.

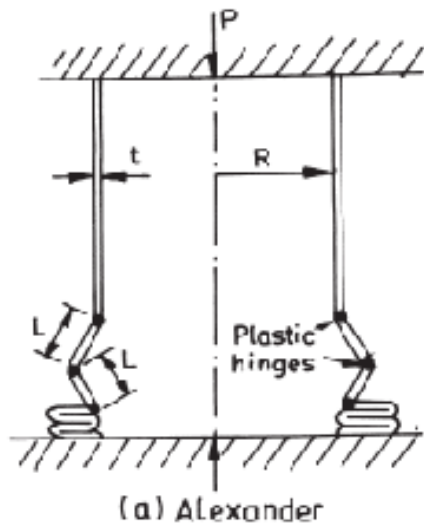
1.2 Αξονοσυμμετρικός τρόπος κατάρρευσης



Σχήμα 1: Αξονοσυμμετρικός τρόπος κατάρρευσης [21],[11]

Κατά τον αξονοσυμμετρικό τρόπο κατάρρευσης οι λοβοί σχηματίζονται με εκτατό τρόπο. Γι' αυτό χαρακτηρίζεται και ως εκτατός τρόπος κατάρρευσης. Αυτό σημαίνει ότι συμβαίνει μία έκταση στη διατομή της κατασκευής, δηλαδή η περίμετρος της δεν διατηρείται σταθερή αλλά αυξάνεται. Στις παραπάνω φωτογραφίες φαίνονται δοκίμια από πειράματα μετά από την κατάρρευσή τους. Είναι εμφανές ότι η διατομή τους παραμένει κυκλική, αλλά κατά τη συμπίεση εκτείνεται και αυξάνεται η περίμετρος της. Αυτός ο τρόπος κατάρρευσης είναι και ο πιο επιθυμητός διότι γενικά οδηγεί στα υψηλότερα ποσά απορροφούμενης ενέργειας κατά τη συμπίεση, δημιουργώντας συμμετρικές δομές.

Ο πρώτος που προσπάθησε να αναλύσει μαθηματικά τον αξονοσυμμετρικό τρόπο κατάρρευσης ήταν ο Alexander [6] και από τότε έχουν γίνει διάφορες άλλες προσπάθειες να βελτιωθεί το μοντέλο του ώστε να παραχθούν πιο ακριβή αποτελέσματα. Ο ιδεατός τρόπος κατάρρευσης του μοντέλου του Alexander, που θεώρησε τρεις πλαστικούς αρμούς κατά τη δημιουργία ενός λοβού τον οδήγησε στην πρόβλεψη του μέσου φορτίου της συμπίεσης από τον τύπο:

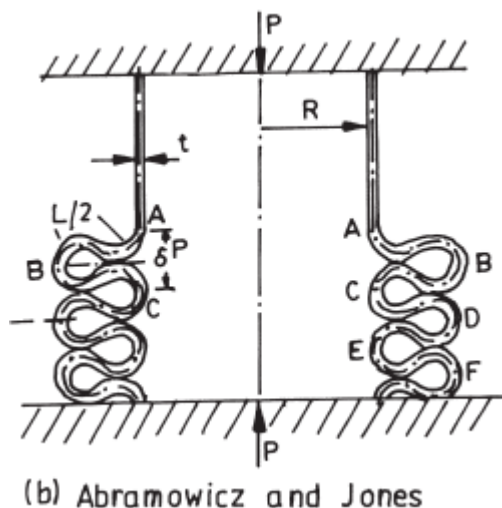


Σχήμα 2: Μοντέλο του Alexander

$$\frac{P_m}{P_0} = \frac{t}{4\pi R\sqrt{3}} \left[20.73 \left(2 \frac{R}{t} \right)^{0.5} + 6.283 \right]$$

Αργότερα, άλλοι μελετητές όπως οι Abramowicz και Jones [12], Grzebieta [18], Gupta και Velmurugan [9] ανέπτυξαν τις δικές τους θεωρίες και κατέληξαν σε διαφορετικούς τύπους για την πρόβλεψη του μέσου φορτίου της κατάρρευσης.

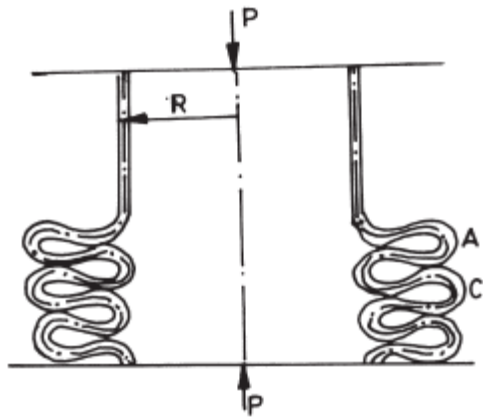
Οι μηχανισμοί για τη δημιουργία των λοβών και οι εξισώσεις για το μέσο φορτίο παρατίθενται παρακάτω:



Σχήμα 3: Μοντέλο των Abramowicz και Jones

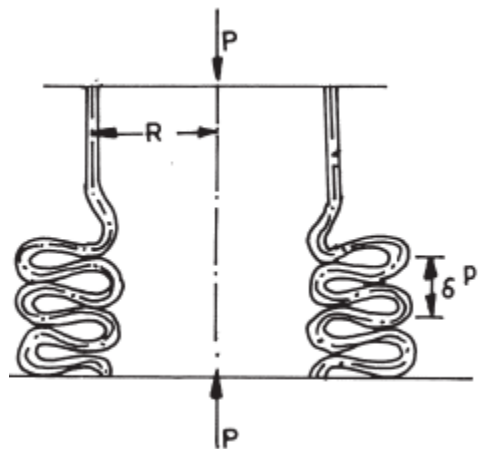
όπου το μέσο φορτίο που προέβλεψαν δίνεται από την εξίσωση:

$$\frac{P_m}{P_o} = \frac{t}{4\pi R\sqrt{3}} \left[20.79 \left(2 \frac{R}{t} \right)^{0.5} + 11.9 \right]$$



(c) Grzebieta

Σχήμα 4: Μοντέλο του Grzebieta



(d) Gupta and Velmurugan

Σχήμα 5: Μοντέλο των Gupta και Velmurugan

που προέβλεψαν το μέσο φορτίο ως:

$$\frac{P_m}{P_o} = \frac{1}{R \left[2L - t - \frac{2L}{3a} \right]} \left\{ \frac{L^2}{3} \sin a + \frac{t}{\sqrt{3}} \left[2Ra + \frac{L}{3} (1 - \cos a) \right] \right\}$$

$$\text{όπου } L = 1.347\sqrt{R \cdot t}$$

και το a δίνεται από τη λύση της εξίσωσης:

$$L - 2L \sin a - L \sin a + \frac{3at}{2} = 0$$

1.2.1. Μαθηματικό μοντέλο των Gupta, Abbas για την αξονική κατάρρευση κυλινδρικών κελυφών

Στη συνέχεια ακολουθεί το μαθηματικό μοντέλο που ανέλυσαν οι Gupta και Abbas [8].

Συμβολισμοί

D : Αρχική μέση διάμετρος του σωλήνα

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$: Τάσεις

f_{yc} : Όριο διαρροής του υλικού σε θλίψη

f_{yt} : Όριο διαρροής του υλικού σε εφελκυσμό

h : Μέγεθος του λοβού

k : Μία παράμετρος

m : Παράμετρος λοβού (αναλογία του μέρους του λοβού που βρίσκεται εσωτερικά στον σωλήνα προς το ολικό μήκος του)

M_p : Πλαστική ροπή ανά μονάδα μήκους

P_m : Μέσο φορτίο παραμόρφωσης

P_θ : Φορτίο παραμόρφωσης σε γωνία θ

r : Λόγος του f_{yc} προς το f_{yt}

t : Χρόνος

t_0 : Αρχικό πάχος σωλήνα

t_1, t_2 : Πάχος του σωλήνα στο εσωτερικό και εξωτερικό μέρος του λοβού αντίστοιχα

W_b : Έργο σε λυγισμό για ένα πλήρη λοβό

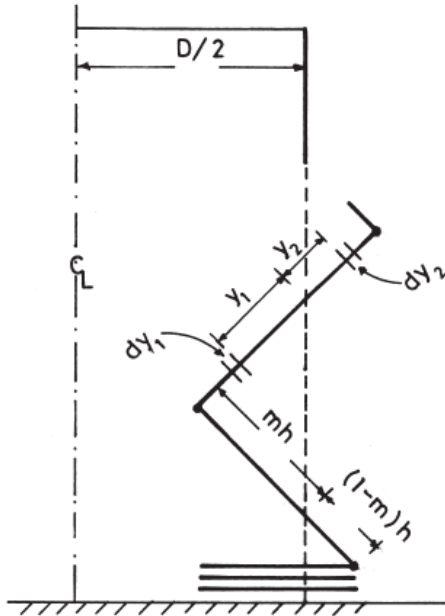
$W_{b\theta}$: Έργο σε λυγισμό για περιστροφή κατά γωνία θ

W_c : Έργο περιφερειακής παραμόρφωσης

$W_{c\theta}$: Έργο περιφερειακής παραμόρφωσης μέχρι γωνία θ

W : Ολικό έργο

y_1, y_2 : Αποστάσεις



Σχήμα 6: Μηχανισμός σχηματισμού λοβών

Ενώ ο Alexander θεώρησε κίνηση του υλικού προς τα έξω οι Gurta, Velmurugan θεώρησαν κίνηση προς τα μέσα και προς τα έξω με αναλογία παρμένη εμπειρικά πειράματα. Σε αυτή τη μελέτη δίνεται το μαθηματικό μοντέλο για τον καθορισμό της αναλογίας των μηκών των εσωτερικών και εξωτερικών λοβών λαμβάνοντας υπόψη την αρχή διατήρησης της μάζας.

Θεωρείται λοιπόν, D η αρχική μέση διάμετρος του σωλήνα και t_0 το αρχικό του πάχος. Έστω h το μήκος του λοβού, οπότε $m \cdot h$ είναι στο εσωτερικό του σωλήνα και $(1-m) \cdot h$ είναι στο εξωτερικό, όπως φαίνεται και στο σχήμα 6. Σε αυτό φαίνεται μόνο το μισό κέλυφος, αφού λόγω της αξονοσυμμετρικής κατάρρευσης το δοκίμιο θα είναι συμμετρικό γύρω από την κεντρική γραμμή (C_L). Τα όρια διαρροής του υλικού του σωλήνα σε θλίψη και εφελκυσμό έχουν ληφθεί ως f_{yc} και f_{yt} αντίστοιχα. Ακόμα, αν η παράμετρος m πάρει την τιμή 0 τότε η κατάρρευση είναι μόνο προς τα έξω, ενώ αν πάρει την τιμή 1 τότε είναι μόνο προς τα μέσα. Η πλαστική ροπή αντίστασης του υλικού λαμβάνεται ως $M_p = k f_{yt} t^2$, όπου t είναι το στιγμιαίο πάχος και k μία σταθερά, η τιμή της οποίας λαμβάνεται ίση με $1/(2\sqrt{3})$ σύμφωνα με το κριτήριο Von-Mises.

Απορροφούμενη ενέργεια κατά την κατάρρευση

Το έργο κάμψης $W_{b\theta}$ για τον σχηματισμό των πλαστικών αρμών για την περιστροφή των λοβών κατά θ είναι:

$$W_{b\theta} = 2\pi M_p \int_0^\theta (D - 2mh \sin \theta) d\theta + \int_0^\theta [D + 2(1-m)h \sin \theta] d\theta$$

(εσωτερικό μέρος) (εξωτερικό μέρος)

$$= 2\pi M_p [2D\theta + 2(2m-1)h(\cos \theta - 1)]$$

Το ολικό έργο για τον σχηματισμό της άρθρωσης υπολογίζεται για $\theta = \pi/2$,
οπότε είναι:

$$W_b = 2\pi M_p (\pi D + 2H - 4mh) = 2\pi k f_{yt} t_0^2 (\pi D + 2h - 4mh)$$

Το έργο για την περιφερειακή παραμόρφωση $W_{c\theta}$ για την περιστροφή
κατά θ του λοβού είναι:

$$W_{c\theta} = \int \bar{W}_{c\theta} dt, \quad \text{όπου}$$

$$\bar{W}_{c\theta} = \int_0^{mh} 2f_{yc} t_0 |\bar{\varepsilon}_1| dA_1 + \int_0^{(1-m)h} 2f_{yt} t_0 |\bar{\varepsilon}_2| dA_2$$

(εσωτερικό μέρος) (εξωτερικό μέρος)

$$\text{με } dA_1 = \pi(D - 2y_1 \sin \theta) dy_1 \quad \text{και} \quad dA_2 = \pi(D - 2y_2 \sin \theta) dy_2$$

$$|\bar{\varepsilon}_1| = \frac{d\varepsilon_1}{dt} = \frac{d}{dt} \left[\frac{\pi(D - 2y_1 \sin \theta) - \pi D}{\pi D} \right] = \frac{-2y_1}{D} \cos \theta \bar{\theta}$$

$$|\bar{\varepsilon}_2| = \frac{d\varepsilon_2}{dt} = \frac{d}{dt} \left[\frac{\pi(D - 2y_2 \sin \theta) - \pi D}{\pi D} \right] = \frac{-2y_2}{D} \cos \theta \bar{\theta}, \quad \bar{\theta} = \frac{d\theta}{dt}$$

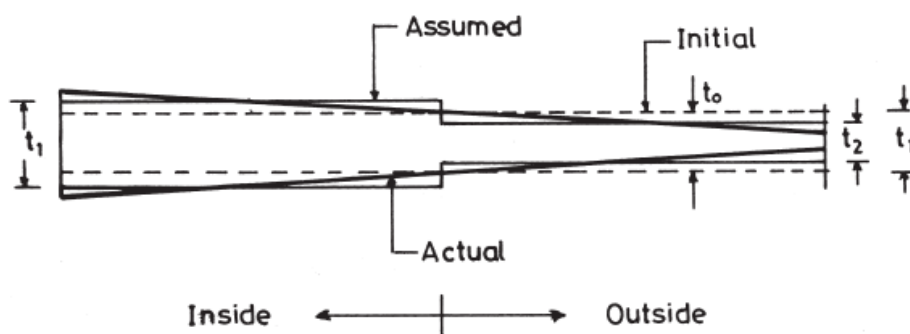
Μετά από αντικατάσταση και ολοκλήρωση για $\theta = \pi/2$ προκύπτει η σχέση:

$$W_c = 2\pi f_{yt} t_0 h^2 \left\{ r m^2 \left(1 - \frac{2mh}{3D} \right) + (1-m)^2 \left[1 + \frac{2(1-m)h}{3D} \right] \right\}$$

η οποία δεν διαφέρει και πολύ από την σχέση του Alexander:

$$W_c = 2\pi f_{yt} t_0 h^2 [r m^2 + (1-m)^2] \quad \text{όπου } r = f_{yt}/f_{yc}$$

Λαμβάνοντας υπόψη την αρχή διατήρησης της μάζας, διαπιστώνεται ότι το πάχος μεταβάλλεται κατά την κατάρρευση. Συγκεκριμένα, το πάχος μειώνεται λόγω εφελκυσμού στο εξωτερικό μέρος του λοβού και αυξάνεται λόγω θλίψης στο εσωτερικό. Η αύξηση ή η μείωση του πάχους θεωρείται σταθερή όπως φαίνεται στο σχήμα 7. Μεβάση αυτή την αρχή προκύπτουν οι παρακάτω τύποι για το έργο κάμψης και το περιφερειακό έργο παραμόρφωσης:



Σχήμα 7: θελωρηση μεταβολής του πάχους

$$W_b = 4\pi k f_{yr} D^2 t_0^2 \frac{(D^2 - 2m^2 h^2)}{A^{2/3}} \left[\tan^{-1} \left(\frac{D - mh}{\sqrt{A}} \right) - \tan \left(\frac{-mh}{\sqrt{A}} \right) \right] +$$

$$+ 4\pi k f_{yr} D^2 t_0^2 \frac{(D^2 - 2m^2 h^2)}{B^{2/3}} \left[\tan^{-1} \left(\frac{D - mh}{\sqrt{B}} \right) - \tan \left(\frac{-mh}{\sqrt{B}} \right) \right] +$$

$$+ 4\pi k f_{yr} D^2 t_0^2 h \left[-\frac{m}{A} + \frac{(1-m)}{B} \right]$$

$$\text{με } A = D^2 - m^2 h^2 \quad \text{και} \quad B = D^2 - (1-m)^2 h^2$$

$$W_c = \frac{2}{3} \pi f_{yr} t_0^2 h^2 \left[4rm^2 + \frac{rmD}{h} \ln \left(\frac{1-mh}{D} \right) + 4(1-m)^2 - \frac{(1-m)D}{h} \ln \left(1 + \frac{(1-m)h}{D} \right) \right]$$

Μέσο φορτίο κατάρρευσης

Εξισώνοντας το εξωτερικό έργο με την απορροφούμενη ενέργεια σε καμπτική και περιφερειακή παραμόρφωση έχουμε:

$$P_m 2h = W_b + W_c$$

και με αντικατάσταση από τις προηγούμενες σχέσεις, πρώτα σύμφωνα με την σχέση του Alexander για το περιφερειακό έργο, έχουμε:

$$P_m = \pi f_{yt} t_0 \left[kt_0 \left(\frac{\pi D}{h} - 4m + 2 \right) + h \left(rm^2 + (1-m)^2 \right) \right]$$

ενώ κάνοντας αντικατάσταση με τη σχέση που προέκυψε νωρίτερα το μέσο φορτίο προκύπτει:

$$P_m = k\pi f_{yt} t_0 \left[kt_0 \left(\frac{\pi D}{h} - 4m + 2 \right) + rm^2 h \left(1 - \frac{2mh}{3D} \right) + (1-m)^2 h \left(1 + \frac{2(1-m)h}{3D} \right) \right]$$

Τέλος, αν ληφθεί υπόψη και η μεταβολή του πάχους του σωλήνα με βάση τις σχέσεις που προέκυψαν για τα W_b και W_c , η εξίσωση για το μέσο φορτίο παραμόρφωσης γίνεται:

$$\begin{aligned} P_m = & 2k\pi f_{yt} D^2 t_0^2 \frac{D^2 - 2m^2 h^2}{hA^{2/3}} \left[\tan^{-1} \left(\frac{D - mh}{\sqrt{A}} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{-mh}{\sqrt{A}} \right) \right] + \\ & + 2k\pi f_{yt} D^2 t_0^2 \frac{(D^2 - 2(1-m)^2 h^2)}{hB^{2/3}} \left[\tan^{-1} \left(\frac{D + (1-m)h}{\sqrt{B}} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{(1-m)h}{\sqrt{B}} \right) \right] + \\ & + \pi f_{yt} D^2 t_0^2 \left[-\frac{m}{A} + \frac{1-m}{B} \right] + \frac{\pi}{3} f_{yt} t_0 h \left[4rh^2 + \frac{rmD}{h} \ln \left(\frac{1-mh}{D} \right) + 4(1-m)^2 - \right. \\ & \left. - \frac{(1-m)D}{h} \ln \left(1 + \frac{(1-m)h}{D} \right) \right] \end{aligned}$$

Μεταβολή του φορτίου παραμόρφωσης

Το φορτίο παραμόρφωσης P_θ την κάθε χρονική στιγμή της κατάρρευσης όταν η περιστροφή του λοβού είναι θ μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$P_\theta = \frac{dW_\theta}{dz} = \frac{d(W_{b\theta} + W_{c\theta})}{d(2h(1 - \cos \theta))} = \frac{1}{2h \sin \theta} \frac{d}{d\theta} (W_{b\theta} + W_{c\theta})$$

όπου, W_θ είναι το ολικό έργο παραμόρφωσης έως την γωνία θ , $W_{b\theta}$ και $W_{c\theta}$ είναι τα έργα σε κάμψη και περιφεριακή συμπίεση αντίστοιχα στη γωνία θ , και z η κατακόρυφη μετατόπιση.

Λαμβάνοντας υπόψη τις σχέσεις που χρησιμοποιήθηκαν νωρίτερα για τα έργα, το στιγμιαίο φορτίο γίνεται:

$$P_{\theta} = \frac{\pi f_{yt} t_0}{h \sin \theta} \left[2kt_0 (D - (2m-1)h \sin \theta) + rm^2 h^2 \left(\cos \theta - \frac{2mh}{3D} \sin 2\theta \right) + (1-m)^2 h^2 \left(\cos \theta + \frac{2(1-m)h}{3D} \sin 2\theta \right) \right]$$

ενώ θεωρώντας ότι υπάρχει και μεταβολή στο πάχος, η σχέση γίνεται:

$$P_{\theta} = \frac{\pi f_{yt} t_0}{h \sin \theta} \left[\frac{kD^2 t_0 (D - 2mh \sin \theta)}{(D - mh \sin \theta)^2} + \frac{kD^2 t_0 [D + 2(1-m)h \sin \theta]}{[D + (1-m)h \sin \theta]^2} \right] + \frac{\pi f_{yt} t_0}{h \sin \theta} \left[\frac{rm^2 h^2 D \cos \theta}{D - mh \sin \theta} \left(1 - \frac{4mh}{3D} \sin \theta \right) + \frac{(1-m)^2 h^2 D \cos \theta}{D + (1-m)h \sin \theta} \left(1 + \frac{4(1-m)h}{3D} \sin \theta \right) \right]$$

1.2.2. Μοντέλο των Abbas, Gupta, Tyagi και Arif για δημιουργία καμπύλων λοβών

Οι περισσότερες μελέτες, θεωρούν το σχηματισμό των λοβών είτε πλήρως εσωτερικό είτε πλήρως εξωτερικό, ενώ δεν λαμβάνουν υπόψη τη μεταβολή της περιφερειακής τάσης με τη μεταβολή του προσανατολισμού του λοβού. Έτσι, για τον υπολογισμό του μέσου φορτίου απαιτείται μόνο η μέση περιφερειακή τάση. Ωστόσο, ο υπολογισμός της μεταβολής του φορτίου κατάρρευσης απαιτεί και τη γνώση της μεταβολής της περιφερειακής τάσης ανάλογα με την περιστροφή των λοβών. Παρόλο που ορισμένα μοντέλα καμπύλων λοβών έχουν αναπτυχθεί, αυτά δεν λαμβάνουν υπόψη τον μερικό σχηματισμό λοβών εσωτερικά και εξωτερικά του λοβού. Οι Abbas, Gupta, Tyagi, και Arif [10], ανέπτυξαν ένα μοντέλο με μεταβλητό μήκος και μερικώς εξωτερικό, μερικώς εσωτερικό σχηματισμό λοβών.

Οι επιπλέον συμβολισμοί είναι οι εξής:

α : Γωνία άρθρωσης

α_m : Μέγιστη γωνία άρθρωσης

α_1 : Μία γωνία

β : Λόγος του ευθύ μήκους του λοβού προς το μισό μήκος του λοβού

δ : Κατακόρυφη συμπίεση σε γωνία άρθρωσης α

δ_T : Ολική ενεργή μετατόπιση κατάρρευσης για τον σχηματισμό ενός λοβού

R : Αρχική μέση διάμετρος του σωλήνα

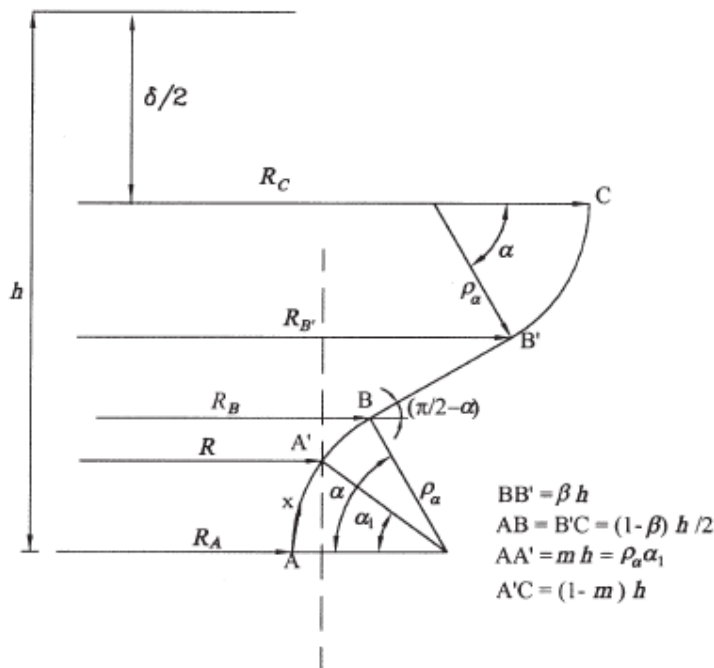
W_T : Ολικό έργο σε κάμψη και περιφερειακή παραμόρφωση

W_α : Ολικό έργο μέχρι την γωνία α

Θεωρείται λοιπόν, σωλήνας μέσης ακτίνας R και αρχικού πάχους t_0 , ο οποίος υφίσταται αξονοσυμμετρική αξονική κατάρρευση. Αν h είναι το μήκος του λοβού, τότε mh είναι το εσωτερικό μέρος και $(1-m)h$ το εξωτερικό. Ο τρόπος κατάρρευσης που χρησιμοποιείται σε αυτή την ανάλυση φαίνεται στα επόμενα σχήματα 8,9,10. Καθώς ο σχηματισμός των λοβών είναι συμμετρικός γύρω από το μέσο της άρθρωσης, αρκεί μόνο το μισό του λοβού για τη μελέτη. Οι γωνίες των αρθρώσεων που αναφέρονται στους αρμούς A και C θεωρούνται ίσες. Όπως φαίνεται και

από τα σχήματα, το οριζόντιο μήκος του λοβού έχει ληφθεί ίσο με β φορές το μισό μήκος του λοβού. Το σημείο A' αντιστοιχεί στη μέση ακτίνα R . Το τμήμα AA' καταρρέει εσωτερικά, ενώ το $A'C$ εξωτερικά. Υπάρχουν τρεις περιπτώσεις όπως φαίνεται και από τα σχήματα, το σημείο A' να βρίσκεται στο AB τόξο, στο ευθύ τμήμα BB' ή στο τόξο $B'C$. Για κάθε μία από τις τρεις περιπτώσεις, γίνεται και η αντίστοιχη ανάλυση.

Περίπτωση I: $m < (1-\beta)/2$



Σχήμα 8: μηχανισμός σχηματισμού λοβών για την περίπτωση I

Η απορροφώμενη ενέργεια από την κάμψη είναι:

$$W_b = 4\pi k f_y t_0^2 \left[2R \int_0^{a_m} da + \beta h \int_0^{a_m} \sin a da + 2mh \int_0^{a_m} \frac{\cos a_1 - \cos a}{a_1} da \right]$$

ενώ η περιφερειακή ενέργεια για το τμήμα AA' είναι:

$$W_{c1} = \frac{4\pi f_y m^3 h^2 t_0}{1-\beta} \int_0^{a_m} \left(\frac{2\sin a_1}{a_1^3} - \frac{\sin a_1}{a_1} - \frac{2\cos a_1}{a_1^2} \right) da$$

Η απορροφούμενη ενέργεια σε κάμψη σε αυτή την περίπτωση είναι:

$$W_b = 4\pi k f_y t_0^2 \left[2R \int_0^{a_m} da + (1-2m)h \int_0^{a_m} \sin ada \right]$$

Η περιφερειακή στο τμήμα AB είναι:

$$W_{c1} = \pi f_y t_0 \frac{(1-\beta)^2 h^2}{2} \left[\int_0^{a_m} \left(\frac{2\sin a_1}{a_1^3} - \frac{\sin a_1}{a_1} - \frac{2\cos a_1}{a_1^2} \right) da - \frac{2m+\beta-1}{1-\beta} \int_0^{a_m} \cos ada \right]$$

στο τμήμα BA' :

$$dW_{c2} = -\pi f_y t_0 \frac{h^2}{4} (\beta - 2m + 1) \cos ada$$

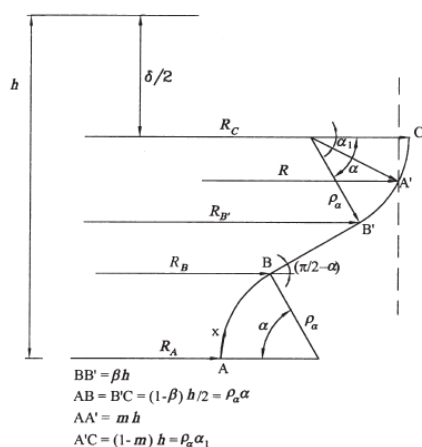
στο τμήμα A'B' είναι:

$$dW_{c3} = \pi f_y t_0 \frac{h^2}{4} (\beta - 2m + 1)^2 \cos ada$$

Ενώ στο B'C είναι:

$$dW_{c4} = \pi f_y t_0 \frac{(1-\beta)^2 h^2}{2} \left[\frac{\beta+1-2m}{1-\beta} \cos ada + \frac{\sin a}{a} da + \frac{2\cos ada}{a^2} - \frac{2\sin a}{a^3} da \right]$$

Περίπτωση III: $\frac{1+\beta}{2} < m < 1$



Σχήμα 10: Μηχανισμός σχηματισμού λοβών για την περίπτωση II

Η απορροφώμενη ενέργεια σε κάμψη είναι:

$$W_b = 4\pi k f_y t_0^2 \left[2R \int_0^{a_m} da - \beta h \int_0^{a_m} \sin ada + (1 - \beta)h \int_0^{a_m} \left(\frac{\cos a - \cos a_1}{a} \right) da \right]$$

η περιφερειακή ενέργεια για το τμήμα AB είναι:

$$W_{c1} = 4\pi k f_y t_0^2 \left[2R \int_0^{a_m} da + (1 - \beta)h \int_0^{a_m} \left(\frac{\cos a - \cos a_1}{a} \right) da - \beta h \int_0^{a_m} \sin ada \right]$$

στο BB' :

$$dW_{c2} = \pi f_y t_0 \beta h^2 \left[2(1 - m) \frac{\sin a_1 da}{a} + (1 - \beta) \left(\frac{\cos a_1}{a^2} - \frac{\sin a}{a} - \frac{\cos a}{a^2} \right) da - \beta \cos ada \right]$$

στο B'A' :

$$dW_{c3} = -\pi f_y t_0 m (1 - \beta) h^2 \left[\frac{3 - 4m + \beta}{2a^2} \cos a_1 - \frac{(2m - \beta - 1)(1 - m)}{(1 - \beta)a} \sin a_1 + \frac{1 - \beta}{a^3} (\sin a - a \cos a - \sin a_1) \right] da$$

και στο CA' :

$$dW_{c4} = \pi f_y t_0 (1 - \beta) h^2 \left[\frac{2(1 - m)^2 \sin a_1}{(1 - \beta)a} + 2(1 - m) \frac{\cos a_1}{a^2} - (1 - \beta) \frac{\sin a_1}{a^3} \right] da$$

Η ολική ενέργεια που απορροφάται σε κάμψη και περιφερειακή παραμόρφωση έως τη μέγιστη γωνία a_m δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$W_T = W_b + 2(W_{c1} + W_{c2} + W_{c3} + W_{c4})$$

Μέσο φορτίο κατάρρευσης

Εξισώνοντας το εξωτερικό έργο με την ενέργεια που απορροφάται σε κάμψη και περιφερειακή παραμόρφωση, το μέσο φορτίο παραμόρφωσης P_m προκύπτει:

$$P_m \delta_T = W_T$$

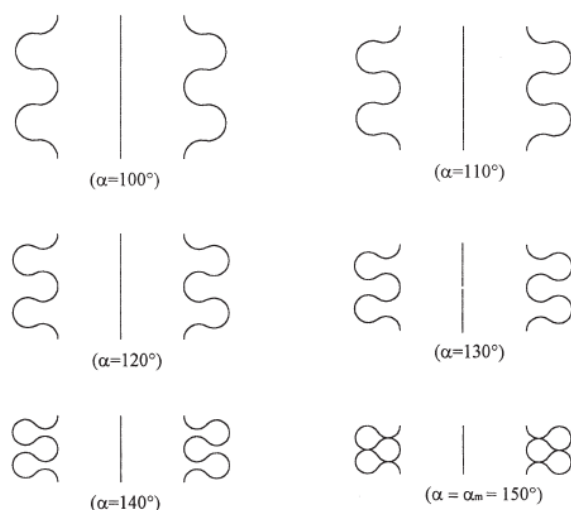
όπου δ_T είναι η ολική ενεργή μετατόπιση της κατάρρευσης

Η μεταβολή του φορτίου παραμόρφωσης μπορεί να προκύψει από τη σχέση:

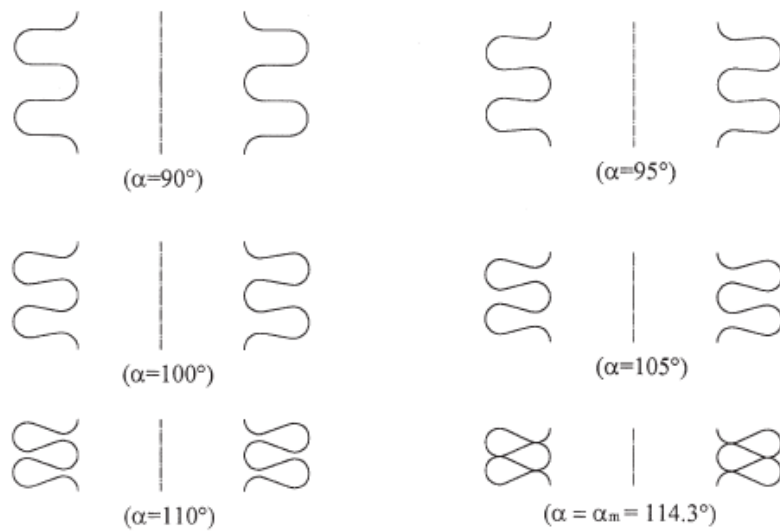
$$P = \frac{dW_\alpha}{d\delta}$$

Τρόπος κατάρρευσης

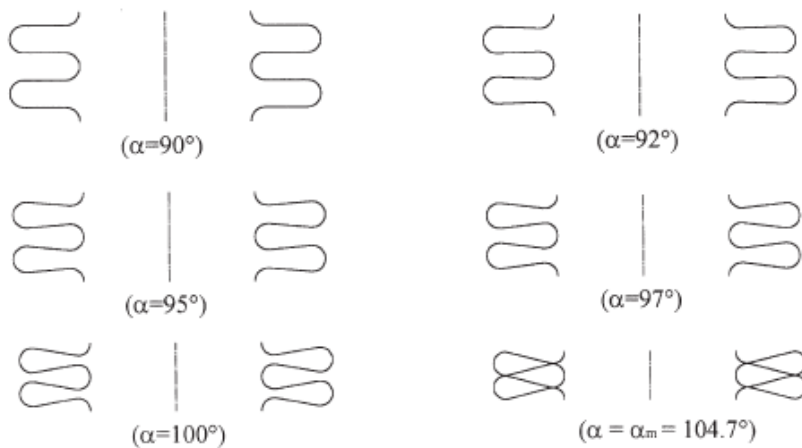
Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο τρόπος κατάρρευσης των κυλινδρικών σωλήνων. Θεωρούνται διάφορες τιμές της παραμέτρου β , δηλαδή του λόγου του ευθύ μήκους του λοβού προς το μισό μήκος του λοβού. Οι τιμές της γωνίας α , για τις οποίες η μορφή του σωλήνα φαίνεται στα σχήματα επιλέχθηκαν αυθαίρετα, ώστε να παρουσιαστεί καλύτερα η διαδικασία της κατάρρευσης. Οι τελικές τιμές της μεταβλητής α είναι η μέγιστη γωνία άρθρωσης, πέρα από την οποία δεν είναι δυνατή η περαιτέρω παραμόρφωση του λοβού.



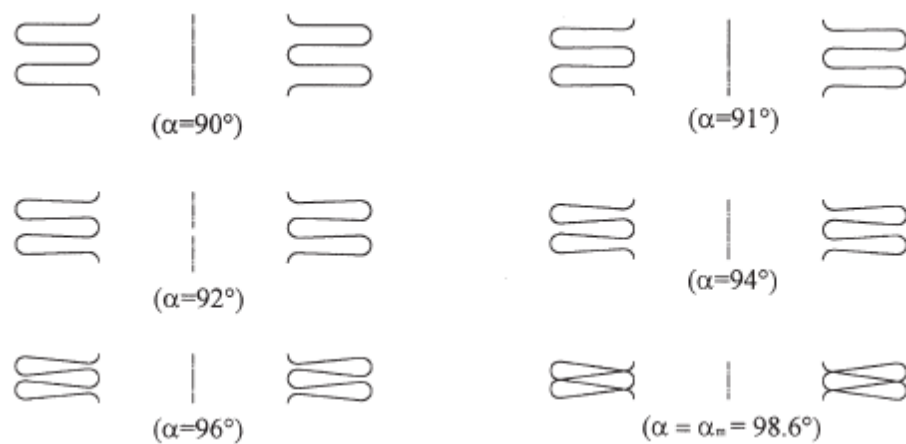
Σχήμα 11: Προοδευτική κατάρρευση κυλινδρικών σωλήνων για $\beta=0$



Σχήμα 12: Προοδευτική κατάρρευση κυλινδρικών σωλήνων για $\beta=1/3$



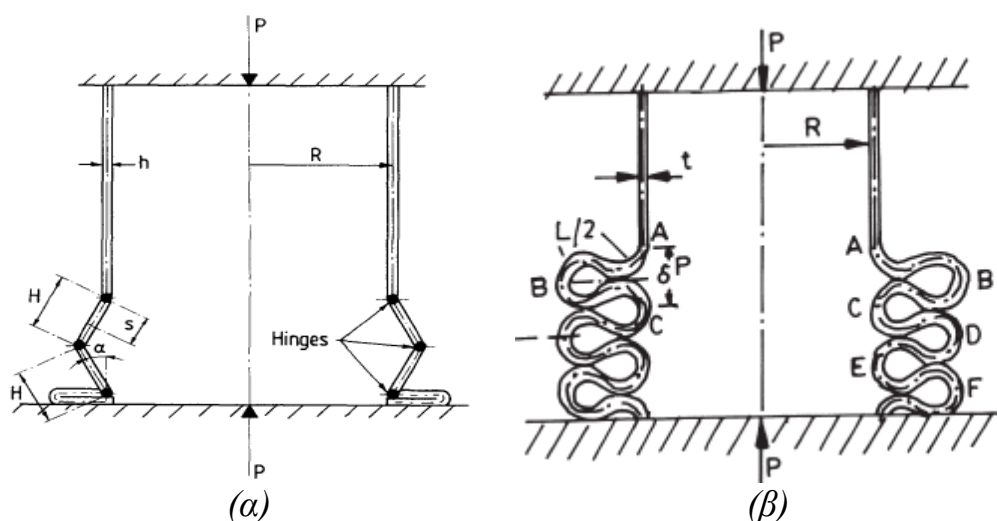
Σχήμα 13: Προοδευτική κατάρρευση κυλινδρικών σωλήνων για $\beta=1/2$



Σχήμα 14: Προοδευτική κατάρρευση κυλινδρικών σωλήνων για $\beta=2/3$

1.2.3. Θεωρία Abramowicz και Jones για αξονοσυμμετρική κατάρρευση κυλινδρικών σωλήνων

Οι Abramowicz και Jones [11] διαφοροποίησαν τη θεωρία του Alexander που θεώρησε κάθε λοβό αποτελούμενο από τρεις πλαστικούς αρμούς. Με το δικό τους μοντέλο κατάρρευσης κατέληξαν σε ένα ελαφρώς διαφοροποιημένο τύπο για το μέσο φορτίο της κατάρρευσης.



Σχήμα 15: Μοντέλο των Alexander (α) και Abramowicz, Jones (β)

Συμβολισμοί

E_1, E_2 : Εσωτερική απορρόφηση ενέργειας

M_0 : $(2\sqrt{3})(\sigma_0 h^2) / 4$

R : Μέση ακτίνα κυλινδρικού κελύφους

$2H$: Αρχική απόσταση μεταξύ των πλαστικών αρμών στην κορυφή και στη βάση του λοβού (σχήμα 15)

σ_0 : όριο διαρροής

h : πάχος τοιχώματος

α : γωνία άρθρωσης

Η ενέργεια που απορροφάται από τους τρεις πλαστικούς αρμούς είναι:

$$E_1 = 4\pi M_0 (\pi R + H)$$

Η ενέργεια που απορροφάται λόγω των περιφερειακών δυνάμεων είναι:

$$\dot{E}_2 = 2 \int_0^H \sigma_0 h \dot{\epsilon} da$$

$$\text{όπου } \dot{\epsilon} = \frac{d}{dt} \left[\frac{2\pi(R + s \sin a) - 2\pi R}{2\pi R} \right]$$

Με ολοκλήρωση $\dot{E}_2 = \int_0^{\pi/2} \dot{E}_2 da$ τελικά προκύπτει:

$$E_2 = 2\pi\sigma_0 h H^2 (1 + H / 3R)$$

Υπολογισμός μέσου φορτίου

Το μέσο φορτίο υπολογίζεται από τη σχέση:

$$P_m 2H = E_1 + E_2$$

και με αντικατάσταση των E_1 και E_2 γίνεται:

$$\frac{P_m}{M_0} = 2\sqrt{3}\pi(R/h)(H/R) + (2\pi(r/h)(H/R)^2) / \sqrt{3} + 2\pi^2 R / H + 2\pi$$

$$\text{από } \frac{\partial \left(\frac{P_m}{M_0} \right)}{\partial H} = 0 \text{ προκύπτει:}$$

$$2(R/h)(H/R)^3 / \sqrt{3} + \sqrt{3}(R/h)(H/R)^2 - \pi = 0$$

Επιλύοντας αριθμητικά την προηγούμενη εξίσωση και θεωρώντας το λόγο $R/h=23,36$, σύμφωνα με πειραματικά δεδομένα προκύπτει ο τελικός τύπος του φορτίου:

$$P_m / M_0 = 20.79(2R/h)^2 + 11.90$$

και $H / R = 1.76(h / 2R)^2$
 όπου $M_0 = (2\sigma_0 / \sqrt{3})(h^2 / 4)$

Παρατηρώντας τους τύπους αυτούς διαπιστώνεται ότι δεν διαφέρουν πολύ από την πρόβλεψη του Alexander [6] που ήταν:

$P_m / M_0 = 20.73(2R / h)^2 + 6.283$
 $H / R = 1.905(h / 2R)^2$

1.3. Μη αξονοσυμμετρικός (μη εκτατός) τρόπος κατάρρευσης

Ο μη αξονοσυμμετρικός τρόπος κατάρρευσης έγκειται στο σχηματισμό λοβών με μη εκτατό τρόπο. Αυτό σημαίνει ότι η διατομή της κατασκευής που καταρρέει δεν εκτείνεται, δηλαδή δεν αυξάνεται η περίμετρός της, αλλά μεταβάλλεται η μορφή της. Στα επόμενα σχήματα φαίνονται δοκίμια που έχουν υποστεί αυτού του είδους την κατάρρευση.



(α)



(β)

Σχήμα 16: Δοκίμια σε πρόοψη (α) [21] και κάτοψη (β)[11] που έχουν υποστεί μη αξονοσυμμετρικό τρόπο κατάρρευσης

Λόγω της μορφής που παίρνουν τα δοκίμια μετά την κατάρρευσή τους, ο μηχανισμός αυτός ονομάζεται και diamond. Στις φωτογραφίες του (β) και (γ) του προηγούμενου σχήματος η διατομή των δοκιμίων έχει πάρει τριγωνική μορφή. Γι' αυτό το λόγο η διατομή χαρακτηρίζεται 3D diamond. Αντίστοιχα, ανάλογα με τον αριθμό των ακμών που έχει χαρακτηρίζεται 2D, 3D, 4D και ούτω καθεξής.

Κάθε λοβός που σχηματίζεται έχει την ίδια μορφή με τον προηγούμενο. Ωστόσο, ο κάθε λοβός δεν συμπίπτει με τους γειτονικούς του, αλλά είναι περιστρεμμένος κατά κάποια γωνία σε σχέση με αυτούς. Η γωνία της περιστροφής εξαρτάται από τη μορφή του λοβού σύμφωνα με τον εξής μηχανισμό: αν έχει x αριθμό ακμών, δηλαδή είναι της μορφής xD, τότε ο κάθε λοβός θα απέχει από τον προηγούμενο και τον επόμενο κατά γωνία π/x rad.

Ακόμα, γενικά πρόκειται για έναν πιο ασταθή τρόπο κατάρρευσης. Όπως αναφέρεται και στο όνομά του, στον μη αξονοσυμμετρικό τρόπο κατάρρευσης δεν υπάρχει συμμετρία ως προς τον άξονα συμπίεσης. Αυτό το φαινόμενο οδηγεί σε χαμηλότερα φορτία κατά τη συμπίεση και κατά συνέπεια σε χαμηλότερη απορροφούμενη ενέργεια, χωρίς βέβαια αυτό να αποτελεί δέσμευση.

Ο μη αξονοσυμμετρικός τρόπος κατάρρευσης μελετήθηκε πρώτη φορά από τους Pugsley και Macaulay [19]. Με την ανάλυσή τους πρότειναν έναν τρόπο για τον προσδιορισμό του μέσου φορτίου. Ο τύπος που πρότειναν για το μέσο φορτίο είναι ο εξής:

$$\frac{P_m}{P_0} = 1.6 \frac{t}{R} + 0.12$$

Οι Johnson, Soden και Al-Hassani [5] πρότειναν τον υπολογισμό του μέσου φορτίου από τη σχέση:

$$P_m = 2\pi M_p \left(1 + n \cos \frac{\pi}{2n} + \frac{m-1}{m} n \cot \frac{\pi}{2n} \right)$$

όπου $M_p = Yt^2 / 4$ είναι η ολική πλαστική ροπή ανά μονάδα μήκους, n είναι ο αριθμός των σχηματιζόμενων τριγώνων ανά λοβό και m είναι ο αριθμός των λοβών.

Ακόμα, ο Pugsley [20] κατέληξε στην εξίσωση:

$\frac{P_m}{M_0} = 198\sigma_\alpha / \sigma_0$, με σ_α μία μέση τάση που για την επιλογή της λαμβάνεται υπόψη και η κράτυνση του υλικού

Ο Wierzbicki [16] κατέγραψε τη δική του σχέση,

$\frac{P_m}{M_0} = 62.88(2R/h)^{1/3}$, που προσεγγίζει αρκετά καλά τα πειραματικά δεδομένα.

Τέλος, οι Jones και Abramowicz [12] οδηγήθηκαν στην έκφραση:

$$\frac{P_m}{M_0} = 86.14(2R/t)^{1/3}$$

1.4. Μικτός τρόπος κατάρρευσης

Αυτός ο μηχανισμός κατάρρευσης αποτελεί συνδυασμό του αξονοσυμμετρικού και του μη αξονοσυμμετρικού τρόπου κατάρρευσης. Το πιο σύνηθες φαινόμενο είναι η δημιουργία αρχικά αξονοσυμμετρικών λοβών και από ένα σημείο και μετά η κατάρρευση να συνεχιστεί με τη δημιουργία μη εκτατών λοβών. Ακόμα, είναι δυνατό ο αρχικά εκτατός ή μη εκτατός τρόπος να οδηγήσει σε λυγισμό της κατασκευής.

Οι παράγοντες που μπορούν να οδηγήσουν σε ένα τέτοιο τρόπο κατάρρευσης είναι πολλοί. Κυρίως μικτός τρόπος εμφανίζεται όταν οι διαστάσεις του δοκιμίου, οι οποίες όπως έχει αναφερθεί καθορίζουν σημαντικά τον τρόπο κατάρρευσής του, είναι κοντά στο οριακό σημείο. Έτσι, σε αυτές τις περιπτώσεις για να καθοριστεί με ακρίβεια η συμπεριφορά του χρήσιμο είναι να γίνεται επανάληψη των πειραμάτων καθώς αυτή μπορεί να οδηγήσει σε διαφορετικά αποτελέσματα. Άλλοι παράγοντες που μπορούν να προκαλέσουν αλλαγή στον μηχανισμό της κατάρρευσης είναι ατέλειες στη δομή ή στην κατασκευή των δοκιμίων.

Τέλος, μέχρι τώρα δεν έχουν καταγραφεί ολοκληρωμένα μαθηματικά μοντέλα που να περιγράφουν τον μικτό τρόπο κατάρρευσης. Αντίθετα, η ανάλυσή του βασίζεται στην ανάλυση των ξεχωριστών τρόπων από τους οποίους αποτελείται και οι οποίοι έχουν μελετηθεί αρκετά.

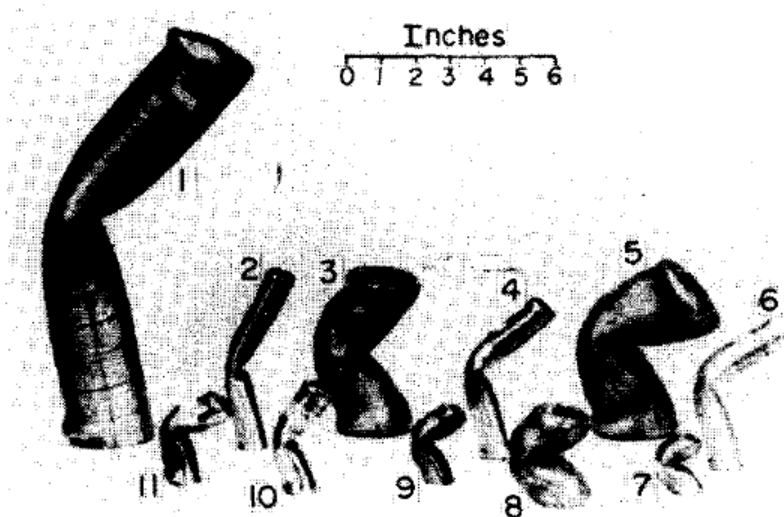
Στο επόμενο σχήμα φαίνεται ένα δοκίμιο του πειράματος της εργασίας που έχει υποστεί μικτό τρόπο κατάρρευσης. Όπως φαίνεται,

αποτελείται από έναν αξονοσυμμετρικό λοβό, με το σχηματισμό του οποίου άρχισε και η κατάρρευση, και τέσσερις μη εκατούς 2D λοβούς. Στο πειραματικό μέρος της εργασίας παρατηρείται σε διάφορα δοκίμια αυτός ο μηχανισμός.

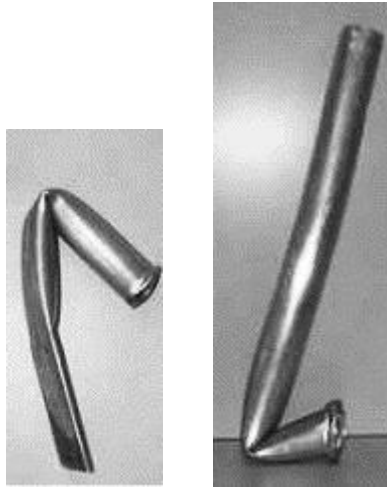


Σχήμα 17: Δοκίμιο με μικτό τρόπο κατάρρευσης [21]

1.5. Λυγισμός



Σχήμα 18: Δοκίμια που έχουν υποστεί λυγισμό [17]



Σχήμα 19: Δοκίμια που έχουν μεταβεί από προοδευτική κατάρρευση σε λυγισμό [22]

Ο λυγισμός θεωρείται ως ένας ξεχωριστός μηχανισμός κατάρρευσης. Χαρακτηρίζεται από την ξαφνική αστοχία της κατασκευής, χωρίς ωστόσο αυτή να οφείλεται στην υπέρβαση του ορίου αντοχής του υλικού. Όπως είναι φανερό, πρόκειται για ένα ανεπιθύμητο φαινόμενο στις μηχανολογικές κατασκευές και γίνεται προσπάθεια να αποφεύγεται.

Η πιο σημαντική αιτία που προκαλεί λυγισμό είναι το μεγάλο μήκος των δοκιμίων. Βέβαια, εξαρτάται επίσης τόσο από τη διάμετρο των δοκιμίων, όσο και από το πάχος του τοιχώματός τους. Ακόμα, είναι δυνατό όπως φαίνεται στο σχήμα 19 η κατάρρευση να ξεκινήσει προοδευτικά και να μεταβεί εκ των υστέρων σε λυγισμό.

Το 1757 ο Euler κατέληξε σε μία σχέση για τον υπολογισμό του μέγιστου φορτίου που μπορεί να δεχτεί μια μακριά και λεπτή στήλη χωρίς να λυγίσει. Γι' αυτό το λόγο, ο λυγισμός συχνά αναφέρεται ως λυγισμός Euler.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΑΞΟΝΙΚΗ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗ ΛΕΠΤΟΤΟΙΧΩΝ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΩΝ ΣΩΛΗΝΩΝ ΑΠΟ ΔΥΟ ΕΠΑΛΛΗΛΑ ΥΛΙΚΑ

Σε αυτή την ενότητα, η οποία αποτελεί και το κύριο θέμα για τα πειράματα που έγιναν στα πλαίσια της εργασίας, μελετάται το μαθηματικό μοντέλο της αξονικής κατάρρευσης κυλινδρικών σωλήνων από δύο επάλληλα υλικά. Δύο σωλήνες από διαφορετικά υλικά τοποθετούνται ο ένας μέσα στον άλλο ώστε να αποτελέσουν έναν ενιαίο κύλινδρο από δύο στρώματα υλικών. Τέτοιες κατασκευές φαίνονται στο επόμενο σχήμα.



Σχήμα 20: Δοκίμια από δύο επάλληλα υλικά πριν και μετά από την κατάρρευση, Το (α) αποτελείται από εσωτερικό αλουμινένιο και εξωτερικό χαλύβδινο σωλήνα [21]. Το (β) από εξωτερικό αλουμινένιο και εσωτερικό χάλκινο[3]

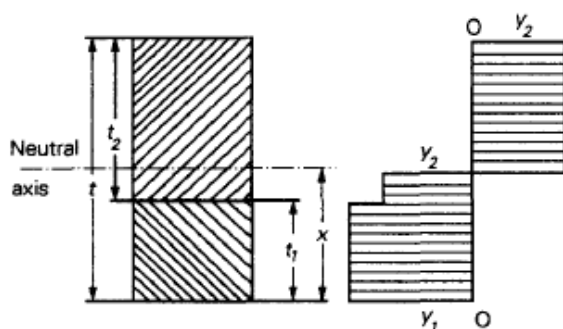
Η μελέτη τέτοιων κατασκευών παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Τα δυο υλικά έχουν διαφορετικές ιδιότητες και όπως είναι επόμενο έχουν διαφορετικό τρόπο συμπεριφοράς κατά την κατάρρευσή τους. Έτσι, κατά τη συμπίεση υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο σωλήνων, γεγονός

που μπορεί να επηρεάσει όλες τις παραμέτρους της κατάρρευσης, την καμπύλη του φορτίου, την απορρόφηση ενέργειας αλλά και τον μηχανισμό δημιουργίας των λοβών.

Στη συνέχεια περιγράφεται η μαθηματική ανάλυση της κατάρρευσης τέτοιων σωλήνων σύμφωνα με τους Mamalis, Manolakos, Demosthenous και Johnson [3]. Η ανάλυσή τους βασίζεται με τη σειρά της σε προηγούμενες μελέτες [5],[6], προσαρμόζεται όμως στην κατάρρευση σωλήνων από δύο επάλληλα υλικά και προσεγγίζει με καλή ακρίβεια το μέσο φορτίο.

Συμβολισμοί

- D : διάμετρος του σωλήνα
- h : απόσταση μεταξύ δύο αρθρώσεων για το σχηματισμό του λοβού
- M_p : πλαστική ροπή κάμψης
- \bar{P} : μέσο φορτίο θλίψης
- P_{max} : αρχικό μέγιστο φορτίο
- r : ακτίνα καμπυλότητας
- t : συνολικό πάχος τοιχώματος του σωλήνα
- t_r : λόγος t_1/t_2
- W : πλαστικό έργο
- x : θέση του ουδέτερου άξονα
- Y : όριο διαρροής υλικού
- \bar{Y} : ισοδύναμο όριο διαρροής για τον τελικό σωλήνα
- k : λόγος Y_1/Y_2



Σχήμα 21: Κατανομή τάσεων σε διατομή που έχει υποστεί παραμόρφωση

Τα πάχη των δύο υλικών είναι t_1 και t_2 αντίστοιχα. Όμοια τα όρια διαρροής τους είναι Y_1 και Y_2 . Το ολικό πάχος είναι $t=t_1 + t_2$ (σχήμα 21). Η θέση του ουδέτερου άξονα προκύπτει από την εξίσωση:

$$Y_2(t-x) = Y_2(x-t) + Y_1 t_1$$

Με τον περιορισμό ότι $Y_1 t_1 < Y_2 t_2$

Από ισορροπία ροπών γύρω από τον ουδέτερο άξονα προκύπτει η καμπτική ροπή:

$$M_p = Y_2 \frac{(t-x)^2}{2} + Y_2 \frac{(x-t_1)^2}{2} + Y_1 t_1 \left(x - \frac{t_1}{2} \right)$$

Εισάγοντας τις αδιάστατες σταθερές $k = \frac{Y_1}{Y_2}$ και $t_r = \frac{t_1}{t_2}$ η ροπή γίνεται:

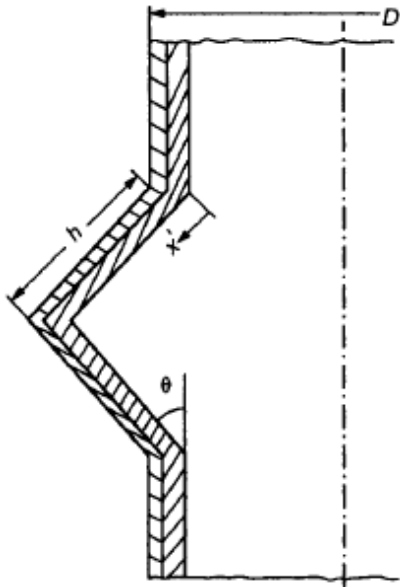
$$M_p = \frac{1 + 2kt_r + 2kt_r^2 - k^2 t_r^2}{(1+t_r)^2} \frac{Y_2 t^2}{4}$$

Τέλος, εκφράζοντας την καμπτική ροπή σε συνάρτηση με ένα ισοδύναμο όριο διαρροής για τον τελικό σωλήνα \bar{Y} με μία σχέση της μορφής $M_p = Y \frac{t^2}{4}$, το ισοδύναμο όριο διαρροής γίνεται:

$$\bar{Y} = \frac{1 + 2kt_r + 2kt_r^2 - k^2 t_r^2}{(1+t_r)^2} Y_2$$

Αξονοσυμμετρικός τρόπος κατάρρευσης

Για τον υπολογισμό του μέσου φορτίου της κατάρρευσης θεωρούνται ξεχωριστά οι περιπτώσεις του αξονοσυμμετρικού και του μη αξονοσυμμετρικού μηχανισμού. Στο επόμενο σχήμα φαίνεται το μοντέλο κατάρρευσης για τον εκτατό τρόπο.



Σχήμα 22: Αξονοσυμμετρικός τρόπος κατάρρευσης για σωλήνα από δύο υλικά

Το έργο για την κάμψη είναι:

$$W_1 = 2 \left(M_p \pi D \frac{\pi}{2} + M_p \int_0^{\pi/2} \pi (D \pm 2h \sin \theta) d\theta \right) = 2M_p \pi (\pi D \pm 2h)$$

Το έργο για την έκταση ώστε να σχηματιστεί ο λοβός είναι:

$$W_2 = \sum_{i=1}^2 2 \int_0^h Y_i \pi D_i t_i \frac{2x \sin \theta}{D_i} dx = 2\pi (Y_1 t_1 + Y_2 t_2) h^2$$

Εξισώνοντας το εξωτερικό έργο $W_e = \bar{P} \cdot 2h$ με το εσωτερικό έργο $W_i = W_1 + W_2$, ο τύπος για το μέσο φορτίο γίνεται:

$$\bar{P} = M_p \pi \left(\frac{\pi D}{h} \pm 2 \right) + \pi h (Y_1 t_1 + Y_2 t_2)$$

Το ελάχιστο \bar{P} προκύπτει μετά από την παραγωγήση $\frac{d\bar{P}}{dh} = 0$, για το οποίο η τιμή του h είναι:

$$h = \frac{\sqrt{\pi M_p D}}{Y_1 t_1 + Y_2 t_2}$$

Συνδυάζοντας τις εκφράσεις για το h και το μέσο φορτίο, ο υπολογισμός του τελευταίου ανάγεται στον εξής τύπο:

$$\bar{P} = 2\pi\sqrt{\pi D} \sqrt{M_p} \sqrt{Y_1 t_1 + Y_2 t_2} \text{ , όπου η } M_p \text{ έχει ήδη υπολογιστεί.}$$

Μη αξονοσυμμετρικός τρόπος κατάρρευσης

Εφαρμόζοντας το μοντέλο για τον μη εκτατό τρόπο κατάρρευσης [5], η έκφραση για το μέσο φορτίο καταλήγει στη μορφή:

$$\bar{P} = 2\pi M_p \frac{D/r - n \cot(\pi/2n) + 1 + n \operatorname{cosec}(\pi/2n)}{1 - 2r/h_1}$$

$$\text{όπου } h_1 = \frac{\pi D}{2n} \tan(\pi/2n)$$

$$r = \frac{D}{A} \sqrt{1 + \frac{h_1 A}{2D}} - 1$$

$$\text{και } A = 1 + n \operatorname{cosec}(\pi/2n) - n \cot(\pi/2n)$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται η περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας. Συγκεκριμένα γίνεται η παρουσίαση των δοκιμών που χρησιμοποιήθηκαν, των υλικών και του τρόπου κατασκευής τους. Ακόμα, περιγράφεται η μηχανή των δοκιμών και η διαδικασία και οι συνθήκες κάτω από τις οποίες αυτά διεξήχθησαν.

3.1. Δοκίμια

Για τη μελέτη που έγινε στα πλαίσια αυτής της εργασίας σχεδιάστηκε μια σειρά πειραμάτων που αφορούσε διάφορα δοκίμια. Έχοντας ως σκοπό τη μελέτη της κατάρρευσης κυλινδρικών σωλήνων από δύο υλικά κατασκευάστηκαν δέκα δοκίμια. Τα δύο ήταν από αλουμίνιο, τέσσερα ήταν από πλαστικό, ενώ άλλα τέσσερα αποτελούνταν από πλαστικούς σωλήνες μέσα στους αλουμινένιους.

Αρχικά χρησιμοποιήθηκαν δύο δοκίμια από αλουμίνιο ίδιας διαμέτρου αλλά διαφορετικού πάχους μεταξύ τους. Για κάθε έναν από τους δύο σωλήνες αλουμινίου κατασκευάστηκαν δύο πλαστικοί σωλήνες διαφορετικού πάχους με εξωτερική διάμετρο όση η εσωτερική των αλουμινένιων. Στη συνέχεια, για να μελετηθεί η κατάρρευση των σωλήνων αυτών ως σύνολο, τοποθετήθηκαν πλαστικοί σωλήνες με τις παραπάνω διαστάσεις μέσα στους μεταλλικούς αποτελώντας έτσι μία ενιαία κατασκευή.

Η πρώτη σειρά δοκιμών που μελετήθηκε είχε πάχη 1mm για τους σωλήνες από αλουμίνιο ενώ για τους πλαστικούς είχε αντίστοιχα πάχη 2mm και 3mm.

Αντίθετα, η δεύτερη σειρά δοκιμών περιελάμβανε πάχη 2 mm για τους αλουμινένιους και δύο διαφορετικά πάχη, 2mm και 3mm για τους πλαστικούς σωλήνες.

Ακόμα, όλα τα δοκίμια είχαν ύψος $H=150$ mm. Αυτό το ύψος είναι τυπικό και χρησιμοποιείται αρκετά συχνά στις εργαστηριακές δοκιμές θλίψης.

Αναλυτικά τα δοκίμια που κατασκευάστηκαν και μελετήθηκαν ήταν τα εξής:

- 1) **A1** : Δοκίμιο αλουμινίου διαστάσεων 50mm × 48mm
- 2) **P1** : Δοκίμιο από πλαστικό διαστάσεων 48mm × 44mm
- 3) **P2** : Δοκίμιο από πλαστικό διαστάσεων 48mm×42mm
- 4) **A1P1** : Δοκίμιο από αλουμίνιο διαστάσεων 50mm × 48mm και πλαστικό 48mm × 44mm
- 5) **A1P2** : Δοκίμιο από αλουμίνιο διαστάσεων 50mm × 48mm και πλαστικό 48mm×42mm

- 6) **A2** : Δοκίμιο αλουμινίου διαστάσεων 50mm × 46mm
- 7) **P2** : Δοκίμιο από πλαστικό διαστάσεων 46mm × 42mm
- 8) **P3** : Δοκίμιο από πλαστικό διαστάσεων 46mm × 40mm
- 9) **A2P3** : Δοκίμιο από αλουμίνιο διαστάσεων 50mm × 46mm και πλαστικό 46mm×42mm
- 10) **A2P4** : Δοκίμιο από αλουμίνιο διαστάσεων 50mm × 46mm και πλαστικό 46mm×40mm

Για λόγους ευκολίας επιλέχθηκε ένα σύστημα ονοματολογίας που θα προσδιόριζε το υλικό των δοκιμίων και την ταυτότητα των σωλήνων που χρησιμοποιήθηκαν. Έτσι για τους αλουμινένιους σωλήνες χρησιμοποιήθηκε το γράμμα A, A1 για τον πρώτο και A2 για τον δεύτερο. Παρομοίως για τους πλαστικούς σωλήνες χρησιμοποιήθηκε το γράμμα P ακολουθούμενο από έναν αριθμό που προσδιορίζει τις διαστάσεις τους. Τέλος, τα δοκίμια που προέκυψαν από συνδυασμό και τοποθέτηση των πλαστικών σωλήνων μέσα στους μεταλλικούς ονομάστηκαν με βάση τους σωλήνες που τα αποτελούν.

Πραγματικές διαστάσεις των δοκιμίων: Παρακάτω παρουσιάζονται οι πραγματικές διαστάσεις των δοκιμίων, δηλαδή το ύψος, η εξωτερική και η εσωτερική τους διάμετρος και το πάχος τους όπως μετρήθηκαν πριν από την κατάρρευσή τους. Είναι φανερό ότι οι διαστάσεις αυτές διαφέρουν από τις ονομαστικές τους. Στους μεταλλικούς σωλήνες η διαφορά είναι σχεδόν αμελητέα διότι η κατασκευή τους έγινε σε

βιομηχανία από όπου προέκυψαν μεγάλοι μήκους σωλήνες με μεγάλη ακρίβεια στη διάμετρο και το πάχος τους. Σημειώνεται όμως, ότι όσον αφορά τις πραγματικές διαστάσεις των πλαστικών σωλήνων υπάρχουν επιφυλάξεις λόγω του ότι προέκυψαν από την κατεργασία της τórνευσης. Έτσι μπορεί να υπάρχει μία μικρή μεταβολή του πάχους κατά μήκους των σωλήνων, όπως επίσης και μία κυμάτωση του πάχους, που μπορεί να σχηματίζει τοπικά ακρότατα κατά το μήκος των δοκιμίων.

Δοκίμια	H (mm)	Dεξ (mm)	Dεσ (mm)	t (mm)
A1	150.36	50	48	1
P1	150	47.80	44.26	1.995
P2	149.86	47.71	42.03	2.85
A1P1	150	50	44.00	3.00
A1P2	150.13	50	42.00	4.04
A2	150.30	50	46	2
P3	150.08	45.90	42.10	2.06
P4	149.95	45.80	40.20	4.00
A2P3	150.12	50	41.50	4.10
A2P4	150.01	50	40.20	4.99

Υλικά που χρησιμοποιήθηκαν

Στη συνέχεια περιγράφονται τα χαρακτηριστικά καθώς και οι βασικές ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για τα δοκίμια, δηλαδή του αλουμινίου και του πλαστικού.

Αλουμίνιο: Το κράμα του αλουμινίου που χρησιμοποιήθηκε για τους μεταλλικούς σωλήνες ήταν το 6063-F25. Το υλικό αυτό έχει πυκνότητα $\rho=2.7 \text{ gr/cm}^3$, μέτρο ελαστικότητας $E=70 \text{ GPa}$ και λόγο Poisson 0.33. Ακόμα το ελάχιστο UTS, δηλαδή της μέγιστης τάσης που παρατηρείται στο διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης σε δοκιμή εφελκυσμού είναι $\min \text{UTS} \cong 225 \text{ MPa}$. Το ελάχιστο αρχικό όριο διαρροής είναι $\sigma_{\delta} \cong 190 \text{ MPa}$. Η ελάχιστη ολκιμότητα, δηλαδή η παραμόρφωση θραύσης είναι περίπου 10%. Τέλος, η σκληρότητα του υλικού είναι περίπου 73HB.

Πλαστικό: Οι πλαστικοί σωλήνες που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα ήταν από Ertalon 6 SA. Το υλικό αυτό έχει πυκνότητα $\rho=1.16 \text{ gr/cm}^3$. Οι μηχανικές του ιδιότητες είναι: εφελκυστική τάση σε διαρροή $\sigma_{\delta}=45 \text{ MPa}$, η εφελκυστική του παραμόρφωση σε θραύση είναι $>100\%$ και το μέτρο

ελαστικότητάς του είναι $E=1400$ MPa. Σημειώνεται εδώ ότι οι μετρήσεις των τιμών αυτών αφορούν υλικά σε ισορροπία με περιβάλλον $23^{\circ}\text{C}/50\%$ RH, που αντιπροσωπεύουν καλά τις συνθήκες στις οποίες έγιναν και τα πειράματα της εργασίας.

Κατασκευή δοκιμίων

Όπως αναφέρθηκε, τα δοκίμια είχαν τη μορφή σωλήνων αλουμινίου, σωλήνων από πλαστικό και επίσης σωλήνων από πλαστικό τοποθετημένων μέσα στους αλουμινένιους. Για κάθε περίπτωση παρακάτω περιγράφεται η διαδικασία της κατασκευής τους.

Σωλήνες από αλουμίνιο: Η μέθοδος κατασκευής των σωλήνων αλουμινίου ήταν η διέλαση [E1]. Κατά τη διέλαση το μέταλλο συμπιέζεται μέσω ενός εμβόλου και αναγκάζεται να περάσει παραμορφωμένο πλαστικά μέσα από μια κατάλληλα διαμορφωμένη μήτρα για να σχηματίσει ένα προϊόν με ελαττωμένη διατομή. Η διέλαση πραγματοποιείται συνήθως είτε εν θερμώ είτε εν ψυχρώ. Το υλικό των δοκιμίων προέκυψε από θερμή διέλαση. Η κατεργασία πραγματοποιείται σε μεγάλες θερμοκρασίες για να μειωθεί η τάση ροής του υλικού και συνεπώς το φορτίο διέλασης και να αυξηθεί η ολκιμότητά του. Το αλουμίνιο και τα κράματά του διελάσσονται στους 470°C . Ο μεταλλικός θάλαμος που είναι δακτύλιος μεγάλου πάχους στο εσωτερικό του οποίου τοποθετείται το προ διέλαση τεμάχιο (μπιγιέτα), υπόκειται σε μεγάλες εσωτερικές πιέσεις που αναπτύσσονται κατά την κατεργασία με κίνδυνο την θραύση του σε περίπτωση υπερφόρτισης. Απλοί μεταλλικοί δακτύλιοι μεγάλου πάχους κατασκευάζονται από χάλυβες υψηλής αντοχής και αντέχουν σε πιέσεις μέχρι 1000MPa . Για μεγαλύτερες πιέσεις, μέχρι 1700MPa οι θάλαμοι αυτοί κατασκευάζονται από δύο ομόκεντρους δακτυλίους που ο ένας τοποθετείται μέσα στον άλλο σε συναρμογή σύσφιξης. Χαλύβδινα έμβολα αντέχουν σε θλιπτική πίεση μέχρι 1200MPa ενώ έμβολα κατασκευασμένα από κοβάλτιο επιτρέπουν θλιπτικές πιέσεις μέχρι 3300MPa .

Το υλικό αυτό υπήρχε στις αποθήκες του εργαστηρίου του τομέα κατεργασιών. Αρχικά ήταν σε μορφή σωλήνα μεγάλου μήκους, όπως είχε προκύψει από την κατεργασία της διέλασης. Έτσι, οι σωλήνες αυτοί έπρεπε να κοπούν στο επιθυμητό ύψος των 150 mm για να δημιουργηθούν με αυτόν τον τρόπο τα κυλινδρικά δοκίμια. Η κοπή έγινε με την χρήση του τροχού κοπής που βρίσκεται στο εργαστήριο του τομέα

Σωλήνες από πλαστικό: Οι πλαστικοί σωλήνες που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα προήλθαν από συμπαγείς πλαστικούς σωλήνες που βρίσκονταν στο εργαστήριο. Αυτοί οι αρχικά συμπαγείς σωλήνες στη συνέχεια κατεργάστηκαν στον τόρνο. Κατά την τόννευση κόπηκαν στην επιθυμητή εξωτερική και εσωτερική διάμετρο από το τεχνικό προσωπικό του εργαστηρίου ώστε να αποκτήσουν την τελική τους μορφή. Παρακάτω φαίνεται σε φωτογραφία η μορφή του αρχικά συμπαγούς σωλήνα από πλαστικό που χρησιμοποιήθηκε.

Δοκίμια από αλουμινένιους σωλήνες επενδυμένους εσωτερικά με πλαστικό: Η τοποθέτηση των εσωτερικών πλαστικών σωλήνων μέσα στους μεταλλικούς έγινε με τη χρήση του τόρνου. Οι αλουμινένιοι σωλήνες στερεώθηκαν στο τσοκ του τόρνου και οι πλαστικοί στο εργαλειοφορείο. Στη συνέχεια, η διείσδυση του εσωτερικού σωλήνα έγινε με την πίεση του εργαλειοφορείου. Σημαντικό είναι το ότι οι διαστάσεις των δοκιμίων ήταν οριακές, ώστε να επιτευχθεί σφιχτή συναρμογή. Ακόμα, η μία άκρη του εσωτερικού σωλήνα είχε ελαφρώς κοπεί στη εξωτερική της πλευρά για να έρθει στο οριακό σημείο που είναι δυνατό να αρχίσει η διείσδυση. Έπειτα, με την παρουσία λιπαντικού συνεχίστηκε η διείσδυση και πραγματοποιήθηκε η σφιχτή συναρμογή.



Σχήμα 3.1: Αρχική μορφή των υλικών από τα οποία προήλθαν οι σωλήνες των πειραμάτων

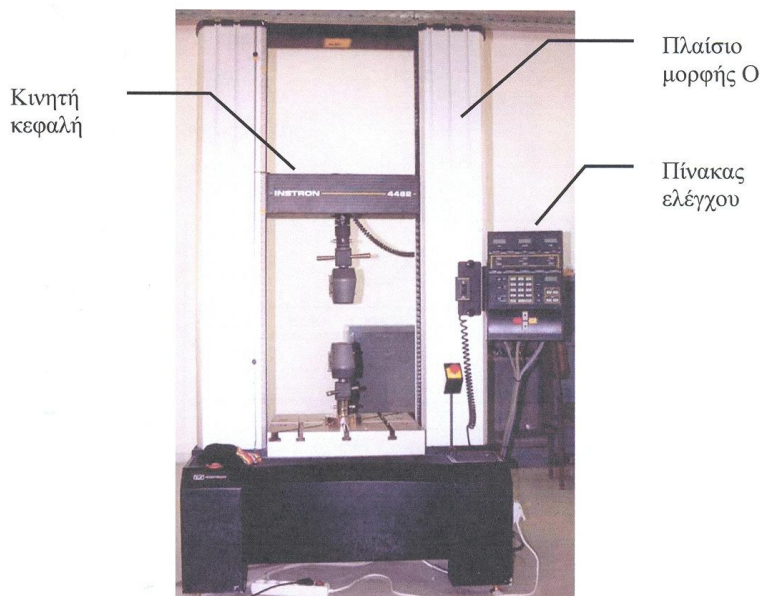
3.2. Συνθήκες πειραμάτων

Μηχανή δοκιμών

Τα πειράματα έγιναν στο μηχάνημα δοκιμών INSTRON 4482, το οποίο βρίσκεται στον πρώτο όροφο του εργαστηρίου του τομέα των κατεργασιών. Η μηχανή αυτή δουλεύει μηχανικά, δηλαδή μεταφέρει κίνηση, ροπή και δυνάμεις με μηχανικό τρόπο (μηχανισμός κοχλία – περικοχλίου). Σε αυτή μπορούν να διεξαχθούν πειράματα εφελκυσμού και θλίψης, καθώς έχει τη δυνατότητα να μεταφέρει εφελκυστικά αλλά και θλιπτικά φορτία. Το ονομαστικό της φορτίο είναι 10 tn. Αυτό σημαίνει ότι η μέγιστη θλιπτική της ικανότητα αρκούσε για το σκοπό των πειραμάτων που έγιναν. Αυτό συνέβη διότι τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν, αν και μερικά ήταν αρκετά παχιά αποτελούνταν από αλουμίνιο και πλαστικό, δηλαδή υλικά με μικρότερη αντοχή σε σχέση με άλλα όπως οι χάλυβες. Γι' αυτό επιλέχθηκε αυτή η μηχανική πρέσα και όχι η υδραυλική που υπάρχει στο εργαστήριο και η οποία έχει πολύ μεγαλύτερο ονομαστικό φορτίο 100 tn.

Τα βασικά μέρη της πρέσας που χρησιμοποιήθηκε είναι:

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



Σχήμα 3.2: Η μηχανή INSTRON 4482, όπου έγιναν τα πειράματα

Η δυνατότητα σύνδεσης της μηχανής με τον Η/Υ μας δίνει επίσης τη δυνατότητα αποθήκευσης των δεδομένων της συμπίεσης κατευθείαν στη μνήμη του. Ακόμα παρείχε άμεσα για καθ' όλη τη διάρκεια της δοκιμής το διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης κάθε δοκιμίου, έτσι ώστε να γίνονται καλύτερα αντιληπτές οι μεταβολές του.

Διεξαγωγή πειραμάτων

Τα πειράματα διεξήχθησαν υπό στατικές συνθήκες. Η ταχύτητα του εμβόλου ήταν 10 mm/min, ταχύτητα που προσεγγίζει αρκετά καλά τις στατικές συνθήκες και χρησιμοποιείται αρκετά συχνά σε τέτοιου είδους δοκιμές. Τα δοκίμια επιλέχθηκε να συμπιεστούν κατά 100 mm, δηλαδή κατά τα 2/3 του μήκους τους. Έτσι ο χρόνος που χρειάστηκε για την κατάρρευση κάθε δοκιμίου ήταν δέκα λεπτά.

Η πειραματική διαδικασία καταγραφόταν οπτικά με τη βοήθεια ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής. Κατά την εξέλιξη κάθε πειράματος ανά τακτά χρονικά διαστήματα γινόταν η λήψη των φωτογραφιών. Η λήψη τους επιλέχθηκε να γίνει κυρίως στα πιο χαρακτηριστικά σημεία της κατάρρευσης όπως στα τοπικά ακρότατα των διαγραμμάτων του φορτίου, δηλαδή τις στιγμές της αρχής του σχηματισμού και της ολοκλήρωσης των λοβών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

4.1. Επεξεργασία πειραματικών αποτελεσμάτων

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται η παρουσίαση των πειραμάτων και των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από αυτά.

Σημαντική είναι η απεικόνιση της διαδικασίας της κατάρρευσης στο διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης. Το διάγραμμα αυτό προέκυψε μετά από επεξεργασία των δεδομένων της κατάρρευσης, τα οποία είχαν αποθηκευθεί στη μνήμη του υπολογιστή. Αυτά αναφέρονταν σε περίπου έξι χιλιάδες χρονικές στιγμές της διαδικασίας του πειράματος. Έτσι έχοντας τόσο μεγάλο εύρος δεδομένων για το φορτίο και τη μετατόπιση κατά την εξέλιξη της δοκιμής τα διαγράμματα που τελικά προκύπτουν είναι εξαιρετικά ακριβή.

Από τις φωτογραφίες που λήφθηκαν κατά την κατάρρευση κάθε δοκιμίου επιλέχτηκαν να παρουσιαστούν οι πιο χαρακτηριστικές. Αυτές περιλαμβάνουν κυρίως τον σχηματισμό και την ολοκλήρωση των λοβών, δηλαδή τα τοπικά μέγιστα και ελάχιστα, τις στιγμές απότομων μεταβολών φορτίου ή τις στιγμές κατά τις οποίες έγιναν θραύσεις στα δοκίμια. Για να υπάρχει αντιστοιχία φωτογραφιών και διαγράμματος κάτω από κάθε φωτογραφία υπάρχει ένας αριθμός που δείχνει σε ποιο σημείο του διαγράμματος αυτή αντιστοιχεί.

Επίσης, πάνω στο διάγραμμα φαίνεται μια μικρή γραμμή που δείχνει το μέσο φορτίο της παραμόρφωσης. Αυτό προέκυψε από το μέσο όρο όλων των μετρήσεων που παρείχε η μηχανή κατά τη διάρκεια της μηχανής και είναι σημαντικό μέγεθος που αντικατοπτρίζει την απόκριση των δοκιμίων στην απορρόφηση ενέργειας.

Αποτελέσματα πειραμάτων – υπολογισμοί μεγεθών

Στη συνέχεια αναγράφονται τα σημαντικότερα αποτελέσματα των πειραμάτων. Αυτά είναι:

- Ύψος δοκιμίου μετά την αποφόρτιση

Το ύψος H (mm) του δοκιμίου μετά την αποφόρτισή του δείχνει το μέγεθος της ελαστικής επαναφοράς που παρουσιάζει.

- Συνολική ενέργεια παραμόρφωσης

Η συνολική ενέργεια παραμόρφωσης είναι ένα από τα πιο σημαντικά μεγέθη που ενδιαφέρουν τον μηχανικό όσον αφορά την κατάρρευση μιας κατασκευής. Ορίζεται ως:

$$E_{\text{abs}} = \int P \cdot d\delta = \bar{P} \cdot \delta, \text{ όπου } P \text{ το φορτίο και } \delta \text{ η μετατόπιση του εμβόλου.}$$

Αντιστοιχεί δηλαδή ως το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη φορτίου – μετατόπισης. Φυσικά στόχος είναι τα δοκίμια να απορροφούν όσο το δυνατόν περισσότερη ενέργεια, επομένως το διάγραμμά τους να έχει μεγάλο εμβαδόν και σχετικά σταθερή καμπύλη φορτίου. Έτσι για τον υπολογισμό της πολλαπλασιάστηκε το μέσο φορτίο της θλίψης με τη συνολική μετατόπιση του εμβόλου.

- Μέγιστο αρχικό φορτίο

Είναι το μέγιστο φορτίο της θλίψης και συνήθως το πρώτο τοπικό μέγιστο του φορτίου. Αναφέρεται το πόσο είναι καθώς και σε ποιο σημείο συμβαίνει. Συνήθως δεν είναι επιθυμητό να υπάρχουν πολύ μεγάλα αρχικά φορτία, αλλά η μετάβαση στην πλαστική περιοχή των κατασκευών να γίνεται σχετικά ομαλά και στη συνέχεια το φορτίο να διατηρείται σε σχετικά σταθερά επίπεδα.

- Μέσο φορτίο θλίψης

Όπως αναλύθηκε παραπάνω, το μέγιστο φορτίο θλίψης υπολογίστηκε από τα δεδομένα που παρείχε η μηχανή και χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της συνολικής ενέργειας παραμόρφωσης.

- CFE (Crush Force Efficiency ή Δείκτης Ομοιομορφίας Φορτίου)

Ο δείκτης CFE ορίζεται ως:
$$CFE = \frac{P_m}{P_{\text{max}}}$$

Είναι δηλαδή ο λόγος του μέσου προς το μέγιστο φορτίο της κατάρρευσης. Ο δείκτης αυτός είναι ιδιαίτερης σημασίας για το μηχανικό, διότι αποτελεί ένδειξη του πόσο σταθερή είναι η καμπύλη του φορτίου. Όπως ήδη αναφέρθηκε, ιδανική περίπτωση είναι αυτή κατά την οποία η καμπύλη του φορτίου είναι σταθερή, επομένως η ιδανική τιμή του δείκτη είναι η μονάδα. Στόχος των μηχανικών είναι με τις κατασκευές τους να προσεγγίζουν όσο το δυνατόν περισσότερο αυτή την ιδανική τιμή.

- Ειδική απορρόφηση ενέργειας (SEA)

Η ειδική απορρόφηση ενέργειας ορίζεται ως ο λόγος της ενέργειας που απορροφήθηκε από μια κατασκευή προς τη μάζα της κατασκευής η οποία παραμορφώθηκε.

$$SEA = \frac{E_{absorbed}}{m}$$

Μετά τη μέτρηση της συνολικής μάζας κάθε δοκιμίου η μάζα που παραμορφώθηκε υπολογίστηκε από τον πολλαπλασιασμό της με το ποσοστό του αρχικού ύψους που συμπίεστηκε. Δηλαδή, στη συγκεκριμένη περίπτωση η μάζα που παραμορφώθηκε είναι τα 2/3 της αρχικής μάζας των δοκιμίων.

Το μέγεθος αυτό είναι επίσης σημαντικό για την αξιολόγηση και σύγκριση της απόδοσης διατάξεων απορρόφησης ενέργειας με διαφορετικές μάζες και γεωμετρίες. Ακόμα χρησιμοποιείται ως κριτήριο για την επιλογή της διάταξης για απορρόφηση ενέργειας όταν υπάρχουν περιορισμοί στη μάζα.

Τελικές όψεις

Στη συνέχεια παρατίθενται οι τελικές όψεις των δοκιμίων μετά το τέλος των πειραμάτων και της ελαστικής τους επαναφοράς, θεωρώντας πρόοψη την όψη από την οποία τραβήχτηκαν οι προοδευτικές φωτογραφίες της κατάρρευσης. Δίπλα από αυτές υπάρχει η κλίμακα, ώστε να είναι δυνατή η αντίληψη των πραγματικών μεγεθών.

Τα δοκίμια που αποτελούνται από δύο υλικά κόπηκαν στον τροχό κοπής και η τελική τους πρόοψη φαίνεται επίσης σε τομή. Έτσι διακρίνονται καλύτερα οι λοβοί και οι σχηματισμοί του εσωτερικού πλαστικού σωλήνα, οι οποίοι δεν είναι δυνατό να φανούν διαφορετικά.

Τρόπος κατάρρευσης

Τέλος, ακολουθεί ένα κείμενο στο οποίο περιγράφεται ο τρόπος κατάρρευσης του κάθε δοκιμίου. Σε αυτό αναλύεται η μορφή κάθε λοβού και η διαδικασία που αυτοί σχηματίζονται, ενώ παράλληλα συσχετίζονται τα στάδια της κατάρρευσης με το διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης και με τις φωτογραφίες που λήφθηκαν κατά την κατάρρευση. Επίσης, περιγράφεται ο σχηματισμός και η εξέλιξη των θραύσεων των δοκιμίων όπου αυτές συνέβησαν και ο τρόπος που επηρέασαν τη συνέχεια της κατάρρευσης.

4.2. Παρουσίαση αποτελεσμάτων

4.2.1. ΔΟΚΙΜΙΟ A1: Al 50×50 mm

ΔΙΑΔΟΧΙΚΕΣ ΟΨΕΙΣ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ



1



2



3



4



5



6



7



8



9



10

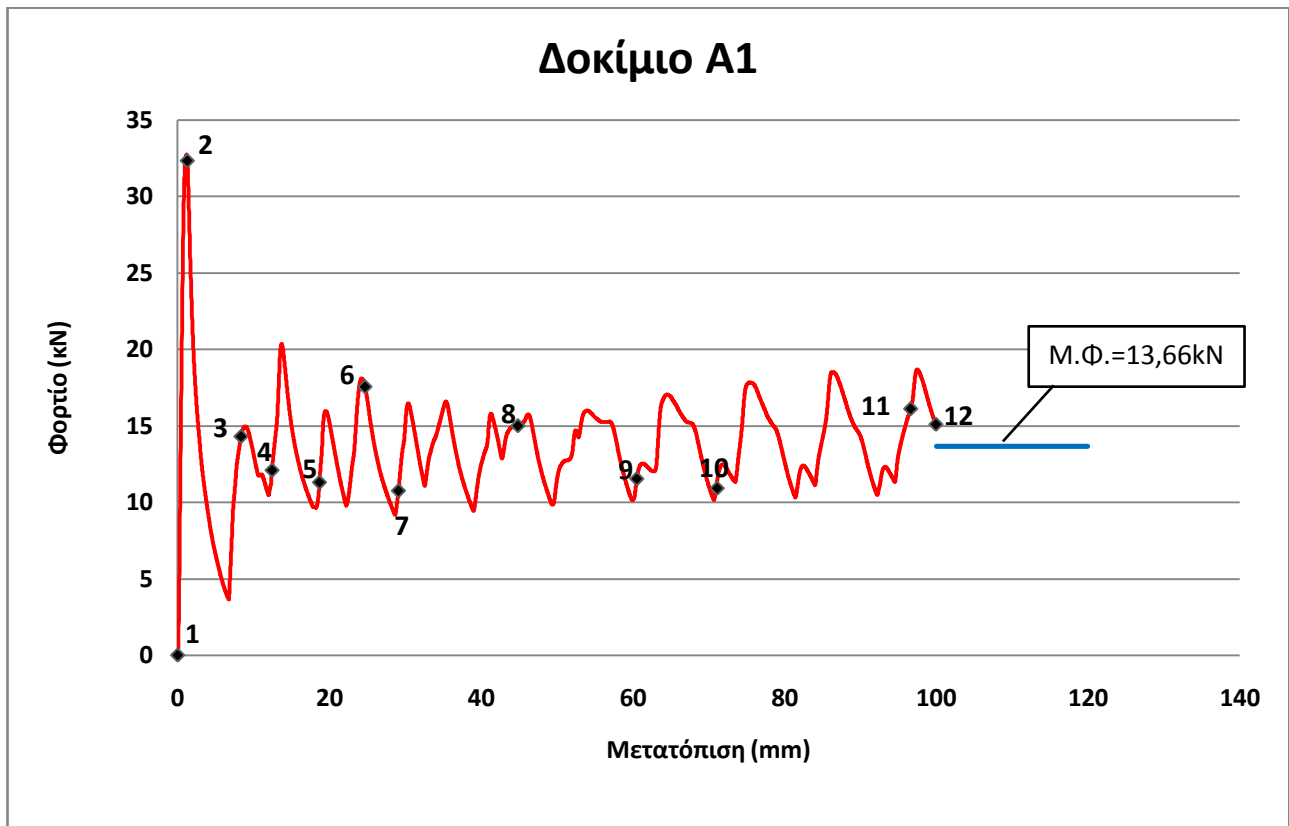


11



12

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΦΟΡΤΙΟΥ – ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ



ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Ύψος μετά την αποφόρτιση: $H = 50,95 \text{ mm}$

Ενέργεια παραμόρφωσης: $E_{\text{παρ}} = 1,366 \text{ kJ}$

Μέγιστο φορτίο: $P_{\text{max}} = 32,76 \text{ kN}$ στα $1,16 \text{ mm}$

Μέσο φορτίο: $P_m = 13,66 \text{ kN}$

$CFE = 0,42$

Ειδική απορρόφηση ενέργειας: $SEA = 30,41 \text{ kJ/kg}$

ΤΕΛΙΚΕΣ ΟΨΕΙΣ



Πρόψη



Κάτοψη



Άνοψη

ΤΡΟΠΟΣ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ

Το δοκίμιο A1 με διαστάσεις 50×48 mm παρουσίασε όπως αναμενόταν έναν εκτατό (αξονοσυμμετρικό) τρόπο κατάρρευσης. Εμφανίστηκαν 10 λοβοί, από τους οποίους ο τελευταίος δεν πρόλαβε να ολοκληρωθεί, ενώ η διαμόρφωσή τους ξεκίνησε από το πάνω μέρος του δοκιμίου. Στο διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης κάθε τοπικό ακρότατο της καμπύλης, δηλαδή κάθε κορυφή ή κοιλάδα αντιστοιχεί στον σχηματισμό μιας πλαστικής άρθρωσης και κάθε λοβός αποτελείται από τέσσερις πλαστικές αρθρώσεις. Άρα για την ολοκλήρωση ενός λοβού στο διάγραμμα αντιστοιχούν τέσσερα τοπικά ακρότατα, από τα οποία το πρώτο ανήκει και στον προηγούμενο λοβό. Για τη δημιουργία του πρώτου λοβού απαιτείται το μέγιστο φορτίο της κατάρρευσης αφού το υλικό βρίσκεται ακόμα στην ελαστική περιοχή, ενώ για τη δημιουργία των υπολοίπων το φορτίο είναι φανερά μικρότερο, αφού το υλικό είναι ήδη τραυματισμένο. Συσχετίζοντας το διάγραμμα του φορτίου με τις φωτογραφίες

παρατηρούμε στην φωτογραφία 2 την αρχή του σχηματισμού του πρώτου λοβού η οποία αντιστοιχεί και στο μέγιστο φορτίο της κατάρρευσης. Στη συνέχεια στις φωτογραφίες 3 και 4 βλέπουμε το σχηματισμό του δεύτερου λοβού, που φαίνεται ολοκληρωμένος στην φωτογραφία 5. Όμοια στην φωτογραφία 7, αφού έχει ολοκληρωθεί και ο τρίτος λοβός το φορτίο αυξάνεται πάλι για το σχηματισμό του επόμενου και κατά παρόμοιο τρόπο συνεχίζεται η κατάρρευση. Στο συγκεκριμένο δοκίμιο, όπως φαίνεται από το διάγραμμα αλλά και από τις εικόνες από τη μετατόπιση των 50 mm και μετά (φωτογραφίες 8 και μετά) παρατηρείται μια ασυμμετρία στη δεξιά και αριστερή πλευρά που οφείλεται στο υλικό. Έτσι, δεν συμμετέχει ταυτόχρονα όλη η διατομή στην παραμόρφωση αλλά σταδιακά, κάτι που φαίνεται και στο διάγραμμα από τη μικρή διαταραχή που υπάρχει μετά τα τοπικά ελάχιστα και κατά την αύξηση του φορτίου για το σχηματισμό των λοβών. Ακόμα όσο εξελίσσεται η συμπίεση τα τοπικά μέγιστα ελαφρώς μεγαλώνουν, γεγονός που είναι απόλυτα λογικό αφού το υλικό έχοντας συμπιεστεί αρκετά παρουσιάζει μεγαλύτερη αντίσταση στον περαιτέρω σχηματισμό λοβών.

4.2.2. ΔΟΚΙΜΙΟ P1: P1 48mm×44mm

ΔΙΑΔΟΧΙΚΕΣ ΟΨΕΙΣ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ



1



2



3



4



5



6



7



8

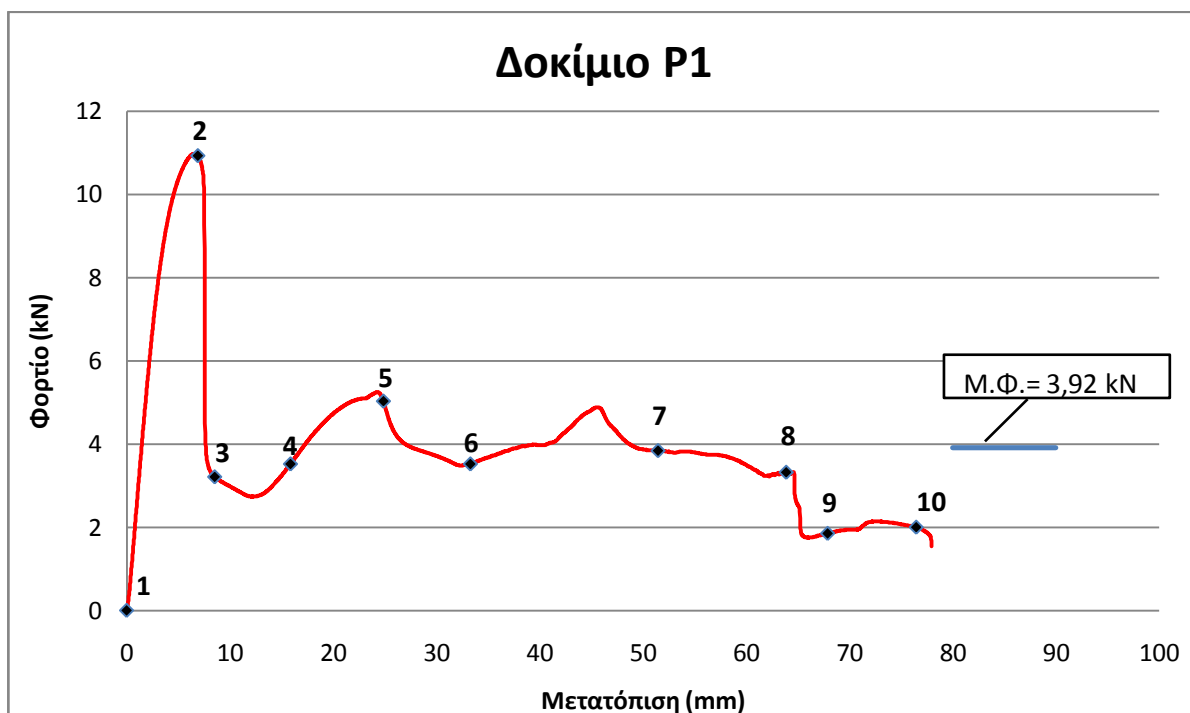


9



10

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΦΟΡΤΙΟΥ – ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ



ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Ύψος μετά την αποφόρτιση: $H = 128 \text{ mm}$

Ενέργεια παραμόρφωσης: $E_{\text{παρ}} = 0,306 \text{ kJ}$

Μέγιστο φορτίο: $P_{\text{max}} = 10,97 \text{ kN}$ στα $6,46 \text{ mm}$

Μέσο φορτίο: $P_m = 3,92 \text{ kN}$

$\text{CFE} = 0,36$

Ειδική απορρόφηση ενέργειας: $\text{SEA} = 12,01 \text{ kJ/kg}$

Τα μεγέθη υπολογίστηκαν μέχρι τη μετατόπιση των 78 mm όπου σταμάτησε η συμπίεση.

ΤΕΛΙΚΕΣ ΟΨΕΙΣ



Πρόοψη



Πλάγια όψη από δεξιά



Πίσω όψη



Πλάγια όψη από αριστερά



Κάτοψη



Άνοψη

ΤΡΟΠΟΣ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ

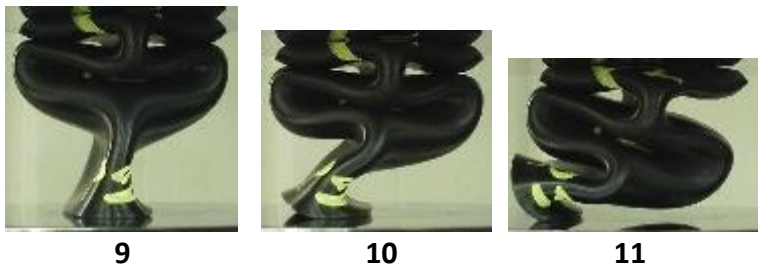
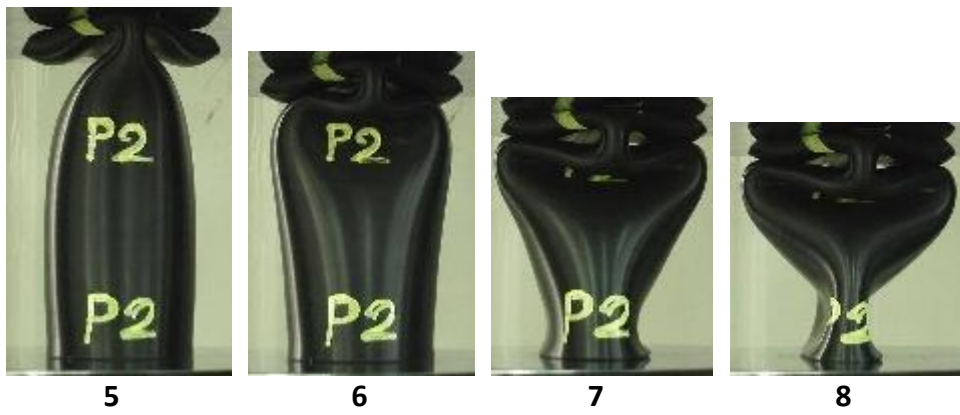
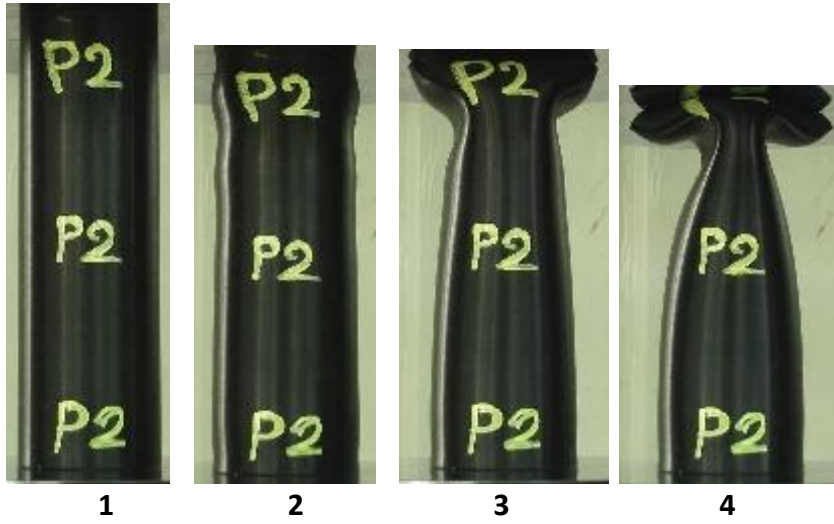
Ο τρόπος κατάρρευσης του δοκιμίου P1 χαρακτηρίζεται μη εκτατός και οι λοβοί που σχηματίζονται είναι τρεις 3D diamond. Αρχικά η κατάρρευση του δοκιμίου ξεκινάει από την πάνω πλευρά με τον σχηματισμό του πρώτου λοβού όπως φαίνεται στην φωτογραφία 3. Στη συνέχεια ακολουθεί ο σχηματισμός των δύο επόμενων μη εκτατών 3D diamond λοβών που

ολοκληρώνεται περίπου στη μετατόπιση των 60 mm. Σε αυτό το σημείο μορφοποιήθηκε η κάτω διατομή του δοκιμίου από κυκλική σε ελλειψοειδή, που φαίνεται από τις φωτογραφίες 8 και 9. Έπειτα ακολουθεί ένα είδος λυγισμού. Αυτό είχε σαν συνέπεια το δοκίμιο να λυγίσει προς την αριστερή πλευρά και να μειωθεί απότομα το φορτίο θλίψης. Αφού το δοκίμιο είχε λυγίσει προς τα αριστερά, όπως φαίνεται στη φωτογραφία 10, το καμπτικό φορτίο το ανάγκασε να πεταχτεί έξω από τη μηχανή στη μετατόπιση των 78 mm και σε αυτό το σημείο σταμάτησε και η δοκιμή.

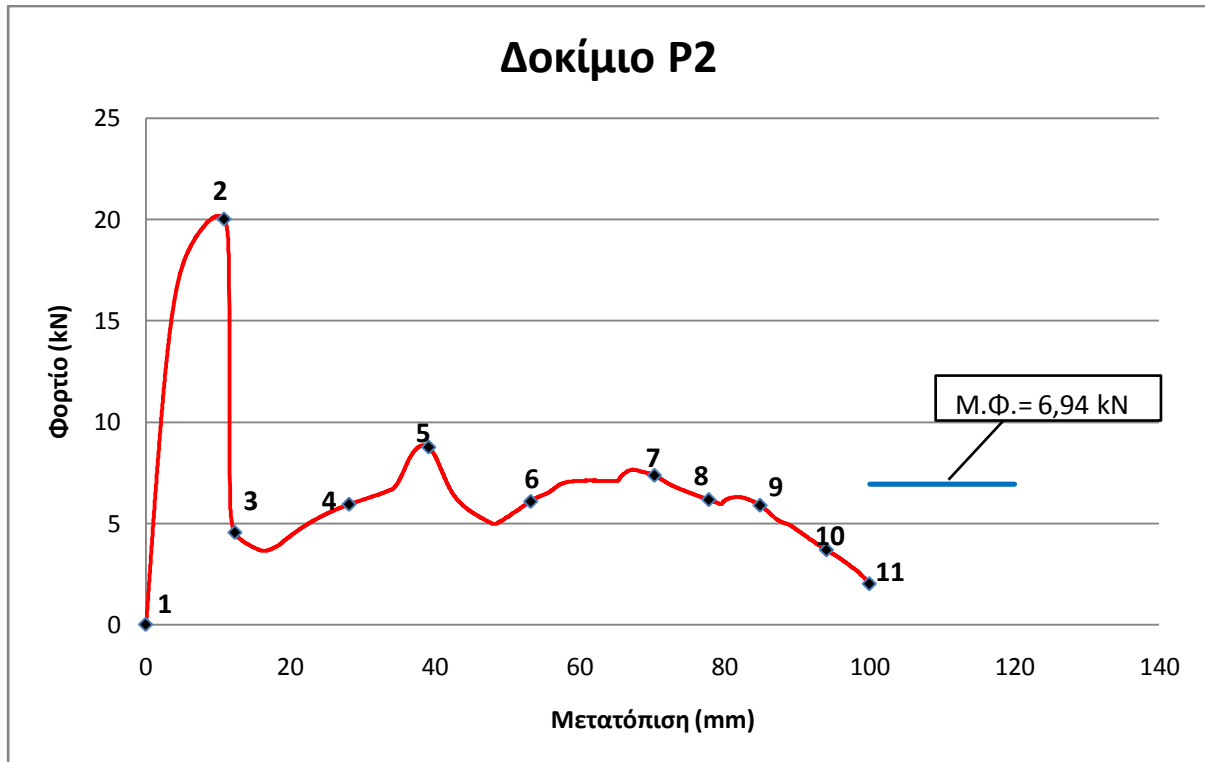
Στις φωτογραφίες πριν αλλά και μετά από την κατάρρευση είναι εμφανές ότι στην περιφέρεια του δοκιμίου υπάρχουν ίνες από το πλαστικό τυλιγμένες γύρω από το σωλήνα. Αυτό είναι αποτέλεσμα της κακής απομάκρυνσης του νηματοειδούς αποβλίττου κατά τη διάρκεια της τόννευσης. Στο τελευταίο δηλαδή στάδιο της τόννευσης το βάθος κοπής ήταν πολύ μικρό όπως επίσης και η πρόωση. Αυτό είχε σαν συνέπεια το απόβλιττο να μην μπορεί να απομακρυνθεί επαρκώς. Βέβαια, θεωρείται ότι τα νήματα του πλαστικού δεν μεταβάλλουν τις διαστάσεις του δοκιμίου ούτε και τη συμπεριφορά του στην κατάρρευση.

4.2.3. ΔΟΚΙΜΙΟ P2: P1 48mm×42mm

ΔΙΑΔΟΧΙΚΕΣ ΟΨΕΙΣ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΦΟΡΤΙΟΥ – ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ



ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Ύψος μετά την αποφόρτιση: $H = 125 \text{ mm}$

Ενέργεια παραμόρφωσης: $E_{\text{παρ}} = 0,694 \text{ kJ}$

Μέγιστο φορτίο: $P_{\text{max}} = 20,17 \text{ kN}$ στα $9,86 \text{ mm}$

Μέσο φορτίο: $P_m = 6,94 \text{ kN}$

$\text{CFE} = 0,34$

Ειδική απορρόφηση ενέργειας: $\text{SEA} = 14,71 \text{ kJ/kg}$

ΤΕΛΙΚΕΣ ΟΨΕΙΣ



Πρόοψη



Πλάγια όψη από δεξιά



Κάτοψη



Άνοψη

ΤΡΟΠΟΣ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ

Ο τρόπος κατάρρευσης του δοκιμίου P2 είναι μη εκτατός. Κατά τη συμπίεσή του διαμορφώθηκαν τρεις μη εκτατοί 2D diamond λοβοί. Στη μετατόπιση των 15 mm περίπου έχει σχηματιστεί ο πρώτος λοβός όπως φαίνεται και στη φωτογραφία 3. Έπειτα όπως φαίνεται στη φωτογραφία 6 σχηματίζεται και ο δεύτερος μη εκτατός λοβός και στη συνέχεια η διαμόρφωση επιβάλλεται προς τα κάτω με το σχηματισμό της κάτω διατομής του δοκιμίου και τη δημιουργία του τρίτου λοβού, που φαίνεται χαρακτηριστικά στη φωτογραφία 9. Όμως σε αυτό το σημείο επειδή η κάτω διατομή έχει γίνει πολύ στενή και δεν αντέχει άλλο φορτίο, το δοκίμιο γλιστράει στο πλάι και λυγίζει. Ο λυγισμός προς την δεξιά πλευρά φαίνεται στις φωτογραφίες 10 και 11. Αυτό αντικατοπτρίζεται στο διάγραμμα από τη μεγάλη μείωση του φορτίου κατά το τελευταίο στάδιο της συμπίεσης.

4.2.4. ΔΟΚΙΜΙΟ A1P1 : Al 50mm×48mm + Pl 48mm×44mm

ΔΙΑΔΟΧΙΚΕΣ ΟΨΕΙΣ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ



1



2



3



4



5



6



7



8



9



10

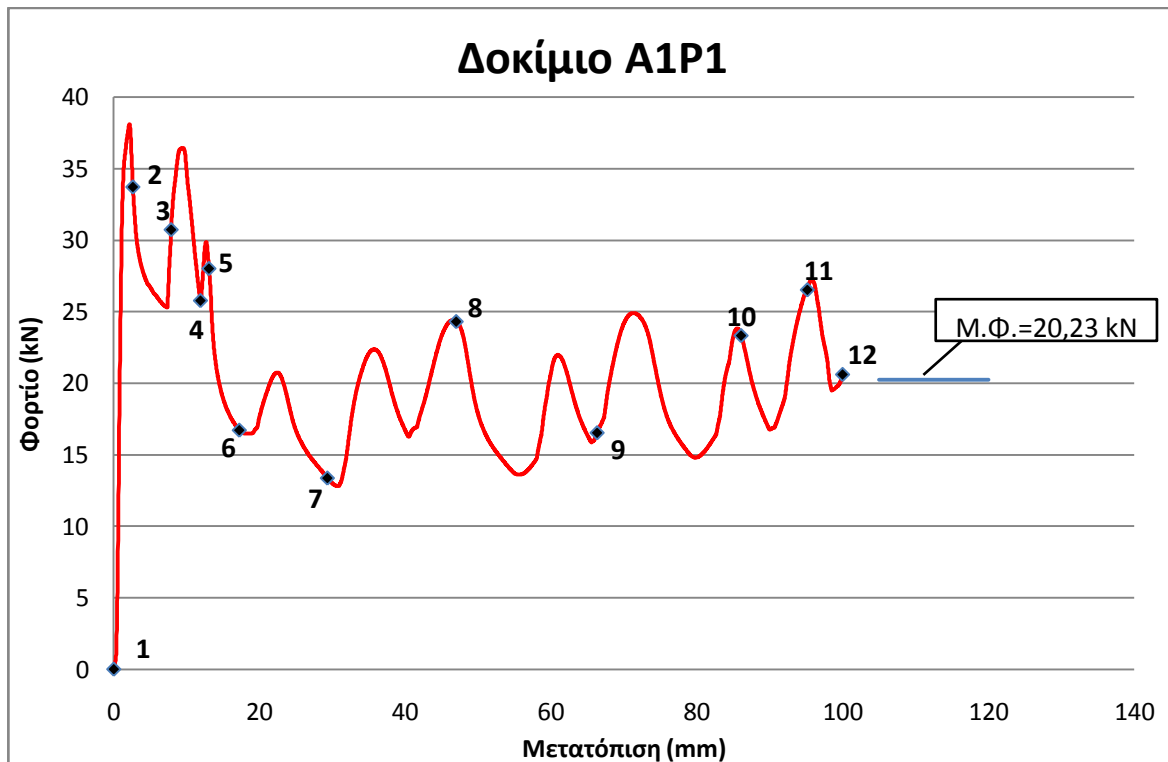


11



12

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΦΟΡΤΙΟΥ – ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ



ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Ύψος μετά την αποφόρτιση: $H = 58,6 \text{ mm}$

Ενέργεια παραμόρφωσης: $E_{\text{παρ}} = 2,023 \text{ kJ}$

Μέγιστο φορτίο: $P_{\text{max}} = 38,08 \text{ kN}$ στα $2,13 \text{ mm}$

Μέσο φορτίο: $P_m = 20,23 \text{ kN}$

$CFE = 0,53$

Ειδική απορρόφηση ενέργειας: $SEA = 26,16 \text{ kJ/kg}$

ΤΕΛΙΚΕΣ ΟΨΕΙΣ



Πλάγια όψη από αριστερά



Πίσω όψη



Πλάγια όψη από δεξιά



Κάτοψη



Άνοψη



Πρόοψη σε τομή

ΤΡΟΠΟΣ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ

Το δοκίμιο AIP1 από αλουμίνιο και πλαστικό παρουσίασε έναν μη εκτατό τρόπο κατάρρευσης που επηρεάστηκε σημαντικά από την παρουσία του εσωτερικού σωλήνα. Η συμπίεση οδήγησε στη δημιουργία εννιά λοβών, ενός αξονοσυμμετρικού και οκτώ μη εκτατών 3D diamond. Αρχικά βλέπουμε το μέγιστο φορτίο της κατάρρευσης που αφορά τη συνολική κατασκευή και οδηγεί στη δημιουργία του πρώτου λοβού

(φωτογραφία 3). Ο πρώτος αυτός λοβός όμως σχηματίστηκε μόνο από το αλουμίνιο, ενώ το πλαστικό δεν συμμετείχε, δημιούργησε έναν 3D diamond σχηματισμό και δεν παγιδεύτηκε στον αξονοσυμμετρικό λοβό. Στις φωτογραφίες 3 έως 6 είναι εμφανές ότι δεν ακολούθησε το πλαστικό γιατί ο πρώτος λοβός είναι αρκετά λεπτότερος από τον δεύτερο της φωτογραφίας 6, ο οποίος αφορά και τα δύο υλικά. Έπειτα, για τον σχηματισμό του δεύτερου λοβού αλληλεπίδρασαν ο μη εκτατός τρόπος του πλαστικού με τον αξονοσυμμετρικό τρόπο κατάρρευσης του αλουμινίου με συνέπεια να υπάρξει μία δεύτερη κορυφή στο φορτίο για το σχηματισμό του δεύτερου 3D diamond λοβού. Στη συνέχεια η κατάρρευση συνεχίστηκε κανονικά με μη εκτατό 3D diamond τρόπο, στον οποίο κάθε λοβός διαφέρει από τον προηγούμενο $180/3^\circ$. Το διάγραμμα αποτελείται από τοπικά μέγιστα στην προσπάθεια να σχηματιστούν οι λοβοί και τοπικά ελάχιστα, όταν αυτοί έχουν ολοκληρωθεί. Έτσι για παράδειγμα, στην φωτογραφία 6 έχουν ολοκληρωθεί οι δύο πρώτοι λοβοί, το φορτίο βρίσκεται σε τοπικό ελάχιστο και έπειτα αυξάνεται πάλι για το σχηματισμό του επόμενου λοβού, που φαίνεται ολοκληρωμένος στη φωτογραφία 7. Αντίστοιχα, στη φωτογραφία 8 το φορτίο βρίσκεται σε τοπικό μέγιστο, έχει διαμορφωθεί η διατομή του λοβού και κατά συνέπεια το υλικό δεν παρουσιάζει πλέον μεγάλη αντίσταση και το φορτίο πέφτει μέχρι να ολοκληρωθεί ο πέμπτος λοβός και να ξαναρχίσει η διαδικασία για το σχηματισμό του έκτου. Τέλος, μετά την αποφόρτιση υπήρχε μία μικρή υποχώρηση του πλαστικού προς τα κάτω λόγω της τάσης του για ελαστική επαναφορά.

4.2.5. ΔΟΚΙΜΙΟ A1P2: Al 50mm×48mm + Pl 48mm×42mm

ΔΙΑΔΟΧΙΚΕΣ ΟΨΕΙΣ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ



1



2



3



4



5



6



7



8



9

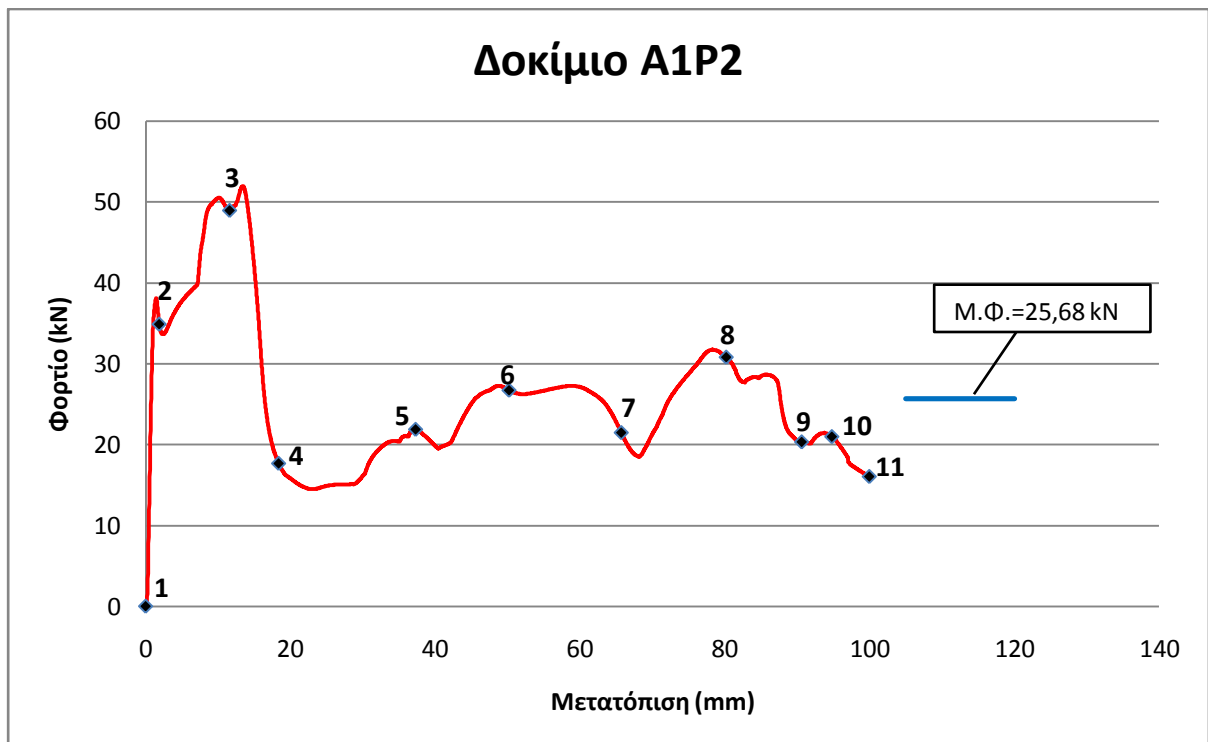


10



11

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΦΟΡΤΙΟΥ – ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ



ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Ύψος μετά την αποφόρτιση: $H = 67 \text{ mm}$

Ενέργεια παραμόρφωσης: $E_{\text{παρ}} = 2,568 \text{ kJ}$

Μέγιστο φορτίο: $P_{\text{max}} = 51,92 \text{ kN}$ στα $13,36 \text{ mm}$

Μέσο φορτίο: $P_m = 25,68 \text{ kN}$

$\text{CFE} = 0,49$

Ειδική απορρόφηση ενέργειας: $\text{SEA} = 27,91 \text{ kJ/kg}$

ΤΕΛΙΚΕΣ ΟΨΕΙΣ



Πρόοψη



Πλάγια όψη από δεξιά



Πλάγια όψη από αριστερά



Πίσω όψη



Κάτοψη



Άνοψη



Πρόοψη σε τομή

ΤΡΟΠΟΣ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ

Το δοκίμιο A1P2 από αλουμίνιο και πλαστικό πλησίασε περισσότερο προς τον μη εκτατό 2D diamond τρόπο κατάρρευσης. Αρχικά παρουσίασε ένα πρώτο τοπικό μέγιστο της τάξεως των 38 kN στη μετατόπιση των 1,4 mm ώστε να σχηματιστεί ο πρώτος λοβός. Αυτός ο πρώτος λοβός όμως αφορά μόνο το αλουμίνιο, καθώς το πλαστικό δεν ακολούθησε τον ίδιο σχηματισμό. Αυτό φαίνεται στη φωτογραφία 3, όπου ο λοβός διακρίνεται ότι είναι λεπτός και δεν περιέχει το πλαστικό και στην κάτοψη που φαίνονται οι διαφορετικοί σχηματισμοί των δύο σωλήνων. Βέβαια, ο σχηματισμός του αλουμινίου ήταν αρχικά αξονοσυμμετρικός και στην πορεία της κατάρρευσης (φωτογραφία 4) του επιβλήθηκε ο ελλειψοειδής σχηματισμός του πλαστικού. Μετά την ολοκλήρωση του πρώτου λοβού, λόγω της αλληλεπίδρασης των δύο τρόπων κατάρρευσης, δηλαδή του αλουμινίου που έχει την τάση να ακολουθεί αξονοσυμμετρικό και του πλαστικού, που έχει την τάση να ακολουθεί μη εκτατό, το φορτίο αυξάνεται πάλι ξεπερνώντας αυτή τη φορά το αρχικό μέγιστο και φτάνει τα 52 kN στην μετατόπιση των 13 mm (φωτογραφία 3) για να σχηματιστεί δεύτερος λοβός της κατασκευής που είναι 2D diamond. Από αυτό το σημείο και μετά η κατάρρευση του εξωτερικού σωλήνα διέπεται από τον μη εκτατό 2D diamond τρόπο του αρκετά πιο παχύ εσωτερικού πλαστικού σωλήνα. Έτσι σχηματίστηκαν έξι λοβοί, από τους οποίους ο τελευταίος δεν πρόλαβε να ολοκληρωθεί. Ο πρώτος είναι αξονοσυμμετρικός και αφορά μόνο το αλουμίνιο όπως φαίνεται και από τις εικόνες 3,4 και οι υπόλοιποι είναι 2D diamond. Στις τελικές όψεις διακρίνεται μία μικρή θραύση στην τρίτο λοβό, η οποία οφείλεται στις μεγάλες τάσεις που επικρατούν στην εξωτερική ίνα του καμπτόμενου κελύφους κατά το σχηματισμό του λοβού, που όμως δεν εξελίχθηκε κατά τη συνέχεια της κατάρρευσης. Από το σημείο της μετατόπισης 80 mm και μετά (φωτογραφία 8) η διαμόρφωση λαμβάνει μέρος στην κάτω διατομή του δοκιμίου και τέλος στην τελευταία φάση της κατάρρευσης, όπως φαίνεται στις φωτογραφίες 10 και 11, το δοκίμιο μετατοπίζεται ελαφρώς προς το πλάι με συνέπεια την αισθητή μείωση στο φορτίο θλίψης όπως φαίνεται στο διάγραμμα. Μετά την αποφόρτιση ο πλαστικός σωλήνας υποχωρεί ελαφρώς στην πάνω και κάτω διατομή του δοκιμίου.

4.2.6. ΔΟΚΙΜΙΟ Α2: ΑΙ 50mm × 46mm

ΔΙΑΔΟΧΙΚΕΣ ΟΥΣΙΕΣ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ



1



2



3



4



5



6



7



8



9

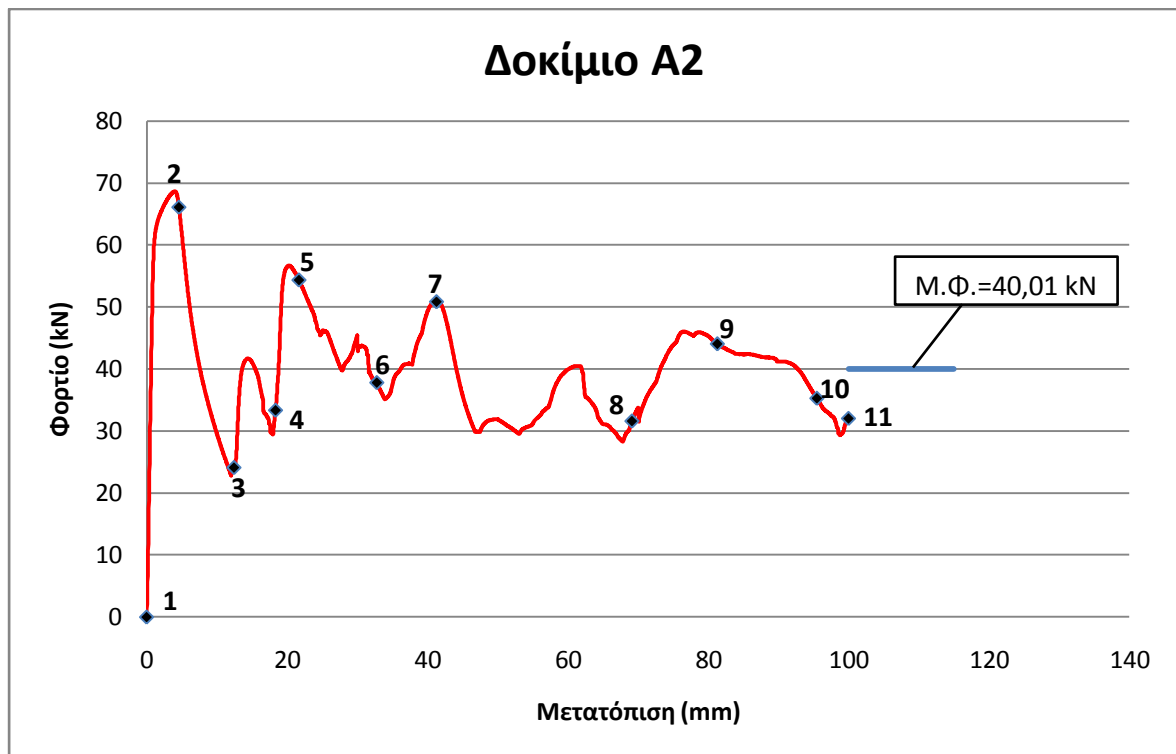


10



11

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΦΟΡΤΙΟΥ – ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ



ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Ύψος μετά την αποφόρτιση: $H = 51,20 \text{ mm}$

Ενέργεια παραμόρφωσης: $E_{\text{παρ}} = 4,001 \text{ kJ}$

Μέγιστο φορτίο: $P_{\text{max}} = 68,67 \text{ kN}$ στα $4,01 \text{ mm}$

Μέσο φορτίο: $P_m = 40,01 \text{ kN}$

$\text{CFE} = 0,58$

Ειδική απορρόφηση ενέργειας: $\text{SEA} = 47,41 \text{ kJ/kg}$

ΤΕΛΙΚΕΣ ΟΨΕΙΣ



Πρόοψη



Πλάγια όψη από δεξιά



Πλάγια όψη από αριστερά



Πίσω όψη



Άνοψη



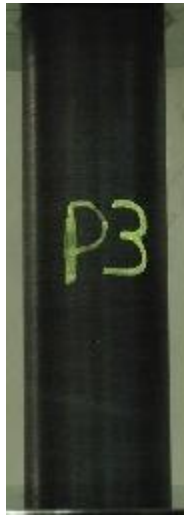
Κάτοψη

ΤΡΟΠΟΣ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ

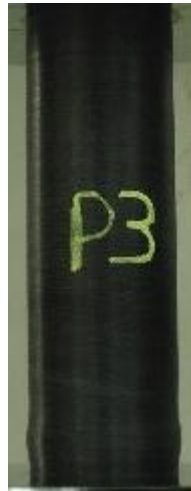
Το δοκίμιο αλουμινίου A2 ακολούθησε έναν μικτό τρόπο κατάρρευσης που αποτελείται από πέντε λοβούς, δύο αξονοσυμμετρικούς και τρεις μη εκτατούς 2D diamond. Λόγω του μεγαλύτερου πάχους του μετάλλου που έχουμε σε αυτή την περίπτωση παρουσιάστηκαν λιγότεροι λοβοί από το δοκίμιο A1. Ακόμα το μεγαλύτερο πάχος άλλαξε και τον τρόπο κατάρρευσης που για το δοκίμιο A1 ήταν αξονοσυμμετρικός. Μετά το αρχικό μέγιστο φορτίο και τη δημιουργία του πρώτου αξονοσυμμετρικού λοβού η διαπλάτυνσή του συνεχίστηκε περίπου τα 20 mm (φωτογραφία 4). Σε αυτό το σημείο άρχισαν οι θραύσεις στην κάτω πλευρά εξαιτίας της έκτασης στο λοβό που προκάλεσε έντονο περιφερειακό εφελκυσμό. Το σημείο αυτό διακρίνεται και στο διάγραμμα από την απότομη πτώση φορτίου που προκλήθηκε. Οι θραύσεις ήταν τρεις μη κατανεμημένες και μετά τη δημιουργία του δεύτερου αξονοσυμμετρικού λοβού οδήγησαν στην αποκοπή δύο κομματιών του πρώτου λοβού. Στις προοδευτικές φωτογραφίες φαίνεται μόνο το ένα σημείο θραύσης, ενώ τα υπόλοιπα δύο βρίσκονται σε γωνία 180° και φαίνονται καλά στις τελικές όψεις. Στη συνέχεια ακολούθησαν τρεις μη εκτατοί λοβοί. Στη φωτογραφία 7 αρχίζει να σχηματίζεται ο πρώτος μη εκτατός και τρίτος συνολικά. Στη φωτογραφία 8 φαίνεται να έχει ολοκληρωθεί ο τέταρτος και στη φωτογραφία 10 έχει ολοκληρωθεί ο πέμπτος. Κατά το σχηματισμό του τελευταίου λοβού (φωτογραφίες 9,10) διαμορφώθηκε μια ελαφρώς ελλειψοειδής διατομή στο πάνω μέρος του δοκιμίου όπως φαίνεται και στην κάτοψη στις τελικές όψεις. Στους μη εκτατούς λοβούς επίσης υπήρξαν μερικές ρηγματώσεις μικρότερου μεγέθους από τις προηγούμενες του πρώτου λοβού λόγω των καμπτικών τάσεων της δημιουργίας των λοβών. Έμειναν όμως περιορισμένες διότι στους μη εκτατούς λοβούς δεν υπάρχει αύξηση της περιφέρειας και μεγάλες εφελκυστικές τάσεις όπως στην περίπτωση των εκτατών λοβών.

4.2.7. ΔΟΚΙΜΙΟ P3: 46mm×42mm

ΔΙΑΔΟΧΙΚΕΣ ΟΨΕΙΣ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ



1



2



3



4



5



6



7



8



9

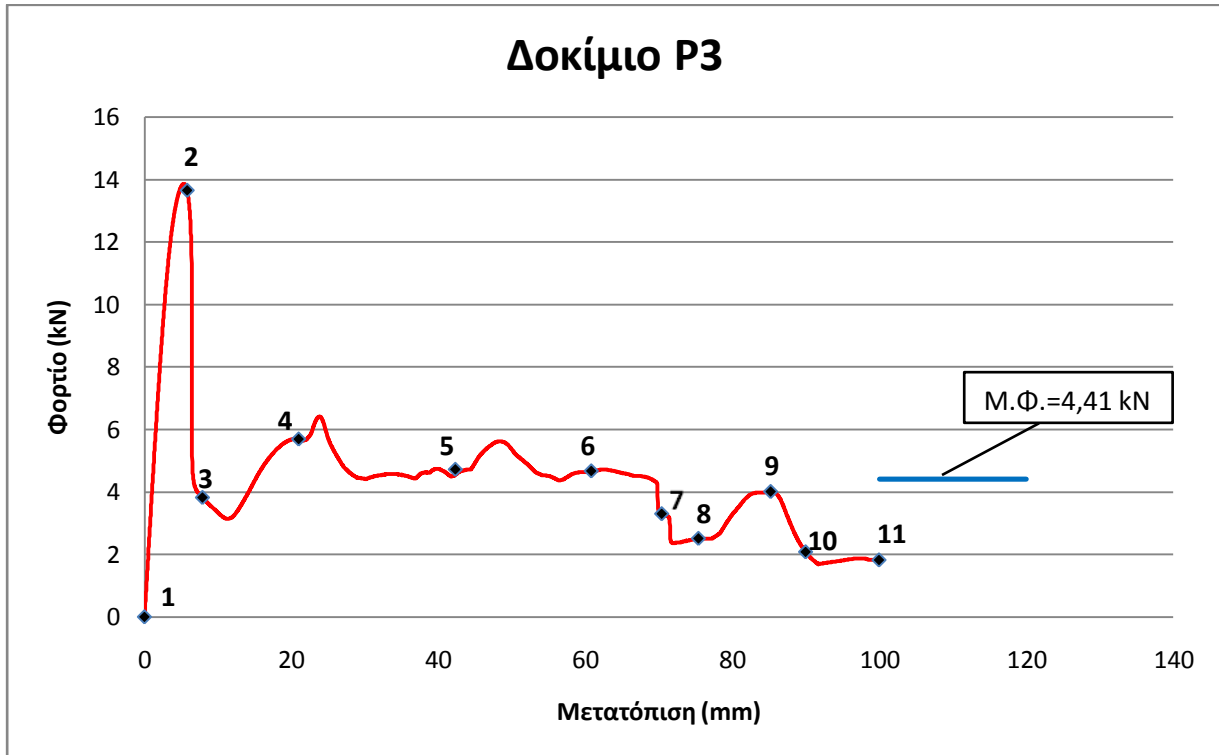


10



11

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΦΟΡΤΙΟΥ – ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ



ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Ύψος μετά την αποφόρτιση: $H = 122 \text{ mm}$

Ενέργεια παραμόρφωσης: $E_{\text{παρ}} = 0,441 \text{ kJ}$

Μέγιστο φορτίο: $P_{\text{max}} = 13,86 \text{ kN}$ στα $5,28 \text{ mm}$

Μέσο φορτίο: $P_m = 4,41 \text{ kN}$

$CFE = 0,32$

Ειδική απορρόφηση ενέργειας: $SEA = 13,82 \text{ kJ/kg}$

ΤΕΛΙΚΕΣ ΟΨΕΙΣ



Πρόοψη



Πλάγια όψη από δεξιά



Πίσω όψη



Πλάγια όψη από αριστερά



Κάτοψη



Άνοψη

ΤΡΟΠΟΣ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ

Ο τρόπος κατάρρευσης του δοκιμίου P3 είναι μη εκτατός και περιλαμβάνει το σχηματισμό τριών μη εκτατών 3D diamond λοβών. Στη φωτογραφία 3 έχει σχεδόν ολοκληρωθεί ο πρώτος μη εκτατός λοβός. Στη φωτογραφία 5 έχει ολοκληρωθεί ο δεύτερος λοβός και το μετά το φορτίο πάλι αυξάνεται για να σχηματιστεί ο επόμενος. Στη μετατόπιση των 70 mm λαμβάνει χώρα η στένωση της διατομής στο μέσο του δοκιμίου, η οποία διακρίνεται στην προοδευτική φωτογραφία 7, και λίγο αργότερα η διαμόρφωση της πάνω διατομής του, που φαίνεται στις φωτογραφίες 8 και 9. Στο διάγραμμα αυτό διακρίνεται από δύο απότομες πτώσεις του φορτίου. Κατά τη διάρκεια του πειράματος αυτές οι διαμορφώσεις γίνονται αντιληπτές από διάφορα τριξίματα που ακούγονται από το δοκίμιο. Έπειτα, αφού η διατομή του έχει στενέψει αρκετά, λυγίζει προς τα δεξιά (φωτογραφία 10) με συνέπεια να πέσει σημαντικά το φορτίο θλίψης κατά το τελευταίο στάδιο της κατάρρευσης.

4.2.8. ΔΟΚΙΜΙΟ P4: P1 46mm×40mm

ΔΙΑΔΟΧΙΚΕΣ ΟΨΕΙΣ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ



1



2



3



4



5



6



7



8

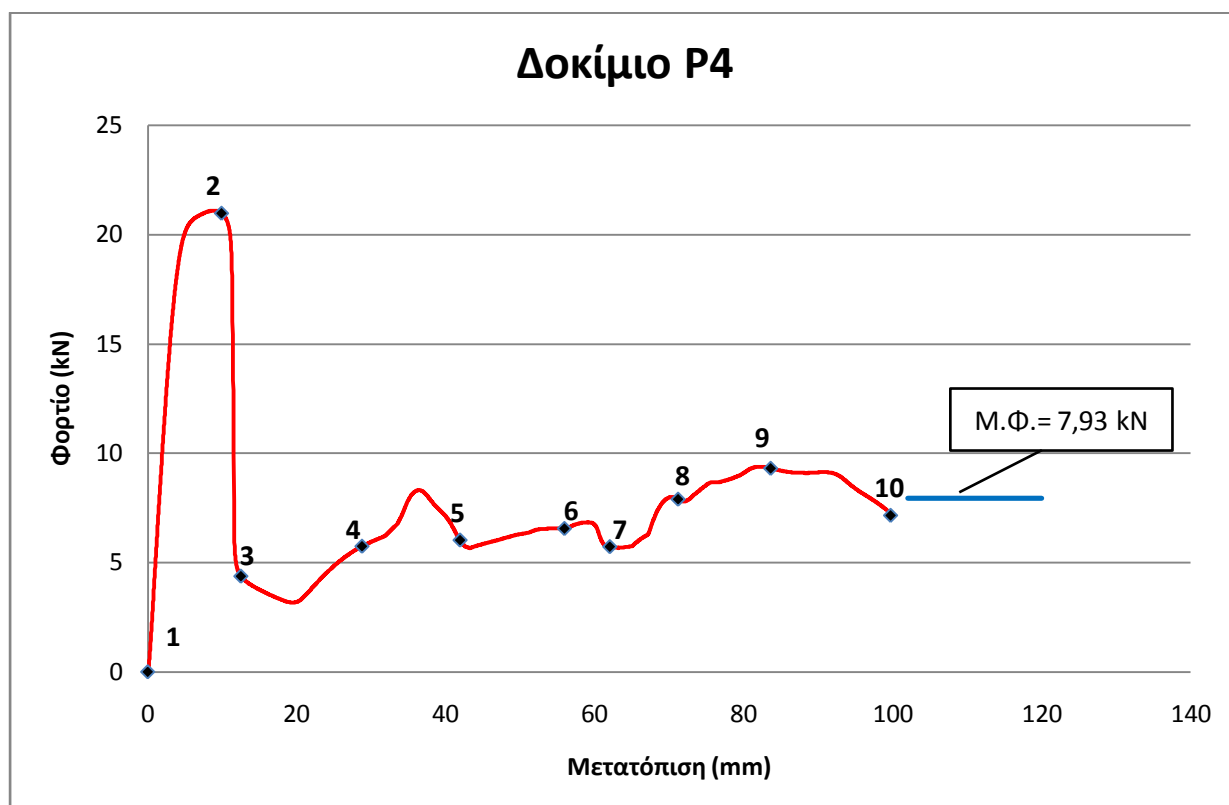


9



10

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΦΟΡΤΙΟΥ – ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ



ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Ύψος μετά την αποφόρτιση: $H = 117,8 \text{ mm}$

Ενέργεια παραμόρφωσης: $E_{\text{παρ}} = 0,793 \text{ kJ}$

Μέγιστο φορτίο: $P_{\text{max}} = 21,07 \text{ kN}$ στα $8,5 \text{ mm}$

Μέσο φορτίο: $P_m = 7,93 \text{ kN}$

$CFE = 0,38$

Ειδική απορρόφηση ενέργειας: $SEA = 18,6 \text{ kJ/kg}$

ΤΕΛΙΚΕΣ ΟΨΕΙΣ



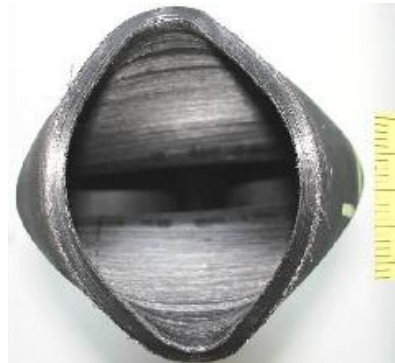
Πρόοψη



Πλάγια όψη από δεξιά



Κάτοψη



Άνοψη

ΤΡΟΠΟΣ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ

Ο τρόπος κατάρρευσης του δοκιμίου P4 είναι μη εκτατός και περιλαμβάνει το σχηματισμό τεσσάρων μη εκτατών 2D diamond λοβών. Μετά από το αρχικό μέγιστο φορτίο ακολουθεί η απότομη πτώση του λόγω του σχηματισμού του πρώτου λοβού. Η απότομη μεταβολή που συντελέστηκε παρατηρείται στις φωτογραφίες 2 και 3. Στη συνέχεια στην μετατόπιση περίπου των 40 mm ολοκληρώνεται και ο δεύτερος μη εκτατός λοβός (φωτογραφία 5). Έπειτα η διαμόρφωση μεταφέρεται στο πάνω μέτωπο, όπου έχουμε το σχηματισμό της πάνω διατομής σε ελλειψοειδή μορφή, κάτι που φαίνεται στη φωτογραφία 7. Επίσης, η διαμόρφωση της πάνω διατομής αντικατοπτρίζεται και στο διάγραμμα από μία μικρή πτώση του φορτίου. Σε αυτό το σημείο, αφού έχει διαμορφωθεί και η πάνω διατομή το φορτίο αυξάνεται πάλι (φωτογραφίες 8 και 9), ώσπου να λυγίσουν οι ευθείες που οδηγούν στο πάνω μέρος του δοκιμίου. Αυτό φαίνεται στη φωτογραφία 10. Τότε, το φορτίο μειώνεται ξανά και το δοκίμιο αποκτά την τελική του μορφή.

4.2.9. ΔΟΚΙΜΙΟ A2P3: Al 50mm×46mm + Pl 46mm×42mm

ΔΙΑΔΟΧΙΚΕΣ ΟΨΕΙΣ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ



1



2



3



4



5



6



7



8



9



10

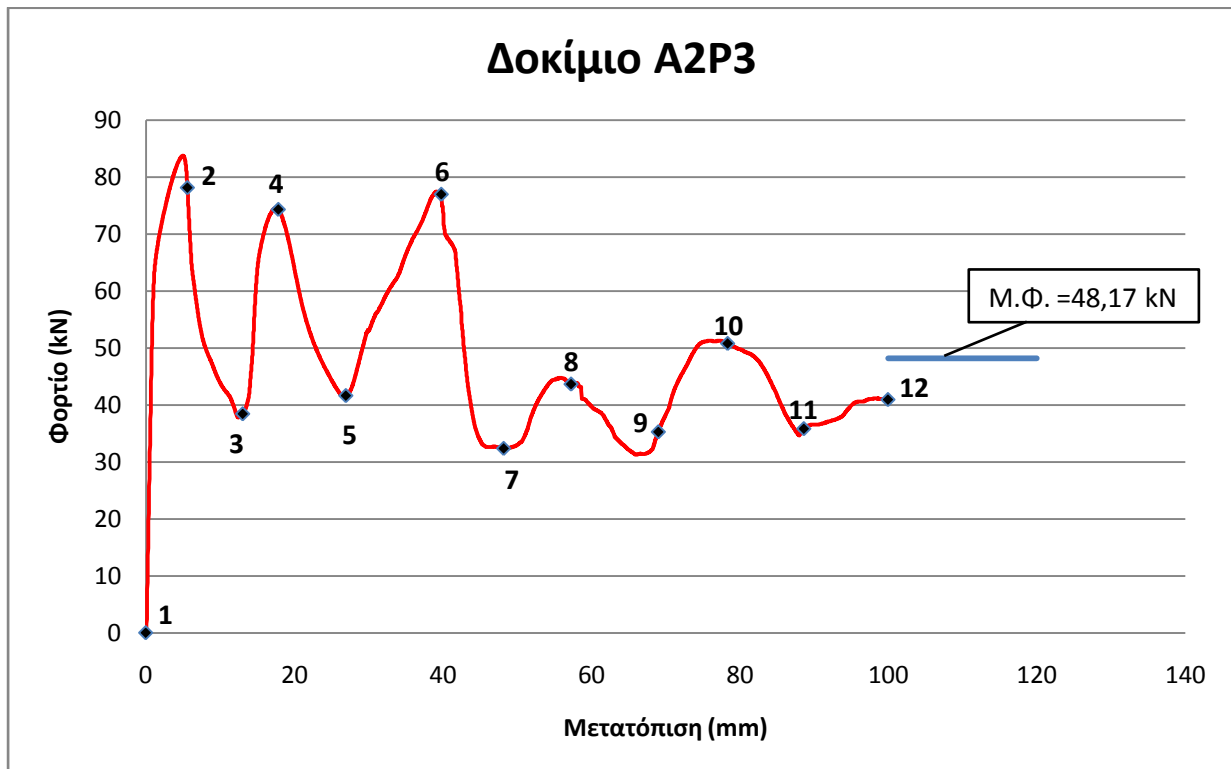


11



12

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΦΟΡΤΙΟΥ – ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ



ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Ύψος μετά την αποφόρτιση: $H = 65,5 \text{ mm}$

Ενέργεια παραμόρφωσης: $E_{\text{παρ}} = 4,817 \text{ kJ}$

Μέγιστο φορτίο: $P_{\text{max}} = 83,70 \text{ kN}$ στα $4,95 \text{ mm}$

Μέσο φορτίο: $P_m = 48,17 \text{ kN}$

$\text{CFE} = 0,58$

Ειδική απορρόφηση ενέργειας: $\text{SEA} = 41,53 \text{ kJ/kg}$

ΤΕΛΙΚΕΣ ΟΨΕΙΣ



Πρόψη



Πλάγια όψη από δεξιά



Πίσω όψη



Πλάγια όψη από αριστερά



Κάτοψη



Άνοψη



Πρόψη σε τομή

ΤΡΟΠΟΣ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ

Το δοκίμιο A2P3 ήταν αρκετά παχύ (2mm πάχος αλουμινίου και 2 mm πάχος πλαστικού) και ο τρόπος κατάρρευσής του επηρεάστηκε και από τα δύο υλικά. Αυτός χαρακτηρίζεται σαν μικτός τρόπος κατάρρευσης με τη δημιουργία έξι λοβών, δύο αξονοσυμμετρικών και τεσσάρων μη εκτατών 2D diamond, από τους οποίους ο τελευταίος δεν πρόλαβε να ολοκληρωθεί. Κυρίως λόγω του μεγάλου πάχους τα φορτία της κατάρρευσης ήταν αρκετά υψηλά με το μέγιστο φορτίο στα 84 kN κατά το σχηματισμό του πρώτου λοβού (φωτογραφία 2). Ο πρώτος λοβός φαίνεται ολοκληρωμένος στη φωτογραφία 3 και ο δεύτερος στη φωτογραφία 5. Στο στάδιο της ολοκλήρωσης του τρίτου (φωτογραφίες 6 και 7) ο δεύτερος εκτατός λοβός πιάστηκε αρκετά και κατά τη διαπλάτυνσή του παρουσίασε θραύσεις λόγω των μεγάλων εφελκυστικών τάσεων που προκλήθηκαν. Οι θραύσεις εξελίχθηκαν σε αποκόλληση ενός μεγάλου μέρους του εξωτερικού σωλήνα και φαίνονται καλύτερα στις τελικές όψεις. Το σημείο που δημιουργήθηκαν διακρίνεται επίσης στο διάγραμμα από την απότομη μείωση του φορτίου περίπου στα 40 mm. Η περαιτέρω κατάρρευση συνεχίστηκε με μη εκτατό τρόπο με πολύ πιο χαμηλά φορτία θλίψης που φαίνονται και στο διάγραμμα. Σε αυτή την περίπτωση επίσης είχαμε μια μικρή υποχώρηση του πλαστικού σωλήνα προς τα κάτω στην κάτω διατομή. Τέλος από την πάνω διατομή του δοκιμίου αποκολλήθηκε ένας λεπτός μεταλλικός δακτύλιος που φαίνεται και στην τελική πρόοψη. Αυτό οφείλεται στο μεγάλο πάχος του μεταλλικού τοιχώματος και στην υψηλή συμπίεση κατά την κάμψη του μετάλλου για τη δημιουργία του πρώτου λοβού. Οι συνθήκες αυτές οδήγησαν στην αποκόλληση του μεταλλικού δακτυλίου από την εξωτερική πλευρά του σωλήνα.

4.2.10. ΔΟΚΙΜΙΟ Α2Ρ4 : ΑΙ 50mm×46mm + ΡΙ 46mm×40 mm

ΔΙΑΔΟΧΙΚΕΣ ΟΨΕΙΣ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ



1



2



3



4



5



6



7



8



9



10

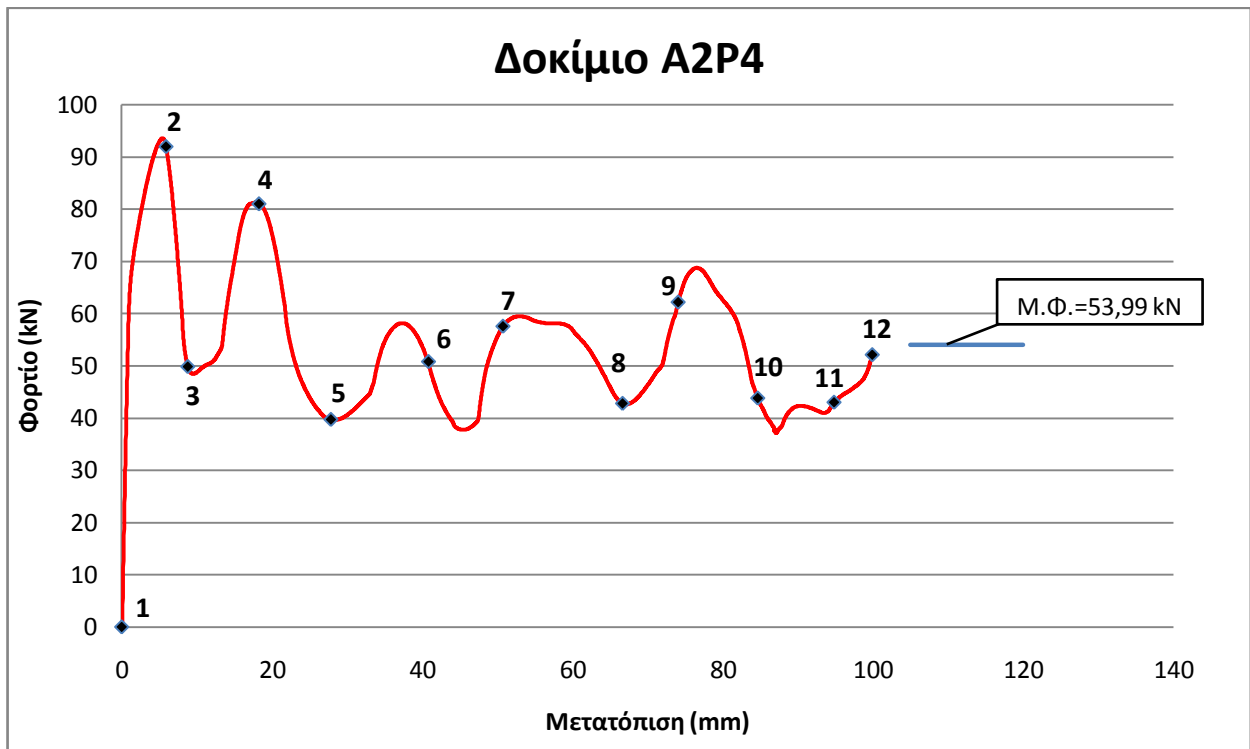


11



12

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΦΟΡΤΙΟΥ – ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ



ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Ύψος μετά την αποφόρτιση: $H = 54 \text{ mm}$

Ενέργεια παραμόρφωσης: $E_{\text{παρ}} = 5,399 \text{ kJ}$

Μέγιστο φορτίο: $P_{\text{max}} = 93,56 \text{ kN}$ στα $5,38 \text{ mm}$

Μέσο φορτίο: $P_m = 53,99 \text{ kN}$

$CFE = 0,58$

Ειδική απορρόφηση ενέργειας: $SEA = 42,4 \text{ kJ/kg}$

ΤΕΛΙΚΕΣ ΟΨΕΙΣ



Πρόοψη



Πλάγια όψη από δεξιά



Πίσω όψη



Πλάγια όψη από αριστερά



Κάτοψη



Άνοψη



Πρόοψη σε τομή

ΤΡΟΠΟΣ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ

Το δοκίμιο A2P4 ήταν το πιο παχύ δοκίμιο των πειραμάτων με συνέπεια κατά την κατάρρευσή του να σημειωθούν τα μεγαλύτερα φορτία. Ο τρόπος κατάρρευσής του χαρακτηρίζεται μικτός. Εμφανίστηκαν πέντε λοβοί από τους οποίους ο πρώτος ήταν αξονοσυμμετρικός, ενώ οι υπόλοιποι ήταν μη εκτατοί 2D diamond. Εξαιτίας του μεγάλου πάχους δημιουργούνται λίγοι λοβοί και αυτό φαίνεται επίσης στο διάγραμμα στο οποίο μεσολαβεί μεγάλη απόσταση μεταξύ των μεγίστων φορτίων. Ακόμα, λόγω του ότι αυτό το δοκίμιο ήταν το πιο παχύ, εμφάνισε τα μεγαλύτερα φορτία κατά την συμπίεσή του. Το μέγιστο φορτίο ήταν περίπου 93.5 kN και αντιστοιχεί στη φωτογραφία 2. Ο πρώτος λοβός φαίνεται ολοκληρωμένος στη φωτογραφία 3 και ο δεύτερος, που είναι μη εκτατός στη φωτογραφία 5. Έπειτα συνεχίζεται η κατάρρευση με μη εκτατό τρόπο και παρουσιάζονται πιο χαμηλά φορτία από το αρχικό στάδιο της δημιουργίας των δύο πρώτων λοβών. Σε αυτό το δοκίμιο επίσης σημειώθηκαν θραύσεις στους πρώτους τέσσερις λοβούς που όμως έμειναν περιορισμένες εντός τους και δεν εξελίχθηκαν, όπως φαίνεται και στις τελικές όψεις του δοκιμίου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

5.1. Εισαγωγικά στοιχεία – μεγέθη που εξετάζονται και παράγοντες ως προς τους οποίους γίνονται οι συγκρίσεις

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται η σύγκριση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των πειραμάτων ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με τη συμπεριφορά των δοκιμίων σε αξονική κατάρρευση. Συσχετίζονται δηλαδή τα μεγέθη της κατάρρευσης των δοκιμίων με τα χαρακτηριστικά τους. Η σύγκριση των μεγεθών είναι απαραίτητη ώστε να κατανοήσει κανείς ποιοι είναι οι παράγοντες που επηρεάζουν περισσότερο τη διαδικασία της κατάρρευσης και να μπορεί να προβλέψει τη συμπεριφορά μηχανολογικών κατασκευών από δύο επάλληλα υλικά σε αξονικά θλιπτικά φορτία.

Τα μεγέθη που ενδιαφέρουν περισσότερο τους μηχανικούς είναι το μέσο φορτίο, το μέγιστο φορτίο, η απορροφώμενη ενέργεια, που προκύπτει από το μέσο φορτίο θλίψης, ο δείκτης CFE και η ειδική απορρόφηση ενέργειας (SEA).

Όπως έχει αναφερθεί στο πειραματικό μέρος της εργασίας το μέσο φορτίο εκφράζει την ποσότητα της ενέργειας που απορροφά το δοκίμιο, αφού η απορροφώμενη ενέργεια υπολογίζεται από το γινόμενο του μέσου φορτίου με τη συνολική μετατόπιση του εμβόλου. Γι' αυτό το λόγο η σύγκριση των δοκιμίων γίνεται για το μέσο φορτίο και τα συμπεράσματα που προκύπτουν ισχύουν ανάλογα και για την απορροφώμενη ενέργεια.

Το μέγιστο φορτίο, που συνήθως είναι το πρώτο μέγιστο της κατάρρευσης έχει μεγάλη σημασία και συγκρίνεται σε αυτό το κεφάλαιο. Είναι επιθυμητό να είναι σχετικά μικρό ώστε η μετάβαση στην πλαστική περιοχή να γίνεται ομαλά και στη συνέχεια το φορτίο να διατηρείται σε σχετικά σταθερά επίπεδα.

Επίσης συγκρίνεται ο Δείκτης Ομοιομορφίας Φορτίου ή CFE (Crush Force Efficiency), που ορίζεται ως $CFE = \frac{P_m}{P_{max}}$. Ο δείκτης συγκρίνεται για να εξετασθεί το πόσο σταθερές είναι οι καμπύλες φορτίων των διαφόρων δοκιμίων.

Τέλος, συγκρίνεται η ειδική απορρόφηση ενέργειας (Specific Energy Absorption ή SEA). Αυτή ορίζεται ως ο λόγος της ενέργειας που απορροφήθηκε προς τη μάζα της κατασκευής η οποία παραμορφώθηκε

και είναι από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά ενός συστήματος απορρόφησης ενέργειας καθώς στις περισσότερες περιπτώσεις οι μηχανικοί επιθυμούν υψηλή απορρόφηση ενέργειας από κατασκευές με χαμηλή μάζα.

Στη συνέχεια γίνονται δύο ειδών συγκρίσεις. Η πρώτη σύγκριση αφορά κάθε σωλήνα που αποτελείται από αλουμίνιο και πλαστικό. Για κάθε τέτοιο σωλήνα συγκρίνονται τα βασικά μεγέθη του με τα αντίστοιχα των ξεχωριστών σωλήνων που τον αποτελούν. Έτσι για παράδειγμα, μελετάται το αν το μέσο φορτίο των διπλών σωλήνων ισούται με το άθροισμα των μέσων φορτίων των σωλήνων που τον αποτελούν ή αν δεν ισχύει κάτι τέτοιο και δίνεται η ανάλογη εξήγηση στο φαινόμενο.

Η δεύτερη σύγκριση γίνεται με βάση το υλικό των δοκιμίων οι οποίοι είναι μονοί σωλήνες. Για τους μονούς σωλήνες από το ίδιο υλικό παρουσιάζονται οι διαφορές τους στα βασικά μεγέθη της κατάρρευσης. Ο μόνος παράγοντας διαφοροποιεί δηλαδή τα μεγέθη στη μεταξύ τους σύγκριση είναι οι διαστάσεις τους.

Για λόγους πληρότητας, πριν την ομαδοποίηση των δοκιμίων προς σύγκριση, δίνεται ένας πίνακας που συνοψίζει τα βασικά μεγέθη της κατάρρευσης για όλα τα δοκίμια. Ο τρόπος υπολογισμού των μεγεθών έχει αναλυθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο.

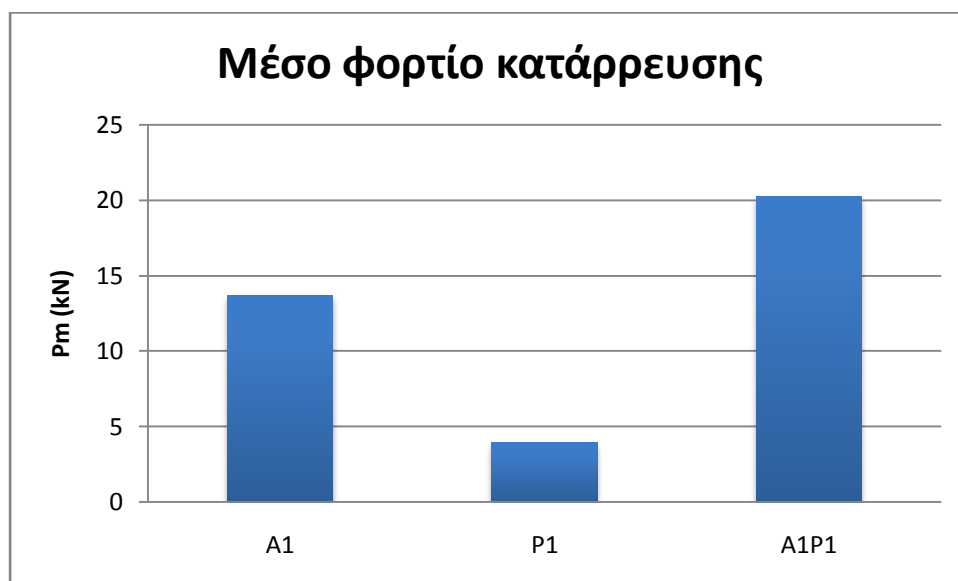
	P_m(kN)	E_{απορ}(kJ)	P_{max}	CFE= P_m/P_{max}	SEA (kJ/kg)
A1	13,66	1,366	32,76	0,42	30,41
P1	3,92	0,306	10,97	0,36	12,01
P2	6,94	0,694	20,17	0,34	14,71
A1P1	20,23	2,023	38,08	0,53	26,16
A1P2	25,68	2,568	51,92	0,49	27,91
A2	40,01	4,001	68,67	0,58	47,41
P3	4,41	0,441	13,86	0,32	13,82
P4	7,93	0,793	21,07	0,38	18,6
A2P3	48,17	4,817	83,7	0,58	41,53
A2P4	53,99	5,399	93,56	0,58	42,4

5.2. Σύγκριση σωλήνων από δύο επάλληλα υλικά με τους σωλήνες από τους οποίους αποτελούνται

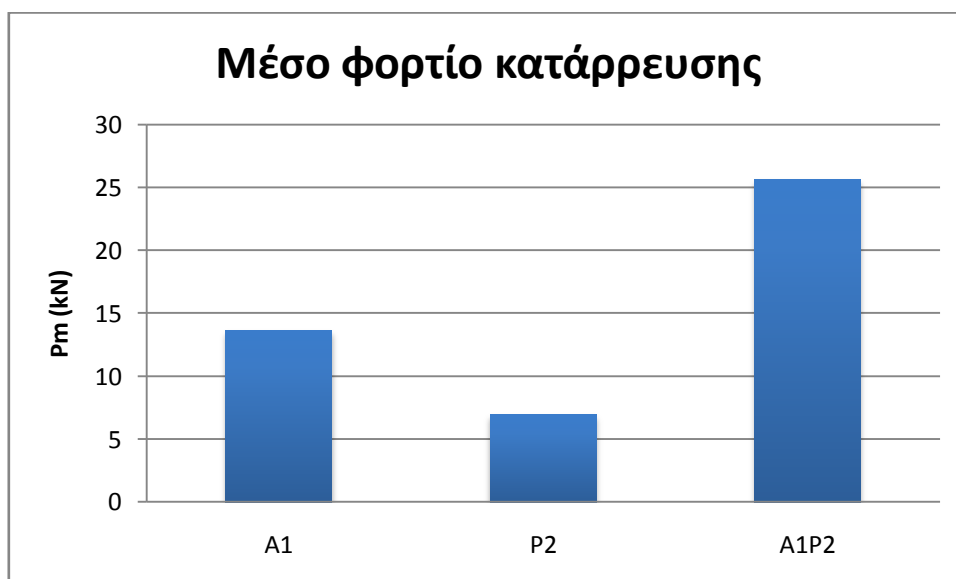
Μέσο φορτίο κατάρρευσης

Παρακάτω δίνεται σε σχήμα το μέσο φορτίο για κάθε σωλήνα από αλουμίνιο και πλαστικό και συγκρίνεται με το αντίστοιχο μέσο φορτίο των σωλήνων που το αποτελούν.

Για το δοκίμιο A1 το μέσο φορτίο είναι 13,66 kN, για το P1 είναι 3,92 kN, ενώ για το A1P1 είναι 20,23 kN.



Για το δοκίμιο A1 το μέσο φορτίο είναι 13,66 kN, για το P2 είναι 6,94 kN, ενώ για το A1P2 είναι 25,68 kN.



Για το δοκίμιο A2 το μέσο φορτίο είναι 40,01 kN, για το P3 είναι 4,41 kN, ενώ για το A2P3 είναι 48,17 kN.



Για το δοκίμιο A2 το μέσο φορτίο είναι 40,01 kN, για το P4 είναι 7,93 kN, ενώ για το A2P4 είναι 53,99 kN



Παρατηρείται δηλαδή, σε όλα τα δοκίμια που έχουν επενδυθεί εσωτερικά με πλαστικό μέσο φορτίο σημαντικά μεγαλύτερο από το άθροισμα των μέσων φορτίων των ξεχωριστών σωλήνων που τα αποτελούν. Αυτό οφείλεται στο μεγαλύτερο πάχος των διπλών σωλήνων, αλλά και στην αλληλεπίδραση των τρόπων κατάρρευσης των εξωτερικών με τους εσωτερικούς σωλήνες. Έτσι, με την προσθήκη της εσωτερικής επένδυσης αλλάζει ολόκληρος κατάρρευσης των δοκιμίων και αυτό φαίνεται και από την μεγάλη αύξηση των μέσων φορτίων που παρουσιάζουν.

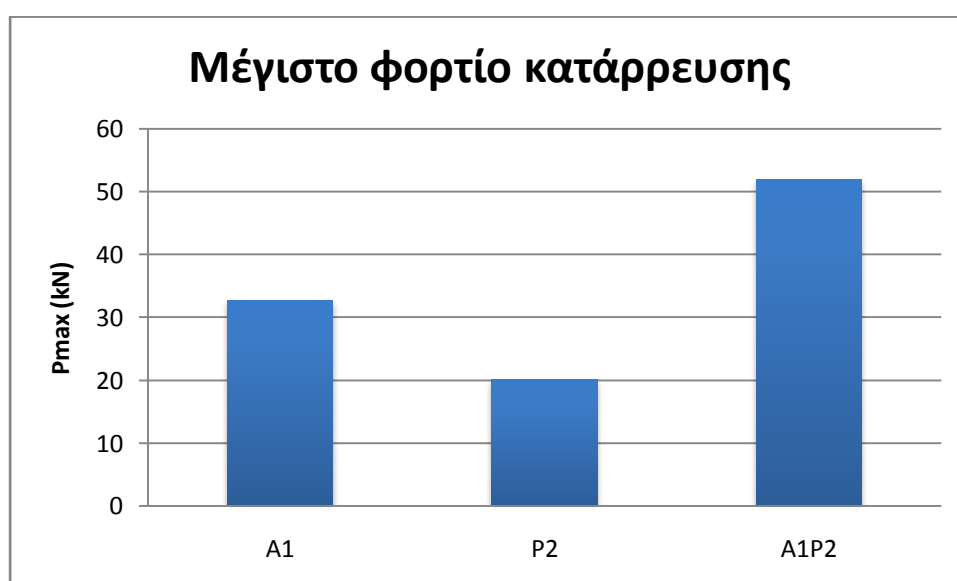
Μέγιστο φορτίο κατάρρευσης

Τα ίδια δοκίμια συγκρίνονται τώρα ως προς το μέγιστο φορτίο που παρουσίασαν κατά την κατάρρευσή τους. Αυτό σε όλες τις περιπτώσεις ήταν το αρχικό μέγιστο της καμπύλης εκτός από την περίπτωση του δοκιμίου A1P2 που το ολικό μέγιστο ήταν το δεύτερο τοπικό μέγιστο.

Για το δοκίμιο A1 το μέγιστο φορτίο είναι 32,76 kN, για το P1 είναι 10,97 kN, ενώ για το A1P1 είναι 38,08 kN.



Για το δοκίμιο A1 το μέγιστο φορτίο είναι 32,76 kN, για το P2 είναι 20,17 kN και για το A1P2 είναι 51,91 kN.



Για το δοκίμιο A2 το μέγιστο φορτίο είναι 68,67 kN, για το P3 είναι 13,86 kN και για το A2P3 είναι 83,7 kN.



Για το δοκίμιο A2 το μέγιστο φορτίο είναι 68,67 kN, για το P4 είναι 21,07 kN και για το A2P4 είναι 93,56 kN.

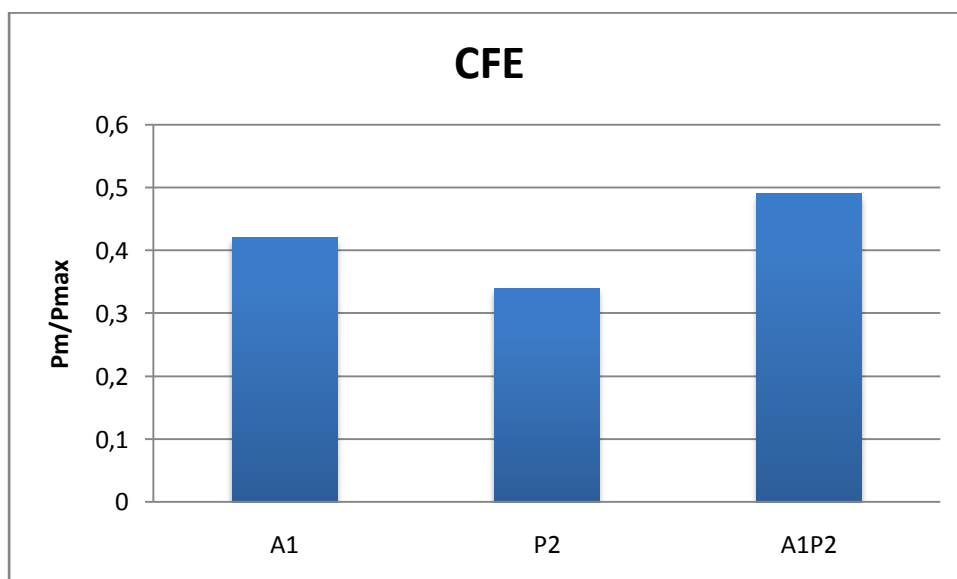
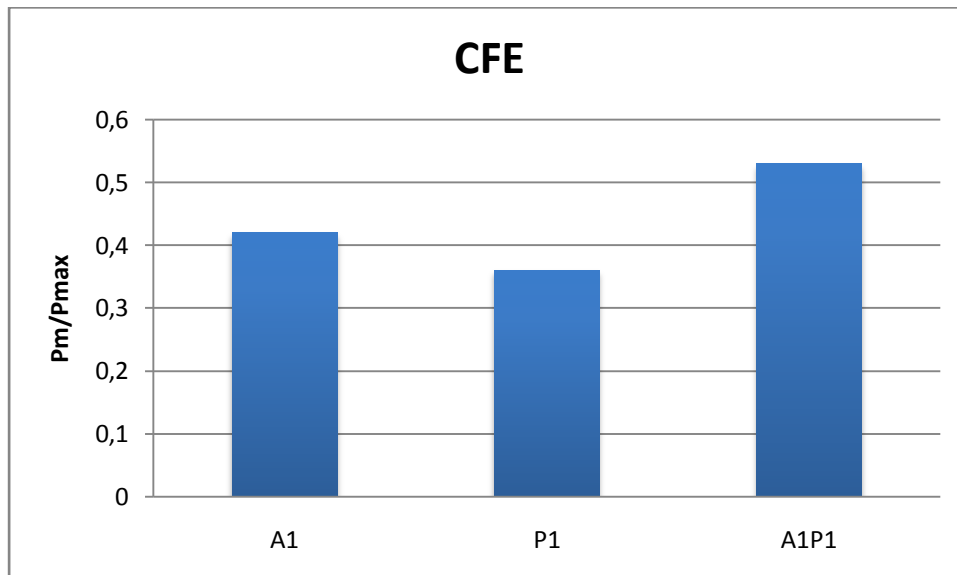


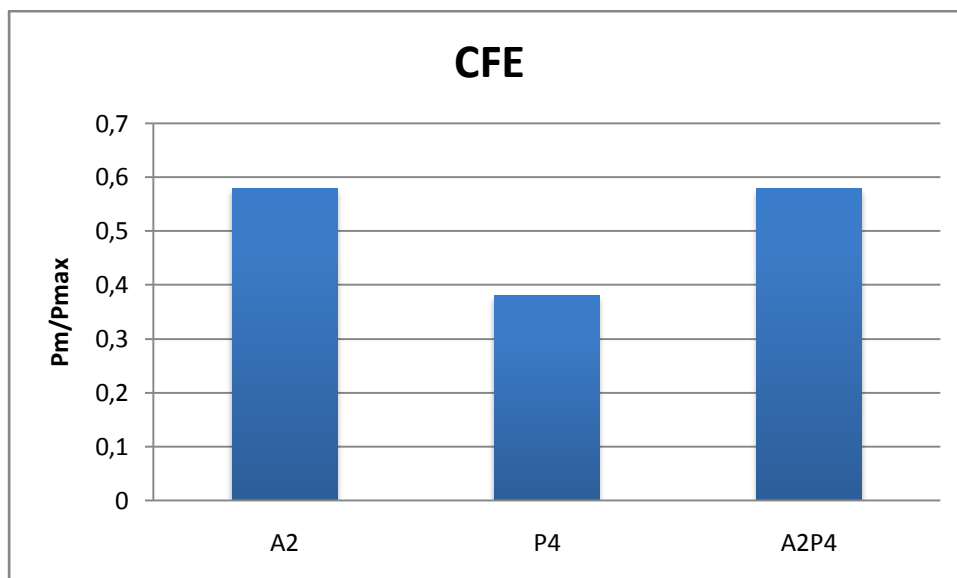
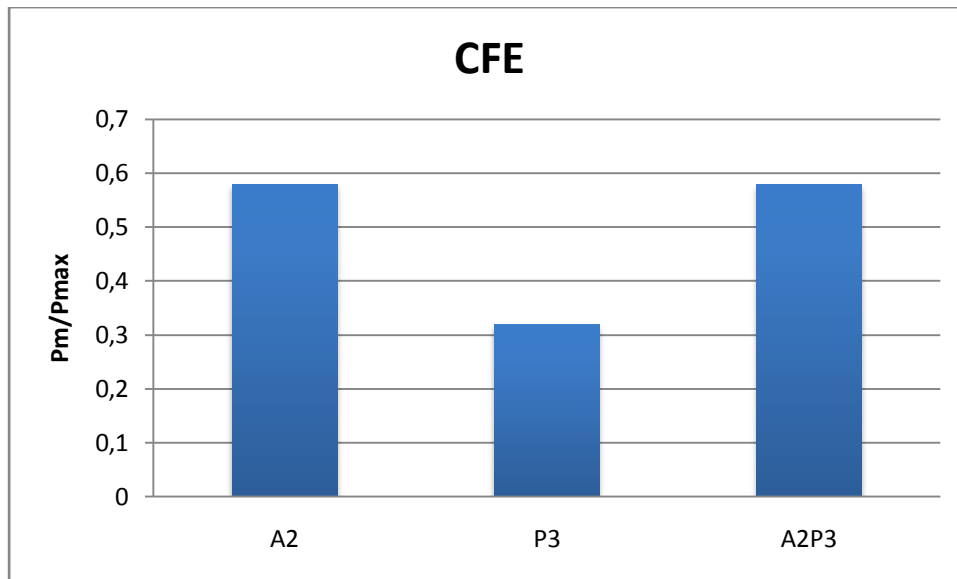
Από τα παραπάνω δεδομένα προκύπτει το συμπέρασμα ότι το μέγιστο φορτίο των δοκιμίων από διπλούς σωλήνες είναι περίπου ίσο με το άθροισμα των ξεχωριστών σωλήνων από ένα υλικό. Αυτό συμβαίνει γιατί το μέγιστο φορτίο εξαρτάται κυρίως από τα χαρακτηριστικά του υλικού και όχι από τον τρόπο κατάρρευσης του κάθε δοκιμίου. Η αλληλεπίδραση των τρόπων κατάρρευσης στα δοκίμια από δύο σωλήνες επηρεάζει περισσότερο το φορτίο θλίψης μετά το σχηματισμό του πρώτου λοβού. Γι' αυτό το λόγο το μέσο φορτίο της κατάρρευσής των

συγκεκριμένων δοκιμίων είναι αρκετά μεγαλύτερο από το άθροισμα των μέσων φορτίων των μονών σωλήνων τους, ενώ δεν συμβαίνει κάτι αντίστοιχο για το μέγιστο φορτίο θλίψης τους.

Δείκτης CFE

Στη συνέχεια συγκρίνεται ο δείκτης CFE, ο οποίος αποτελεί το λόγο μέσου προς μέγιστο φορτίο, για τα ίδια δοκίμια. Επαναλαμβάνεται ότι εκφράζει το πόσο σταθερή είναι η καμπύλη του φορτίου και ότι είναι επιθυμητό να είναι όσο πιο κοντά γίνεται στη μονάδα, που αποτελεί την ιδανική περίπτωση.

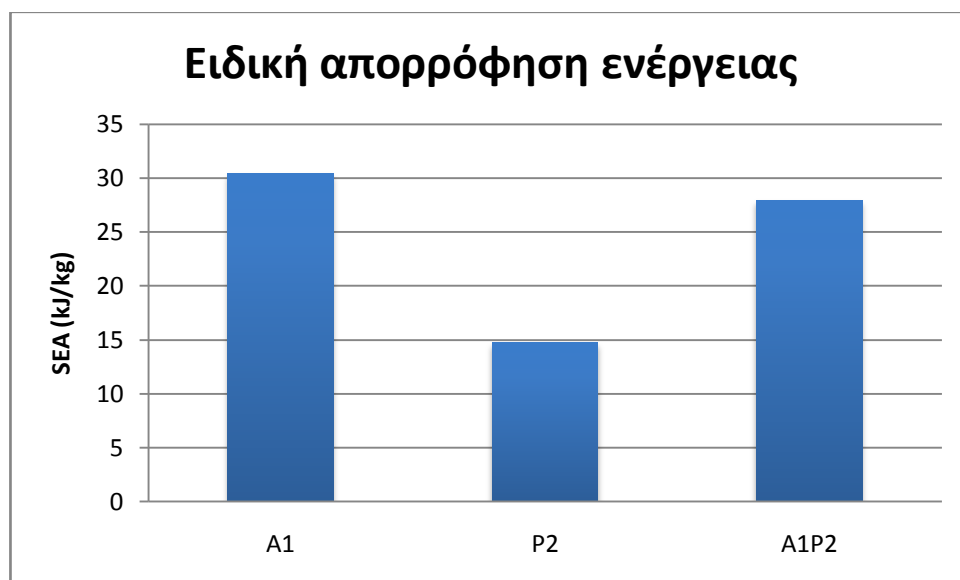
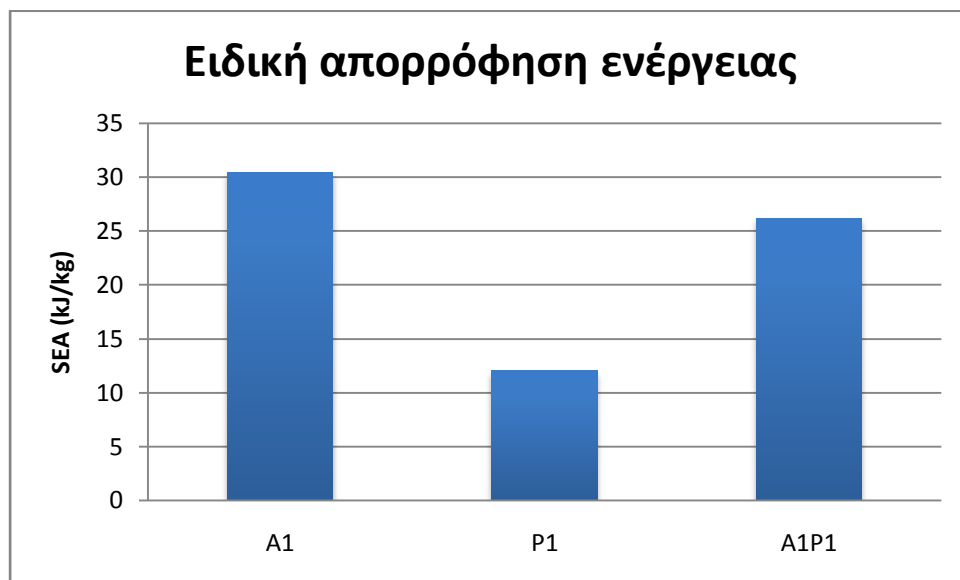


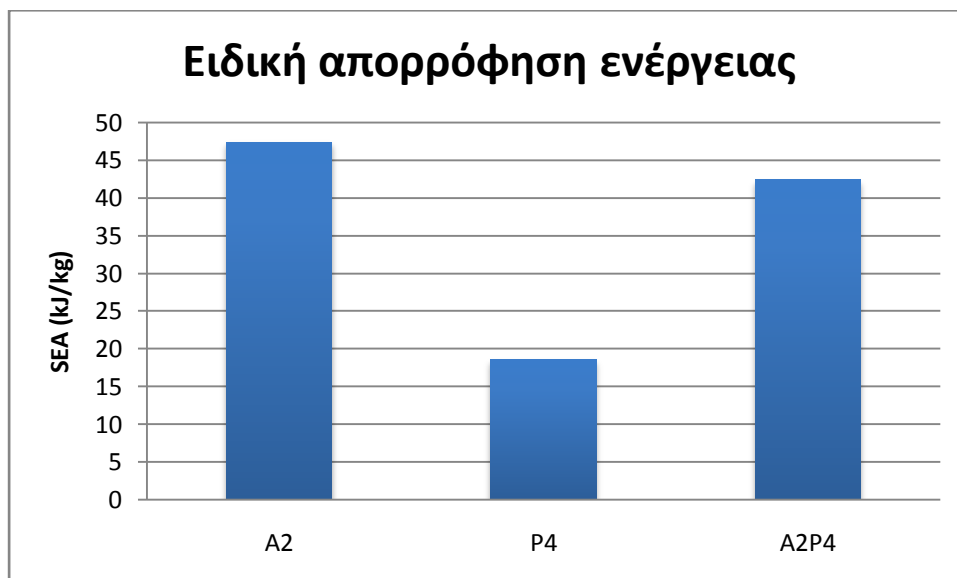


Από τα γραφήματα παρατηρείται ότι για τα δοκίμια A1P1 και A1P2 ο δείκτης CFE είναι μεγαλύτερος από τους μονούς σωλήνες από τους οποίους αποτελούνται. Αντίθετα στα δοκίμια A2P3 και A2P4 ο δείκτης CFE είναι ίσος με αυτό του αλουμινένιου δοκιμίου A2 και δεν επηρεάστηκε από την εσωτερική επένδυση με πλαστικό. Αυτό ίσως να οφείλεται στο μεγαλύτερο πάχος του σωλήνα A2 σε σχέση με το πάχος του A1. Έτσι, σε αυτά τα δοκίμια με την προσθήκη της εσωτερικής επένδυσης αυξήθηκε ανάλογα τόσο το μέσο φορτίο όσο και το μέγιστο φορτίο.

Ειδική απορρόφηση ενέργειας

Σε αυτό το σημείο παρουσιάζονται τα γραφήματα της ειδικής απορρόφησης ενέργειας (SEA) για τα ίδια δοκίμια με τις παραπάνω περιπτώσεις και αξιολογούνται τα αποτελέσματα των συγκρίσεων.

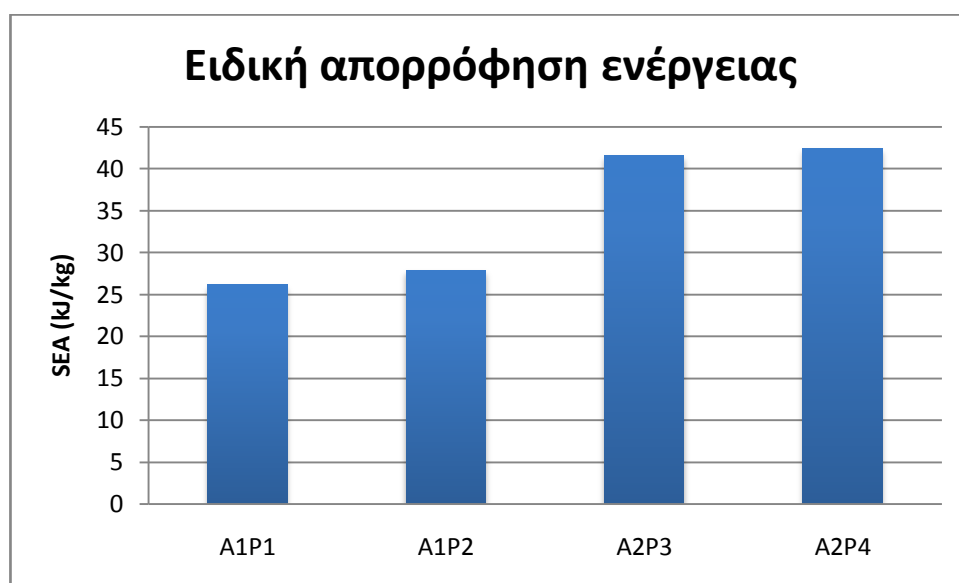




Η ειδική απορρόφηση ενέργειας στα δοκίμια από αλουμίνιο είναι αρκετά μεγάλη, 30,41 kJ/kg για το A1 και 47,41 kJ/kg για το A2. Αντίθετα στα δοκίμια από πλαστικό είναι πολύ μικρή, 12,01 kJ/kg για το P1, 14,71 kJ/kg για το P2, 13,82 kJ/kg για το P3 και 18,6 kJ/kg για το P4. Έτσι, με την προσθήκη της εσωτερικής επένδυσης από πλαστικό η ειδική απορρόφηση ενέργειας υποβαθμίζεται σε όλα τα αλουμινένια δοκίμια. Ενώ στους διπλούς σωλήνες το μέσο φορτίο και κατά συνέπεια και η απορροφώμενη ενέργεια αυξάνεται σημαντικά όπως καταγράφηκε πιο πάνω, η ειδική απορρόφηση ενέργειας μειώνεται. Αυτό εξηγείται από το ότι με την προσθήκη του πλαστικού εσωτερικού σωλήνα η μάζα του σωλήνα που προκύπτει αυξάνεται περισσότερο από ότι αυξάνεται το μέσο φορτίο του. Ακόμα, παρατηρείται ότι στα δοκίμια A1P1 και A2P3 η μείωση της SEA είναι λίγο μεγαλύτερη από την αντίστοιχη μείωση που παρουσίασαν τα δοκίμια A1P2 και A2P4 σε σχέση πάντα με τους

μεταλλικούς σωλήνες. Δηλαδή, η επένδυση με πιο παχείς εσωτερικούς πλαστικούς σωλήνες οδηγεί σε ελαφρώς υψηλότερη τιμή SEA από ότι η επένδυση με πιο λεπτούς.

Βέβαια, ο παράγοντας που επηρεάζει περισσότερο το μέγεθος της SEA είναι το πάχος του αλουμινίου, καθώς η ειδική απορρόφηση ενέργειας των αλουμινένιων σωλήνων είναι πολύ πιο υψηλή από αυτή των πλαστικών. Αυτό φαίνεται από το επόμενο γράφημα που παριστάνει την SEA για όλα τα δοκίμια από δύο επάλληλους σωλήνες. Τα δοκίμια με πιο παχύ αλουμινένιο σωλήνα έχουν πολύ υψηλότερη ειδική απορρόφηση ενέργειας.



5.3. Σύγκριση μονών σωλήνων από το ίδιο υλικό μεταξύ τους

Εδώ συγκρίνονται τα ίδια μεγέθη με παραπάνω αλλά με διαφορετική ομαδοποίηση των δοκιμίων. Σε κάθε γράφημα περιλαμβάνονται δοκίμια από το ίδιο υλικό τα οποία είναι όμως μονοί σωλήνες. Ουσιαστικά ο μόνος παράγοντας που τα διαφοροποιεί είναι οι διαστάσεις τους.

Επομένως, γίνεται προσπάθεια να εξηγηθούν οι εμφανιζόμενες διαφορές στα βασικά μεγέθη της κατάρρευσης σύμφωνα με τις διαφορές των διαστάσεων των δοκιμίων και κυρίως σύμφωνα με τη διαφορά στην ενεργό διατομή τους. Σημειώνεται βέβαια, ότι σημασία για τη μελέτη αυτής της επίδρασης έχουν οι πραγματικές και όχι οι ονομαστικές διαστάσεις των δοκιμίων.

Θεωρείται όπως έχει αναφερθεί ότι οι διαστάσεις των αλουμινένιων δοκιμίων συμπίπτουν με τις ονομαστικές. Αυτό συμβαίνει διότι η

διαμόρφωσή τους έγινε από διέλαση σε βιομηχανία με μεγάλη ακρίβεια. Έπειτα αγοράστηκαν στη μορφή σωλήνων μεγάλου μήκους και κόπηκαν στο επιθυμητό ύψος. Αντίθετα, στην περίπτωση των πλαστικών δοκιμίων υπάρχει μεγαλύτερη απόκλιση από τις ονομαστικές τους διαστάσεις επειδή διαμορφώθηκαν εξ' ολοκλήρου στον τόρνο από συμπαγείς πλαστικούς σωλήνες.

Για τη διευκόλυνση στην εξαγωγή των συμπερασμάτων καταγράφονται ξανά οι πραγματικές διαστάσεις των δοκιμίων που συγκρίνονται. Φυσικά, οι διαστάσεις υπάρχουν επίσης στο κεφάλαιο της περιγραφής των δοκιμίων.

	Dεξ (mm)	Dεσ (mm)	t (mm)
A1	50	48	1
A2	50	46	2
P1	47.8	44.26	1.995
P2	47.71	42.03	2.85
P3	45.90	42.10	2.06
P4	45.80	40.20	3.00

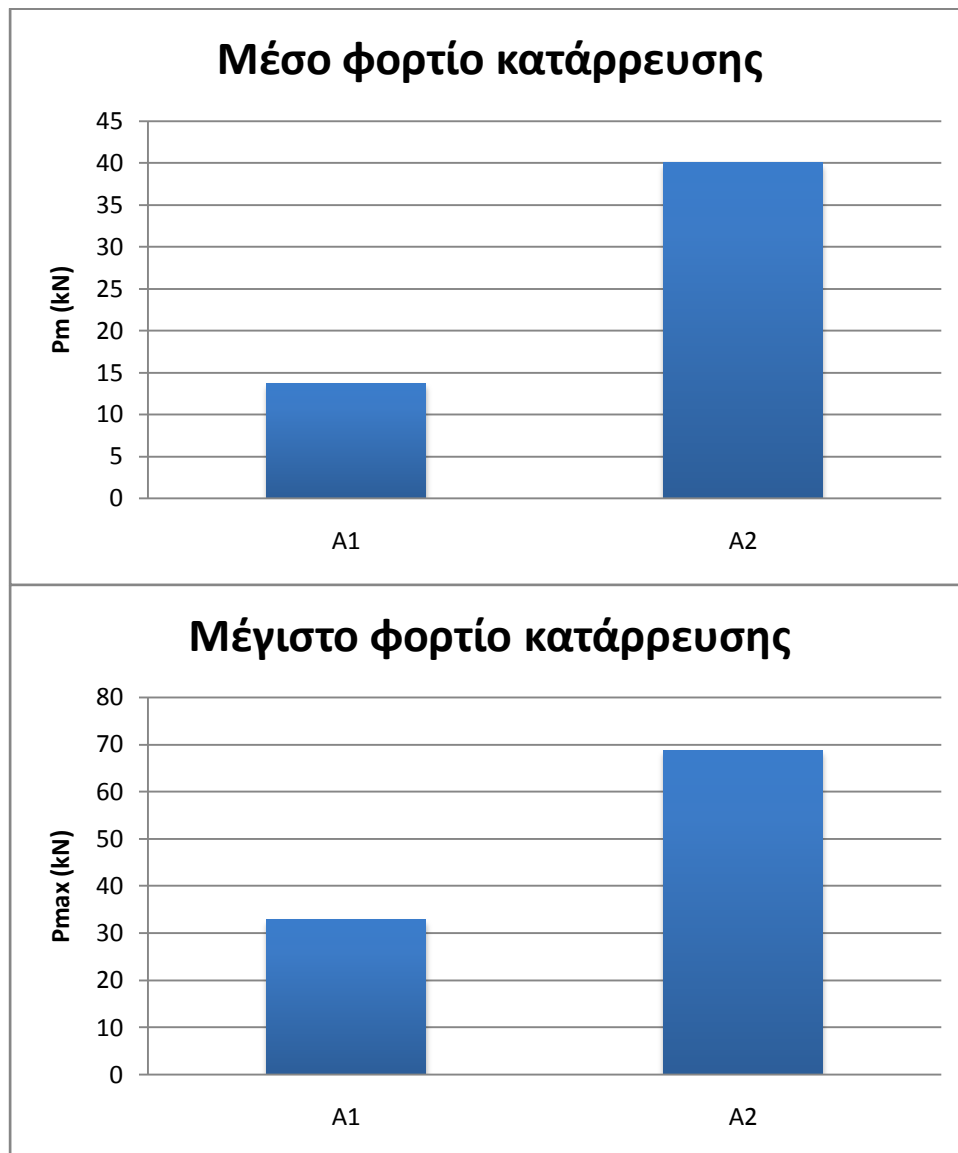
Το βασικό χαρακτηριστικό των προς εξέταση δοκιμίων είναι η ενεργός διατομή τους και επομένως η αντίστοιχη μεταβολή στη μάζα τους. Σκοπός είναι να διαπιστωθεί το πόσο αυτή επηρεάζει τα μεγέθη της κατάρρευσης. Για παράδειγμα να εξεταστεί στην περίπτωση που Διατομή A1 = κ · Διατομή A2, αν τα υπόλοιπα μεγέθη ακολουθούν την ίδια αναλογία ή όχι και να εξηγηθεί το γιατί συμβαίνει αυτό.

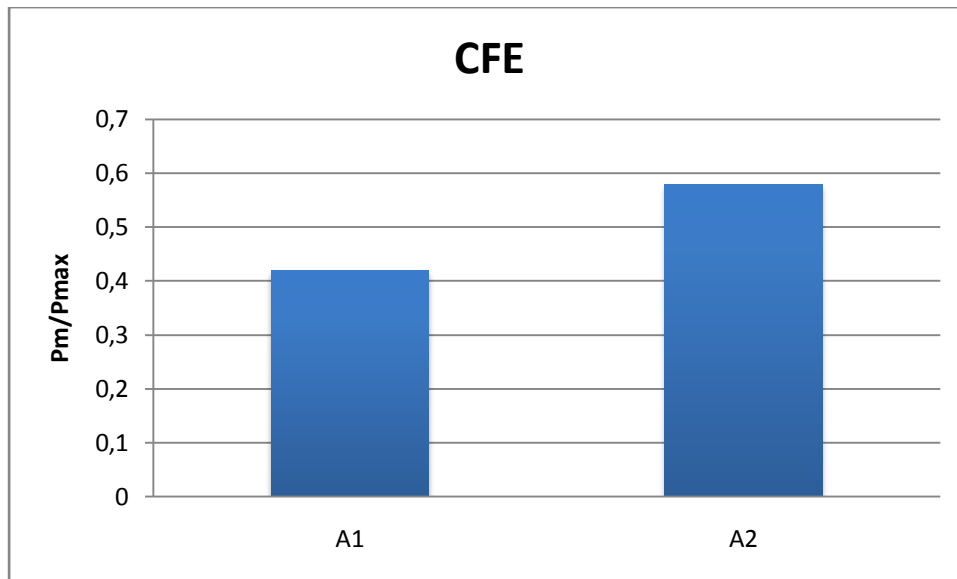
Η ενεργός διατομή των δοκιμίων σύμφωνα με τις πραγματικές τους διαστάσεις είναι:

	Ενεργός διατομή (m ²)
A1	0,000154
A2	0,0003
P1	0,000256
P2	0,0004
P3	0,000263
P4	0,000378

Σύγκριση σωλήνων από αλουμίνιο

Παρακάτω παρουσιάζονται τα γραφήματα που παριστούν το μέσο φορτίο, το μέγιστο φορτίο, τον δείκτη CFE και της SEA για τα δοκίμια από αλουμίνιο, δηλαδή τα A1 και A2.





Για τις ενεργείς διατομές ισχύει: $E_{A2} = 1,96 E_{A1}$

Για τα υπόλοιπα μεγέθη αντίστοιχα ισχύει: $P_{m_{A2}} = 2,93 P_{m_{A1}}$
 $P_{max_{A2}} = 2,10 P_{max_{A1}}$
 $CFE_{A2} = 1,38 CFE_{A1}$
 $SEA_{A2} = 1,56 SEA_{A1}$

Από τα παραπάνω φαίνεται ότι ο λόγος των ενεργών διατομών είναι περίπου ίδιος με το λόγο των μέγιστων φορτίων. Αυτό συμβαίνει διότι το μέγιστο φορτίο, που είναι και το αρχικό μέγιστο της συμπίεσης εξαρτάται από τις ιδιότητες του υλικού. Αντίθετα, για την περίπου διπλάσια ενεργό διατομή του A2, το μέσο φορτίο σχεδόν τριπλασιάστηκε. Αυτό σημαίνει ότι το μεγαλύτερο πάχος επηρέασε όλη την πορεία της κατάρρευσης και όχι μόνο το αρχικό στάδιό της. Έτσι, άλλαξε ο συνολικός τρόπος

κατάρρευσης του δοκιμίου, κάτι που φαίνεται και στις φωτογραφίες, δύο από τις οποίες παρατίθενται και εδώ. Το δοκίμιο A1 κατάρρευσε αξονοσυμμετρικά, ενώ στο A2 δημιουργήθηκαν αξονοσυμμετρικοί και diamond λοβοί. Ο δείκτης CFE αυξήθηκε σημαντικά και καταδεικνύει ότι η καμπύλη του φορτίου έγινε πιο ομαλή με την αύξηση του πάχους του δοκιμίου.

Όπως φαίνεται παραπάνω, η μάζα στην περίπτωση του δοκιμίου A2 σχεδόν διπλασιάστηκε. Ακόμα, το μέσο φορτίο έγινε σχεδόν τριπλάσιο. Δηλαδή, παρά τη μεγάλη αύξηση του μέσου φορτίου και επομένως και την ανάλογη αύξηση στην απορρόφηση ενέργειας, η παράλληλη αλλά μικρότερη αύξηση στη μάζα, οδήγησε τη SEA σε αύξηση μικρότερου βαθμού από αυτή του μέσου φορτίου. Από τις μεταβολές αυτές προκύπτει ότι η ειδική απορρόφηση ενέργειας αυξήθηκε περίπου κατά 3/2 για το A2. Γενικά, το δοκίμιο A2 παρουσίασε τη μεγαλύτερη τιμή ειδικής απορρόφησης ενέργειας λόγω του υψηλού μέσου φορτίου του, αλλά και της χαμηλής του μάζας.

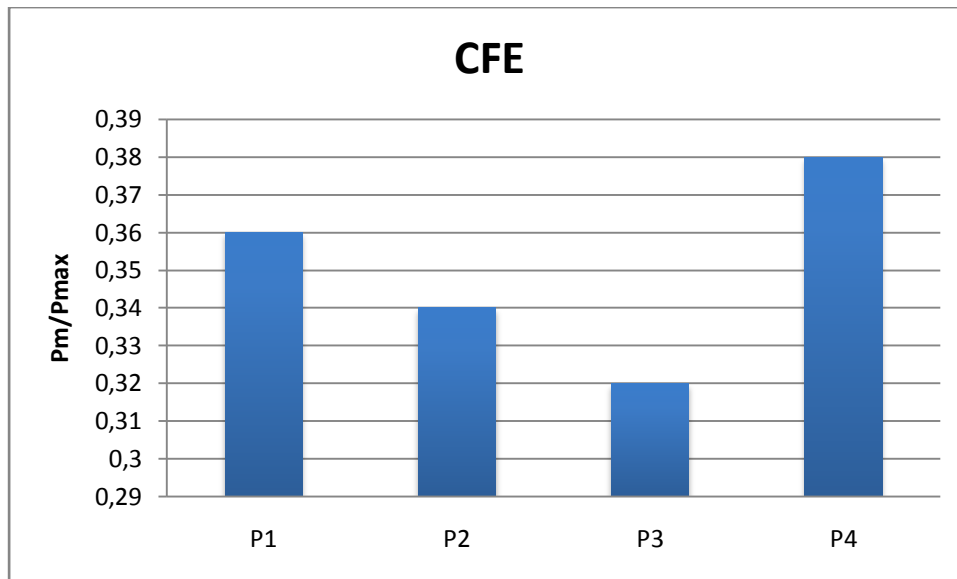


Σύγκριση σωλήνων από πλαστικό

Η ίδια σύγκριση γίνεται τώρα για τους πλαστικούς σωλήνες. Σημειώνεται ότι οι σωλήνες P1 και P2 έχουν ίδια ονομαστική εξωτερική διάμετρο και διαφορετικό πάχος. Αντίστοιχα, το ίδιο συμβαίνει με τους P3 και P4. Έτσι, η ανάλυση των πλαστικών σωλήνων θα γίνει για αυτές τις δύο ομάδες δοκιμίων.

Τα διαγράμματα του μέσου, του μέγιστου φορτίου, του CFE και της ειδικής απορρόφησης ενέργειας είναι:





Για τις ενεργείς διατομές ισχύει: $E_{P2} = 1,56 E_{P1}$
 Για τα υπόλοιπα μεγέθη ισχύει: $P_{mP2} = 1,77 P_{mP1}$
 $P_{maxP2} = 1,84 P_{maxP1}$
 $CFE_{P2} = 0,94 CFE_{P1}$
 $SEA_{P2} = 1,22 SEA_{P1}$

Για τα δοκίμια P3 και P4 ισχύει:
 $E_{P4} = 1,44 E_{P3}$
 $P_{mP4} = 1,80 P_{mP3}$
 $P_{maxP4} = 1,52 P_{maxP3}$
 $CFE_{P4} = 1,19 CFE_{P3}$
 $SEA_{P4} = 1,35 SEA_{P3}$

Το μέγιστο φορτίο στην περίπτωση του δοκιμίου P2 αυξήθηκε περισσότερο από ότι η ενεργός διατομή του, κάτι που δεν αναμενόταν. Παρ' όλα αυτά στο δοκίμιο P4 το μέγιστο φορτίο αυξήθηκε όσο και η διατομή του, όπως είναι αναμενόμενο.

Το μέσο φορτίο και στις δύο ομάδες δοκιμίων αυξήθηκε αρκετά σε σχέση με την αύξηση της ενεργού διατομής τους. Η εξήγηση είναι ότι, όπως και στους αλουμινένιους σωλήνες, η αύξηση του πάχους των δοκιμίων μετέβαλε ολόκληρο τον τρόπο κατάρρευσής τους. Αυτό εκτός από τα παραπάνω μεγέθη, φαίνεται στις καμπύλες του φορτίου και στις παρακάτω τελικές όψεις των δοκιμίων. Το μεγαλύτερο πάχος μετέβαλε τον αριθμό αλλά και το είδος των λοβών. Βέβαια, υπενθυμίζεται ότι το δοκίμιο P1 δεν ολοκλήρωσε την κατάρρευση, τα καμπτικά φορτία το ανάγκασαν να λυγίσει και το εξώθησαν μακριά από τη μηχανή πριν το τέλος της δοκιμής.

Ο δείκτης μέσου προς μέγιστο φορτίο στην περίπτωση του P2 μειώθηκε ελαφρώς. Ίσως αυτό να οφείλεται ότι το P1 δεν ολοκλήρωσε το τελευταίο στάδιο της κατάρρευσης, στο οποίο τα φορτία είναι πιο μικρά. Αντίθετα, στην περίπτωση του P4 αυξήθηκε αρκετά. Έτσι, η μεταβολή στο πάχος του P3 σε σχέση με το P4 οδήγησε το τελευταίο να έχει πιο μικρές αυξομειώσεις στο φορτίο.

Τέλος, η ειδική απορρόφηση ενέργειας παρουσίασε αύξηση αυξανόμενου του πάχους των σωλήνων. Με την αύξηση του πάχους και συνεπώς της μάζας, η απορρόφηση ενέργειας, που εκφράζεται μέσα από το μέσο φορτίο, αυξήθηκε περισσότερο από ότι αυξήθηκε η μάζα. Αυτό οδήγησε και στην τελική αύξηση της SEA. Φυσικά, επειδή τα δοκίμια αυτά ήταν από πλαστικό, το μέγεθος της ειδικής απορρόφησης ενέργειας ήταν πολύ χαμηλότερο από τα αλουμινένια δοκίμια.

Εκτός από τον δείκτη CFE παρατηρείται ότι στα υπόλοιπα μεγέθη υπάρχει σχετική συμφωνία στη μεταβολή τους για τις ομάδες P1, P2 και P3, P4.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

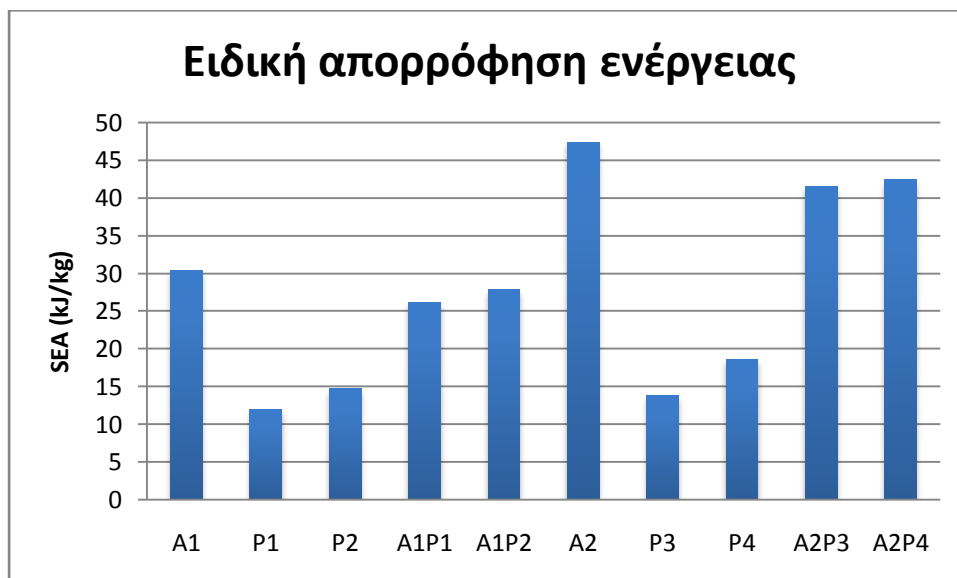
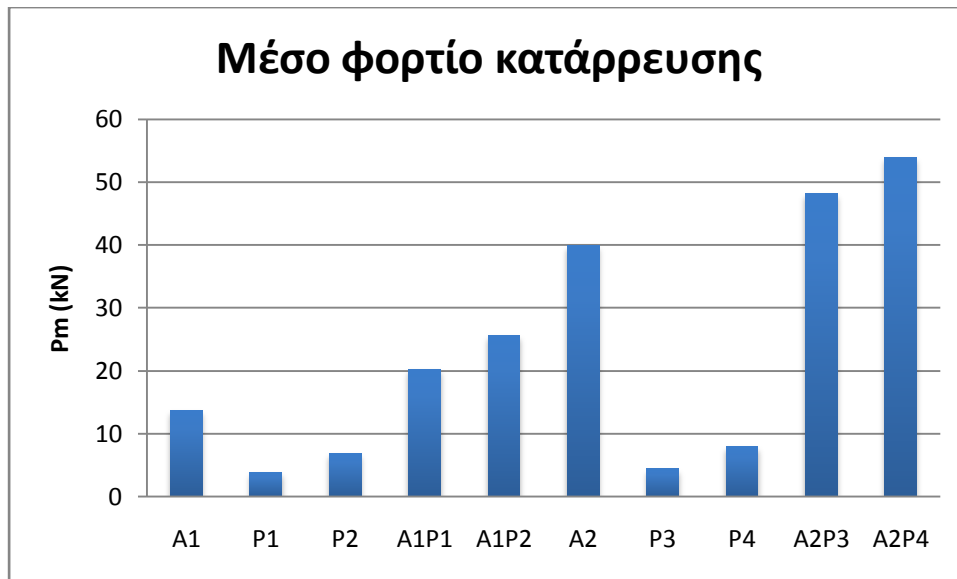
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στα προηγούμενα κεφάλαια έχει παρουσιαστεί η πειραματική διαδικασία, τα αποτελέσματα των πειραμάτων και η σύγκριση των αποτελεσμάτων τους. Σε αυτό το κεφάλαιο της εργασίας γίνεται μία σύντομη ανασκόπηση των αποτελεσμάτων και παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την ανάλυσή τους. Ακόμα, καταγράφονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της εσωτερικής επένδυσης με πλαστικό των μεταλλικών σωλήνων και γίνεται προσπάθεια να διαπιστωθεί σε ποιες περιπτώσεις χρειάζεται να κατασκευαστούν τέτοιες διατάξεις απορρόφησης ενέργειας. Τέλος, γίνονται προτάσεις για συνέχιση και επέκταση της μελέτης της αξονικής κατάρρευσης σωλήνων από δύο ή περισσότερα επάλληλα υλικά.

6.1 Συνοπτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων και συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία αφορά τη μελέτη της αξονικής κατάρρευσης μεταλλικών σωλήνων επενδυμένων εσωτερικά με πλαστικό. Εξετάστηκαν δύο σωλήνες από αλουμίνιο, οι οποίοι είχαν δύο διαφορετικά πάχη. Κάθε ένας από αυτούς επενδύθηκε εσωτερικά με πλαστικούς σωλήνες δύο διαφορετικών παχών. Αφού έγινε η κατάρρευση των ξεχωριστών μεταλλικών και πλαστικών σωλήνων, έγινε η κατάρρευση των τεσσάρων διπλών σωλήνων από τα δύο αυτά επάλληλα υλικά. Η μηχανή δοκιμών κατέγραψε το φορτίο σε κάθε χρονική στιγμή και από αυτά τα δεδομένα υπολογίστηκαν τα βασικά μεγέθη της κατάρρευσης, όπως το μέσο φορτίο, το μέγιστο φορτίο, η απορροφούμενη ενέργεια, ο δείκτης μέσου προς μέγιστο φορτίο και η ειδική ενέργεια απορρόφησης, ενώ σχεδιάστηκαν και τα διαγράμματα φορτίου- μετατόπισης εμβόλου.

Στη συνέχεια γίνεται μια συνοπτική παρουσίαση των δύο πιο σημαντικών μεγεθών που ενδιαφέρουν τους μηχανικούς, του μέσου φορτίου και της ειδικής ενέργειας απορρόφησης, για τα δέκα δοκίμια που εξετάστηκαν. Το μέσο φορτίο εκφράζει την απορρόφηση ενέργειας και η ειδική απορρόφηση ενέργειας ορίζεται ως η απορροφούμενη ενέργεια ανηγμένη ως προς τη μάζα που παραμορφώθηκε.



Το ενδιαφέρον της μελέτης κυρίως εστιάζεται στο πώς αλλάζουν τα μεγέθη και ο τρόπος της κατάρρευσης με την προσθήκη της εσωτερικής επένδυσης και για ποιο λόγο συμβαίνει κάτι τέτοιο.

Όσον αφορά το μέσο φορτίο, παρατηρήθηκε σημαντική αύξηση με την προσθήκη των πλαστικών σωλήνων. Αυτό οφείλεται τόσο στο μεγαλύτερο πάχος που προέκυψε, όσο και στην αλληλεπίδραση των τρόπων κατάρρευσης των δύο σωλήνων. Έτσι, ο τρόπος κατάρρευσης των διπλών σωλήνων ήταν διαφορετικός από των μεταλλικών, κάτι που διαπιστώνεται και από τις φωτογραφίες των δοκιμίων που παρατίθενται στα προηγούμενα κεφάλαια. Σημαντική παρατήρηση είναι ακόμα ότι το μέσο φορτίο των δοκιμίων από τα δύο επάλληλα υλικά ήταν σε όλες τις περιπτώσεις μεγαλύτερο από το άθροισμα των δύο ξεχωριστών σωλήνων που τα απαρτίζουν. Στις περιπτώσεις που χρησιμοποιήθηκε ο σωλήνας A2 σημειώθηκαν θραύσεις, τόσο όταν συμπίεστηκε μόνος του, όσο και

όταν επενδύθηκε εσωτερικά, περισσότερο στο δοκίμιο A2P3 και λιγότερο στο δοκίμιο A2P4.

Η ειδική απορρόφηση ενέργειας μεταβλήθηκε με διαφορετικό τρόπο. Τα αλουμινένια δοκίμια παρουσίασαν πολύ μεγάλη ειδική απορρόφηση ενέργειας, κυρίως λόγω του υλικού τους. Το αλουμίνιο ως υλικό έχει χαμηλή πυκνότητα και σημειώνει μεγάλη απορρόφηση ενέργειας. Αντίθετα, στα πλαστικά δοκίμια η ειδική απορρόφηση ενέργειας ήταν αρκετά πιο χαμηλή. Με την προσθήκη της εσωτερικής επένδυσης, παρά την αύξηση του μέσου φορτίου, η ειδική απορρόφηση ενέργειας σε σχέση με τα μεταλλικά δοκίμια μειώθηκε. Αυτό εξηγείται από το ότι με την προσθήκη του πλαστικού σωλήνα, η μάζα αυξήθηκε περισσότερο από όσο αυξήθηκε το μέσο φορτίο και η απορροφώμενη ενέργεια.

Από τα παραπάνω, εξάγεται το συμπέρασμα ότι αν σε μία διάταξη απορρόφησης ενέργειας στόχος είναι η αύξηση του φορτίου και επομένως και της απορροφώμενης ενέργειας, η εσωτερική επένδυση με πολυμερές υλικό ενός μεταλλικού σωλήνα βελτιώνει αρκετά την απόδοσή του. Ωστόσο, αν σε μια κατασκευή υπάρχουν σημαντικοί περιορισμοί στο βάρος του και επιθυμείται παράλληλα καλή απορρόφηση ενέργειας, είναι προτιμότερο να χρησιμοποιηθούν σωλήνες από αλουμίνιο, καθώς αυτοί παρουσίασαν μεγαλύτερη ειδική απορρόφηση ενέργειας. Επίσης, σε αυτή την περίπτωση αποφεύγεται το κόστος και ο χρόνος της εσωτερικής επένδυσης και η κατασκευή είναι πιο απλή.

6.2 Προτάσεις για συνέχιση και επέκταση της μελέτης

Η μελέτη της κατάρρευσης κυλινδρικών σωλήνων από δύο επάλληλα υλικά παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον και τέτοιες διατάξεις έχουν μεγάλη χρησιμότητα, αφού όπως κατέδειξαν τα πειράματα μπορούν να απορροφήσουν αποτελεσματικά μεγάλες ποσότητες ενέργειας. Επιπλέον, για λειτουργικούς ή άλλους λόγους μπορεί να κρίνεται απαραίτητη η επένδυση εσωτερικά ή εξωτερικά του κελύφους μιας κατασκευής με άλλο υλικό. Βασικότερη εφαρμογή τέτοιων διατάξεων απορρόφησης ενέργειας αποτελούν τα μέσα μεταφοράς, στα οποία επιδιώκεται η ασφάλεια ανθρώπων, δομών και αγαθών.

Γι' αυτούς τους λόγους, η επέκταση της μελέτης αυτού του είδους των συστημάτων απορρόφησης ενέργειας, η οποία έχει αναπτυχθεί αρκετά τα τελευταία χρόνια, μπορεί να αποδειχθεί πολύ επωφελής. Χρήσιμο είναι να μελετηθούν και άλλοι συνδυασμοί υλικών, που ενδεχομένως να παρουσιάσουν διαφορετική συμπεριφορά κατά τη συμπίεσή τους. Τέτοιοι

συνδυασμοί είναι για παράδειγμα μέταλλο και σύνθετο υλικό, δύο είδη μετάλλων διαφόρων κραμάτων ή συνδυασμός σύνθετου με πολυμερές υλικό. Ακόμα, η κατασκευή είναι δυνατό να αποτελείται από τρία επάλληλα υλικά. Μία μέθοδος που παρουσιάζει καλή συμπεριφορά κατάρρευσης είναι η διαμόρφωση ενός πυρήνα από αφρό, πολυμερή ή μεταλλικό, και η επένδυσή του εξωτερικά από τις δύο πλευρές με άλλο υλικό. Τέτοιες διερευνήσεις μπορεί να οδηγήσουν στην επιλογή της διάταξης με τα περισσότερα οφέλη για το σκοπό που θα χρησιμοποιηθεί.

Μία άλλη μέθοδος για την εξέταση συστημάτων απορρόφησης ενέργειας είναι η προσομοίωσή τους με τη χρήση υπολογιστή. Η κατάρρευσή τους μπορεί να προσομοιωθεί μέσω ειδικών λογισμικών και ακόμα μπορούν να συγκριθούν τα αποτελέσματα με τα αντίστοιχα των πειραμάτων. Έτσι, πολλές φορές αποφεύγεται το κόστος και ο χρόνος κατεργασίας των δοκιμίων και προκύπτουν αποτελέσματα αρκετά αξιόπιστα και σε συμφωνία με των πραγματικών δοκιμίων. Βέβαια, σημαντικό πλεονέκτημα αποτελεί το ότι η αριθμητική προσομοίωση δεν λαμβάνει υπόψη τους τυχαίους παράγοντες που ενυπάρχουν σε μια πειραματική διαδικασία όπως τυχόν ατέλειες των δοκιμίων.

Με αυτούς τους τρόπους η ήδη εκτενής έρευνα που έχει ξεκινήσει τα τελευταία χρόνια για τις καταστροφικές καταπονήσεις και τις διατάξεις απορρόφησης ενέργειας μπορεί να συνεχιστεί. Η ανάλυση πολλών ειδών διατάξεων και η αξιολόγηση των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων που αυτές παρουσιάζουν για κάθε περίπτωση καταπόνησης αποτελεί βασικό μέλημα των μελετητών. Έτσι, είναι σε θέση να αξιολογήσουν και να επιλέξουν τον τύπο της διάταξης που θα χρησιμοποιήσουν, τη γεωμετρία και τα υλικά της, ώστε σε κάθε περίπτωση να αποκομίσουν τα μέγιστα οφέλη για τους ανθρώπους και το περιβάλλον με το ελάχιστο δυνατό κόστος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική βιβλιογραφία

E1. Κατεργασίες των υλικών I, Αθαν. Γ. Μάμαλη, Αθήνα 1998, εκδόσεις ΕΜΠ.

Ξενόγλωσση βιβλιογραφία

- 1. Collapsible impact energy absorbers: an overview**, A.A.A. Alghandi, Thin-Walled Structures 39, 189-213, 2001.
- 2. Metallic tube type energy absorbers: a synopsis**, A.G. Olabi, Edmund Morris, M.S.J. Hashmi, Thin-Walled Structures 45, 706-726, 2007.
- 3. Axial plastic collapse of thin bi-material tubes as energy dissipating systems**, A.G. Mamalis, D.E. Manolakos, G.A. Demosthenous, W. Johnson, Int. J. Impact Engng Vol. 11, No. 2, pp. 185-196, 1991.
- 4. The quasi-static crumpling of thin-walled circular cylinders and frusta under axial compression**, A.G. Mamalis, W. Johnson, Int. J. Mech. Sci. Vol. 25, No. 9-10, pp. 713-732, 1983.
- 5. Inextensional collapse of thin-walled tubes under axial compression**, W. Johnson, P.D. Soden, S.T.S. Al-Hassani, Journal of Strain Analysis 12 (4), 317-330, 1977.
- 6. An approximate analysis of the collapse of thin cylindrical shells under axial loading**, J.M. Alexander, Q. J. Mech. Appl. Math. 13, 1-9, 1960.
- 7. Some aspects of axial collapse of thin cylindrical thin -walled tubes**, N.K. Gupta, Thin-Walled Structures 32, 111-126, 1998
- 8. Mathematical modeling of axial crushing of cylindrical tubes**, N.K. Gupta, Husain Abbas, Thin-Walled Structures 38, 355-375, October 2000.

9. **An analysis of axi-symmetric axial collapse of round tubes**, N.K. Gupta & R. Velmurugan, *Thin-Walled Structures* 22, 261-274, 1995.
10. **Curved fold model analysis for axi-symmetric axial crushing of tubes**, H. Abbas, B.L. Tyagi, M. Arif, N.K. Gupta, *Thin-Walled Structures* 41, 639-661, December 2002.
11. **Dynamic axial crushing of circular tubes**, Wlodzimierz Abramowicz, Norman Jones, *Int. J. Impact Engng.* Vol. 2, No. 3, pg. 263-281, 1984
12. **Static and dynamic axial crushing of circular and square tubes**, Norman Jones, Wlodzimierz Abramowicz. In Reid SR, editor, *Metal forming and Impact Mechanics*, Oxford, Pergamon Press, 1985:225
13. **The effective crushing distance in axially compressed thin-walled metal columns**, Wlodzimierz Abramowicz, Polish Academy of sciences, Institute for Fundamental Technological Research, Poland 1983
14. **Simplified crushing analysis of thin-walled columns and beams**, Wlodzimierz Abramowicz, *Eng. Transactions* 29, 5-26, 1981
15. **On the crushing mechanics of thin-walled structures**, T. Wierzbicki, W. Abramowicz, *J. Appl. Mech.* 50, 727-734, 1983
16. **Optimum design of integrated front panel against crush**, Report for Ford Motor Company, Vehicle Component Dept., 1983
17. **Classification of the axial collapse of cylindrical tubes under quasi-static loading**, K.R.F. Andrews, G.L. England, E. Ghani, *Int. J. Mech. Sci.*, 25:687-96, 1983
18. **An alternate method for determining the behaviour of round stocky tubes subjected to an axial crush load**, R.H. Grzebeita, *Thin-Walled Structures*, 9:61-89, 1990
19. **The large scale crumpling of thin cylindrical columns**, A.G. Pugsley, M. Macaulay, *Quart. J. Mech. and Applied Math.*, 13:1-9, 1960
20. **On the crumpling of thin tubular struts**, A.G. Pugsley, *Quart. J. Mech. and Applied Math.*, 32:1-7, 1979

- 21. Attempts to improve energy absorption characteristics of circular metal tubes subjected to axial loading**, S. Salehghaffari, M. Tajdari, M. Panahi, F. Mokhtarnezhad, *Thin-Walled Structures*, 48 (2010), 379-390

- 22. Transition from progressive to global bending of circular shells under axial impact- Part 1: Experimental and numerical observation**, D. Karagiozova, M. Alves, *International Journal of Solids and Structures*, Volume 41, Issues 5-6, March 2004, 1565-1580