

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΣΤΗ
ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ PVC
ΚΕΛΥΦΩΝ

ΜΑΛΙΝΑΚΗΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ Ε. ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ



ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια των σπουδών μου στη σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π., στον τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών με σκοπό της ολοκλήρωσης τους. Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον επιβλέποντα καθηγητή και διευθυντή του εργαστηρίου κ. Μανωλάκο Δημήτριο για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπο μου αναθέτοντάς μου τη μελέτη και τη διεκπεραίωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, καθώς και για την πολύτιμη καθοδήγηση του. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Μηχανολόγο Μηχανικό Κωστάζο Πρωτεσίλαο (ΕΔΙΠ) για την εποικοδομητική συνεργασία καθ' όλη τη διάρκεια της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Επιπλέον, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στους κ. Κερασιώτη Κωνσταντίνο και Μελισσά Νικόλαο για την πολύτιμη βοήθεια τους κατά τη διεξαγωγή της πειραματικής διαδικασίας. Τέλος, θα ήθελα να αφιερώσω την διπλωματική εργασία αυτή στον πατέρα μου Νικόλαο ο οποίος δεν βρίσκεται πλέον εν ζωή.



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μέτρηση της αντοχής πλαστικών κελυφών PVC διαφόρων διατομών μέσω της αξονικής θλίψης τους. Η αντοχή τους εξετάζεται αρχικά σε συνθήκες περιβάλλοντος, ενώ η διαδικασία επαναλαμβάνεται καθώς τα δοκίμια τοποθετούνται μέσα σε διάταξη με βραστό νερό. Παρατηρούνται οι μεταβολές στην αντοχή τους κατά τις δύο πειραματικές – θερμοκρασιακές συνθήκες και εξάγονται τα απαραίτητα συμπεράσματα. Να σημειωθεί ότι τα συμπιεσμένα δοκίμια εμβάπτιζονται σε βραστό νερό αμέσως μετά τη δοκιμή συμπίεσης και εξετάζεται η συμπεριφορά τους. Σύμφωνα με τα ευρήματα, η αντοχή των δοκιμίων στις συνθήκες συμπίεσης βραστού νερού είναι εμφανώς μειωμένη σε σχέση με τη συμπίεση σε συνθήκες περιβάλλοντος. Επίσης, διαπιστώθηκε διαφοροποίηση στον τρόπο παραμόρφωσης. Τέλος, παρατηρήθηκε ότι τα συμπιεσμένα δοκίμια ανατάχθηκαν στην αρχική τους διαμόρφωση κατόπιν της εμβάπτισής τους σε βραστό νερό. Τα αποτελέσματα συζητούνται και αναλύονται αναφορικά με τις πειραματικές συνθήκες και τις διαστάσεις των δοκιμίων.

Λέξεις κλειδιά: PVC κέλυφος, αξονική καταπόνηση, συμπίεση / θλίψη, εφελκυσμός, απορρόφηση ενέργειας, μνήμη σχήματος, εμβάπτιση σε βραστό νερό



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΥΛΙΚΟ PVC

1.1	Εισαγωγή στο υλικό PVC.....	8
1.1.1	Ιστορικά στοιχεία.....	8
1.2	Τι είναι το PVC.....	9
1.2.1	Διαδικασία παραγωγής PVC.....	10
1.2.2	Παραγωγή μονομερούς βινυλοχλωριδίου (VCM).....	11
1.2.3	Κίνδυνοι VCM.....	12
1.2.4	Μεταφορά VCM.....	12
1.2.5	Προσθετικά PVC.....	13
1.2.6	Πλαστικοποιητές του PVC.....	14
1.2.7	Σταθεροποιητές του PVC.....	14
1.3	Φυσικές ιδιότητες PVC.....	16
1.3.1	Μηχανική σταθερότητα.....	17
1.3.2	Δυνατότητα επεξεργασίας και χυτευσιμότητα.....	17
1.3.3	Αντοχή σε εφελκυσμό.....	18
1.3.4	Ιδιότητα σε ερπυσμό.....	18
1.3.5	Πλαστικοποίηση.....	19
1.3.6	Χημική αντίσταση.....	19
1.3.7	Διαφάνεια.....	20
1.3.8	Αντιπυρικές ιδιότητες.....	21
1.3.9	Άλλες ιδιότητες.....	21



1.3.10 Μνήμη σχήματος.....	22
----------------------------	----

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΞΟΝΙΚΗΣ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΩΝ ΣΩΛΗΝΩΝ

2.1 Γενικά στοιχεία κατάρρευσης κυλινδρικών σωλήνων.....	24
2.2 Τρόποι κατάρρευσης.....	25
2.2.1 Αξονοσυμμετρικός τρόπος κατάρρευσης.....	25
2.2.1.1 Μοντέλο αξονοσυμμετρικής κατάρρευσης Alexander.....	26
2.2.1.2 Μοντέλο αξονοσυμμετρικής κατάρρευσης Abramowicz και Jones.....	26
2.2.1.3 Μοντέλο αξονοσυμμετρικής κατάρρευσης Gupta και Vermurugan.....	27
2.2.1.4 Μοντέλο αξονοσυμμετρικής κατάρρευσης Gupta και Abbas.....	28
▪ Απορροφούμενη ενέργεια κατά την κατάρρευση.....	29
▪ Μέσο φορτίο κατάρρευσης.....	31
▪ Μεταβολή φορτίου παραμόρφωσης.....	32
2.2.2 Μη αξονοσυμμετρικός τρόπος κατάρρευσης.....	33
2.2.3 Μικτός τρόπος κατάρρευσης.....	35
2.2.4 Λυγισμός.....	35

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

3.1 Γενικά στοιχεία.....	37
3.2 Πειραματικά δοκίμια.....	37
3.2.1 Διαστάσεις δοκιμίων / ονοματολογία.....	37



3.3	Συνθήκες διεξαγωγής πειραμάτων.....	38
3.3.1	Μηχανική πρέσα INSTRON.....	38
3.3.2	Εξοπλισμός εκτέλεσης πειραμάτων σε συνθήκες βραστού νερού.....	43
3.3.3	Διεξαγωγή πειραμάτων.....	44

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

4.1	Πειραματικό δοκίμιο 1_A.....	45
4.2	Πειραματικό δοκίμιο 2_A.....	48
4.3	Πειραματικό δοκίμιο 3_A.....	52
4.4	Πειραματικό δοκίμιο 4_A.....	56
4.5	Πειραματικό δοκίμιο 1_B.....	59
4.6	Πειραματικό δοκίμιο 2_B.....	63
4.7	Πειραματικό δοκίμιο 3_B.....	68
4.8	Πειραματικό δοκίμιο 4_B.....	72
4.9	Πειραματικό δοκίμιο 5.....	76

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΣΤΙΣ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΔΙΕΞΑΓΩΓΗΣ ΤΟΥΣ

5.1	Γενικά στοιχεία.....	80
5.2	Ορισμός μεγεθών σύγκρισης.....	80
5.3	Σύγκριση συμπεριφοράς παραμόρφωσης δοκιμίων 1_A και 1_B.....	81
5.4	Σύγκριση συμπεριφοράς παραμόρφωσης δοκιμίων 2_A και 2_B.....	83



5.5	Σύγκριση συμπεριφοράς παραμόρφωσης δοκιμίων 3_A και 3_B.....	85
5.6	Σύγκριση συμπεριφοράς παραμόρφωσης δοκιμίων 4_A και 4_B.....	87
5.7	Συμπεράσματα.....	89
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		90



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΥΛΙΚΟ PVC

1.1 Εισαγωγή στα υλικά PVC

Το πολυβινυλικό χλωρίδιο (PVC), σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, είναι ένα από τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα θερμοπλαστικά υλικά αναφορικά με την παγκόσμια κατανάλωση πολυμερών [5]. Πιο συγκεκριμένα, σε παγκόσμιο επίπεδο η ετήσια ζήτηση σε PVC ξεπερνά τους 35 τόνους, καθιστώντας το δεύτερο (μετά την πολυαιθυλένιο) στη βιομηχανία πλαστικών.

1.1.1 Ιστορικά στοιχεία

Το πολυβινυλικό χλωρίδιο (polyvinil chloride), γνωστό ως PVC, είναι ένα πολυμερές υλικό το οποίο αποτελεί σημείο αναφοράς στη σύγχρονη βιομηχανία πλαστικών [1].

Στα 1838 ο Γάλλος μηχανικός Henri Regnault δημιούργησε συνθετικά το PVC δίχως όμως να έχει αντιληφθεί το όφελος της ανακάλυψής του. Αρχικά, το πολυμερές εμφανίστηκε ως ένα λευκό στερεό υλικό μέσα σε δοχεία αερίου του προσφάτως ανακαλυφθέν αερίου χλωριούχου βινυλίου, το οποίο εκτιθόταν στο ηλιακό φως. Ο Henri Regnault αδυνατούσε να συλλάβει τότε την εμπορική αξία του νεοανακαλυφθέντος PVC [1][8].

Η πιο σημαντική ανακάλυψη έλαβε χώρα στις Ηνωμένες Πολιτείες όταν η εταιρεία BFGoodrich προσέλαβε τον επιστήμονα Waldo Semon για να αναπτύξει ένα συνθετικό υποκατάστατο του φυσικού καουτσούκ, το οποίο ήταν πολύ ακριβό [1]. Ο Semon παρόλες τις προσπάθειες που κατέβαλε αρχικά, δεν κατάφερε να υλοποιήσει το στόχο του μέχρι που συνέλαβε την ιδέα του PVC, ως μία αδιάβροχη ενίσχυση για υφάσματα. Οι πωλήσεις άρχισαν να αυξάνονται ταχύτατα, καθώς και το εύρος των προϊόντων της εταιρείας. Η ζήτηση του PVC επιταχύνθηκε εκ νέου κατά τη διάρκεια του Δευτέρου Παγκοσμίου Πολέμου, όταν το πολυμερές αντικατέστησε γρήγορα το παραδοσιακό υλικό για τη μόνωση καλωδίων στα στρατιωτικά πλοία.

Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1950, περισσότερες εταιρείες άρχισαν να παράγουν PVC και ο όγκος τους αυξήθηκε δραματικά σε όλο τον κόσμο. Κατά τη διάρκεια της εν λόγω δεκαετίας διαπιστώθηκαν καινοτόμες χρήσεις του υλικού και νέες μέθοδοι ενίσχυσής του με αποκορύφωμα τη χρήση του σε κατασκευαστικές εφαρμογές. Έως τα μέσα του 20ου αιώνα, πέντε



εταιρείες παρήγαγαν το συγκεκριμένο πλαστικό, ενώ πρωτοποριακές χρήσεις για το πολυμερές συνέχισαν να ανακαλύπτονται και κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1960.

Είναι γεγονός ότι τα προϊόντα από PVC έγιναν αμέσως απαραίτητα στην κατασκευαστική βιομηχανία. Οι ιδιότητες τους στην αντοχή τόσο έναντι του ηλιακού φωτός όσο και στη διάβρωση και τα χημικά θεμελίωσε τη χρήση τους σε οικοδομικές εφαρμογές, καθώς θεωρήθηκε ως απαραίτητη.

1.2 Τι είναι το PVC

Η ελληνική ονομασία του PVC είναι πολυβινιλοχλωρίδιο. Πρόκειται για ένα θερμοπλαστικό πολυμερές του βινυλίου, κατασκευασμένο από επαναλαμβανόμενες ομάδες βινυλίου, οι οποίες έχουν αντικαταστήσει ένα από τα υδρογόνα με μία ομάδα χλωρίου. Η σύστασή του αποτελείται από το αιθυλένιο το οποίο υπάρχει στο πετρέλαιο σε ποσοστό 43% και το χλώριο το οποίο υπάρχει στο αλάτι σε ποσοστό 57% [2]. Κατά την ένωση τους σχηματίζουν ένα άχρωμο αέριο το λεγόμενο βινιλοχλωρίδιο (VC). Με την προσθήκη οξυγόνου και φωτός γίνεται ο πολυμερισμός αυτού του αερίου, δηλαδή τα μόρια ενώνονται μεταξύ τους και σχηματίζουν μεγαλύτερες ομάδες μορίων και με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται το πολυβινιλοχλωρίδιο ή αλλιώς PVC.

Το αιθυλένιο είναι ένα από τα πέντε προϊόντα που προκύπτουν κατόπιν της παρόλυσης της νάφθας και κατ'επέκταση αποτελεί βασικό συστατικό στην παραγωγή πλαστικών. Αυτή γίνεται μέσω διύλισης σε παράκτιες περιοχές ή κοντά σε ποτάμια. Εκεί μέσω αγωγών παρέχεται εύκολη πρόσβαση σε εισαγόμενους φυσικούς πόρους όπως το αργό πετρέλαιο. Συχνά παρατηρείται ότι οι βιομηχανίες αλκαλίων και χλωρίου βρίσκονται μαζί με τις βιομηχανίες πετροχημικών [3].



1.2.1 Διαδικασία παραγωγής

Αναφορικά με τη διαδικασία παραγωγής του, η ευρέως χρησιμοποιούμενη παραγωγική διαδικασία είναι ο πολυμερισμός προσθήκης [3]. Σε αυτή τη διαδικασία, το μονομερές βινυλοχλωρίδιο (VCM) και το νερό εισάγονται στον αντιδραστήρα πολυμερισμού και ένας εκκινητής μαζί με άλλα χημικά πρόσθετα προστίθενται για να αρχίσει η αντίδραση πολυμερισμού. Τα περιεχόμενα του δοχείου αντίδρασης συνεχώς αναμειγνύονται για να συντηρηθεί το μίγμα και να εξασφαλιστεί η ομοιομορφία του μεγέθους των σωματιδίων της ρητίνης PVC. Η αντίδραση είναι εξώθερμη και ως εκ τούτου απαιτεί ένα μηχανισμό ψύξης για τη διατήρηση του περιεχομένου του αντιδραστήρα στην κατάλληλη θερμοκρασία. Δεδομένου ότι ο όγκος επίσης συστέλλεται κατά τη διάρκεια της αντίδρασης το PVC είναι πυκνότερο από το VCM, στο μίγμα προστίθεται συνεχώς νερό για να διατηρηθεί το αιώρημα.

Μόλις η αντίδραση ξεκινήσει το προκύπτον υδαρές PVC απαεριώνεται και επεξεργάζεται για να απομακρυνθεί η περίσσεια του VCM. Ύστερα, ανακυκλώνεται στην επόμενη παρτίδα και περνά μέσα στη μηχανή φυγοκέντρισης ώστε να απομακρυνθεί το μεγαλύτερο μέρος από την περίσσεια του νερού. Η προκύπτουσα λάσπη ξηραίνεται περαιτέρω σε ένα έδρανο ζεστού αέρα και η σκόνη που δημιουργείται κοσκινίζεται πριν την αποθήκευση ή την μετατροπή της σε σβώλους. Σε κανονικές συνθήκες, το προκύπτον PVC έχει περιεκτικότητα, σε VCM μικρότερη από το 1ppm [3]. Το VCM που δεν χρησιμοποιήθηκε μετά τον καθαρισμό του μπορεί να ανακυκλωθεί και να χρησιμοποιηθεί ξανά κατά την επανάληψη της διαδικασίας. Η ρητίνη που παράγεται μέσω αυτής της διαδικασίας είναι γνωστή ως s-PVC [12][15]. Η ρητίνη αυτή ονομάζεται "soft-PVC" και είναι πιο "μαλακή" από το τελικό προϊόν, το PVC.

Άλλες παραγωγικές διαδικασίες, όπως ο πολυμερισμός μικρό-προσθήκης και ο πολυμερισμός γαλακτώματος, παράγουν PVC με μικρότερα μεγέθη σωματιδίων (10 μm έναντι 120-150 μm, για το αιώρημα PVC), με ελαφρώς διαφορετικές ιδιότητες και με κάπως διαφορετικά σύνολα εφαρμογών [3].

Το προϊόν της διαδικασίας πολυμερισμού είναι το αμετάβλητο PVC. Πριν το PVC να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε τελικά προϊόντα, σχεδόν πάντα απαιτεί τη μετατροπή του σε μια ένωση με την ενσωμάτωση των πρόσθετων υλών, όπως σταθεροποιητές θερμότητας, σταθεροποιητές υπεριώδους (UV) ακτινοβολίας, λιπαντικά, πλαστικοποιητές, τα βοηθητικά μέσα



επεξεργασίας, τροποποιητές κρούσης, θερμικούς τροποποιητές, επιβραδυντικά φλόγας, βιοκτόνα, διογκωτικά, καταστολείς καπνού και προαιρετικά χρωστικές [4].

1.2.2 Παραγωγή μονομερούς βινυλοχλωριδίου (VCM)

Το μονομερές βινυλοχλωρίδιο (VCM) είναι το βασικό υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένο το PVC [10]. Χαρακτηρίζεται ως αέριο με μοριακό βάρος των 62.5 gr και σημείο ζέσεως των $-13,9^{\circ}\text{C}$ και ως εκ τούτου έχει υψηλή πίεση ατμού σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Υπάρχουν δύο τρόποι να κατασκευαστεί VCM από αιθυλένιο (που λαμβάνεται από το θερμικό ράγισμα). Η πρώτη είναι η άμεση μέθοδος χλωρίωσης, ενώ η δεύτερη η μέθοδος της οξυγονοχλωρίωσης (oxychlorination) [6].

Κατά τη μέθοδο της χλωρίωσης, το αιθυλένιο και το χλώριο (που λαμβάνονται από την ηλεκτρόλυση του άλατος) αντιδρούν μέσα σε έναν αντιδραστήρα καταλύτη για να διαμορφώσουν το ενδιάμεσο υλικό EDC. Το EDC είναι στη συνέχεια θερμικά ραγισμένο και έτοιμο να παράξει VCM σε μερικές εκατοντάδες βαθμών Κελσίου ($^{\circ}\text{C}$) [10][14].

Κατά τη δεύτερη μέθοδο, αυτή της οξυγονοχλωρίωσης, το υδροχλώριο που λαμβάνεται ως υποπροϊόν από την παραπάνω μέθοδο αντιδρά με το αιθυλένιο παρουσία του καταλύτη και του αέρα (ή του οξυγόνου) λαμβάνοντας EDC. Το EDC από τη διαδικασία της οξυγονοχλωρίωσης αρχικά αφυδατώνεται και στη συνέχεια ραγίζεται θερμικά με τελικό αποτέλεσμα τη λήψη του αερίου VCM [6][20].

Σε παλαιότερες διαδικασίες παραγωγής VCM, το αέριο δεν παράγεται από το EDC, αλλά από την αντίδραση της ασετιλίνης με το υδροχλωρικό οξύ (HCL) παρουσία ενός υδραργυρικού καταλύτη χλωριδίου [7][19]. Είναι γεγονός ότι εδώ και αρκετές δεκαετίες δεν χρησιμοποιείται αυτή η τεχνολογία στη βιομηχανία και δεν φαίνεται να υπάρχει κανένα περιβαλλοντικό ή οικονομικό κίνητρο για να αντιστραφεί αυτή η τάση [20]. Ωστόσο, υπάρχει ένα ισχυρό περιβαλλοντικό κίνητρο για να σταματήσει τη χρήση του υδραργυρικού καταλύτη, ο οποίος περιλαμβάνεται στη διαδικασία της ασετιλίνης [7]. Σήμερα, η συγκεκριμένη διαδικασία είναι σχεδόν ξεπερασμένη, με εξαίρεση την Κίνα όπου η διαθεσιμότητα του σχετικά φθηνού άνθρακα την καθιστά οικονομικά ελκυστική.



1.2.3 Κίνδυνοι του VCM

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να λαμβάνεται κατά το χειρισμό και την αποθήκευση του VCM, καθώς πρόκειται για ένα εύφλεκτο και πιθανώς εκρηκτικό αέριο [10]. Η εισπνοή του επίσης σε μεγάλες ποσότητες μπορεί να κριθεί πολύ επικίνδυνη. Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1950, το συγκεκριμένο αέριο χρησιμοποιούνταν ως αναισθητικό σε ιατρικές εφαρμογές. Στις μέρες μας είναι γνωστό ότι μπορεί να αποτελέσει και καρκινογόνο ουσία, καθώς υπάρχει η πιθανότητα πρόκλησης μιας σπάνιας μορφής καρκίνου, του καρκίνου των αιμοφόρων αγγείων του ήπατος, εάν υπάρχει σημαντική έκθεση σε αυτό για παρατεταμένη περίοδο [14]. Το εν λόγω εύρημα έγινε γνωστό σε μελέτες εργαζομένων σε εγκαταστάσεις πολυμερισμού PVC κατά τη δεκαετία του 1970. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, μόλις διαπιστώθηκε αυτός ο κίνδυνος λήφθηκαν σημαντικά μέτρα για να μειωθεί το επίπεδο έκθεσης, ενώ παράλληλα διεκόπησαν και όλες οι διαδικασίες παραγωγής που περιλαμβάνουν τη χρήση του VCM [10]. Από τότε οι εργαζόμενοι στον κλάδο εξετάζονται τακτικά ακόμα και στα χαμηλότερα επίπεδα έκθεσης, ενώ αξίζει να σημειωθεί ότι δεν έχει παρατηρηθεί καμία περίπτωση καρκίνου των αιμοφόρων αγγείων, γεγονός που οφείλεται και στην τροποποίηση της διαδικασίας παραγωγής του PVC.

1.2.4 Μεταφορά VCM

Η μεταφορά του αερίου VCM παρουσιάζει υψηλούς κινδύνους, όπως άλλωστε και η μεταφορά άλλων εύφλεκτων αερίων όπως το προπάνιο, το βουτάνιο (LPG) και το φυσικό αέριο. Όπως μας είναι γνωστό από τη βιβλιογραφία [11], στην Ευρώπη τα τελευταία 40 χρόνια δεν έχει συμβεί κανένα μοιραίο ατύχημα που να σχετίζεται με τη μεταφορά VCM. Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για τη μεταφορά του αερίου σχεδιάζεται ειδικά για το σκοπό αυτό, είναι αντιδιαβρωτικός και η βιομηχανία είναι δεσμευμένη να βελτιώσει περαιτέρω την ασφάλεια της μεταφοράς του [14].



1.2.5 Προσθετικά PVC

Το πολυβινυλικό χλωρίδιο (PVC) είναι ένα ευπροσάρμοστο και αποδοτικό θερμοπλαστικό το οποίο καλύπτει το ευρύτερο φάσμα των απαιτήσεων στη βιομηχανία [6][9]. Οι πρόσθετες ουσίες που χρησιμοποιούνται στο PVC το καθιστούν ιδιαίτερα χρήσιμο προσδίδοντάς του διάφορους χρωματισμούς, ευπλαστότητα, επεξεργασιμότητα κλπ, με αποτέλεσμα την ευρεία χρήση του [5]. Τα προϊόντα PVC μπορούν να είναι άκαμπτα ή εύκαμπτα, αδιαφανή ή διαφανή, χρωματισμένα ή άχρωμα. Γενικά, υπάρχει μια οικογένεια προϊόντων κατάλληλη για να ανταποκριθεί στις ανάγκες κάθε εφαρμογής. Αντίθετα με τα υπόλοιπα θερμοπλαστικά, η πλειοψηφία των εφαρμογών PVC έχει διάρκεια ζωής μεταξύ 10 και 100 ετών. Για να επιτευχθεί μια τέτοια διάρκεια ζωής οι σταθεροποιητές διαδραματίζουν ένα σημαντικό μέρος στην επίτευξή της [16][17].

Προτού το PVC μετασχηματιστεί σε τελικό προϊόν, πρέπει να συνδυαστεί με μία σειρά από πρόσθετες ουσίες. Οι ουσίες αυτές είναι κατά κύριο λόγο σταθεροποιητές και λιπαντικά. Η χαμηλή ακαμψία των υλικών PVC συμπεριλαμβάνοντας και την καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης καθιστούν το υλικό πιο ευπαθές από τα μέταλλα σε διάφορες τιμές πλαστικής και ελαστικής αστάθειας [16]. Οι πρόσθετες ουσίες θα επηρεάσουν ή θα καθορίσουν τις μηχανικές ιδιότητες, την ελαφριά και θερμική σταθερότητα, το χρώμα, τη σαφήνεια και τις ηλεκτρικές ιδιότητες του προϊόντος [3]. Μόλις επιλεγθούν οι πρόσθετες ουσίες, αναμιγνύονται με το πολυμερές σώμα σε μία διαδικασία αποκαλούμενη σύνθεση. Μια συνηθισμένη μέθοδος χρησιμοποιεί έναν μεγάλο αναμίκτη, ο οποίος αναμιγνύει άρρηκτα όλα τα συστατικά. Το αποτέλεσμα είναι μία σκόνη, γνωστή ως «ξηρό μίγμα», η οποία τροφοδοτείται έπειτα στον εξοπλισμό επεξεργασίας [17][5].

Η δεύτερη μέθοδος είναι ο συνδυασμός των συστατικών σε έναν εξωθητή με μεγάλη ή μικρή ταχύτητα. Μετά την ανάμιξη μεταφέρεται το μίγμα σε μορφή σκόνης σε έναν δεύτερο αναμίκτη προς τήξη. Με αυτόν τον τρόπο παράγεται ένα μίγμα υγρής μορφής που όταν πλέον κρυώσει κόβεται σε κόκκους προς επεξεργασία [16][5].



1.2.6 Πλαστικοποιητές του PVC

Πλαστικοποιητής είναι μια ουσία που όταν προστεθεί σε ένα υλικό, συνήθως σε ένα πλαστικό, το καθιστά πιο εύκαμπτο, πιο ελαστικό και πιο εύκολο στην επεξεργασία. Μερικά παραδείγματα πλαστικοποιητών είναι το νερό το οποίο βοηθά στην χαλάρωση του αργίλου καθώς και το πετρέλαιο στην πίσσα [13][18].

Το PVC, όπως έχει προαναφερθεί, είναι ένα άκαμπτο υλικό σε κανονική θερμοκρασία. Αυτό οφείλεται στις μικρές αποστάσεις μεταξύ των μορίων δεδομένου ότι υπάρχουν ισχυρές διαμοριακές ελκτικές δυνάμεις [22]. Κατά τη θέρμανση, η ενέργεια των μοριακών κινήσεων γίνεται μεγαλύτερη από τις διαμοριακές δυνάμεις, με συνέπεια την χαλάρωση της ρητίνης. Σε αυτό το στάδιο όταν προστεθούν οι πλαστικοποιητές στο PVC, τα μόρια τους εισχωρούν ανάμεσα στα πολυμερή μόρια του PVC αποτρέποντάς τα να έρθουν πιο κοντά. Συνεπώς, τα πολυμερή μόρια παραμένουν σε απόσταση ακόμη και στην κανονική θερμοκρασία και η χαλαρότητα διατηρείται. Αυτός είναι και ο ρόλος των πλαστικοποιητών και η διαδικασία καλείται τεχνικά πλαστικοποίηση [13].

1.2.7 Σταθεροποιητές

Κατά τη θέρμανση του PVC στους 170-180°C, το χλώριο και το υδρογόνο αποβάλλονται με αποτέλεσμα την απελευθέρωση του υδροχλωρίου. Οι δομές των μορίων γίνονται ασταθείς ολοένα και περισσότερο και η αποβολή και η αποσύνθεση του υδροχλωρίου επιταχύνεται. Η χρήση σταθεροποιητών αποτρέπει την αποβολή του υδροχλωρίου γεγονός που τους καθιστά εξαιρετικά χρήσιμους [21][23].

Επομένως, η χρήση των σταθεροποιητών είναι καίρια ώστε να αποτραπεί η αλυσωτή αντίδραση της αποσύνθεσης. Οι σταθεροποιητές προσδίδουν επίσης στο PVC αντίσταση στο φως της ημέρας και στη διάβρωση και αντοχή στη θερμότητα, ενώ παράλληλα έχουν μια σημαντική επιρροή στις σωματικές ιδιότητες και αύξηση του κόστους του υλικού [18]. Οι σταθεροποιητές παρέχονται στη μορφή μιγμάτων με κύρια συστατικά μεταλλικά σαπούνια, μεταλλικά άλατα και οργανικές μεταλλικές ενώσεις [21].

Η επιλογή των σταθεροποιητών θερμότητας εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένων των τεχνικών απαιτήσεων του προϊόντος PVC, των νομικών κανονισμών και του κόστους. Οι κύριοι σταθεροποιητές θερμότητας συνδυάζονται συνήθως με τους



οργανικούς σταθεροποιητές, όπως είναι οι πολυόλες και οι εποξειδομένοι εστέρες. Γνωστοί και ευρέως χρησιμοποιούμενοι σταθεροποιητές είναι οι σταθεροποιητές μολύβδου, κασσίτερου, ψευδαργύρου, βáriου και κάδμιου. Οι κύριες χρήσεις τους παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον παρακάτω πίνακα:



	Είδος σταθεροποιητή						
Εφαρμογές	Pb	Pb/Ba/Cd	Ba/Cd	Ca/Zn	Ba/Zn	Sn	K/Zn
Μη πλαστικοποιημένο PVC							
Σωληνώσεις	++			++			
Εξαρτήματα	++					+	
Προφίλ	++	++		+			
Φύλλα αλουμινίου						++	
Φιάλες				++		++	
Φύλλα μετάλλου	+			(+)		++	
Πλαστικοποιημένο PVC							
Καλώδια	+			++			
Φύλλα αλουμινίου και μετάλλου	+			+	++		
Υλικά δαπέδων					++	+	++
Ταπετσαρίες				(+)	++	+	++
Ιατρικές εφαρμογές				++			
Παπούτσια				+	++		
Σακούλες τροφίμων				++			
Υφάσματα				+	++		++

Σχήμα 1.1 Κύριες χρήσεις των βασικότερων σταθεροποιητών [21][23]



1.3 Φυσικές ιδιότητες PVC

Τα PVC, PE, PP και τα CP είναι πλαστικά γενικού τύπου. Τα χαρακτηριστικά γνωρίσματά τους καθορίζονται από τη χημική τους σύνθεση και τον τύπο της μοριακής τους δομής [21][24]. Τα PVC έχουν μία άτακτη δομή με πολικά άτομα χλωρίου στην μοριακή τους σύνθεση. Παρά το γεγονός της φαινομενικής ομοιογένειάς τους τα πλαστικά διαφέρουν μεταξύ τους. Τα PVC παρουσιάζουν εντελώς διαφορετικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα από τα υπόλοιπα πλαστικά, γεγονός που οφείλεται κυρίως στην μοριακή τους δομή. Τα υπόλοιπα πλαστικά αποτελούνται από άτομα μόνο άνθρακα ή υδρογόνου. Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζεται η μοριακή σύνθεση των συγκεκριμένων πλαστικών:

Molecular form			
			
Amorphous	Crystalline		
Molecular chains are fixed.	The crystalline part is fixed, the amorphous part is flexible.		
PVC	PS	PE	PP
carbon, hydrogen, chlorine		carbon, hydrogen	
$\begin{array}{c} \text{H} & \text{H} \\ & \\ -\text{C} & - & \text{C}- \\ & \\ \text{H} & \text{Cl} \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{H} & \text{H} \\ & \\ -\text{C} & - & \text{C}- \\ & \\ \text{H} & \text{C}_6\text{H}_5 \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{H} & \text{H} \\ & \\ -\text{C} & - & \text{C}- \\ & \\ \text{H} & \text{H} \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{H} & \text{H} \\ & \\ -\text{C} & - & \text{C}- \\ & \\ \text{H} & \text{CH}_3 \end{array}$
Chemical composition			

Σχήμα 1.2: Μοριακή σύνθεση πλαστικών PVC,PS,PE,PP

Ο παράγοντας που επηρεάζει εντονότερα τη διάρκεια ζωής ενός υλικού είναι η αντίσταση στην οξείδωση από το ατμοσφαιρικό οξυγόνο. Στη μοριακή δομή του PVC το άτομο χλωρίου είναι στενά συνδεδεμένο με κάθε άλλη αλυσίδα ατόμων άνθρακα, γεγονός που το καθιστά ιδιαίτερα ανθεκτικό στις οξειδωτικές αντιδράσεις και συντελεί στη διατήρηση της απόδοσής του για μεγάλο χρονικό διάστημα.

Το PVC είναι ανθεκτικό στο οξύ, το αλκάλιο και σχεδόν όλες τις ανόργανες χημικές ουσίες. Παρά το γεγονός της διόγκωσής του, με αποτέλεσμα τη διάλυσή του σε υδρογονάνθρακες,



κετόνες, και κυκλικούς αιθέρες, δεν επιμερίζεται σε άλλους οργανικούς διαλύτες. Η βιομηχανία εκμεταλλεύεται αυτό το χαρακτηριστικό του PVC, με αποτέλεσμα να χρησιμοποιείται ευρέως στην κατασκευή αγωγών, μπουκαλιών, σωλήνων και μανικών [5].

1.3.1 Μηχανική σταθερότητα

Το PVC παρουσιάζει χημική σταθερότητα [9], εντούτοις παρατηρείται μικρή αλλαγή στη μοριακή του δομή και κατ' επέκταση στη χημική του σύσταση. Κάτω από τη συνεχή επίδραση εξωτερικών δυνάμεων το υλικό μπορεί να παραμορφωθεί ακόμα και αν οι δυνάμεις ασκούνται σε επίπεδο χαμηλότερο από το όριο αντοχής του. Το συγκεκριμένο φαινόμενο καλείται φαινόμενο ερπυσμού. Στα PVC η παραμόρφωση ερπυσμού είναι πολύ μικρότερη έναντι άλλων πλαστικών λόγω της περιορισμένης μοριακής κίνησης, σε αντίθεση με το PE και τα PP, τα οποία έχουν μεγαλύτερη μοριακή κίνηση στα άμορφα τμήματά τους [21][24].

1.3.2 Δυνατότητα επεξεργασίας και χυτευσιμότητα

Η δυνατότητα επεξεργασίας ενός θερμοπλαστικού υλικού εξαρτάται κατά ένα μεγάλο μέρος από το ιξώδες του. Το PVC παρουσιάζει υψηλό ιξώδες με αποτέλεσμα να μην είναι κατάλληλο για χύτευση σε καλούπια μεγάλου μεγέθους. Από την άλλη μεριά, το τηγμένο PVC παρουσιάζει ελαστική συμπεριφορά [15] η οποία δεν εξαρτάται σε μεγάλο παράγοντα από τη θερμοκρασία και έτσι καθίσταται κατάλληλο για εφαρμογές στη γεωργία (σωλήνες, γεωργικές ταινίες).

Οι εξωτερικές επιφάνειες των προϊόντων PVC είναι άριστες, γεγονός που αποδεικνύει την υψηλή ποιότητα του υλικού ως προς την επεξεργασία του και προσδίδει ευρεία ποικιλία στη διαμόρφωση σχημάτων. Επίσης, το υλικό είναι κατάλληλο προς επεξεργασία σε κάμψη, συγκόλληση, καθώς και σε κατάσταση κενού.



1.3.3 Αντοχή σε εφελκυσμό

Το PVC χρησιμοποιείται κατά κόρον στα δίκτυα παροχής πόλεων για τη μεταφορά νερού και λυμάτων. Η μεγάλη του αντοχή στην καταπόνηση το καθιστά καταλληλότερο σε σχέση με τα άλλα πλαστικά γενικού σκοπού [9]. Με άλλα λόγια, συγκρίνοντας το PVC με άλλα πλαστικά παρατηρείται αυξημένη αντοχή κατά την καταπόνηση. Ως κριτήριο αντοχής λογίζεται η αντοχή στον εφελκυσμό όταν το δοκίμιο εφελκύεται από τα δύο του άκρα έως ότου σπάσει.

Κατά την εφαρμογή συγκεντρωμένης δύναμης στο κέντρο ενός δοκιμαστικού δοκιμίου η αντοχή του κυμαίνεται περί τα 100 MPa, μέχρι αυτό να σπάσει. Η αντοχή αυτή είναι πολύ μεγαλύτερη από τα υπόλοιπα πλαστικά τα οποία κυμαίνονται στα όρια των 70~80 MPa.

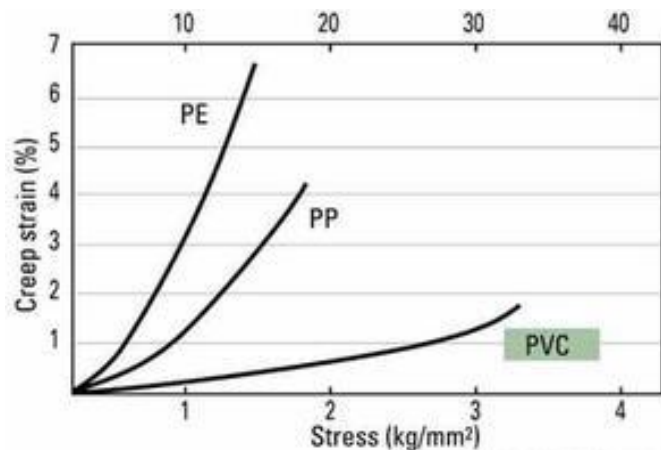
Όταν ένα δοκιμαστικό δοκίμιο PVC συμπιεστεί αξονικά παρατηρείται ότι η αντοχή του μέχρι τη στιγμή που αρχίζει να παραμορφώνεται αγγίζει τα 90 MPa, ενώ στα κοινά πλαστικά τα 60 MPa. Η δύναμη κοπώσεως είναι το κριτήριο της αντοχής ενός δοκιμίου κατά το οποίο το δοκίμιο δεν θα έσπαζε αν σε αυτό εφαρμοζόταν η συγκεκριμένη δύναμη για 10^7 φορές. Το PVC έχει συντελεστή για τη δύναμη κοπώσεως 1,7 ο οποίος αντιστοιχεί σε 17 MPa. Η δύναμη σύγκρουσης των πλαστικών PVC είναι αρκετά χαμηλή και αποτελεί ένα από τα μειονεκτήματα του πλαστικού. Η ενέργεια που απορροφάται από το πλαστικό μέχρι αυτό να σπάσει κατά την καταπόνηση σε συνθήκες περιβάλλοντος είναι μικρή ενώ σε θερμοκρασία άνω των 70°C αυξάνεται [9].

1.3.4 Αντοχή σε ερπυσμό

Η συμπεριφορά ερπυσμού χαρακτηρίζει το υλικό όταν αυτό είναι ήδη παραμορφωμένο και του ασκείται συνεχώς μια εξωτερική δύναμη σε συνθήκες θερμοκρασίας δωματίου [25]. Το φαινόμενο είναι γνωστό και ως κρύα ροή. Όταν τα πλαστικά χρησιμοποιούνται στον κλάδο των κατασκευών ή στη βιομηχανία η κρύα ροή είναι ένας παράγοντας που εξετάζεται σημαντικά. Στα PVC η παραμόρφωση ερπυσμού είναι πολύ μικρότερη έναντι άλλων πλαστικών λόγω της περιορισμένης μοριακής κίνησης, σε αντίθεση με το PE και τα PP, τα οποία έχουν μεγαλύτερη μοριακή κίνηση στα άμορφα τμήματά τους [21][24]. Επομένως, η ιδιότητα αυτή επιτρέπει την ευρεία χρήση των πλαστικών PVC.



Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται η καμπύλη ερπυσμού των πλαστικών με το PVC να παρουσιάζει τη χαμηλότερη τιμή, γεγονός που το καθιστά καταλληλότερο για την χρήση του σε βιομηχανικές εφαρμογές [25]:



Σχήμα 1.3: Καμπύλες ερπυσμού πλαστικών

1.3.5 Πλαστικοποίηση

Το PVC είναι ένα πολικό πολυμερές με ισχυρές διαμοριακές δυνάμεις οι οποίες το καθιστούν άκαμπτο σε θερμοκρασία δωματίου. Όταν κατά την παραγωγή του πλαστικού προστίθενται πλαστικοποιητές τότε αυτοί διεισδύουν ανάμεσα στα μόρια χαλαρώνοντας τις διαμοριακές του δυνάμεις, με αποτέλεσμα να γίνεται εύκαμπτο, γεγονός που αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα του υλικού.

1.3.6 Χημική αντίσταση

Η κύρια αλυσίδα των πολυμερών αποτελείται από απλούς δεσμούς ατόμων άνθρακα. Το γεγονός αυτό προσδίδει στο PVC εξαιρετική χημική αντίσταση. Το αποτέλεσμα είναι το PVC να είναι κατάλληλο για χρήση σε χημικές δεξαμενές, πλαστικές βαλβίδες, φλάντζες και σωλήνες αποχέτευσης λυμάτων.



1.3.7 Διαφάνεια

Το PVC είναι ένα άμορφο πολυμερές σώμα και κατά συνέπεια τα προϊόντα του είναι κυρίως διαφανή. Τα προϊόντα PVC είναι αδιαφανή όταν η παραγωγή του γίνεται με τη χρήση συνθετικών παραγόντων οι οποίοι δεν είναι συμβατοί. Η τιμή “θαμπάδας” χρησιμοποιείται για τη μέτρηση διαφάνειας των πλαστικών [26].

Αυτή η τιμή υπολογίζεται ως ο λόγος της διάχυτης ελαφριάς διαπερατότητας προς τη συνολική ελαφριά διαπερατότητα. Επίσης, είναι δυνατόν να παραχθούν πλαστικά PVC με μεγάλη γυαλάδα. Η γυαλάδα αυτή εκφράζεται σαν το ποσό του αντανακλώμενου φωτός στο δοκιμαστικό τεμάχιο σε σχέση με αυτή του γυαλιού η οποία λογίζεται σαν 100%.

Ο παρακάτω πίνακας (Πίνακας 1.5) συγκρίνει την τιμή της θαμπάδας και της γυαλάδας των πλαστικών PVC σε σχέση με άλλα πλαστικά. Γενικά, όσο μικρότερη είναι η τιμή θαμπάδας τόσο μεγαλύτερη είναι η διαφάνεια του υλικού [26].

Films	Haze value (%)	Gloss value (%)
High-pressure process PE (inflation molding)	5~15	65
High-pressure process PE (T-die extrusion)	2~10	—
Medium-low pressure process PE (inflation molding)	15~75	22
Medium-low pressure process PE (T-die extrusion)	2~10	65
Non-drawn PP (T-die extrusion)	2~3	70~75
Biaxial drawn PP	1.5~2	80
Rigid PVC	1~2	79.5

Σχήμα 1.4: Σύγκριση τιμών γυαλάδας των πλαστικών PVC και άλλων πλαστικών

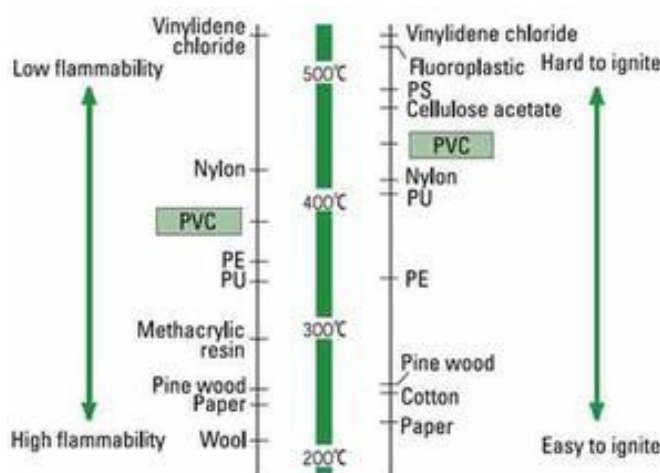


1.3.8 Αντιπυρικές ιδιότητες

Το PVC είναι ένα εγγενώς πυρίμαχο πλαστικό και αποτελεί εξαίρεση μεταξύ των γενικής χρήσης πλαστικών, δεδομένου ότι περιέχει περισσότερο από 50% χλώριο.

Όταν τα προϊόντα PVC καίγονται, το αέριο υδροχλωρίου, ως αποτέλεσμα του θερμικού ραγίσματος, επιβραδύνει τη συνεχή αντίδραση καύσης και αποτρέπει το κάψιμο του υλικού, απομακρύνοντας την επιφάνεια του πλαστικού από το οξυγόνο στον αέρα [27]. Το αέριο που εκλύεται είναι ανιχνεύσιμο από την εξαιρετικά δυσάρεστη μυρωδιά του και σε χαμηλότερες συγκεντρώσεις είναι επιβλαβές για την υγεία. Αυτό το χαρακτηριστικό γνώρισμα επιτρέπει την έγκαιρη ανίχνευση μιας πυρκαγιάς. Επιπλέον, η θερμότητα που απελευθερώνεται κατά το κάψιμό του είναι αρκετά χαμηλότερη, σε σύγκριση με το PE και το PP, Επομένως, μπορούμε να πούμε ότι συμβάλει στον περιορισμό της πυρκαγιάς ακόμα και όταν καίγεται [24].

Στον ακόλουθο πίνακα παρατηρείται η ευφλεκτότητα των πλαστικών:



Σχήμα 1.5: Ευφλεκτότητα πλαστικών [24]

1.3.9 Άλλες ιδιότητες

Το PVC αποτελείται από πολικές ομάδες χλωρίου και είναι άμορφο, επομένως αναμιγνύεται άριστα με διάφορες άλλες ουσίες. Οι φυσικές ιδιότητες, όπως ευελιξία, ελαστικότητα, πρόληψη της μικροβιακής αύξησης, χαμηλή ευφλεκτότητα κ.α., τηρούνται μέσω



της χρήσης πλαστικοποιητών, τροποποιητών και άλλων πρόσθετων ουσιών. Το PVC είναι το μόνο πλαστικό γενικού σκοπού που επιτρέπει την ελεύθερη, ευρεία και άνευ ραφής ρύθμιση των παραπάνω φυσικών ιδιοτήτων των προϊόντων.

Οι πολικές ομάδες στο PVC συμβάλλουν επίσης στην ευκολία του χρωματισμού και της εκτύπωσης. Τα προϊόντα του δεν απαιτούν προγενέστερη επεξεργασία, η οποία επιτρέπει μια ευρεία ποικιλία στη χρήση του. Διά τούτου χρησιμοποιείται στις διάφορες διακοσμητικές εφαρμογές που εκμεταλλεύονται πλήρως τη παραπάνω ιδιότητα. Γνωστά παραδείγματα εφαρμογών περιλαμβάνουν τα καλύμματα και τα δάπεδα τοίχων, τα έπιπλα, τις ηλεκτρικές συσκευές και τις πινακίδες στα αεροπλάνα, τα τρένα κλπ.

1.3.10 Μνήμη σχήματος

Τα πλαστικά PVC ανήκουν στην κατηγορία των πολυμερών υλικών με “μνήμη σχήματος” (SMPs). Η ικανότητα αυτή χαρακτηρίζει τα “έξυπνα” πολυμερή και δίνει τη δυνατότητα στα υλικά να επιστρέφουν από μία παραμορφωμένη κατάσταση (προσωρινή μορφή) στην αρχική τους (μόνιμη) διαμόρφωση. Η ιδιότητα αυτή πυροδοτείται συνήθως από ένα εξωτερικό ερέθισμα, όπως η αλλαγή θερμοκρασίας [39].

Τα πολυμερή με μνήμη σχήματος μπορούν να διατηρούν δύο ή ακόμα και τρία σχήματα και η μετάβαση μεταξύ εκείνων να προκαλείται από τη θερμοκρασία. Εκτός από τη μεταβολή της θερμοκρασίας η μεταβολή του σχήματος μπορεί να προκληθεί από ένα ηλεκτρικό / μαγνητικό πεδίο, το φως, ένα διάλυμα [40].

Δύο ποσότητες που περιγράφουν τις επιδράσεις στη μνήμη σχήματος είναι ο ρυθμός ανάκτησης (R_r) και ο ρυθμός στερεότητας (R_f). Ο ρυθμός ανάκτησης περιγράφει την ικανότητα του υλικού να απομνημονεύει το μόνιμο σχήμα του, ενώ ο ρυθμός στερεότητας την ικανότητα να αλλάζει σχήματα ανάλογα με τη μηχανική παραμόρφωση. Οι προαναφερθείσες ποσότητες υπολογίζονται από τους παρακάτω μαθηματικούς τύπους [41]:

$$R_r(N) = \frac{\varepsilon_m - \varepsilon_p(N)}{\varepsilon_m - \varepsilon_p(N-1)}$$



$$R_f(N) = \frac{\varepsilon_p(N)}{\varepsilon_m}$$

όπου N είναι ο αριθμός του θερμομηχανικού κύκλου μεταξύ εναλλαγών του σχήματος, ε_m είναι η μέγιστη τάση που επιβάλλεται στο υλικό και $\varepsilon_p(N)$, $\varepsilon_p(N-1)$ είναι οι τάσεις δύο διαδοχικών κύκλων προτού εφαρμοστεί κάποια αποδιδόμενη τάση.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΞΟΝΙΚΗΣ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΩΝ ΣΩΛΗΝΩΝ

2.1 Γενικά στοιχεία για την κατάρρευση κυλινδρικών σωλήνων

Το φαινόμενο της αξονικής κατάρρευσης κυλινδρικών σωλήνων έχει μελετηθεί από διάφορους ερευνητές, κυριότεροι εκ των οποίων είναι οι Abramowicz, Jones, Abbas, Johnson και Μάμαλης. Οι συγκεκριμένοι ερευνητές έχουν αναπτύξει θεωρητικά μοντέλα κατάρρευσης των κυλινδρικών σωλήνων τα οποία παρουσιάζουν μεγάλη σύγκλιση με τα πειραματικά δεδομένα [33][37].

Όπως υπογραμμίζεται και στη βιβλιογραφία, ο τρόπος κατάρρευσης ενός σωλήνα επηρεάζεται σε πολύ μεγάλο βαθμό από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του τεμαχίου. Κύριο παράγοντα αποτελεί ο λόγος της διαμέτρου του σωλήνα προς το πάχος του D/t [28][29][30]. Ένας άλλος παράγοντας μπορεί να είναι ο λόγος μήκους προς πάχος L/t [32]. Οι σωλήνες μικρού πάχους παρουσιάζουν μορφή διαμαντιού είτε κατά την αρχή της κατάρρευσής τους είτε κατά τη διάρκεια του πειράματος, ενώ οι σωλήνες μεγαλύτερου πάχους παρουσιάζουν πιο ομαλή κατάρρευση.

Γενικά, έχουν παρατηρηθεί τέσσερις κύριοι τρόποι κατάρρευσης κυλινδρικών σωλήνων οι οποίοι θα αναλυθούν με μεγαλύτερη λεπτομέρεια σε επόμενη παράγραφο. Οι τρόποι αυτοί είναι ο αξονοσυμμετρικός σε μορφή δακτυλίου, ο μη εκτατός σε μορφή διαμαντιού, ο μικτός -δηλαδή ο συνδυασμός των δύο- παραπάνω και ο λυγισμός.

Κατά τη συνήθη αξονική καταπόνηση μια σταθερή πλάκα βρίσκεται στο κάτω μέρος της διάταξης και το τεμάχιο τοποθετείται κάθετα πάνω σε αυτήν. Στο πάνω μέρος βρίσκεται η κινούμενη πλάκα που αρχίζει να συγκλίνει προς τα κάτω. Όταν αυτή έρθει σε επαφή με το δοκιμαστικό τεμάχιο τότε το φορτίο ξεκινάει να αυξάνεται σχεδόν γραμμικά μέσα στα όρια της ελαστικής περιοχής. Ύστερα από εκείνη την περιοχή το φορτίο δεν αυξάνεται πλέον γραμμικά αλλά παρατηρούνται καμπυλότητες στο διάγραμμα φορτίου μετατόπισης. Εκεί συνήθως παρατηρείται και η μέγιστη τιμή του φορτίου όπου το τεμάχιο θα αρχίσει να παραμορφώνεται. Το δοκίμιο έχει εισέλθει πλέον στην πλαστική περιοχή και η παραμόρφωση του είναι φανερή και



έντονη. Κατά τη συνέχεια του πειράματος παρατηρείται η δημιουργία λοβών παραμόρφωσης και το φορτίο παρουσιάζει αυξομειώσεις. Ιδανικό αποτέλεσμα είναι η καμπύλη να είναι σχετικά σταθερή χωρίς να παρουσιάζει μεγάλες ταλαντώσεις ώστε να μεγιστοποιείται η απορρόφηση ενέργειας.

2.2 Τρόποι κατάρρευσης

Παρουσιάζονται αναλυτικά οι πιθανοί τρόποι κατάρρευσης δοκιμίων κατά τη διαδικασία της αξονικής συμπίεσης.

2.2.1 Αξονοσυμμετρικός τρόπος κατάρρευσης

Κατά τον αξονοσυμμετρικό τρόπο κατάρρευσης οι λοβοί σχηματίζονται ο ένας πάνω στον άλλον με εκτατό τρόπο (concertina mode) [31][33]. Η περίμετρος των δοκιμίων δεν διατηρείται σταθερή αλλά αυξάνεται, ενώ η διατομή τους παραμένει κυκλική. Οι δομές που σχηματίζονται χαρακτηρίζονται ως συμμετρικές και η απορροφούμενη ενέργεια αυξάνεται κατά τη συμπίεση αυτή. Για αυτό το λόγο ο συγκεκριμένος τρόπος κατάρρευσης αποτελεί έναν από τους επιθυμητούς κατά την πειραματική διαδικασία.

Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται ένα δοκίμιο το οποίο έχει συμπιεστεί σύμφωνα με τον αξονοσυμμετρικό τρόπο κατάρρευσης:



Σχήμα 2.1: Αξονοσυμμετρικός τρόπος κατάρρευσης [32]

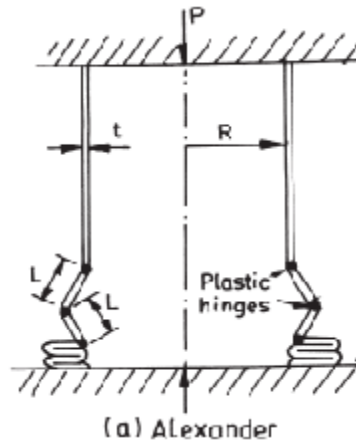


Αρκετοί ερευνητές προσπάθησαν να αναλύσουν τον αξονοσυμμετρικό τρόπο κατάρρευσης και διατύπωσαν διάφορα μοντέλα πάνω σε αυτόν. Τα κυριότερα παρουσιάζονται παρακάτω.

2.2.1.1. Μοντέλο αξονοσυμμετρικής κατάρρευσης Alexander

Ο Alexander προσπάθησε μέσω του μοντέλου του να προβλέψει την τιμή του μέσου φορτίου της συμπίεσης [34]. Σύμφωνα με αυτό διατύπωσε τον παρακάτω τύπο:

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

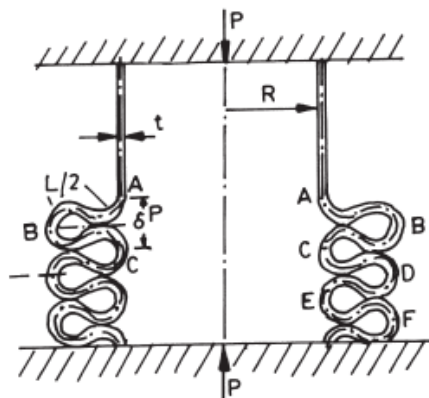


Σχήμα 2.2: Μοντέλο του Alexander

2.2.1.2 Μοντέλο αξονοσυμμετρικής κατάρρευσης Abramowicz και Jones

Οι Abramowicz και Jones με τη σειρά τους προσπάθησαν να προβλέψουν το μέσο φορτίο και διατύπωσαν τον παρακάτω τύπο [36] :

$$\frac{P_m}{P_0} = \frac{t}{4\pi R\sqrt{3}} \left[20.79 \left(\frac{2R}{t} \right)^{0.5} + 11.9 \right]$$



(b) Abramowicz and Jones

Σχῆμα 2.3: Μοντέλο Abramowicz και Jones

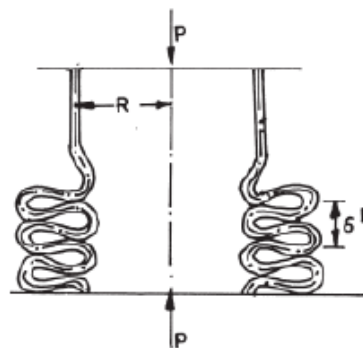
2.2.1.3 Μοντέλο αξονοσυμμετρικής κατάρρευσης Gurta και Velmurugan

Καθώς ο Alexander υποστήριξε την κίνηση του υλικού προς τα έξω οι Gurta και Velmurugan υποστήριξαν τόσο την κίνηση του υλικού προς τα έξω όσο και προς τα μέσα με αναλογία βασισμένη σε εμπειρικά πειράματα. Το μέσο φορτίο που προέβλεψαν δίνεται από τον τύπο [35]:

$$\frac{P_m}{P_0} = \frac{t}{R \left[2L - t - \frac{2L}{3a} \right]} \left\{ \frac{L^2}{3} \sin a + \frac{t}{\sqrt{3}} \left[2Ra + \frac{L}{3} (1 - \cos a) \right] \right\}$$

όπου $L = 1.347\sqrt{Rt}$ και το a υπολογίζεται από το λύση της εξίσωσης

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



(d) Gurta and Velmurugan

Σχῆμα 2.4: Μοντέλο Gurta και Velmurugan



2.2.1.4 Μοντέλο αξονοσυμμετρικής κατάρρευσης Gupta και Abbas

Οι συμβολισμοί του μαθηματικού μοντέλου των Gupta και Abbas είναι [37]:

D : Αρχική μέση διάμετρος σωλήνα

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$: Τάσεις

f_{yc} : Όριο διαρροής του υλικού σε θλίψη

f_{yt} : Όριο διαρροής του υλικού σε εφελκυσμό

k : Παράμετρος

h : Μέγεθος του λοβού

m : Μέγεθος αναλογίας λοβού του μέρους εσωτερικά του σωλήνα προς το μήκος του

M_p : Πλαστική ροπή ανά μονάδα μήκους

P_m : Πλαστικό φορτίο παραμόρφωσης

P_θ : Φορτίο παραμόρφωσης σε γωνία θ

r : Ο λόγος του f_{yc} προς f_{yt}

t : Χρόνος

t_0 : Αρχικό πάχος σωλήνα

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

W_b : Έργο σε λυγισμό για ένα πλήρη λοβό

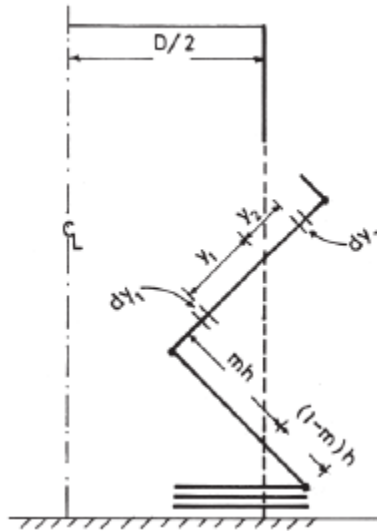
$W_{b\theta}$: Έργο σε λυγισμό για περιστροφή κατά γωνία θ

W_c : Έργο περιφερειακής παραμόρφωσης

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

W : Ολικό έργο

y_1, y_2 : Αποστάσεις



Σχήμα 2.5: Μηχανισμός σχηματισμού λοβών

Σύμφωνα λοιπόν με το μοντέλο των Gurta και Abbas, θεωρείται D η αρχική μέση διάμετρος του σωλήνα και t_0 το αρχικό πάχος του. Από το σχήμα 4, ως h χαρακτηρίζεται το μήκος του λοβού, άρα $m h$ είναι στο εσωτερικό του σωλήνα και $(1-m)h$ στο εξωτερικό. Το τεμάχιο διέπεται από συμμετρία 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. Εφόσον η παράμετρος m πάρει την τιμή 0 τότε η κατάρρευση είναι μόνο προς τα έξω, ενώ αν πάρει την τιμή 1 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 σταθερά από το κριτήριο Von-Mises ίση με $1/(2\sqrt{3})$.

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:

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



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

όπου :

$$\int_0^\theta (D - 2mh \sin\theta) d\theta \text{ για το εσωτερικό μέρος και}$$

$$\int_0^\theta [D + 2(1-m)h \sin\theta] d\theta \text{ για το εξωτερικό μέρος}$$

Το ολικό έργο για το σχηματισμό της άρθρωσης υπολογίζεται για γωνία $\theta = \pi/2$ και 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 :

$$W_{c\theta} = \int \overline{W}_{c\theta} dt, \text{ όπου } \overline{W}_{c\theta} = \int_0^{mh} 2f_{yc} t_0 |\overline{\varepsilon}_1| dA_1 + \int_0^{(1-m)h} 2f_{yt} t_0^2 |\overline{\varepsilon}_2| dA_2$$

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

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

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

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

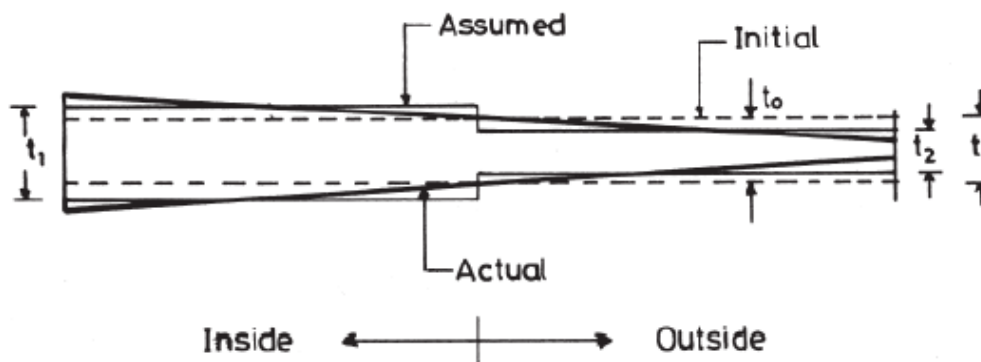
$$W_c = 2\pi f_{yt} t_0 h^2 \left\{ r m^2 \left(1 - \frac{2mh}{3D} \right) + (1-m)^2 \left[1 + \frac{2(1-m)h}{3D} \right] \right\}$$

η οποία δεν διαφέρει πολύ από τη σχέση του Alexander:

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



Κατά την κατάρρευση του τεμαχίου παρατηρείται ότι το πάχος στο εσωτερικό τμήμα του λοβού αυξάνεται λόγω θλίψης, ενώ στο εξωτερικό μειώνεται λόγω εφελκυσμού. Η αύξηση ή η μείωση του πάχους θεωρείται σταθερή σύμφωνα με το σχήμα 5.



Σχήμα 2.6 : Μεταβολή του πάχους

Με βάση την αρχή διατήρησης της μάζας προκύπτει :

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

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

με $A = D^2 - m^2 h^2$ και $B = D^2 - (1-m)^2 h^2$ προκύπτει η περιφερειακή παραμόρφωση:

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

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 σύμφωνα με το θεώρημα του Alexander 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 αντικαθιστώντας από προηγούμενη σχέση προκύπτει:

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

Για το μέσο φορτίο παραμόρφωσης -λαμβάνοντας υπόψιν τη μεταβολή του πάχους ισχύει:

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

Μεταβολή φορτίου παραμόρφωσης

Το φορτίο παραμόρφωσης P_θ όταν ο λοβός περιστρέφεται κατά γωνία θ υπολογίζεται 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 το ολικό έργο παραμόρφωσης ως την γωνία θ , $W_{b\theta}$ και $W_{c\theta}$ τα έργα σε κάμψη και περιφερειακή συμπίεση αντίστοιχα στη γωνία θ , z η κατακόρυφη μετατόπιση. Από τις προηγούμενες σχέσεις το φορτίο παραμόρφωσης γίνεται:

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



ενώ για μεταβολή του πάχους προκύπτει :

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

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

2.2.2 Μη αξονοσυμμετρικός τρόπος κατάρρευσης

Κατά τον μη αξονοσυμμετρικό τρόπο κατάρρευσης οι λοβοί σχηματίζονται κατά την κατάρρευση του δοκιμίου με μη εκτατό τρόπο. Παρατηρείται μεταβολή στη μορφή του τεμαχίου αλλά όχι αύξηση της περιμέτρου του. Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται μία τέτοιας μορφής κατάρρευση.



Σχήμα 2.7: Δοκίμιο που έχει υποστεί μη αξονοσυμμετρικό τρόπο κατάρρευσης (παρούσα εργασία)

Όπως φαίνεται όλοι οι λοβοί κατάρρευσης έχουν την ίδια μορφή. Παρόλα αυτά ο κάθε ένας έχει περιστραφεί κατά μία γωνία από τον προηγούμενο του. Η γωνία αυτή έχει αποδειχθεί ότι υπολογίζεται με τον παρακάτω τρόπο:

Εφόσον ο λοβός έχει k αριθμό ακμών τότε είναι της μορφής kD , οπότε θα απέχει από τον προηγούμενο και τον επόμενο κατά γωνία π/k rad.



Ο συγκεκριμένος τρόπος κατάρρευσης χαρακτηρίζεται από αστάθεια. Αυτό συμβαίνει διότι στο μη αξονοσυμμετρικό τρόπο κατάρρευσης υπάρχει έλλειψη συμμετρίας ως προς τον άξονα συμπίεσης. Αποτέλεσμα αυτού του φαινομένου είναι να παρατηρούνται χαμηλότερα φορτία κατά τη συμπίεση οπότε και χαμηλότερη απορροφούμενη ενέργεια.

Επίσης, λόγω της μορφής των δοκιμίων κατά την κατάρρευση τους, ο μηχανισμός αυτός ονομάζεται και "διαμάντι" (diamond). Ανάλογα με τον αριθμό των ακμών που δημιουργούνται δίνεται και ο χαρακτηρισμός της παραμόρφωσης. Δηλαδή, εάν παρατηρηθούν δύο ακμές τότε ονομάζεται 2D-diamond, τρεις ακμές 3D-diamond και ούτω καθεξής.

Οι πρώτοι που ασχολήθηκαν με τη μελέτη του μη αξονοσυμμετρικού τρόπου κατάρρευσης ήταν οι Pugsley και Macaulay [38]. Σύμφωνα με τη μελέτη αυτή υπολογίζεται το μέσο φορτίο από τον παρακάτω τύπο :

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

Επίσης, οι Abramowicz και Jones [36] διατύπωσαν τη δική τους σχέση για το μέσο φορτίο :

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

Διάφοροι άλλοι μελετητές ασχολήθηκαν με τον προσδιορισμό του μέσου φορτίου, ενδεικτικά αναφέρεται η σχέση των Johnson, Soden και Al-Hassani [28] παρακάτω:

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

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



2.2.3 Μικτός τρόπος κατάρρευσης

Σύμφωνα με το μικτό τρόπο κατάρρευσης, όπως συμπεραίνεται και από την ονομασία του, παρατηρείται ο συνδυασμός των δύο προαναφερθέντων. Συνηθέστερα παρατηρείται αρχικά η δημιουργία αξονοσυμμετρικών λοβών και κατόπιν ενός σημείου δημιουργία μη αξονοσυμμετρικών. Επίσης, υπάρχει η πιθανότητα ένα δοκίμιο να ξεκινήσει να παραμορφώνεται με το μικτό τρόπο κατάρρευσης και στη συνέχεια να οδηγείται σε λυγισμό.

Ο μικτός τρόπος κατάρρευσης οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι αρκετές φορές τα δοκίμια παρουσιάζουν μεγάλες ατέλειες στη δομή και τη γεωμετρία τους. Ασυμμετρίες και ατέλειες οι οποίες δεν είναι εύκολο να παρατηρηθούν με γυμνό μάτι είναι ικανές να προκαλέσουν μικτό τρόπο κατάρρευσης. Έτσι για να καθοριστεί με βεβαιότητα η συμπεριφορά του τεμαχίου πρέπει να γίνουν αρκετές επαναλήψεις του πειράματος οι οποίες είναι πιθανό να οδηγήσουν σε διαφορετικά αποτελέσματα. Επιπρόσθετος λόγος που μπορεί να προκαλέσει αυτό το φαινόμενο είναι όταν οι διαστάσεις του δοκιμίου (μήκος, διατομή, πάχος τοιχώματος) βρίσκονται σε οριακή σχέση μεταξύ τους.

Τα υπάρχοντα μαθηματικά μοντέλα δεν αντιμετωπίζουν το μικτό τρόπο κατάρρευσης σαν κάτι ενιαίο. Αναλύονται ξεχωριστά οι επιμέρους αξονοσυμμετρικοί και μη αξονοσυμμετρικοί τρόποι για τους οποίους υπάρχουν πληθώρα θεωρητικών προσεγγίσεων και σχέσεων.

2.2.4 Λυγισμός

Ο λυγισμός είναι το φαινόμενο κατά το οποίο ένα πειραματικό δοκίμιο αστοχεί σε μία φάση της καταπόνησης στην οποία υπόκειται. Αυτό είναι πιθανό να συμβεί χωρίς να γίνει υπέρβαση του ορίου αντοχής του υλικού και αντιμετωπίζεται σαν ξεχωριστός μηχανισμός κατάρρευσης. Γενικά, όταν ένα δοκίμιο λυγίσει τότε δεν καθίσταται πλέον ικανό να απορροφήσει κατάλληλα ποσά ενέργειας τα οποία απαιτούνται [32]. Συνήθως, λυγισμός παρατηρείται σε δοκίμια που έχουν μεγάλο μήκος και μικρό σχετικά πάχος τοιχώματος. Επίσης, είναι πιθανό ένα δοκίμιο αρχικά να ξεκινήσει να καταπονείται κανονικά και στη συνέχεια να λυγίσει.

Το φαινόμενο του λυγισμού μελετήθηκε αρχικά από τον Euler ο οποίος και διατύπωσε μαθηματικές σχέσεις για την ανάλυση του φαινομένου. Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται ένα



δοκίμιο που έχει υποστεί λυγισμό κατά την πειραματική διαδικασία της παρούσας διπλωματικής εργασίας.



Σχήμα 2.8: Δοκίμιο σε λυγισμό (παρούσα εργασία)



ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

3.1 Γενικά στοιχεία

Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας που ακολουθήθηκε για τη διεκπεραίωση της εν λόγω διπλωματικής εργασίας. Συγκεκριμένα, θα γίνει παρουσίαση των δοκιμίων, της μηχανής στην οποία διεξήχθησαν τα πειράματα και τις συνθήκες κάτω από τις οποίες έγιναν.

3.2 Πειραματικά δοκίμια

Για τις ανάγκες του παρόντος πειράματος χρησιμοποιήθηκαν πλαστικοί σωλήνες PVC εμπορίου, πέντε διαφορετικών διαστάσεων. Τα τέσσερα δοκίμια ήταν κυλινδρικής διατομής και το ένα τετραγωνικής.

3.2.1 Διαστάσεις δοκιμίων / ονοματολογία

Τα δοκίμια ονομάστηκαν κατά αύξοντα αριθμό από το ένα (1) έως το πέντε (5) και χαρακτηρίστηκαν ως Α ή Β για τις περιπτώσεις που η διεξαγωγή του πειράματος γινόταν σε θερμοκρασιακές συνθήκες περιβάλλοντος ή αντιστοίχως μέσα σε βραστό νερό (~90° C).

Όλα τα δοκίμια κόπηκαν σε μήκος 189,00 mm στο εργαστήριο του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ με τη βοήθεια αυτόματης πριονοκορδέλας. Στη συνέχεια, με τη χρήση τόννου έγινε φινίρισμα των επιφανειών των τοιχωμάτων προς επίτευξη απόλυτης συμμετρίας. Τέλος, για τη λείανση των επιφανειών χρησιμοποιήθηκε γυαλόχαρτο καθώς το τεμάχιο περιστρεφόταν στον τόννο.

Αναλυτικά παρουσιάζονται παρακάτω οι διαστάσεις των δοκιμίων όπως αυτές μετρήθηκαν στο εργαστήριο:



	Είδος διατομής	Εξωτερική διάμετρος	Εσωτερική διάμετρος	Πάχος τοιχώματος
Δοκίμιο 1	Κυλινδρική	50 mm	42 mm	4.0 mm
Δοκίμιο 2	Κυλινδρική	50 mm	45 mm	2.5 mm
Δοκίμιο 3	Κυλινδρική	63 mm	53 mm	5.0 mm
Δοκίμιο 4	Κυλινδρική	63 mm	57 mm	3.25 mm
	Είδος διατομής	Διαστάσεις		Πάχος τοιχώματος
Δοκίμιο 5	Τετραγωνική	101 mm x 60 mm		2.5 mm

Σχήμα 3.1: Ονοματολογία και διαστάσεις δοκιμίων που καταπονήθηκαν

3.3 Συνθήκες διεξαγωγής πειραμάτων

Όπως η διαμόρφωση των δοκιμίων έτσι και όλα τα πειράματα διεξήχθησαν στο κτίριο Ξ της Σχολής των Μηχανολόγων Μηχανικών. Στο κτίριο αυτό βρίσκονται οι εγκαταστάσεις του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω.

3.3.1 Μηχανική πρέσα INSTRON

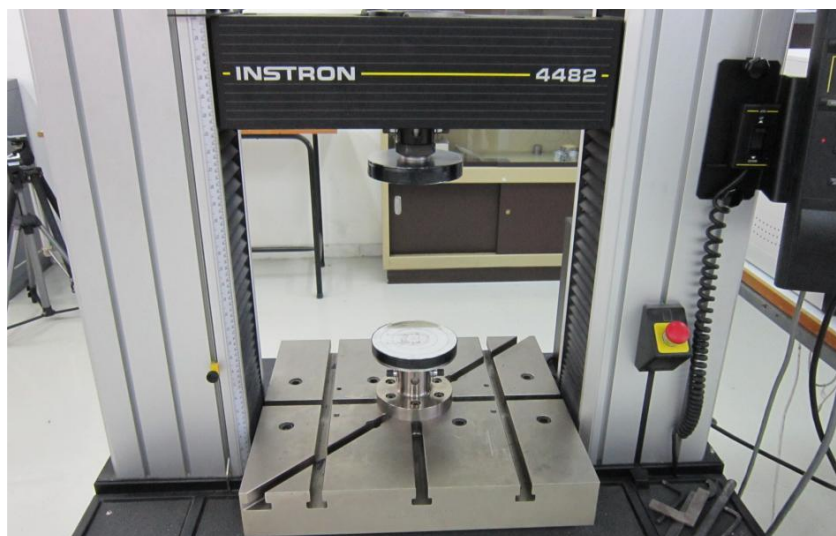
Τα πειράματα έγιναν στη μηχανική πρέσα **INSTRON 4482** η οποία βρίσκεται στον πρώτο όροφο του εργαστηρίου. Η συγκεκριμένη πρέσα έχει μέγιστη θλιπτική ικανότητα 100 kN και περιλαμβάνει κατάλληλες διατάξεις για να εκτελέσει τις ακόλουθες μηχανικές δοκιμές:

- Εφελκυσμός
- Θλίψη



- Κάμψη

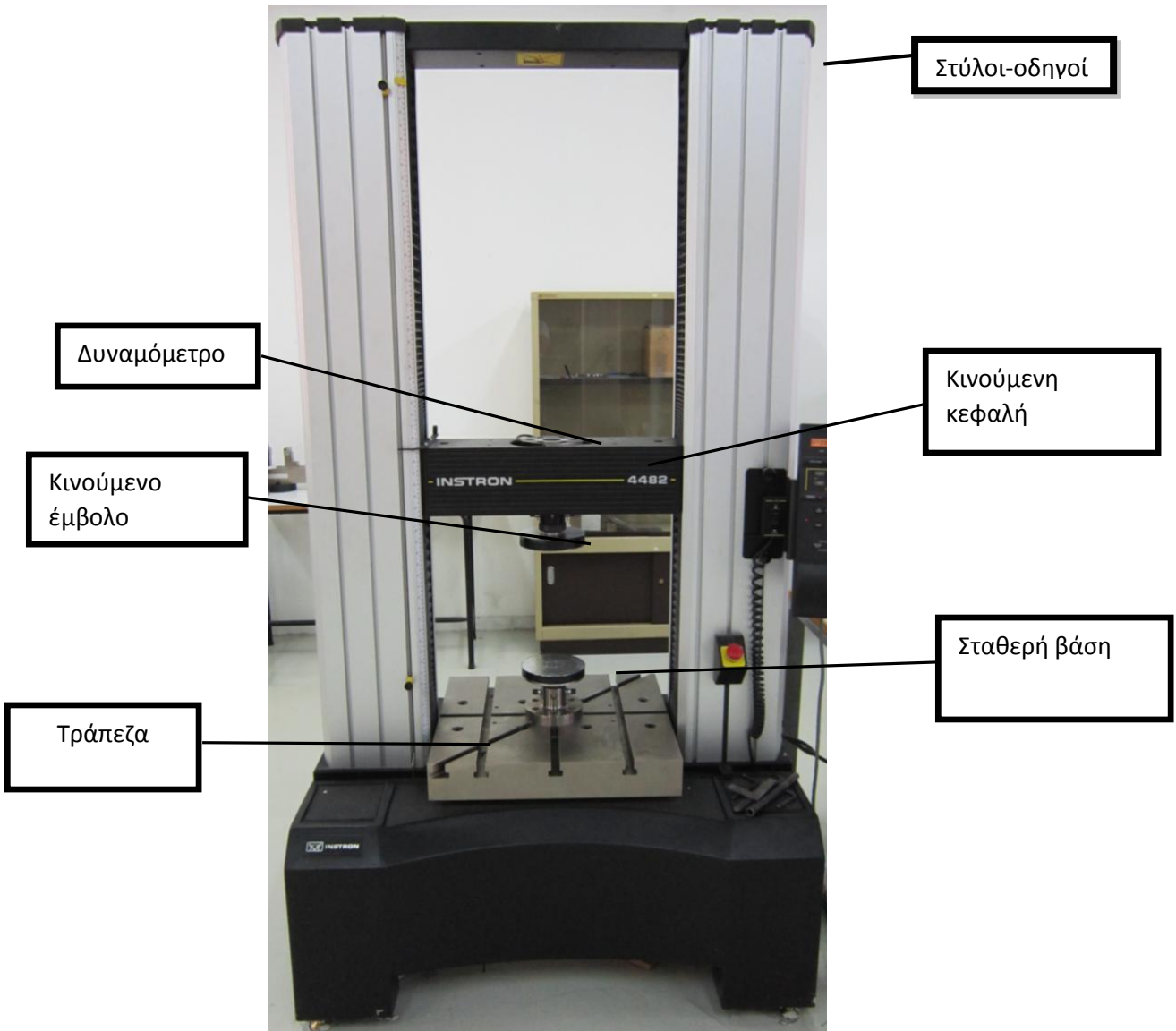
Για την εκτέλεση των δοκιμών θλίψης σε συνθήκες περιβάλλοντος έχει προσαρμοστεί πάνω στην πρέσα το κατάλληλο εργαλείο (δύο πλάκες συμπίεσης) όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 3.2: Εργαλείο θλίψης προσαρμοσμένο στη μηχανική πρέσα INSTRON

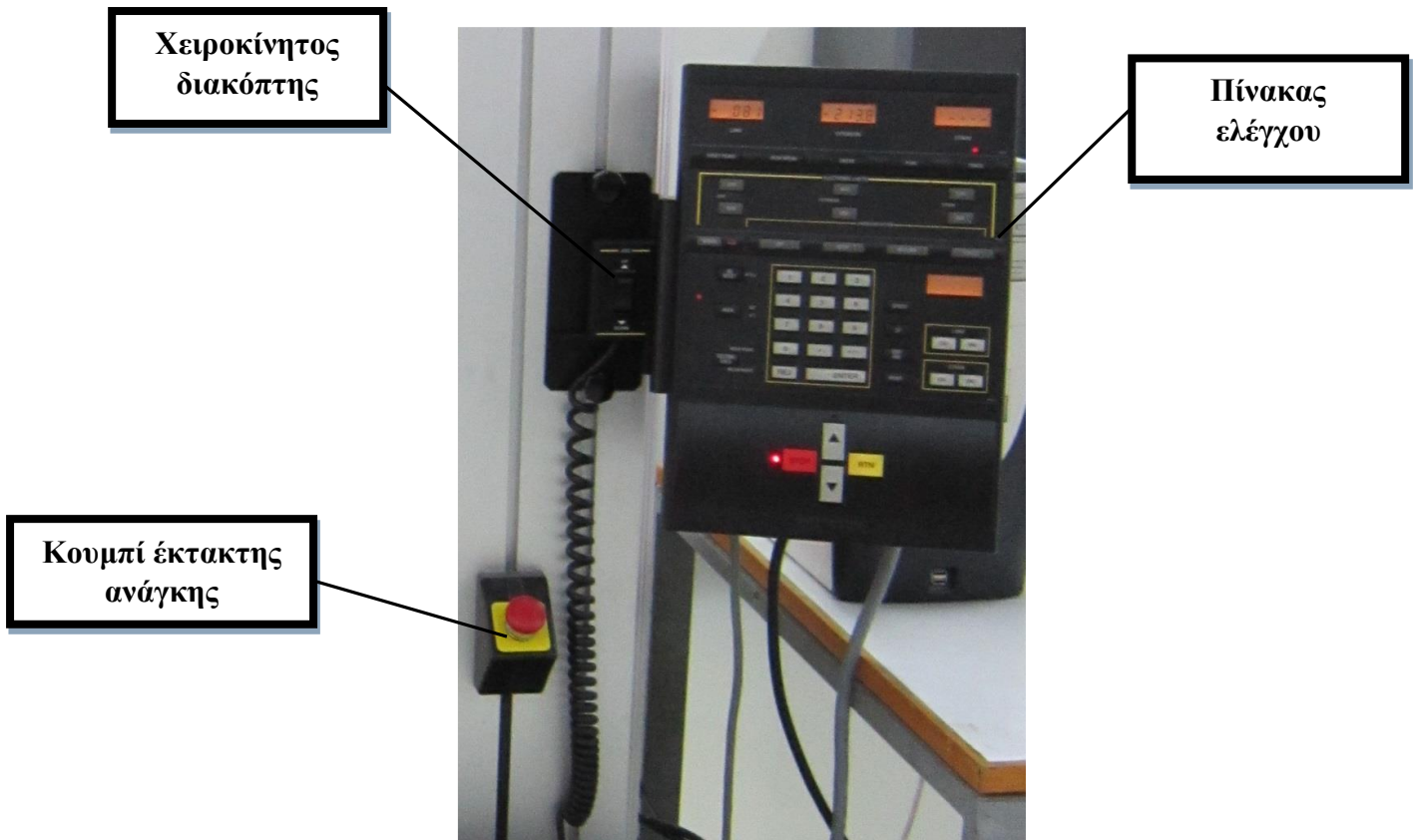
Αναλυτικότερα, η συνολική διάταξη της πρέσας, αποτελείται από τα επιμέρους τμήματα:

- Το κυρίως σώμα το οποίο περιλαμβάνει την τράπεζα, τη κινητή κεφαλή όπου είναι προσαρμοσμένο το δυναμόμετρο και οι κολώνες – οδηγοί της κινητής κεφαλής.



Σχήμα 3.3: Κυρίως σώμα πρέσας INSTRON

- Τον πίνακα ελέγχου όπου μπορούμε να ορίσουμε τις συνθήκες των δοκιμών που πραγματοποιούμε, τον μετακινούμενο διακόπτη χειροκίνητης κίνησης (πάνω - κάτω) της κινητής κεφαλής και το κουμπί έκτακτης ανάγκης.



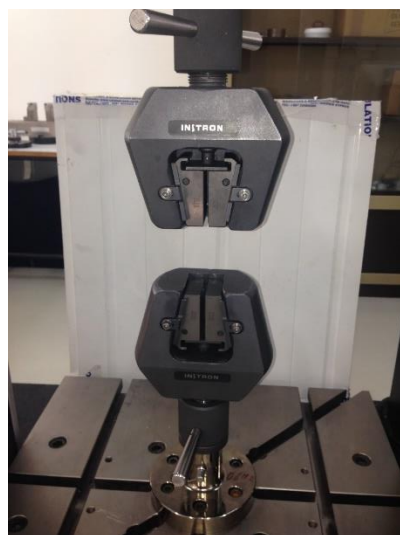
Σχήμα 3.4: Επιμέρους τμήματα πρέσας INSTRON

- Η μηχανική πρέσα συνδέεται μέσω σειριακής θύρας με Η/Υ ο οποίος είναι εξοπλισμένος με κατάλληλο λογισμικό (Bluehill) με το οποίο είναι δυνατός ο ορισμός των συνθηκών των δοκιμών, η εκτέλεσή τους και λήψη αποτελεσμάτων και διαγραμμάτων απαραίτητων για την επεξεργασία των μετρήσεων.



Σχήμα 3.5: Συνολική διάταξη της μηχανικής πρέσας INSTRON του εργαστηρίου

- Για την εκτέλεση των δοκιμών εφελκυσμού του δοκιμίου 5 προσαρμόστηκαν στην πρέσα οι ακόλουθες δαγκάνες:



Σχήμα 3.6: Αρπάγες εφελκυσμού INSTRON



3.3.2 Εξοπλισμός εκτέλεσης πειραμάτων σε συνθήκες βραστού νερού

Για την εκτέλεση των δοκιμών θλίψης μέσα σε βραστό νερό, χρησιμοποιήθηκε ο ακόλουθος εξοπλισμός:

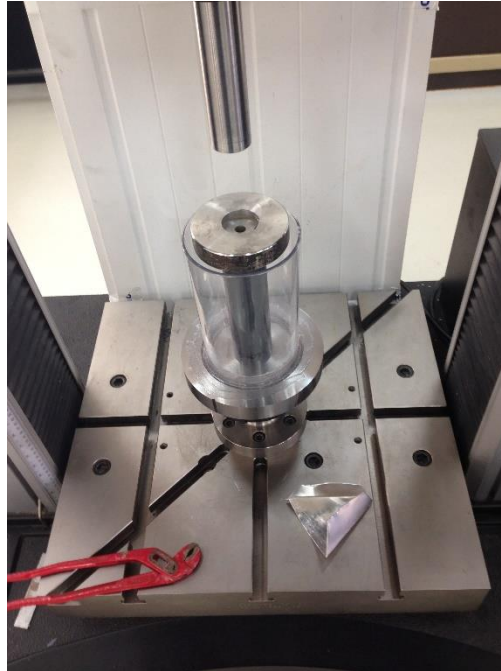
1. Δοχείο διαφανούς κυλινδρικού πλαστικού προσαρμοσμένο σε μεταλλική βάση. Στο δοχείο αυτό κατεργάστηκε και προσαρμόστηκε κατάλληλα, σταθερή μεταλλική βάση με οπή για τη συγκράτηση του PVC κελύφους. Παράλληλα τοποθετήθηκε σιλικόνη περιμετρικά της μεταλλικής πλάκας χάριν στεγανοποίησης και επιπλέον κράτησης κατά την έκχυση βραστού νερού. Μέσα στο δοχείο αυτό τοποθετούνταν το βραστό νερό και τα κελύφη PVC ώστε να μπορεί να πραγματοποιηθεί η διαδικασία συμπίεσης.

2. Μεταλλική πλάκα με οπή για τη συμπίεση του πλαστικού δοκιμίου. Η πλάκα αυτή κατεργάστηκε κατάλληλα (άνοιγμα οπής σε τόννο) ώστε να εφαρμόζει πλήρως το μεταλλικό έμβολο πάνω της. Τοποθετούνταν πάνω στο PVC κέλυφος με κύριο σκοπό τη συγκράτησή του σε οριζόντια θέση ύστερα από την έκχυση βραστού νερού μέσα στο δοχείο.

3. Μεταλλικό έμβολο προσαρμοσμένο στην πρέσα. Το έμβολο αποτελεί εργαλείο της πρέσας τοποθετημένο στο άνω άκρο της με αποτέλεσμα να εφαρμόζε στην οπή της μεταλλικής πλάκας ώστε να πραγματοποιείται συμμετρική θλίψη των δοκιμίων.



Σχήμα 3.6: Διαμορφωμένος εξοπλισμός για εκτέλεση θλίψης σε βραστό νερό



Σχήμα 3.7: Εξοπλισμός και τεμάχιο έτοιμα για τη διεξαγωγή πειράματος σε βραστό νερό

3.3.3 Διεξαγωγή πειραμάτων

Η συμπίεση των δοκιμίων, όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, διεξήχθη αρχικά σε συνθήκες θερμοκρασίας περιβάλλοντος εργαστηρίου και κατόπιν επαναλήφθηκε όταν τα δοκίμια τοποθετήθηκαν μέσα σε δοχείο με βραστό νερό 85° C.

Τα δοκίμια ένα έως τέσσερα (1 – 4) για τις συνθήκες A (περιβάλλοντος) συμπίεστηκαν σε συνθήκες περιβάλλοντος εργαστηρίου με θερμοκρασία 21° C. Επίσης, το δοκίμιο 5 εφελκύστηκε στις ίδιες συνθήκες.

Ομοίως δοκίμια ίδιων διαστάσεων συμπίεστηκαν σε συνθήκες B (βραστού νερού) θερμοκρασίας 85° C, η οποία κατά την ολοκλήρωση της συμπίεσης έφτασε τους 64° C.

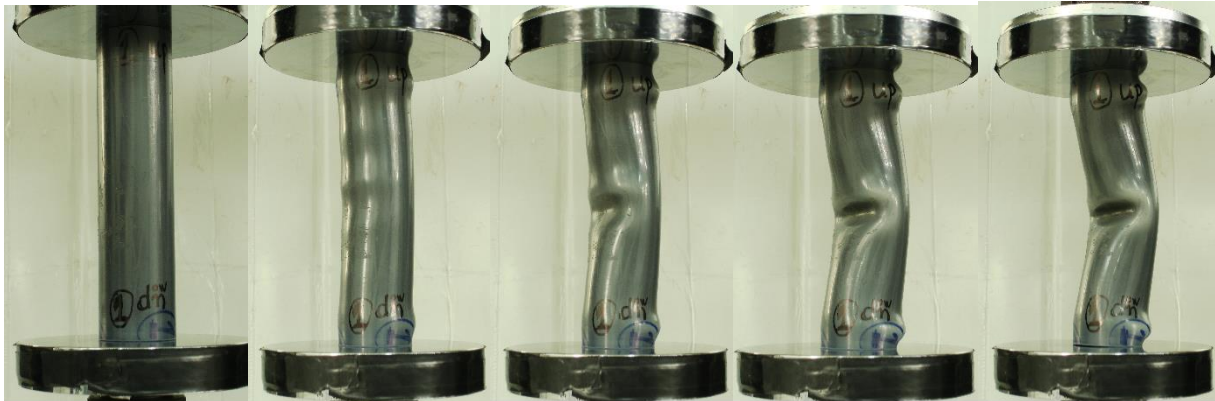
Όλα τα δοκίμια κόπηκαν σε ύψος 189,00 mm, ενώ η ταχύτητα συμπίεσης ορίστηκε σταθερή στα 10 mm/min. Η βράχυνση των δοκιμίων (μετατόπιση εμβόλου) προγραμματίστηκε στα 2/3 του αρχικού τους ύψους, δηλαδή στα 126,00 mm μετατόπισης και τελικού ύψους 63,00 mm.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

4.1 Πειραματικό δοκίμιο 1_A

Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης



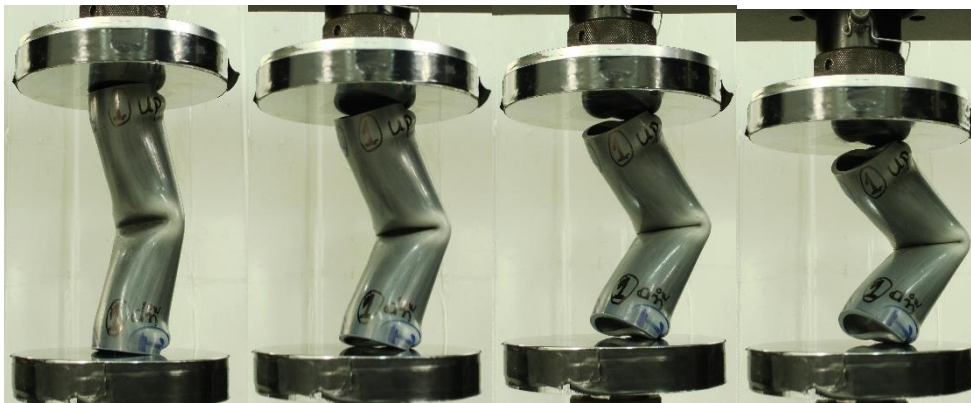
disp₁ = 0 mm

disp₂=13,82 mm

disp₃=15,91 mm

disp₄=19.16mm

disp₅=23.60mm



disp₆=29.41mm

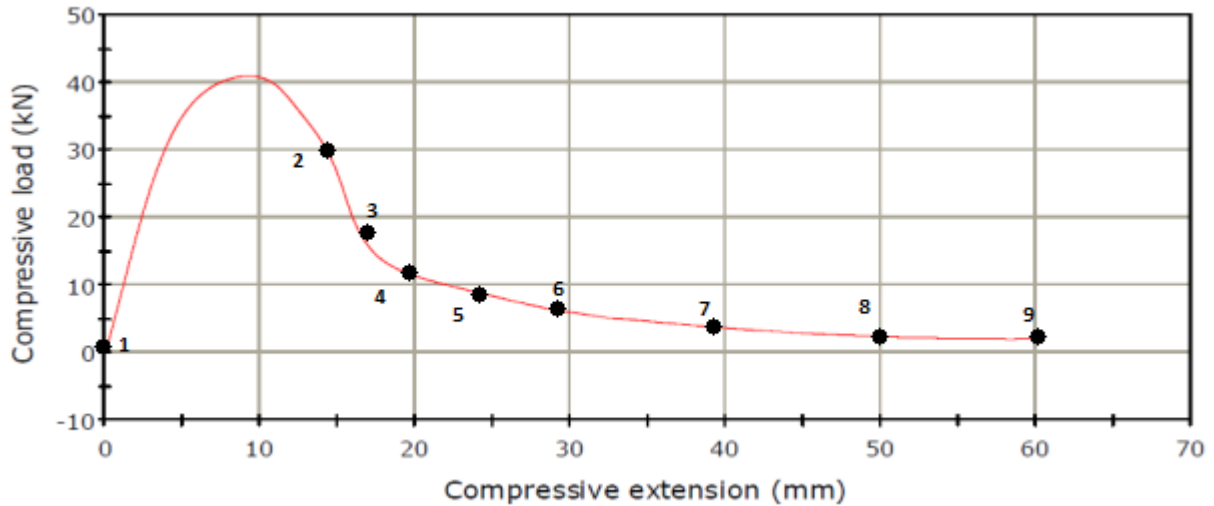
disp₇=39.16mm

disp₈=49.99mm

disp₉=60.00mm



Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης



Επεξηγήσεις

Όπως παρατηρήθηκε από το παραπάνω διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης η μέγιστη αντοχή του δοκιμαστικού κελύφους ανήλθε στα 40912 N και σημειώθηκε σε μετατόπιση 9,90 mm. Η συγκεκριμένη τιμή του φορτίου αποτέλεσε και την τιμή αντοχής του τεμαχίου μέχρις ότου αυτό άρχισε να παραμορφώνεται. Η μέση τιμή της αντοχής του παρατηρήθηκε στα 12143,37 N.

Τρόπος κατάρρευσης

Στο συγκεκριμένο τεμάχιο παρατηρήθηκε λυγισμός στο μέσον του μήκους του και αυτός αποδίδεται στο γεγονός ότι η διάμετρος του ήταν αρκετά μικρή όπως και το πάχος τοιχώματός του σε σχέση με το μήκος του. Το τεμάχιο απέτυχε να παραμορφωθεί με το μοτίβο δημιουργίας λοβών (προοδευτική και ελεγχόμενη κατάρρευση), με αποτέλεσμα το πείραμα να χρειαστεί να σταματήσει σε μετατόπιση 60,00 mm αφού το δοκίμιο είχε λυγίσει οριστικά και κινδύνευε να “γλιστρήσει” εκτός των πλακών συμπίεσης.



Τελικές όψεις



εμπρός όψη

πλάγια αριστερή όψη

πίσω όψη



πλάγια δεξιά όψη

άνω όψη

κάτω όψη

Το δοκίμιο 1_A υπέστη μόνιμο λυγισμό κατά τη παραμόρφωση του με αποτέλεσμα να μην παρουσιάζει ενδιαφέρον η εμβάπτιση του σε βραστό νερό.

Συμπεράσματα

Το δοκίμιο 1_A παρουσίασε μέγιστη αντοχή στα 25879 N. Από εκείνο το σημείο και ύστερα ξεκίνησε να λυγίζει στο μέσον του μήκους του μέχρι τη χρονική στιγμή κατά την οποία το τεμάχιο



δεν βρίσκονταν σε πλήρη επαφή με τις πλάκες συμπίεσης. Δεν παρατηρήθηκαν λοβοί παραμόρφωσης και ο λυγισμός που υπέστη ήταν μόνιμος.

4.2 Πειραματικό δοκίμιο 2_A

Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης



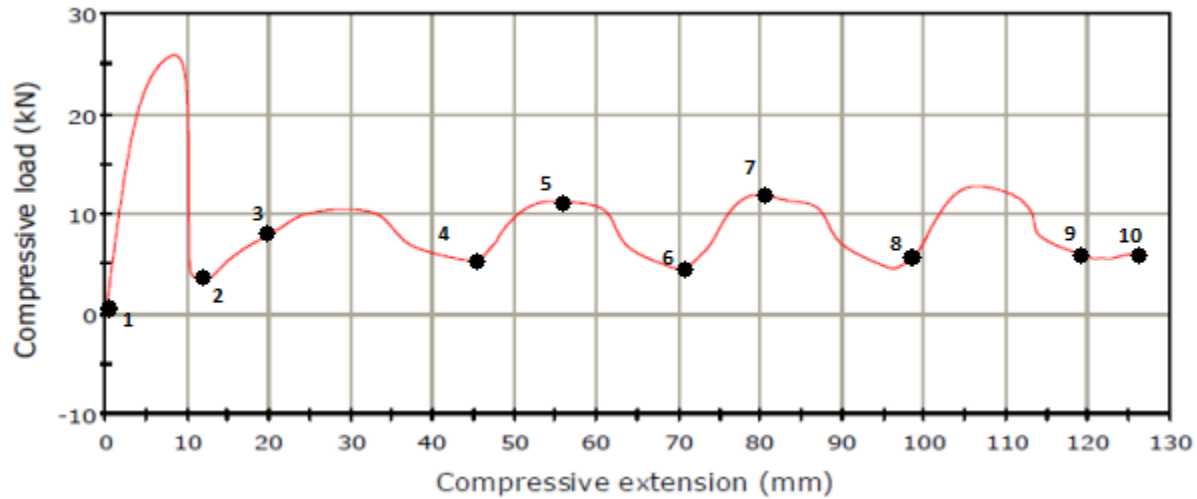
disp₁=0,0 mm disp₂=11,2 mm disp₃=29,5 mm disp₄=45,3 mm disp₅=55,3 mm



disp₆=70.4 mm disp₇=80.8 mm disp₈=97.10 mm disp₉=117.5 mm disp₁₀=126.0 mm



Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης



Επεξηγήσεις

Όπως παρατηρήθηκε σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης η πρώτη μέγιστη τιμή του φορτίου καταγράφηκε στα 25879 N και σημειώθηκε σε μετατόπιση 7,00 mm. Η τιμή αυτή αποτέλεσε και τη συνολική μέγιστη τιμή αντοχής του τεμαχίου (P_{max}). Η μέση τιμή της αντοχής του υπολογίστηκε στα 9152,85 N (P_m).

Τρόπος κατάρρευσης

Το τεμάχιο ξεκίνησε να καταρρέει με το μοτίβο κατάρρευσης μη αξονοσυμμετρικών λοβών παραμόρφωσης. Ο πρώτος λοβός ξεκίνησε να δημιουργείται στο επάνω μέρος και οι υπόλοιποι ακολούθησαν διαδοχικά προς το κάτω άκρο του δοκιμίου. Παρατηρήθηκε σαφής αποτύπωση του αριθμού των λοβών παραμόρφωσης οι οποίοι ήταν πέντε (5). Το τελικό ύψος του δοκιμίου έφτασε τα προκαθορισμένα 63,00 mm, όμως μετά την αποσυμπίεσή του το ύψος του σταθεροποιήθηκε στα 84,80 mm. Η μέθοδος μη αξονοσυμμετρικής κατάρρευσης που ακολούθησε το δοκίμιο 2_A, χαρακτηρίζεται ως 2-D (diamond) με το χαρακτηριστικό γνώρισμα δύο τελικών ακμών και την περιστροφή των διαδοχικών λοβών κατά 90°.



Τελικές όψεις



εμπρός όψη

πλάγια αριστερή όψη

πίσω όψη



πλάγια δεξιά όψη

άνω όψη

κάτω όψη

Εμβάπτιση θλιμμένου δοκιμίου σε δοχείο με βραστό νερό

Το θλιμμένο το δοκίμιο τοποθετήθηκε σε δοχείο με βραστό νερό αμέσως μετά τη θλίψη του. Παρατηρήθηκε ότι σε χρόνο 60 sec είχε επανέλθει στην αρχική του διαμόρφωση προ θλίψης. Το φαινόμενο αυτό αναμενόταν καθώς τα κελύφη PVC ανήκουν στην κατηγορία των υλικών με μνήμη σχήματος. Επίσης, αναπτύχθηκαν τα περιγράμματα των λοβών επί της αρχικής του κυλινδρικής γεωμετρίας καθώς το τεμάχιο ανατασσόταν.



Γραμμές – αποτύπωση
λοβών παραμόρφωσης

Σχήμα 4.1: Αναταγμένο δοκίμιο 2_A

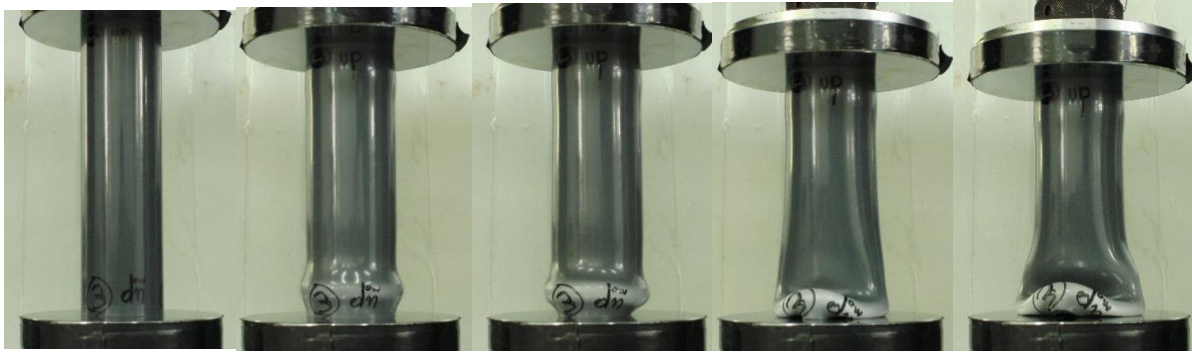
Συμπεράσματα

Το κέλυφος με τα συγκεκριμένα γεωμετρικά χαρακτηριστικά διαπιστώθηκε ότι έχει μέγιστη αντοχή 25879 N ύστερα από τη οποία ξεκίνησε η δημιουργία του πρώτου μη αξονοσυμμετρικού λοβού παραμόρφωσης. Η μέση αντοχή του υπολογίστηκε στα 9152,80 N. Οι λοβοί που δημιουργήθηκαν ήταν πέντε με εκκίνηση από το πάνω μέτωπο διαδοχικά προς τα κάτω, στραμμένοι κατά 90°. Επίσης, η παραμόρφωσή του δεν ήταν μόνιμη, γεγονός που αποδείχθηκε κατόπιν της επαναφοράς στην αρχική του γεωμετρία καθώς εμβαπτίστηκε σε βραστό νερό.



4.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΔΟΚΙΜΙΟ 3_A

Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης



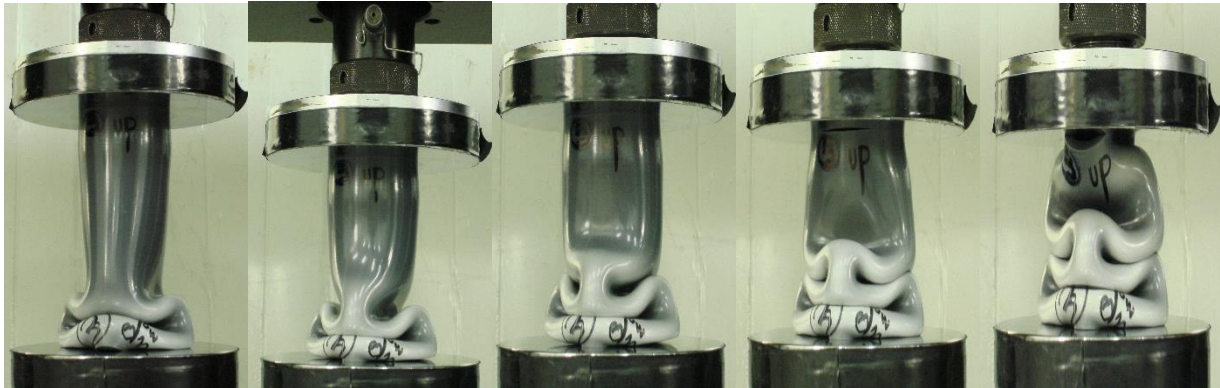
disp₁=0 mm

disp₂=15.40 mm

disp₃=17.90 mm

disp₄=33.48 mm

disp₅=41.23 mm



disp₆=53.73 mm

disp₇=70.85 mm

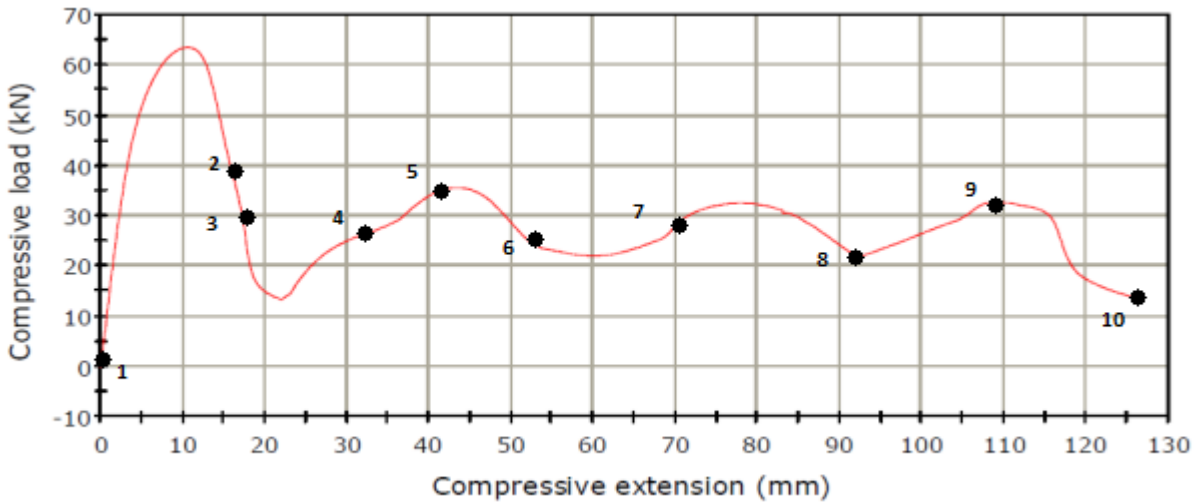
disp₈=92.40 mm

disp₉=109.3 mm

disp₁₀=126.0 mm



Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης



Επεξηγήσεις

Η πρώτη τοπική μέγιστη τιμή της αντοχής του δοκιμίου 3_A σύμφωνα με το διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης παρατηρήθηκε στα 63543 N κατά τη δημιουργία του πρώτου λοβού παραμόρφωσης. Η τιμή αυτή αποτέλεσε και τη συνολική μέγιστη χαρακτηριστική τιμή αντοχής του κελύφους 3_A. Η μετατόπιση σε αυτό το φορτίο, όπως φαίνεται στον οριζόντιο άξονα, υπολογίστηκε στα 12,00 mm. Η μέση αντοχή του δοκιμίου καθ' όλη τη διάρκεια της παραμόρφωσης του υπολογίστηκε στα 29175,80 N.

Τρόπος κατάρρευσης

Η παραμόρφωση του δοκιμίου ξεκίνησε από το κάτω μέτωπο, αρχικά με τη δημιουργία ενός "φουσκώματος" προς το σχηματισμό του πρώτου λοβού παραμόρφωσης. Η κατάρρευση συνεχίστηκε με τη διαδοχική δημιουργία μη αξονοσυμμετρικών λοβών προς το επάνω μέτωπο. Ο τρόπος κατάρρευσης χαρακτηρίστηκε ως 2-D (diamond) με τους διαδοχικούς λοβούς παραμόρφωσης στραμμένους κατά 90° μεταξύ τους. Στα άκρα του δοκιμίου δημιουργήθηκαν δύο ακμές με τη γεωμετρία τους να χαρακτηρίζεται ως έλλειψη. Συνολικά δημιουργήθηκαν τέσσερις



(4) λοβοί παραμόρφωσης με τον τελευταίο (άνω μέρος) να μην σχηματίζεται πλήρως καθώς το δοκίμιο “έχασε” την πλήρη επαφή με τις πλάκες συμπίεσης λόγω παραμόρφωσης του άνω στομίου. Το ύψος του έφτασε την προκαθορισμένη τιμή 63,00 mm και όταν αυτό αφαιρέθηκε από τις πλάκες συμπίεσης έφτασε στο τελικό ύψος 81,50 mm λόγω ελαστικής επαναφοράς.

Τελικές όψεις



εμπρός όψη

πίσω όψη

πλάγια δεξιά όψη



πλάγια δεξιά όψη

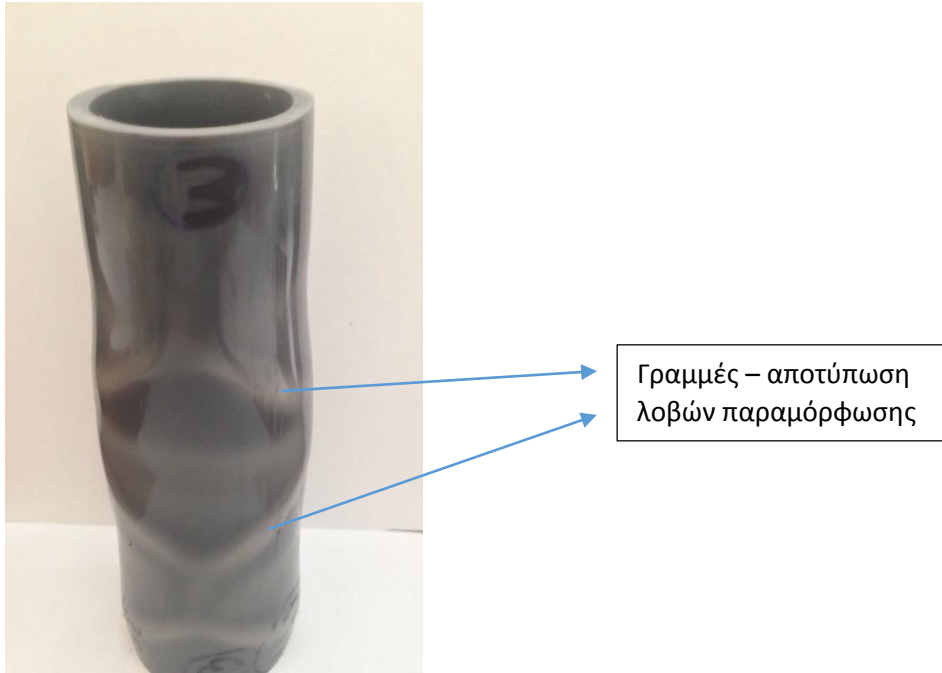
άνω όψη

κάτω όψη



Εμβάπτιση θλιμμένου δοκιμίου σε δοχείο με βραστό νερό

Το συμπιεσμένο κέλυφος 3_A τελικού ύψους 81,50 mm τοποθετήθηκε στην διάταξη με βραστό νερό. Ύστερα από χρόνο 60 sec το δοκίμιο “ανατάχθηκε” και προσέγγισε την αρχική του διαμόρφωση όπως αυτή ήταν πριν τη συμπίεση του (μνήμη σχήματος). Μικρές παραμορφώσεις στα άκρα των χειλών του παρέμειναν μόνιμες. Όπως παρατηρήθηκε, οι γραμμές των λοβών ήταν εμφανείς επάνω στο αναταγμένο δοκίμιο.



Σχήμα 4.2: Αναταγμένο δοκίμιο 3_A

Συμπεράσματα

Το δοκιμαστικό δοκίμιο 3_A μετρήθηκε ότι έχει αντοχή 63543 N έως ότου ξεκινήσει να παραμορφώνεται με τη μέθοδο δημιουργίας λοβών. Επίσης, η παραμόρφωσή του αυτή δεν ήταν μόνιμη γεγονός που αποδείχθηκε κατόπιν της επαναφοράς του στην αρχική του γεωμετρία καθώς βυθίστηκε σε βραστό νερό.



4.4 Πειραματικό δοκίμιο 4_A

Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης



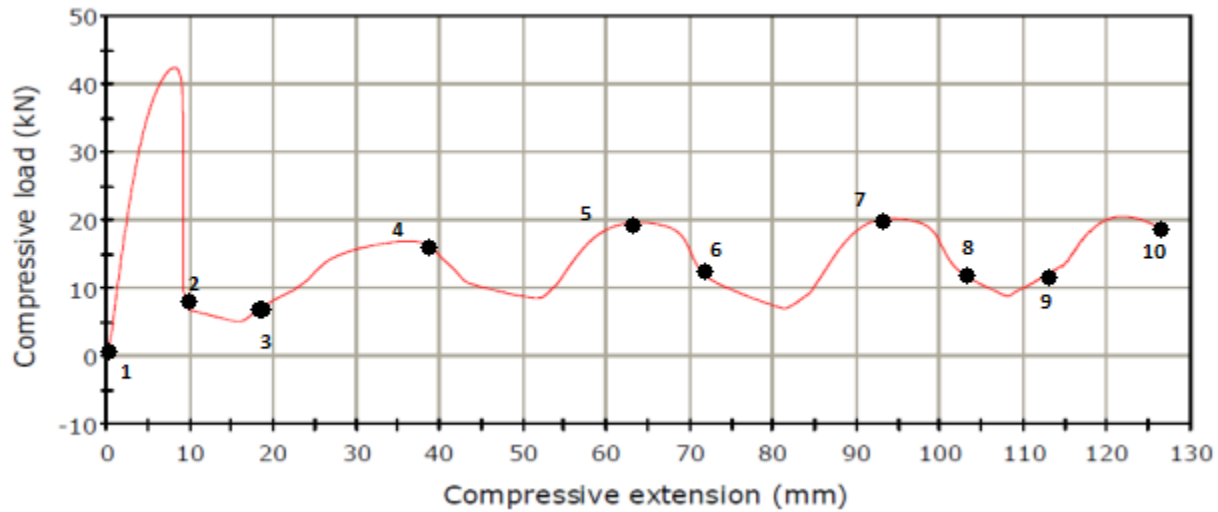
disp₁=0 mm disp₂=9.47 mm disp₃=18.48 mm disp₄=38.65 mm disp₅=63.48 mm



disp₆=72.15 mm disp₇=93.65 mm disp₈=103.5 mm disp₉=114.0 mm disp₁₀=126.0 mm



Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης



Επεξηγήσεις

Το κέλυφος 4_A παρουσίασε αρχικό τοπικό μέγιστο φορτίο στη διαδρομή των 8,0 mm μετατόπισης το οποίο ανήλθε στα 42442 N. Σε εκείνο το σημείο παρατηρήθηκε η δημιουργία του πρώτου λοβού παραμόρφωσης, όπως φαίνεται και από το διάγραμμα η τιμή αυτή αποτέλεσε και το μέγιστο φορτίο P_{max} του δοκιμίου. Η μέση αντοχή του καθ' όλη την πειραματική διαδικασία υπολογίστηκε στα 14582,90 N.

Τρόπος κατάρρευσης

Η παραμόρφωση του δοκιμίου 4_A ξεκίνησε από το κάτω μέτωπο του κελύφους προς το επάνω με τη δημιουργία διαδοχικών, και σε αυτή την περίπτωση, μη αξονοσυμμετρικών λοβών (μη εκτατών). Παρατηρήθηκαν τέσσερις (4) πλήρεις λοβοί, ενώ στο τέλος κατά τη δημιουργία ενός (1) επιπλέον, η πειραματική διαδικασία σταμάτησε στην προκαθορισμένη τιμή μετατόπισης, στα 126.0 mm. Ο τρόπος κατάρρευσης χαρακτηρίστηκε ως 2-D (diamond) με τους διαδοχικούς λοβούς παραμόρφωσης στραμμένους κατά 90° μεταξύ τους. Το ύψος του δοκιμίου έφτασε την αναμενόμενη τιμή 63.00 mm, ενώ αφότου αφέθηκε ελεύθερο υπέστη ελαστική επαναφορά με τελικό πραγματικό ύψος 79.50 mm.

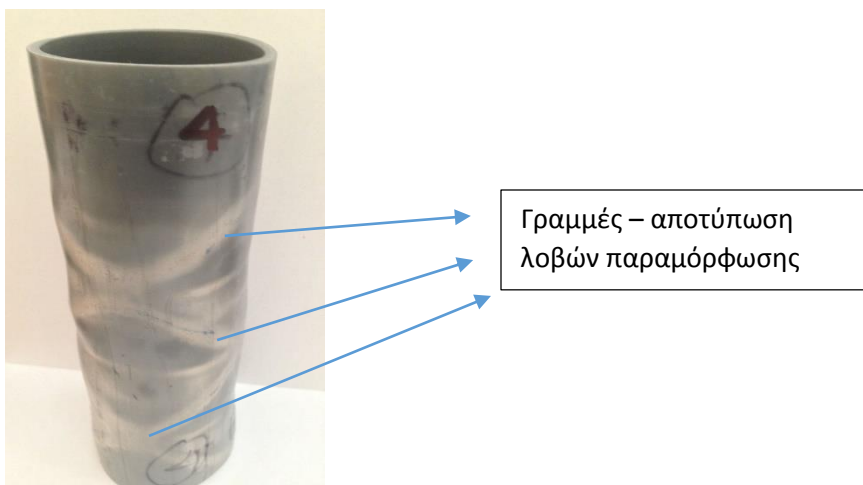


Τελική όψη δοκιμίου



Εμβάπτιση θλιμμένου δοκιμίου σε δοχείο με βραστό νερό

Το συμπιεσμένο δοκίμιο 4_A τοποθετήθηκε στο κατάλληλα διαμορφωμένο δοχείο με βραστό νερό 85° C. Το δοκίμιο άρχισε σταδιακά να ξεδιπλώνεται και μέσα σε χρόνο 60 sec κατάφερε να επαναφερθεί στην αρχική του διαμόρφωση όπως αναμενόταν (ιδιότητα μνήμης σχήματος). Η παραμόρφωσή του συμπεραίνεται ότι δεν ήταν μόνιμη, ενώ κατά το τέλος της ανάταξης του η θερμοκρασία του νερού μετρήθηκε στους 64° C. Αναπτύχθηκε έντονα το περίγραμμα των λοβών παραμόρφωσης επί της αρχικής κυλινδρικής του γεωμετρίας.



Σχήμα 4.3: Αναταγμένο δοκίμιο 4_A



Συμπεράσματα

Ως μέγιστη αντοχή του δοκιμαστικού δοκιμίου 4_A σημειώθηκε το φορτίο των 42442 N. Σε εκείνο το σημείο της καμπύλης φορτίου, στο άνω μέτωπο του τεμαχίου, δημιουργήθηκε ο πρώτος μη αξονοσυμμετρικός λοβός παραμόρφωσης και στη συνέχεια ακολούθησαν διαδοχικά προς τα κάτω τρεις λοβοί. Η μέση τάση παραμόρφωσης υπολογίστηκε στα 14582,90 N. Επίσης, η παραμόρφωσή του αυτή δεν ήταν μόνιμη γεγονός που αποδείχθηκε ύστερα από την επαναφορά του στην αρχική του διαμόρφωση, καθώς βυθίστηκε σε βραστό νερό.

4.5 Πειραματικό δοκίμιο 1_B

Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης



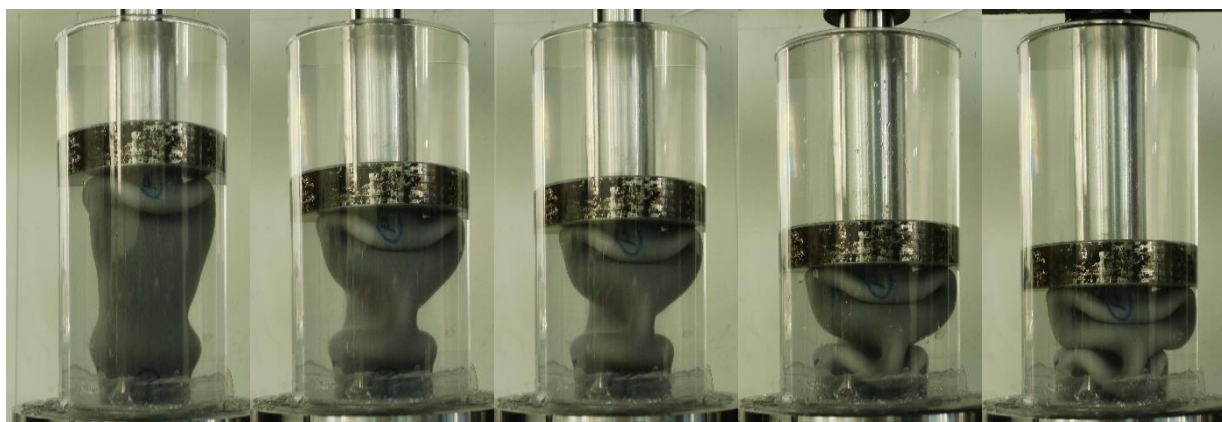
disp₁=0 mm

disp₂=25.49 mm

disp₃=40.30 mm

disp₄=49.66 mm

disp₅=59.91 mm



disp₆=67.25 mm

disp₇=84.50 mm

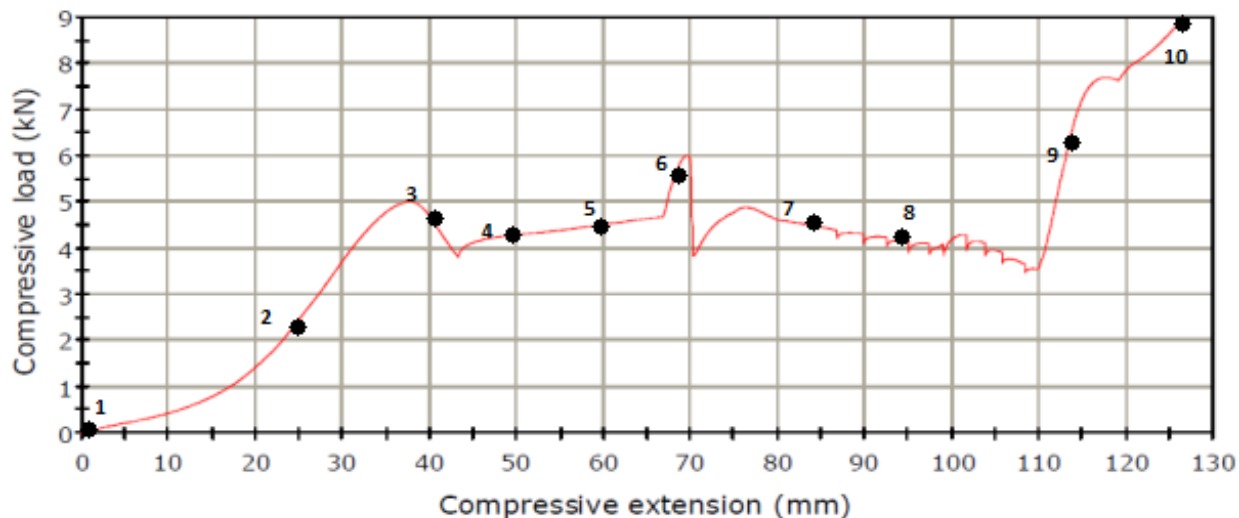
disp₈=93.41 mm

disp₉=114.5 mm

disp₁₀=126.0 mm



Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης



Επεξηγήσεις

Το δοκίμιο 1_B παρουσίασε αρχικό τοπικό μέγιστο φορτίο 5000 N σε μετατόπιση 37,00 mm. Στη συνέχεια παρουσίασε νέο τοπικό μέγιστο στα 6000 N σε μετατόπιση 70,0 mm. Το ολικό μέγιστο φορτίο τελικά σημειώθηκε στα 8902 N σε 126,0 mm μετατόπισης, δηλαδή κατά το τέλος της διαδικασίας συμπίεσης. Παρατηρείται ότι όσο συνεχιζόταν η διαδικασία παραμόρφωσης το φορτίο σημείωνε νέες μέγιστες τιμές. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι λοβοί παραμόρφωσης ακουμπούσαν μεταξύ τους με αποτέλεσμα να προσδίδεται συνεχώς μεγαλύτερη στήριξη καθώς το δοκίμιο συμπιεζόταν. Το μέσο φορτίο του υπολογίστηκε στα 4002,04 N.

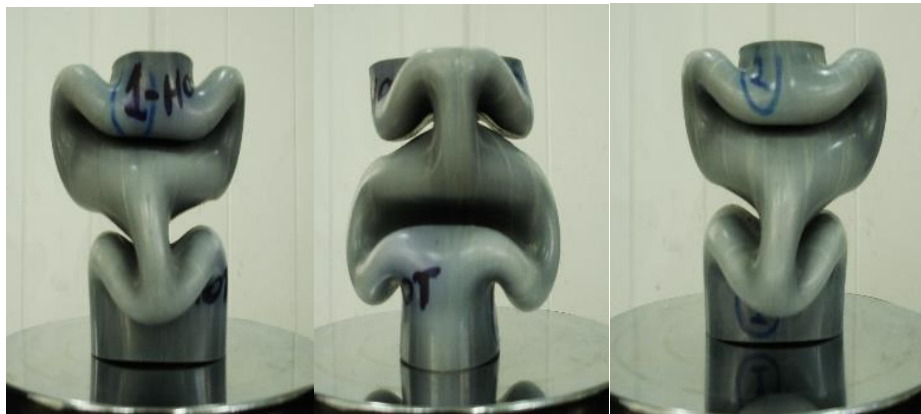
Τρόπος κατάρρευσης

Το δοκίμιο ξεκίνησε να παραμορφώνεται με τη δημιουργία μη αξονοσυμμετρικών λοβών. Αρχικά παρατηρήθηκε ταυτόχρονος σχηματισμός ενός λοβού στο άνω μέτωπο και ενός στο κάτω. Στη συνέχεια και καθώς το δοκίμιο συμπιεζόταν δημιουργήθηκε ένας ακόμα λοβός στο ενδιάμεσο των άλλων δύο. Από το διάγραμμα του φορτίου δεν είναι ξεκάθαρος ο αριθμός των λοβών που δημιουργήθηκαν. Εμφανείς είναι οι τρεις λοβοί που προαναφέρθηκαν. Χαρακτηριστικό είναι ότι οι λοβοί αυτοί διεύρυναν την περίμετρο του δοκιμίου στο επίπεδο της διατομής τους διότι το



κέλυφος μέσα στο βραστό νερό έγινε πιο όλκιμο και πιο ελατό. Καθώς ο ενδιάμεσος λοβός σχηματιζόταν, ακουμπούσε με τους δύο στα άκρα με αποτέλεσμα το δοκίμιο να συμπιέζεται και οι λοβοί να στηρίζονται μεταξύ τους ώστε συνεχώς να προσδίδεται μεγαλύτερη στήριξη στο τεμάχιο. Το αποτέλεσμα ήταν το φορτίο συνεχώς να αυξάνεται κατά την πειραματική διαδικασία. Ο τρόπος παραμόρφωσης χαρακτηρίστηκε ως 2-D (diamond) με τα στόμια του τεμαχίου να έχουν ελλειπτική μορφή. Το τελικό ύψος συμπίεσης έφτασε την προκαθορισμένη τιμή 63,00 mm στην τελική μετατόπιση 126,0 mm. Όταν το δοκίμιο αφέθηκε ελεύθερο λόγω ελαστικής επαναφοράς έφτασε το τελικό ύψος των 73,50 mm.

Τελικές όψεις δοκιμίου



εμπρός όψη

πλάγια δεξιά όψη

πίσω όψη



πλάγια αριστερή όψη

άνω όψη

κάτω όψη



Εμβάπτιση θλιμμένου δοκιμίου σε δοχείο με βραστό νερό

Το δοκίμιο 1_B τοποθετήθηκε σε δοχείο με βραστό νερό κατόπιν της διαδικασίας παραμόρφωσής του. Σε χρόνο 60 sec επανήλθε σχεδόν στην αρχική του γεωμετρία αποδεικνύοντας ότι η παραμόρφωση του δεν ήταν μόνιμη (μνήμη σχήματος). Διαπιστώθηκε ότι υπήρχε διαφορά στη διάμετρο του στο άνω και το κάτω μέρος. Η διάμετρος στο άνω μέρος μετρήθηκε μεγαλύτερη. Παραμορφώσεις στα άκρα του κυλινδρικού δοκιμίου παρέμειναν λόγω της μεγάλης φόρτισης που αυτό δέχθηκε στα συγκεκριμένα σημεία. Παρατηρήθηκαν ισχνές γραμμές των λοβών παραμόρφωσης στην αρχική του γεωμετρία όταν αυτό ανατάχθηκε.



Σχήμα 4.4: Αναταγμένο δοκίμιο 1_B

Συμπεράσματα

Το δοκιμαστικό τεμάχιο 1_B παρουσίασε μέγιστη τιμή του φορτίου $P_{max} = 8902$ N και μέσο φορτίο $P_m = 4002,04$ N. Ξεκίνησε να παραμορφώνεται με το μοτίβο μη αξονοσυμμετρικών λοβών παραμόρφωσης από τους οποίους δύο δημιουργήθηκαν ταυτόχρονα στα άκρα του και κατόπιν ένας ενδιάμεσα. Με τον τρόπο αυτό οι λοβοί στηρίζονταν μεταξύ τους με αποτέλεσμα να παρατηρείται συνεχής αύξηση του φορτίου. Τέλος, το δοκίμιο 1_B τοποθετήθηκε σε δοχείο με βραστό νερό με αποτέλεσμα να επαναφερθεί στην αρχική του διαμόρφωση.



4.6 Πειραματικό δοκίμιο 2_B

Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης



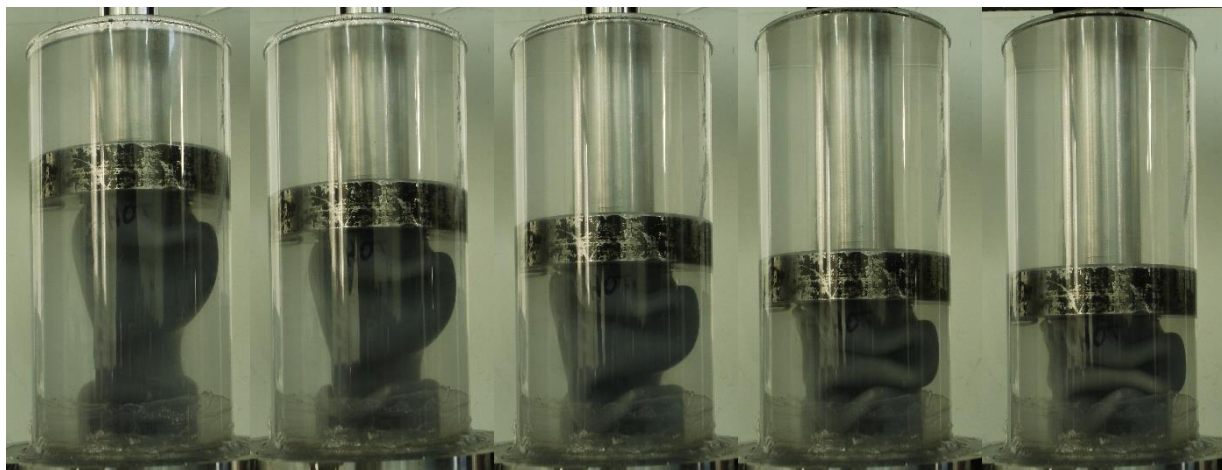
disp₁=0 mm

disp₂=17.05 mm

disp₃=24.38 mm

disp₄=41.38 mm

disp₅=62.63 mm



disp₆=68.97 mm

disp₇=87.63 mm

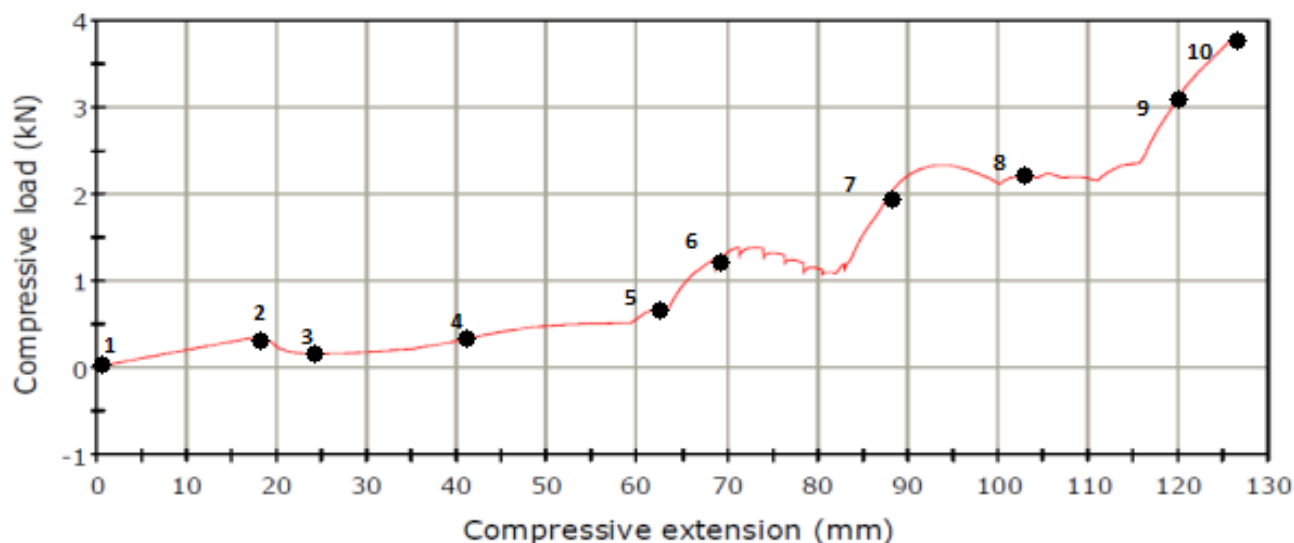
disp₈=102.0 mm

disp₉=120.0 mm

disp₁₀=126.0 mm



Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης



Επεξηγήσεις

Κατά την ανάλυση του διαγράμματος φορτίου – μετατόπισης του κελύφους 2_B διαπιστώθηκε αρχικά τοπικό μέγιστο φορτίο 400 N στα 18,00 mm μετατόπισης. Στη συνέχεια παρατηρήθηκε νέο τοπικό μέγιστο 1400 N στα 74,00 mm μετατόπισης, ενώ τρίτο μέγιστο καταγράφηκε στα 2350 N. Το ολικό μέγιστο φορτίο σημειώθηκε στο τέλος της διαδικασίας θλίψης (126,00 mm) με τιμή 3807 N. Παρατηρείται ότι όσο συνεχιζόταν η διαδικασία παραμόρφωσης το φορτίο σημειώνει νέες μέγιστες τιμές. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι λοβοί παραμόρφωσης ακουμπούσαν μεταξύ τους (χωρίς να υπάρχει διαδοχική ακολουθία κατάρρευσης) με αποτέλεσμα να προσδίδεται συνεχώς μεγαλύτερη στήριξη καθώς το δοκίμιο συμπιεζόταν. Η τιμή της μέσης αντοχής για όλη τη διαδικασία συμπίεσης υπολογίστηκε στα 1160,13 N.

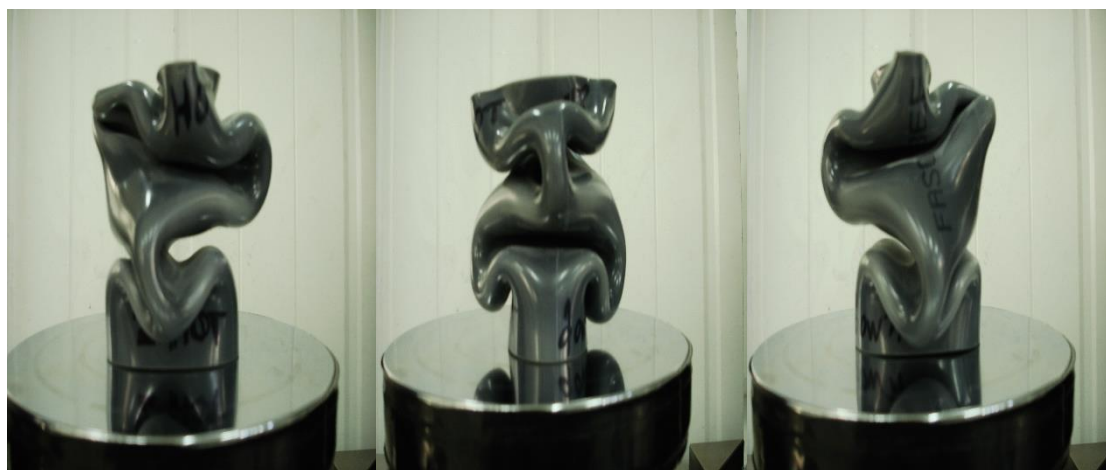
Τρόπος κατάρρευσης

Κατά την κατάρρευση του δοκιμίου παρατηρήθηκε ταυτόχρονος σχηματισμός δύο μη αξονοσυμμετρικών λοβών παραμόρφωσης στο άνω και κάτω μέτωπο του κελύφους. Στη συνέχεια και καθώς η συμπίεση του δοκιμίου συνεχίστηκε δημιουργήθηκε ένας ακόμα λοβός στο ενδιάμεσο



των άλλων δύο. Από το διάγραμμα φορτίου δεν είναι εμφανής ο αριθμός των λοβών καθώς αυτοί σημειώθηκαν σε όλο το μήκος του. Το κέλυφος μέσα στο βραστό νερό έγινε πιο όλκιμο και πιο ελατό με αποτέλεσμα να υπάρχουν ασυμμετρίες κατά την κατάρρευση του και οι λοβοί παραμόρφωσης να διευρύνουν την περίμετρο του. Καθώς ο ενδιάμεσος λοβός σχηματιζόταν, ακουμπούσε με τους δύο στα άκρα με αποτέλεσμα το δοκίμιο να συμπιέζεται και οι λοβοί να στηρίζονται μεταξύ τους ώστε συνεχώς να προσδίδεται μεγαλύτερη στήριξη στο τεμάχιο. Το αποτέλεσμα ήταν το φορτίο συνεχώς να αυξάνεται κατά την πειραματική διαδικασία. Το δοκίμιο κατέρρευσε με τον μη αξονοσυμμετρικό τρόπο 2-D (diamond) με τα στόμια του τεμαχίου να έχουν ελλειπτική μορφή με έντονες ακμές. Το τελικό ύψος συμπίεσης έφτασε την προκαθορισμένη τιμή 63,00 mm στην τελική μετατόπιση 126,0 mm, ενώ λόγω ελαστικής επαναφοράς το ύψος σταθεροποιήθηκε στα 74,40 mm.

Τελικές όψεις δοκιμίου



εμπρός όψη

πλάγια δεξιά όψη

πλάγια αριστερή όψη



πίσω όψη

άνω όψη

κάτω όψη

Εμβάπτιση θλιμμένου δοκιμίου σε δοχείο με βραστό νερό

Κατόπιν της διαδικασίας θλίψης το δοκίμιο τοποθετήθηκε σε δοχείο με βραστό νερό για να παρατηρηθεί εάν αυτό επαναφερθεί στην αρχική του γεωμετρία. Το δοκιμαστικό δοκίμιο 2_B επαναφέρθηκε πλήρως επιβεβαιώνοντας τη ιδιότητα “μνήμη σχήματος” του κελύφους μέσα σε χρόνο 60 sec. Παρατηρήθηκαν ελαφρές γραμμές από το σχηματισμό των λοβών και διαφοροποίηση στη διάμετρο του αναταγμένου κελύφους. Στα άκρα η περίμετρος του δοκιμίου ήταν πιο μικρή σε σχέση με το μέσον του.



Γραμμές – αποτύπωση
λοβών παραμόρφωσης

Σχήμα 4.5: Αναταγμένο δοκίμιο 2_B

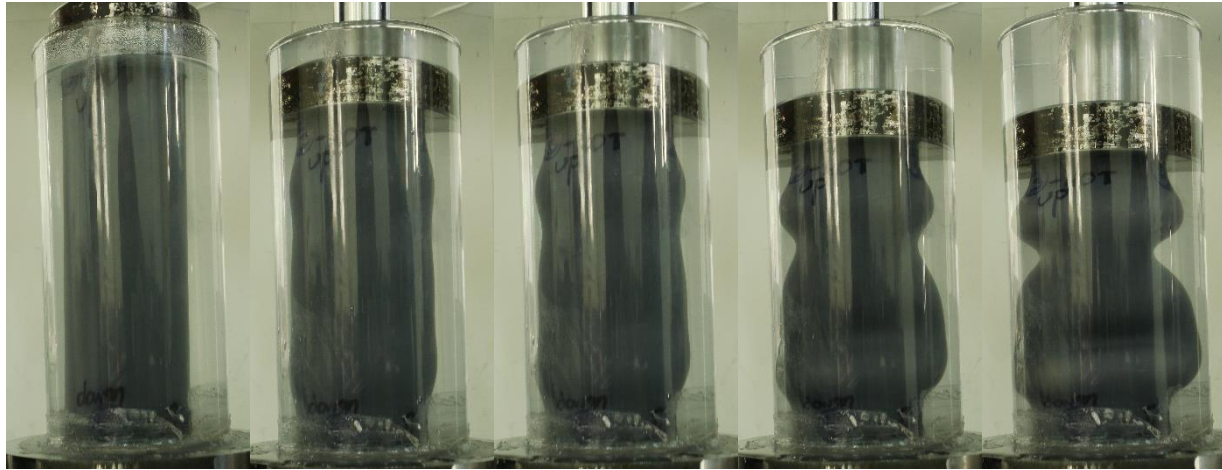
Συμπεράσματα

Το δοκίμιο 2_B ξεκίνησε να παραμορφώνεται με τη μέγιστη τιμή της αντοχής του να καταγράφεται στα $P_{\max} = 3807 \text{ N}$, ενώ η μέση τιμή της να υπολογίζεται ως $P_m = 1160,13 \text{ N}$. Παρατηρήθηκε η δημιουργία τριών (3) μη αξονοσυμμετρικών λοβών παραμόρφωσης (όχι διαδοχικών) σε όλο το μήκος του κελύφους με τους δύο πρώτους να εκκινούν από τα άκρα και τον τρίτο να σχηματίζεται στο ενδιάμεσο. Τέλος, εμβαπτίστηκε σε δοχείο με βραστό νερό και επανήλθε στην αρχική του διαμόρφωση όπως αυτό αναμενόταν.



4.7 Πειραματικό δοκίμιο 3_B

Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης



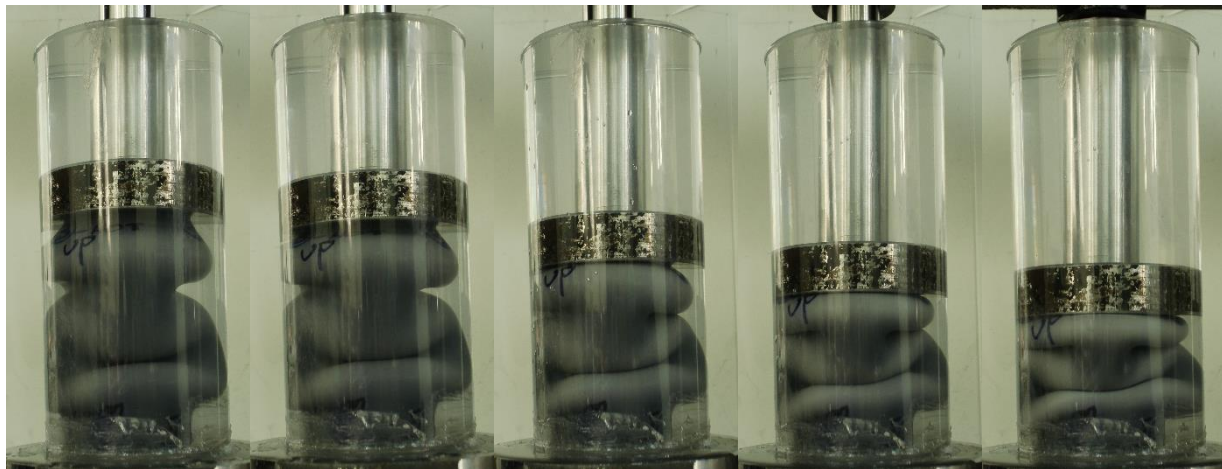
$disp_1=0$ mm

$disp_2=29.41$ mm

$disp_3=34.41$ mm

$disp_4=45.82$ mm

$disp_5=56.74$ mm



$disp_6=77.32$ mm

$disp_7=84.75$ mm

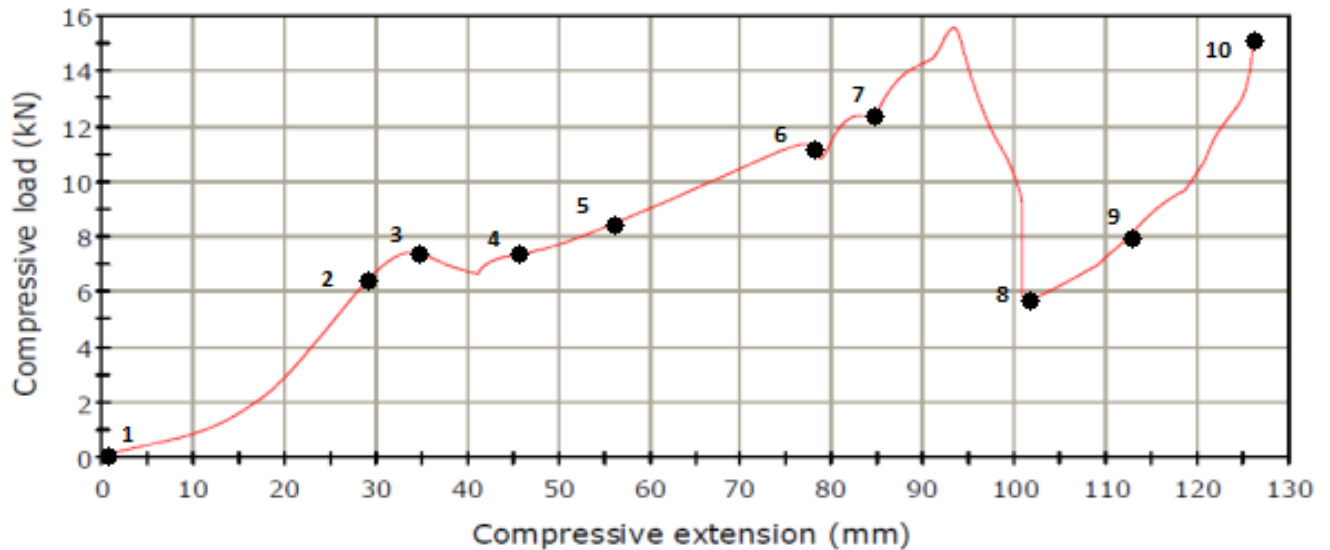
$disp_8=101.3$ mm

$disp_9=113.4$ mm

$disp_{10}=126.0$ mm



Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης



Επεξηγήσεις

Το δοκίμιο 3_B παρουσίασε αρχικά τοπική μέγιστη αντοχή στο φορτίο των 6700 N για μετατόπιση 34,00 mm. Στη συνέχεια της πειραματικής διαδικασίας το φορτίο συνέχιζε να αυξάνεται σημειώνοντας νέο τοπικό μέγιστο στα 15586 N σε μετατόπιση 92,00 mm. Σε εκείνο το σημείο και ύστερα σημειώθηκε σχεδόν κάθετη πτώση μέχρι τα 100,00 mm μετατόπισης όπου το φορτίο άρχισε και πάλι να αυξάνεται σχεδόν γραμμικά μέχρι το πέρας της πειραματικής διαδικασίας. Το ολικό μέγιστο φορτίο του κελύφους 3_B παρατηρήθηκε στην τιμή των $P_{max} = 15586$ N. Το φαινόμενο της συνεχόμενης αύξησης της αντοχής του δοκιμίου ως το τέλος της διαδικασίας συμπίεσης οφείλεται στο γεγονός ότι οι λοβοί παραμόρφωσης δεν σχηματίστηκαν διαδοχικά με αποτέλεσμα να παρέχεται επιπλέον στήριξη στον ενδιάμεσο λοβό που δημιουργήθηκε. Η μέση τιμή της αντοχής του τεμαχίου σημειώθηκε στα 7910,31 N.

Τρόπος κατάρρευσης

Κατά την έναρξη της διαδικασίας θλίψης το δοκίμιο ξεκίνησε να παραμορφώνεται και να δημιουργεί δύο μη αξονοσυμμετρικούς λοβούς παραμόρφωσης ταυτόχρονα στο άνω και κάτω



μέτωπο. Στη συνέχεια δημιουργήθηκε ένας τρίτος λοβός στο ενδιάμεσο των άλλων δύο, ενώ η συμπίεση συνεχίστηκε μέχρι τα προγραμματισμένα 126,00 mm μετατόπισης. Η τιμή της αντοχής του δοκιμίου αυξανόταν συνεχώς, ενώ παρουσίασε μία κατακόρυφη πτώση ύστερα από τη δημιουργία του ενδιάμεσου λοβού. Από το διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης δεν μπορεί να εξαχθεί ασφαλές συμπέρασμα για τον αριθμό των λοβών. Από την παρατήρηση της κατάρρευσης όμως οι λοβοί που σχηματίστηκαν φαίνονται ότι είναι τρεις (3). Στο εγκάρσιο επίπεδο διαπιστώθηκε αύξηση της διατομής του κελύφους λόγω ολκιμότητας και έλασης μέσα στο βραστό νερό. Το δοκίμιο κατέρρευσε με το μη αξονοσυμμετρικό τρόπο 2-D (diamond) με το άνω στόμιο του τεμαχίου να έχει ελλειπτική μορφή, ενώ το κάτω παρέμεινε κυλινδρικό. Μετά το πέρας τη πειραματικής διαδικασίας το δοκίμιο αφέθηκε ελεύθερο χωρίς συγκράτηση και έφτασε την τελική τιμή ύψους των 76,00 mm.

Τελικές όψεις δοκιμίου



εμπρός όψη

πλάγια δεξιά όψη

πίσω όψη



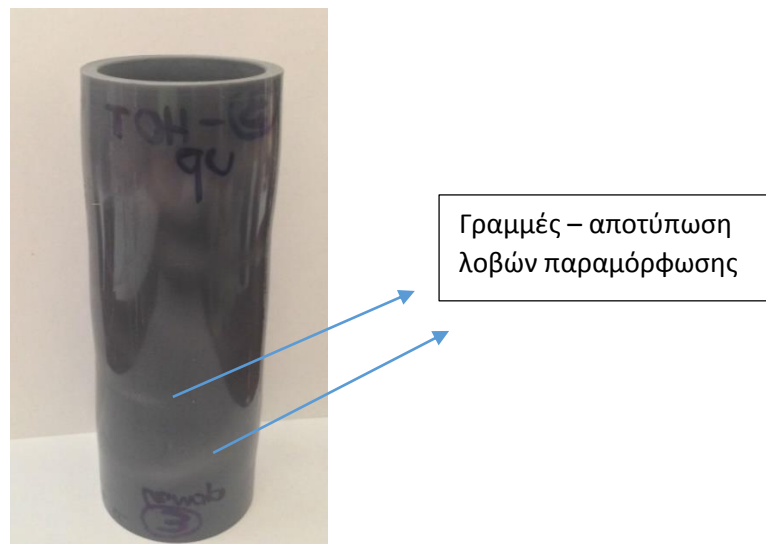
πλάγια αριστερή όψη

άνω όψη

κάτω όψη

Εμβάπτιση θλιμμένου δοκιμίου σε δοχείο με βραστό νερό

Το πειραματικό κέλυφος βυθίστηκε κατόπιν της συμπίεσης του σε δοχείο με βραστό νερό θερμοκρασίας 85°C . Όπως αναμενόταν το δοκίμιο αποσυμπιέστηκε και επανήλθε στην αρχική του διαμόρφωση μέσα σε χρόνο 1 min με μοναδικές αλλοιώσεις στη γεωμετρία του να παρατηρούνται στο άνω άκρο του (ελλειπτικότητα). Σημειώθηκαν ισχνές γραμμές από τους λοβούς παραμόρφωσης πάνω στην επιφάνεια του.



Σχήμα 4.6: Αναταγμένο δοκίμιο 3_B



Συμπεράσματα

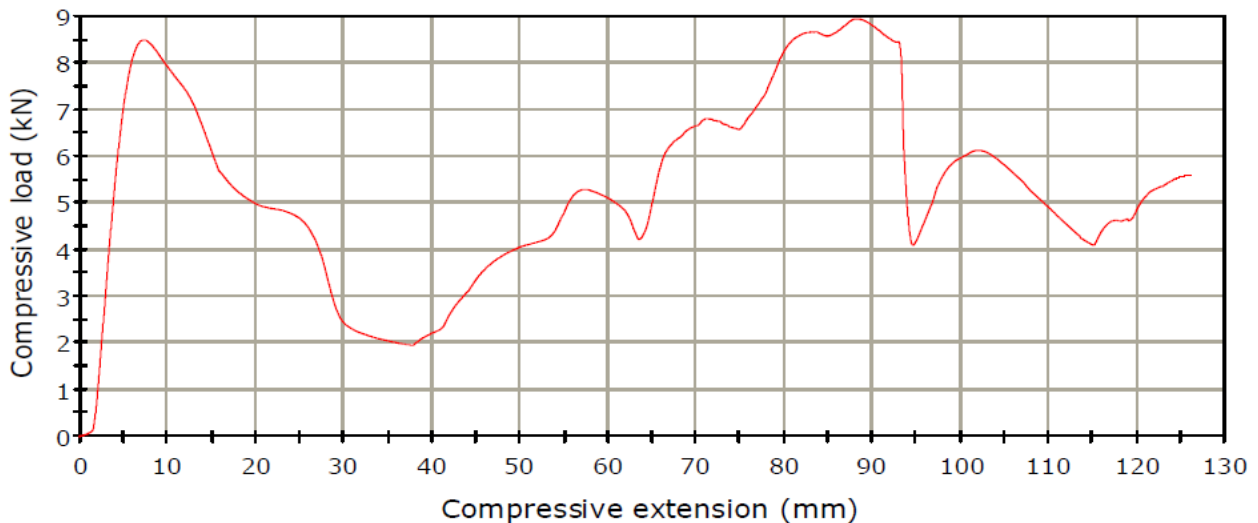
Το δοκιμαστικό δοκίμιο 3_B παρουσίασε μέγιστη αντοχή κατά τη διαδικασία θλίψης του στο φορτίο των $P_{\max} = 15586 \text{ N}$. Η μέση τιμή της αντοχής του υπολογίστηκε στα $P_m = 7910,31 \text{ N}$. Σημειώθηκαν τρεις μη αξονοσυμμετρικοί λοβοί παραμόρφωσης με τους δύο πρώτους να εκκινούν ταυτόχρονα στα άκρα του δοκιμίου και τον τρίτο να ακολουθεί στο ενδιάμεσο. Τέλος, το κέλυφος τοποθετήθηκε σε δοχείο με βραστό νερό και επανήλθε σχεδόν πλήρως στην αρχική του διαμόρφωση (μνήμη σχήματος).

4.8 Πειραματικό δοκίμιο 4_B

Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης

Το δοκίμιο 4_B συμπίεστηκε δοκιμαστικά σε αδιαφανές δοχείο με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατή η λήψη φωτογραφικών στιγμιότυπων.

Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης





Επεξηγήσεις

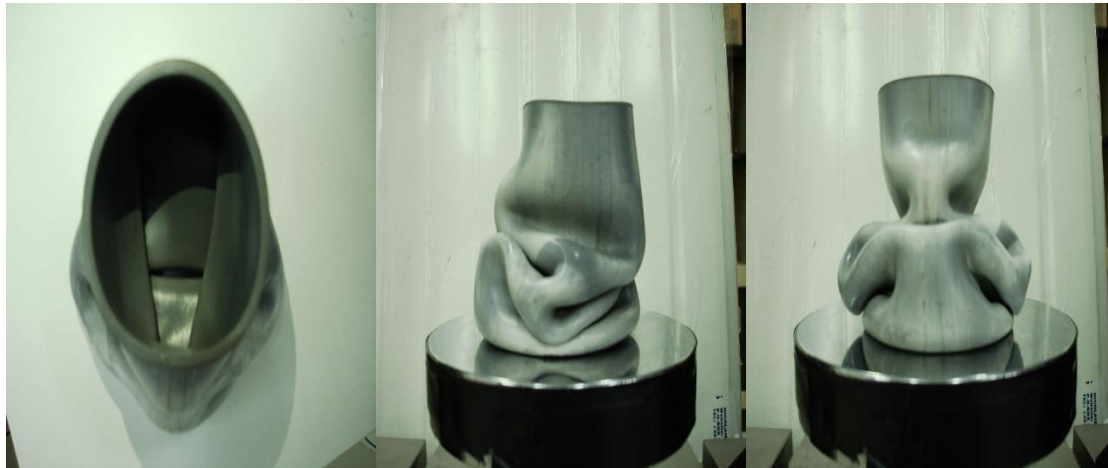
Το δοκίμιο 4_B παρουσίασε αρχικό μέγιστο φορτίο στα 8500 N όπου και ξεκίνησε η παραμόρφωσή του. Στη συνέχεια σημειώθηκε νέο μέγιστο φορτίο αντοχής στα 8948 N σε μετατόπιση 88,00 mm. Το φορτίο αυτό αποτέλεσε και ο ολικό μέγιστο φορτίο του δοκιμίου (P_{max}). Η μέση τιμή της αντοχής του για όλη την πειραματική διαδικασία υπολογίστηκε στα $P_m = 5307,93$ N. Το γεγονός ότι το πρώτο τοπικό μέγιστο φορτίο δεν ήταν και το μέγιστο οφείλεται στο ότι δημιουργήθηκε ένας ενδιάμεσος λοβός παραμόρφωσης ο οποίος ακουμπούσε με τους άλλους και παρείχε στήριξη στο τεμάχιο ώστε να μπορέσει στη συνέχεια να καταπονηθεί με μεγαλύτερο φορτίο.

Τρόπος κατάρρευσης

Το συγκεκριμένο δοκίμιο ξεκίνησε και αυτό με τη σειρά του να παραμορφώνεται με τη δημιουργία μη αξονοσυμμετρικών (μη εκτατών) λοβών παραμόρφωσης. Από το διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης αλλά και από το θλιμμένο τεμάχιο φαίνεται ότι δημιουργήθηκαν τρεις (3) λοβοί. Πιθανολογείται ότι αρχικά δημιουργήθηκαν δύο λοβοί στο άνω και κάτω μέτωπο του δοκιμίου και κατόπιν ένας ενδιάμεσος. Ύστερα από τη δημιουργία των δύο πρώτων λοβών η αντοχή του τεμαχίου σημείωσε κατακόρυφη πτώση περί τα 2000 N, ενώ στη συνέχεια σημείωσε άνοδο όταν οι λοβοί άρχισαν να εφάπτονται με τον ενδιάμεσο. Χαρακτηριστικό είναι ότι οι λοβοί αυτοί διεύρυναν την περίμετρο του δοκιμίου στο επίπεδο της διατομής τους διότι το κέλυφος μέσα στο βραστό νερό έγινε πιο όλκιμο και πιο ελατό. Ο τρόπος παραμόρφωσης χαρακτηρίζεται ως 2-d (diamond) με τα χείλη του κελύφους να έχουν πάρει τη μορφή έλλειψης. Το τεμάχιο συμπίεστηκε επιτυχώς ως τα 126,00 mm μετατόπισης με τελικό ύψος 63,00 mm. Ύστερα αφέθηκε ελεύθερο και έφτασε τα 74,30 mm ύψους μετά την αποσυμπίεση του.



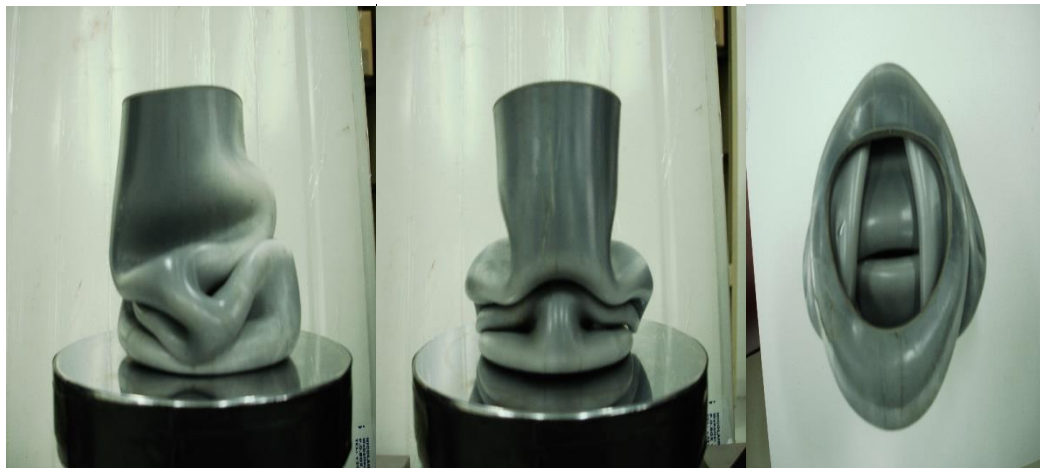
Τελικές όψεις δοκιμίου



άνω όψη

εμπρός όψη

πλάγια αριστερή όψη



πλάγια δεξιά όψη

πίσω όψη

κάτω όψη

Εμβάπτιση θλιμμένου δοκιμίου σε δοχείο με βραστό νερό

Το συμπιεσμένο δοκίμιο τοποθετήθηκε σε δοχείο με βραστό νερό και ανατάχθηκε πλήρως στην αρχική του διαμόρφωση (μνήμη σχήματος) μέσα σε χρόνο 60 sec. Αλλοιώσεις παρατηρήθηκαν στα άνω και κάτω χείλη του, ενώ η διάμετρος του ήταν αρκετά αυξημένη στο άνω μέρος με σταδιακή μείωση προς τα κάτω θυμίζοντας κωνικό σχήμα.



Σχήμα 4.7: Αναταγμένο δοκίμιο 4_B

Συμπεράσματα

Η μέγιστη αντοχή του δοκιμίου 4_B ανήλθε στα $P_{\max} = 8948 \text{ N}$, ενώ η μέση τιμή του φορτίου υπολογίστηκε στα $P_m = 5307,93 \text{ N}$. Ξεκίνησε να παραμορφώνεται με το μοτίβο δημιουργίας μη αξονοσυμμετρικών λοβών παραμόρφωσης οι οποίοι αύξησαν την περίμετρο του. Εικάζεται ότι αρχικά δημιουργήθηκαν δύο λοβοί στα άκρα του δοκιμίου και στη συνέχεια ένας ενδιάμεσος. Τέλος, εμβαπτίστηκε σε δοχείο με βραστό νερό και ανατάχθηκε στην αρχική του διαμόρφωση.



4.9 Πειραματικό δοκίμιο 5 – Δοκιμή εφελκυσμού

Από τετραγωνικό σωλήνα PVC αποκόπηκε με τη χρήση πριονοκορδέλας κατάλληλη λωρίδα έτοιμη προς επεξεργασία. Η λωρίδα αυτή προετοιμάστηκε μέχρι το τελικό της σχήμα (όπως απεικονίζεται παρακάτω) με σκοπό να υποστεί μία δοκιμή εφελκυσμού. Το κατεργασμένο τεμάχιο προσαρμόστηκε στις αρπάγες εφελκυσμού της πρέσας INSTRON, η οποία ρυθμίστηκε με ταχύτητα εφελκυσμού 10mm / min. Η πειραματική διαδικασία σταμάτησε όταν το δοκιμαστικό τεμάχιο έσπασε.

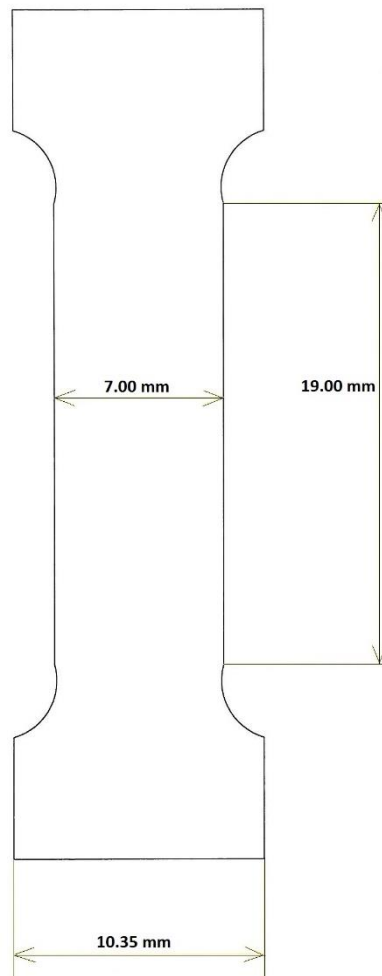
Διαστάσεις δοκιμαστικού δοκιμίου

Πλάτος δοκιμίου: $W = 10,35 \text{ mm}$

Πάχος δοκιμίου: $t = 2,50 \text{ mm}$

Ενεργό πλάτος: $W_{εν} = 7,00 \text{ mm}$

Ενεργό μήκος: $L = 19,00 \text{ mm}$

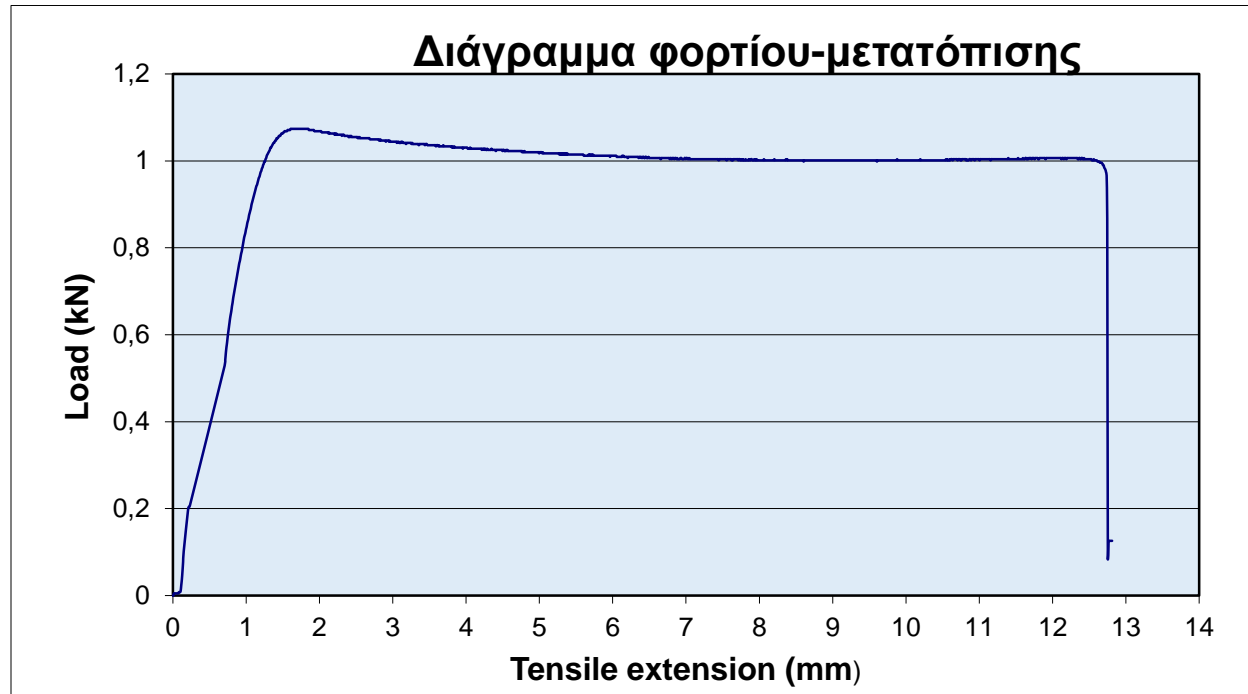


Σχήμα 4.8: Κατεργασμένο δοκίμιο έτοιμο προς εφελκυσμό

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται το διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης όπως αυτό προέκυψε κατά τη διαδικασία εφελκυσμού του τεμαχίου 5:



Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης



Σχήμα 4.9: Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης τεμαχίου 5

Επεξηγήσεις

Το δοκίμιο 5 ξεκίνησε να παραμορφώνεται καθώς η πειραματική διάταξη άρχισε να το εφελκεί. Η μέγιστη αντοχή του τεμαχίου έφτασε μέχρι τα 1.070 N όπου και διατηρήθηκε κοντά σε αυτά τα επίπεδα μέχρι τα 12,80 mm μετατόπισης. Η μέση αντοχή του υπολογίστηκε στα 859,41 N. Κατόπιν των 12,80 mm μετατόπισης το δοκίμιο έσπασε και η πειραματική διαδικασία σταμάτησε.

Η απορροφούμενη ενέργεια υπολογίστηκε στα 110 J, ενώ ο δείκτης ομοιομορφίας φορτίου CFE στα 0,80. Από την τιμή αυτή εξάγεται το συμπέρασμα ότι η καμπύλη του φορτίου για το δοκίμιο 5 ήταν αρκετά σταθερή.

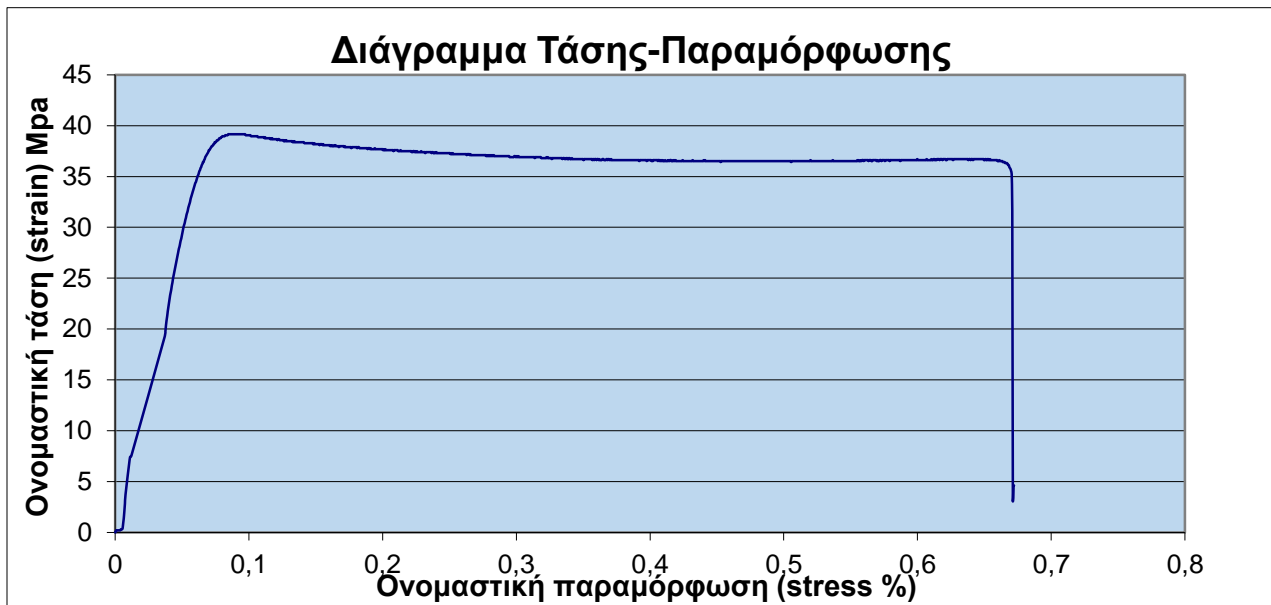
Από τα αποτελέσματα του διαγράμματος φορτίου – μετατόπισης υπολογίστηκαν οι τιμές του διαγράμματος τάσης – παραμόρφωσης. Η καμπύλη του διαγράμματος αυτού, όπως αναμενόταν, παρουσίασε ανάλογη μορφή με την καμπύλη του διαγράμματος φορτίου – μετατόπισης. Η



ονομαστική τάση σ (strain) προέκυψε ως ο λόγος του φορτίου προς τη μετατόπιση για κάθε σημείο του διαγράμματος. Αντίστοιχα, η ονομαστική παραμόρφωση ε (stress) υπολογίστηκε ως το πηλίκο της μετατόπισης προς το ενεργό μήκος για κάθε σημείο.

Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται το διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης όπως αυτό προέκυψε:

Διάγραμμα Τάσης-Παραμόρφωσης



Σχήμα 5.9: Εφελκυσμένο δοκίμιο ύστερα από το πέρας του πειράματος



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΣΤΙΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΔΙΕΞΑΓΩΓΗΣ ΤΟΥΣ

5.1 Γενικά στοιχεία

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, μελετήθηκε η συμπεριφορά ίδιων PVC κελυφών σε δύο διαφορετικές συνθήκες αξονικής συμπίεσης. Τα τέσσερα δοκίμια που καταπονήθηκαν σε συνθήκες περιβάλλοντος εργαστηρίου συμβολίστηκαν με $_A$, ενώ τα όμοια δοκίμια που συμπίεστηκαν μέσα σε κατάλληλα διαμορφωμένο δοκίμιο με βραστό νερό συμβολίστηκαν ως $_B$.

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται σύγκριση της μέγιστης αντοχής (P_{max}), της μέσης αντοχής (P_m), της απορροφούμενης ενέργειας (E_{abs}) και του δείκτη ομοιομορφίας φορτίου (CFE) μεταξύ των ίδιων κελυφών για τις διαφορετικές θερμοκρασιακές συνθήκες θλίψης A και B.

5.2 Ορισμός μεγεθών σύγκρισης

Μέγιστο φορτίο P_{max} : Ως μέγιστο φορτίο θλίψης λογίζεται συνήθως το πρώτο τοπικό μέγιστο του φορτίου. Επιθυμητό είναι η μετάβαση στην πλαστική περιοχή των κατασκευών να γίνεται ομαλά και στη συνέχεια το φορτίο να διατηρείται σε σταθερά επίπεδα χωρίς να παρατηρούνται πολύ μεγάλα αρχικά φορτία.

Μέσο φορτίο θλίψης P_m : Το μέσο φορτίο εκφράζει την ποσότητα ενέργειας που απορροφά το δοκίμιο και υπολογίζεται από τα δεδομένα της μηχανής θλίψης.

Απορροφούμενη ενέργεια E_{abs} : Η απορροφούμενη ενέργεια είναι επιθυμητό να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ώστε το διάγραμμα των δοκιμίων να έχουν μεγάλο εμβαδόν και σταθερή καμπύλη φορτίου. Υπολογίζεται από τον τύπο $E_{abs} = \int P \cdot d\delta = P_m \cdot \delta$, όπου δ : η συνολική μετατόπιση του εμβόλου. (μονάδες: Kn x mm = Joule)

Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου CFE: Ο δείκτης αυτός δείχνει το πόσο σταθερή είναι η καμπύλη του φορτίου και υπολογίζεται ως ο λόγος $CFE = \frac{P_m}{P_{max}}$, με ιδανική τιμή την μονάδα.



5.3 Σύγκριση συμπεριφοράς παραμόρφωσης δοκιμίων 1_A και 1_B

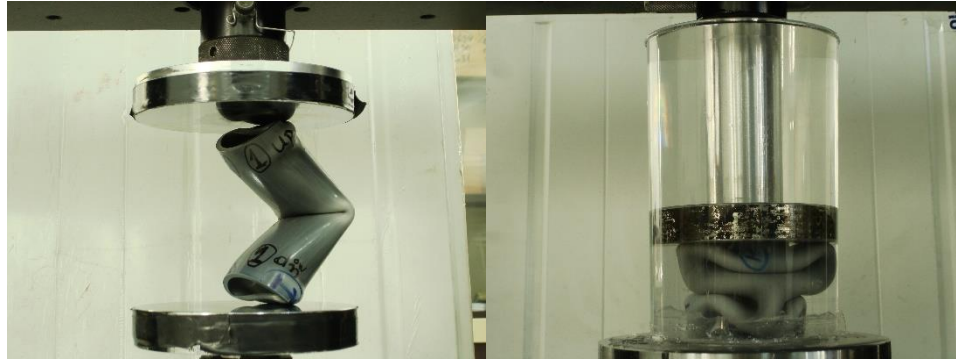
Κατά τη διεξαγωγή του πειράματος συμπίεσης μέσα σε δοχείο με βραστό νερό σε σχέση με το πείραμα σε θερμοκρασία περιβάλλοντος παρατηρήθηκε για το ίδιο δοκίμιο 1 εξαιρετικά μεγάλη μείωση της αντοχής του. Ενώ η μέγιστη αντοχή του δοκιμίου 1_A ανήλθε σε φορτίο 40912 N, στο δοκίμιο 1_B σημειώθηκε στα 8902 N. Η μέση αντοχή του κυμάνθηκε σε κανονικές θερμοκρασιακές συνθήκες στα 12143,37 N, φθίνοντας αρκετά ως τα 4002,04 N μέσα σε βραστό νερό.

Επίσης, η συμπίεση του δοκιμίου μέσα στο νερό δεν προκάλεσε στο δοκίμιο λυγισμό στο μέσον του όπως συνέβη στο τεμάχιο 1_A, αλλά δημιουργήθηκαν τρεις μη αξονοσυμμετρικοί λοβοί παραμόρφωσης. Αρχικά δημιουργήθηκαν δύο λοβοί στα άκρα του τεμαχίου και στη συνέχεια ένας στο ενδιάμεσο. Κατόπιν της διεξαγωγής των συγκεκριμένων πειραμάτων εξήλθε το συμπέρασμα ότι το συγκεκριμένο κέλυφος παρουσιάζει κατακόρυφη μείωση της αντοχής του όταν αυτό βρίσκεται και κατ' επέκτασιν διαρρέεται από καυτό νερό, καθώς και αλλαγή στη συμπεριφορά του κατά τη θλίψη του.

Η απορροφούμενη ενέργεια του δοκιμίου 1_A υπολογίστηκε στα 1530,06 J, ενώ του 1_B στα 504,26 J. Αυτό είναι λογικό διότι το δοκίμιο 1_A υπέστη λυγισμό με αποτέλεσμα η πειραματική διαδικασία να σταματήσει πριν ολοκληρωθεί.

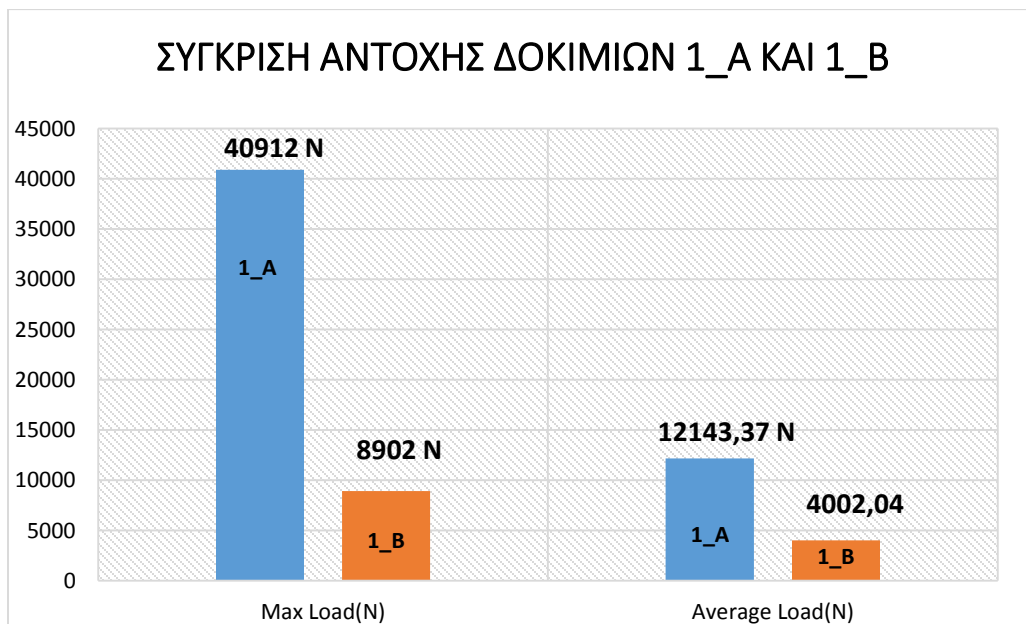
Ο δείκτης CFE για τα κελύφη 1_A και 1_B υπολογίστηκε στα 0,297 και 0,450 αντίστοιχα τα οποία απέχουν πολύ από τη μονάδα με άμεσο συμπέρασμα η καμπύλη φορτίου να μην είναι σταθερή.

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται τα δοκίμια όπως αυτά παραμορφώθηκαν στις δύο συνθήκες.



Σχήμα 5.1 : Συμπιεσμένα δοκίμια 1_A και 1_B

Στο επόμενο διάγραμμα παρατηρούμε σχηματικά την μέγιστη και μέση αντοχή των θλιμμένων τεμαχίων.



Σχήμα 5.2 : Αντοχές δοκιμίων 1_A και 1_B



5.4 Σύγκριση συμπεριφοράς παραμόρφωσης δοκιμίων 2_A και 2_B

Συγκρίνοντας τις δύο θερμοκρασιακές συνθήκες διεξαγωγής του πειράματος για το δοκίμιο 2 παρατηρήθηκε μεγάλη διαφοροποίηση στην αντοχή του. Σε συνθήκες θερμοκρασίας περιβάλλοντος η μέγιστη αντοχή του έφτασε έως τα 25879 N ενώ σε συνθήκες βραστού νερού τα 3807 N. Επίσης, σύμφωνα με την καμπύλη φορτίου – μετατόπισης το δοκίμιο 2_A σημείωσε ως μέγιστο φορτίο το πρώτο τοπικό μέγιστο της καμπύλης και στη συνέχεια η αντοχή του μειωνόταν. Εν αντιθέσει, η αντοχή του δοκιμίου 2_B συνεχώς αυξανόταν μέχρι το τέλος της πειραματικής διαδικασίας. Στο κέλυφος 2_A σημειώθηκαν πέντε μη αξονοσυμμετρικοί λοβοί παραμόρφωσης ξεκινώντας από το άνω μέτωπο διαδοχικά προς τα κάτω χωρίς να εκτίνουν την περίμετρο του δοκιμίου. Ωστόσο κατά την καταπόνηση του δοκιμίου 2_B σημειώθηκαν τρεις μη αξονοσυμμετρικοί λοβοί, οι δύο δημιουργήθηκαν ταυτόχρονα στο άκρο του και ο τρίτος ενδιάμεσα τους οι οποίοι διεύρυναν τη διατομή του. Η διαφοροποίηση αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι μέσα σε βραστό νερό οι κινήσεις των μορίων του πλαστικού ήταν πιο έντονες με αποτέλεσμα το δοκίμιο να είναι πιο όλκιμο και πιο ελατό στο εγκάρσιο επίπεδο παραμόρφωσης. Αντίστοιχα, η μέση αντοχή του από τα 9152,85 N έπεσε στα 1160,13 N.

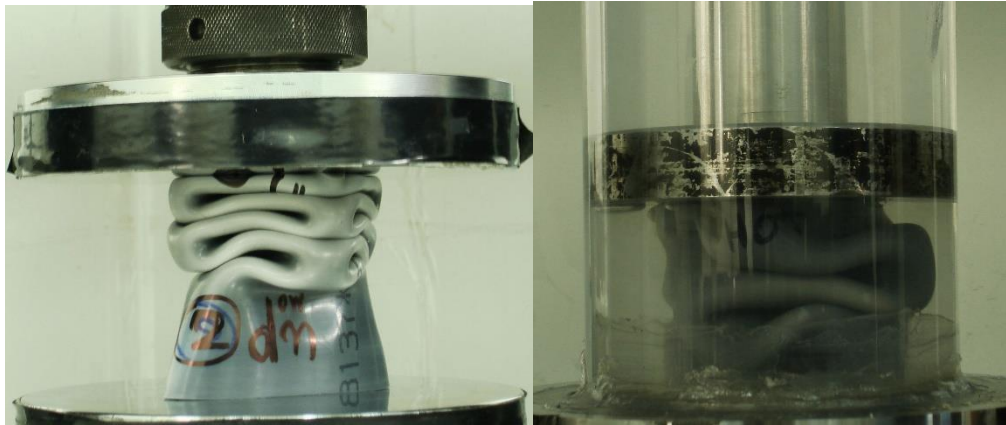
Τα δύο δοκίμια κατάφεραν και ανατάχθηκαν στην αρχική τους διαμόρφωση κατόπιν της εμβάπτισης τους σε βραστό νερό μέσα σε χρόνο 60 sec.

Η τιμή της απορροφούμενης ενέργειας για το δοκίμιο 2_A υπολογίστηκε στα 1153,26 J, ενώ για το 2_B στα 146,17 J. Παρατηρούμε ότι για ίδια δοκίμια η πειραματική δοκιμή σε θερμοκρασιακές συνθήκες περιβάλλοντος εκλύει αισθητά μεγαλύτερη ενέργεια σε σχέση με τη δοκιμή σε θερμοκρασιακές συνθήκες θλίψης βραστού νερού.

Ο δείκτης CFE υπολογίστηκε στα 0,354 και 0,305 για τα δοκίμια 2_A και 2_B αντίστοιχα. Συμπεραίνουμε ότι και τα δύο κελύφη είχαν αρκετά ασταθείς καμπύλες φορτίου, αφού οι τιμές τους απέχουν κατά πολύ από τη μονάδα.

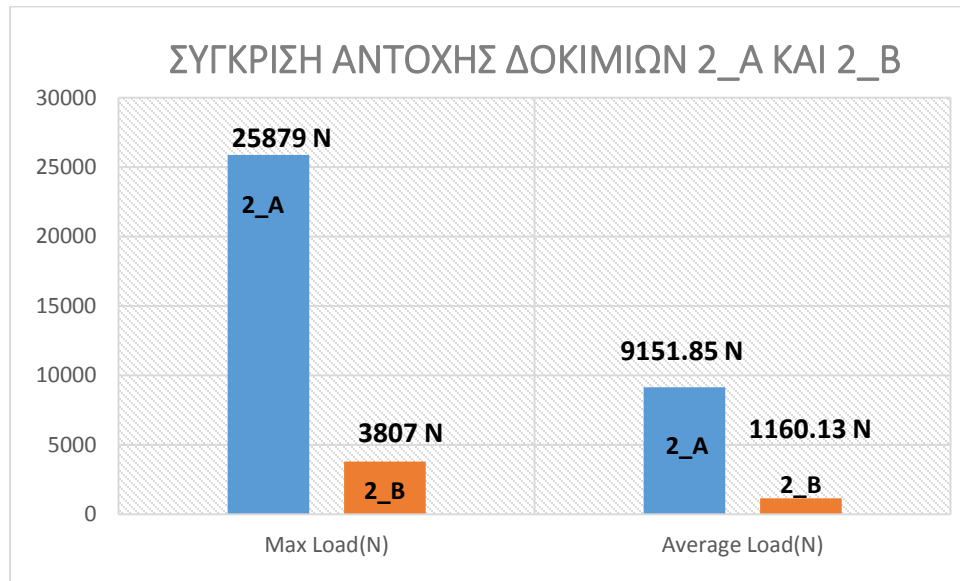


Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα εν λόγω παραμορφωμένα δοκίμια :



Σχήμα 5.3 : Συμπιεσμένα δοκίμια 2_A και 2_B

Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζεται ποιοτικά η μέγιστη και μέση αντοχή των δοκιμίων :



Σχήμα 5.4 : Αντοχές δοκιμίων 2_A και 2_B



5.5 Σύγκριση συμπεριφοράς παραμόρφωσης δοκιμίων 3_A και 3_B

Η μέγιστη αντοχή του δοκιμίου 3 μέσα σε περιβάλλον πίεσης βραστού νερού έφτασε τα 15586 N ενώ σε συνθήκες περιβάλλοντος θερμοκρασίας δωματίου 20° C τα 63543 N. Η μέση αντοχή του από τα 7910,31 N ανέβηκε στα 29175,80 N. Κατά τη συμπίεση του κελύφους 3_A δημιουργήθηκαν τέσσερις μη αξονοσυμμετρικοί λοβοί από το κάτω άκρο διαδοχικά προς τα πάνω. Το τεμάχιο 3_B παραμορφώθηκε δημιουργώντας τρεις μη αξονοσυμμετρικούς λοβούς, με τους δύο πρώτους να δημιουργούνται ταυτόχρονα στα άκρα του και κατόπιν τον τρίτο στο ενδιάμεσο τους, οι οποίοι επέκτειναν την διατομή του. Επίσης, στο κέλυφος 3_B το πρώτο μέγιστο του φορτίου στην καμπύλη δεν ήταν και το ολικό μέγιστο φορτίο αλλά η αντοχή του αυξανόταν συνεχώς. Παρατηρείται για άλλη μια φορά ότι η αντοχή του δοκιμίου μειώνεται ραγδαία μέσα στο βραστό νερό.

Τα δύο δοκίμια κατάφεραν και ανατάχθηκαν στην αρχική τους διαμόρφωση κατόπιν της εμβάπτισης τους σε βραστό νερό μέσα σε χρόνο 60 sec.

Αναφορικά με την απορροφούμενη ενέργεια, αυτή υπολογίστηκε στα 3676,80 J για το τεμάχιο 3_A και στα 996,70 J για το 3_B. Αποτέλεσμα αυτής είναι ότι δοκιμές μέσα σε βραστό νερό απορροφούν αρκετά λιγότερη ενέργεια από αυτές σε συνθήκες περιβάλλοντος.

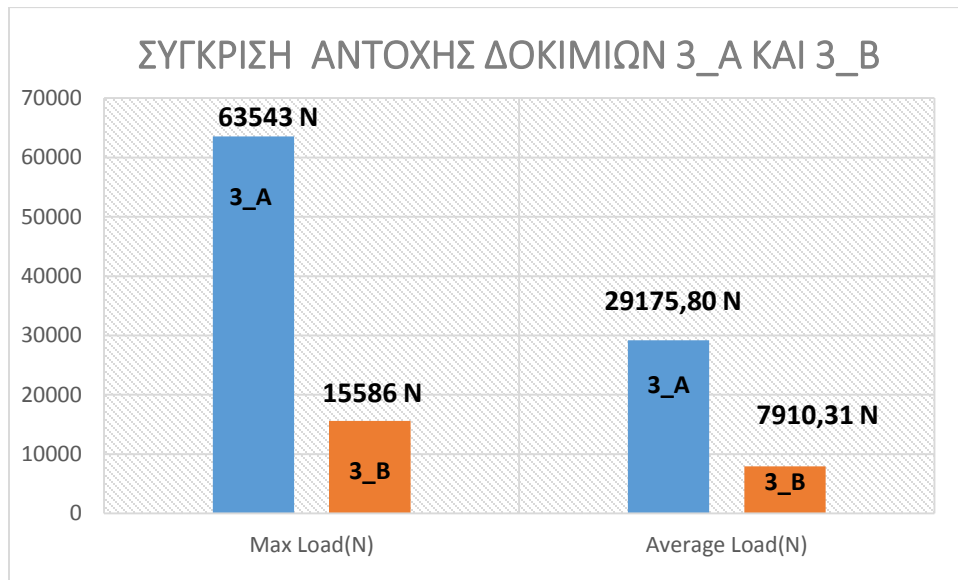
Ο δείκτης CFE υπολογίστηκε στα 0,45 και 0,507 για τα κελύφη 3_A και 3_B αντίστοιχα. Συμπεραίνουμε ότι η δοκιμή σε συνθήκες περιβάλλοντος χαρακτηρίζεται από πιο ασταθή καμπύλη φορτίου.

Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζονται τα συγκεκριμένα δοκίμια όπως αυτά παραμορφώθηκαν :



Σχήμα 5.5 : Συμπιεσμένα δοκίμια 3_A και 3_B

Οι αντοχές των δοκιμών παρουσιάζονται σχηματικά στο γράφημα που ακολουθεί :



Σχήμα 5.6 : Αντοχές δοκιμών 3_A και 3_B



5.6 Σύγκριση συμπεριφοράς παραμόρφωσης δοκιμίων 4_A και 4_B

Η αντοχή του τεμαχίου 4 παρουσίασε σημαντικές διαφορές κατά τη σύγκριση των δύο συνθηκών διεξαγωγής του πειράματος. Σε συνθήκες θερμοκρασίας δωματίου το δοκίμιο ‘‘άντεξε’’ μέγιστη καταπόνηση 42442 N, ενώ μέσα στο δοχείο με βραστό νερό τα 8948 N μέχρι να ξεκινήσει να παραμορφώνεται. Επίσης, σύμφωνα με την καμπύλη φορτίου – μετατόπισης το δοκίμιο 4_A σημείωσε ως μέγιστο φορτίο το πρώτο τοπικό μέγιστο της καμπύλης και στη συνέχεια η αντοχή του μειωνόταν. Εν αντιθέσει, η αντοχή του δοκιμίου 4_B συνεχώς αυξανόταν μέχρι το τέλος της πειραματικής διαδικασίας. Στο κέλυφος 4_A σημειώθηκαν τέσσερις μη αξονοσυμμετρικοί λοβοί παραμόρφωσης ξεκινώντας από το άνω μέτωπο διαδοχικά προς τα κάτω χωρίς να εκτίνουν την περίμετρο του δοκιμίου. Ωστόσο κατά την καταπόνηση του δοκιμίου 4_B σημειώθηκαν τρεις μη αξονοσυμμετρικοί λοβοί, οι δύο δημιουργήθηκαν ταυτόχρονα στα άκρα του και ο τρίτος ενδιάμεσα τους οι οποίοι διεύρυναν τη διατομή του. Η μέση αντοχή του από τα 14582,90 N σε κανονικές συνθήκες έπεσε στα 5307,93 N μέσα σε βραστό νερό. Αυτό ήταν αναμενόμενο όπως παρατηρήθηκε και στα προηγούμενα πειράματα όπου η αντοχή των δοκιμίων μέσα σε βραστό νερό ήταν αρκετά χαμηλότερη.

Η τιμή της απορροφούμενης ενέργειας υπολογίστηκε για το πειραματικό κέλυφος 4_A στα 1837,44 J και στο 4_B στα 668,80 J. Παρατηρείται ότι για μία ακόμη φορά οι δοκιμές μέσα σε βραστό νερό απορροφούν λιγότερη ενέργεια σε σχέση με τις δοκιμές σε συνθήκες περιβάλλοντος.

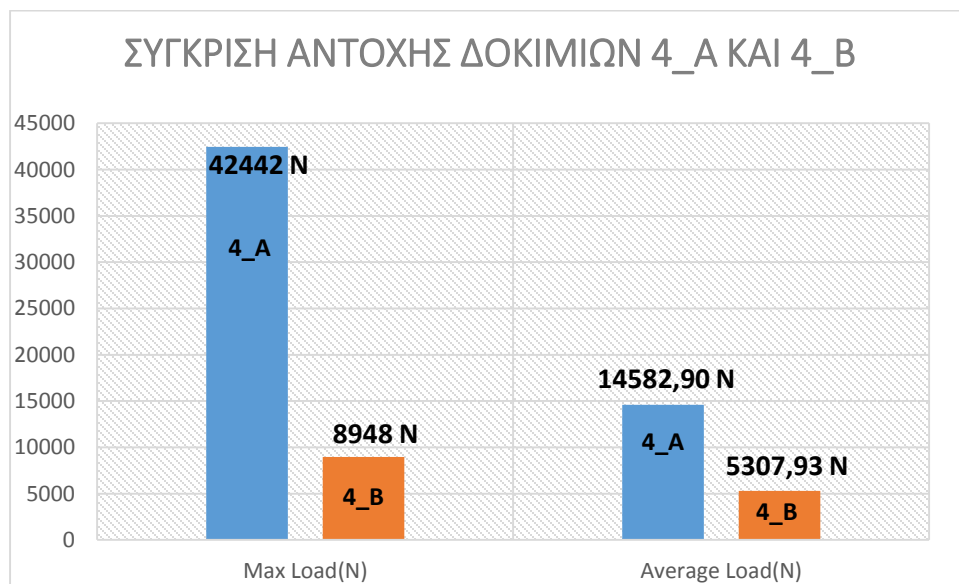
Ο δείκτης CFE υπολογίστηκε στα 0,344 για το δοκίμιο 4_A και στα 0,593 για το δοκίμιο 4_B. Παρουσιάζει ενδιαφέρον ο δείκτης αυτός με την καμπύλη φορτίου να είναι πιο σταθερή μέσα σε συνθήκες βραστού νερού.

Η παραμόρφωση των δοκιμίων παρουσιάζεται ακολούθως :



Σχήμα 5.7 : Συμπιεσμένα δοκίμια 4_A και 4_B

Οι μέγιστη και μέση παραμόρφωση παρουσιάζονται στο γράφημα που ακολουθεί:



Σχήμα 5.8 : Αντοχές δοκιμίων 4_A και 4_B



5.7 Συμπεράσματα

Κατόπιν της πειραματικής διαδικασίας και συλλέγοντας συγκεντρωτικά όλα τα αποτελέσματα μπορεί να εξαχθεί με ασφάλεια το συμπέρασμα ότι στις δοκιμές θλίψης σε θερμοκρασιακές συνθήκες βραστού νερού τα κελύφη PVC παραμορφώνονται πιο άτακτα με αποτέλεσμα να διευρύνεται η διατομή τους στο εγκάρσιο επίπεδο. Οι λοβοί παραμόρφωσης που δημιουργούνται εκκινούν ταυτόχρονα από τα άκρα του τεμαχίου και στη συνέχεια δημιουργείται ένας ενδιάμεσος. Η μέγιστη αντοχή τους δεν σημειώνεται στο πρώτο μέγιστο φορτίο αλλά συνήθως στο τέλος της πειραματικής διαδικασίας. Εν αντιθέσει, στις συνθήκες συμπίεσης περιβάλλοντος οι λοβοί εκκινούν από ένα εκ των δύο άκρων του δοκιμίου και συνεχίζουν διαδοχικά προς το άλλο. Επιπλέον, και στις δύο περιπτώσεις τα δοκίμια καταπονήθηκαν με το ίδιο μοτίβο κατάρρευσης (μη αξονοσυμμετρικοί λοβοί 2-D diamond) ενώ οι γραμμές που σχηματίζονται από τους λοβούς είναι πιο ισχνές για τις συνθήκες βραστού νερού, κατόπιν της ανάταξης των δοκιμίων. Ίδια κελύφη παρουσιάζουν αρκετά μεγαλύτερη αντοχή σε συνθήκες καταπόνησης περιβάλλοντος σε σύγκριση με συνθήκες βραστού νερού. Αποτέλεσμα αυτού είναι η απορροφούμενη ενέργεια να είναι πολύ μεγαλύτερη και η καμπύλη του φορτίου πιο σταθερή. Τέλος, όλα τα συμπίεσμένα δοκίμια παρουσίασαν σχετικά χαμηλό δείκτη ομοιομορφίας φορτίου CFE ($\leq 50\%$) με αποτέλεσμα οι καμπύλες φορτίου να χαρακτηριστούν αρκετά ασταθείς. Το δοκίμιο 5 που εφελκύστηκε παρουσίασε μεγάλο δείκτη CFE άρα και σταθερή καμπύλη φορτίου. Τα δοκίμια που παραμορφώθηκαν μέσα σε βραστό νερό παρουσίασαν μεγαλύτερο ή ίσο δείκτη CFE σε σχέση με τις δοκιμές σε συνθήκες περιβάλλοντος.

**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- 1. PVC plastic: a history of systems development and entrenchment**, Karel Mulder , Marjolijn Knot (2001)
- 2. A comparative study of the thermal behavior of PVC, a series of synthesized chlorinated polyethylenes and HDPE**, A.J. Varma, S.V. Deshpande, P. Kondapalli (1997)
- 3. Technical progresses for PVC production**, Y. Saeki, T. Emura (2001)
- 4. Manufacture and processing of PVC**, R.H.BURGESS (2005)
- 5. Recycling of PVC wastes**, Mehdi Sadat-Shojai, Gholam-Reza Bakhshandeh (2010)
- 6. Industrial Catalysis**, Bruce E. Leach (1983)
- 7. Hydrochlorination of acetylene using supported bimetallic Au-based catalysts**, Marco Conte, Albert F. Carley, Gary Attard, Andrew A. Herzing, Christopher J. Kiely, Graham J. Hutchings (2008)
- 8. Focus on Polyvinyl Chloride**, Geoff Pritchard (2002)
- 9. Effect of different clay treatment on morphology and mechanical properties of PVC-clay nanocomposites**, Chaoying Wan, Xiuying Qiao, Yong Zhang, , Yinxi Zhang (2003)
- 10. Vinyl Chloride: An Assessment of the risk of occupational exposure**, I. F. H. purchase Central Toxicology Laboratory J. STAFFORD Plastics and Petrochemicals Division and G. M. PADDLE Central Medical Group, Imperial Chemical Industries pie, Alderley Park, Macclesfield, Cheshire, England (1987)
- 11. Major accidents in process industries and an analysis of causes and Consequences**, Faisal I. Khan, S.A. Abbasi (1999)
- 12. Microbial colonization of different support materials used to enhance the methanogenic process**, J. M. Sanchez, S. Arijio, M. A. Mufioz, M. A. Morifiigo, J. J. Borrego (1993)
- 13. Mechanical behaviour of a plasticized PVC subjected to ethanol exposure**, Q. Yu, A.P.S. Selvadurai (2005)
- 14. German investigations on morbidity and mortality of workers exposed to vinyl chloride**, H. Weber, W. Reinl, E. Greiser (1981)



15. **Effects of polyvinylchloride films and edible starch coatings on quality aspects of refrigerated Brussels sprouts**, Sonia Z. Vin, Alicia Mugridge, Maria A. Garcia, Ricardo M. Ferreyra, Miriam N. Martino, Alicia R. Chaves, Noemi E. Zaritzky (2007)
16. **Poly(vinyl chloride) (PVC) hollow fiber ultrafiltration membranes prepared from PVC/additives/solvent**, Jian Xu, Zhen-Liang Xu (2002)
17. **Effect of additives on dechlorination of PVC by mechanochemical treatment**, Shu Saeki, Junya Kano, Fumio Saito, Kaoru Shimme, Seiichi Masuda, Tsuyoshi Inoue (2000)
18. **Study of the migration of PVC plasticizers**, A. Marcilla, S. Garcia, J.C, Garcia-Quesada (2003)
19. **Swelling of PVC latex particles by VCM**, Holger Nilsson, Christer Silvegren, Bertil Tornell (1977)
20. **Vinyl chloride and the liver**, Morris Sherman (2009)
21. **Stabilization of poly(vinyl chloride)/epoxidized natural rubber (PVC/ENR) blends**, Chantara Thevy Ratnam, Khairul Zaman (1998)
22. **Mechanical properties evaluation of PVC/plasticizers and PVC/thermoplastic polyurethane blends from extrusion processing**, V.J.R.R. Pita, E.E.M. Sampaio, E.E.C. Monteiro (2001)
23. **Layered and intercalated hydrotalcite-like materials as thermal stabilizers in PVC resin**, Yanjun Lin, Jianrong Wang, David G. Evans, Dianqing Li (2006)
24. **Pyrolysis studies of PP/PE/PS/PVC/HIPS-Br plastics mixed with PET and dehalogenation (Br, Cl) of the liquid products**, Thallada Bhaskar, Jun Kaneko, Akinori Mutoa, Yusaku Sakata, Emma Jakab, Toshiki Matsui, Md. Azhar Uddin (2004)
25. **Physical ageing and creep in PVC**, B. E. Read, G. D. Dean, P. E. Tomlins, J. L. Lesniarek-Hamid (1991)
26. **Resistive cathode transparency**, G. Battistoni, P. Campana, V. Chiarella, U. Denni, E. Iarocci, G. Nicoletti (1982)
27. **Recent developments in the chemistry of halogen-free flame retardant polymers**, Shui-Yu Lu, Ian Hamerton (2002)
28. **Inextensional collapse of thin-walled tubes under axial compression**, W. Johnson, P.D. Soden, S.T.S. Al-Hassani, Journal of Strain Analysis (1977)



29. **Simplified crushing analysis of thin-walled columns and beams**, Wlodzimierz Abramowicz, Eng. Transactions (1981)
30. **On the crushing mechanics of thin-walled structures**, T. Wierzbicki, W. Abramowicz, J. Appl. Mech. (1983)
31. **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 (2010)
32. **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. (1983)
33. **Dynamic axial crushing of circular tubes**, Wlodzimierz Abramowicz, Norman Jones, Int. J. Impact Engng. (1984)
34. **An approximate analysis of the collapse of thin cylindrical shells under axial loading**, J.M. Alexander, Q. J. Mech. Appl. Math. (1960)
35. **An analysis of axi-symmetric axial collapse of round tubes**, N.K. Gupta & R. Velmurugan, Thin-Walled Structures (1995)
36. **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)
37. **Mathematical modeling of axial crushing of cylindrical tubes**, N.K. Gupta, Husain Abbas, Thin-Walled Structures (2000)
38. **The large scale crumpling of thin cylindrical columns**, A.G. Pugsley, M. Macaulay, Quart. J. Mech. and Applied Math. (1960)
39. **Shape – memory polymers**, A. Lendlein, S. Kelch (2002)
40. **Initiation of shape – memory effect by inductive heating of magnetic nanoparticles in thermoplastic polymers**, R. Mohr, K. Kratz, T. Weigel (2006)
41. **Polyurethanes having shape memory effects**, B. Kim, S.Y. Lee (1996)