



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

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ Ε. ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ

## **ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Η ΕΞΩΤΕΡΙΚΗ ΑΝΑΔΙΠΛΩΣΗ ΚΕΛΥΦΩΝ ΛΕΠΤΟΥ ΠΑΧΟΥΣ ΩΣ  
ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΕΣ  
ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΕΙΣ

ΑΡΙΣΤΕΙΔΗΣ Α. ΒΕΛΛΗΣ

ΑΘΗΝΑ, 2009

*Αφιερώνεται στην οικογένειά μου*

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Πρόλογος

## *Κεφάλαιο 1*

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	8
1.1 Γενικά.....	8
1.1 Αξονική καταπόνηση δοκιμίων-Ικανότητα απορρόφησης ενέργειας.....	11
1.3 Σχεδιασμός συστημάτων απορρόφησης ενέργειας.....	12
1.4 Αξιολόγηση συμπεριφοράς συστημάτων απορρόφησης ενέργειας.....	15
1.5 Χρήση σωλήνων σε συστήματα απορρόφησης ενέργειας.....	16
1.5.1 Γενικά.....	16
1.5.2 Σύντομη αναφορά παλαιότερων αναλύσεων - προσεγγίσεων.....	18

## *Κεφάλαιο 2*

2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ.....	19
2.1 Μηχανική της στατικής και δυναμικής διαδικασίας αναδίπλωσης.....	19
2.2 Χαρακτηριστικά εξωτερικής αναδίπλωσης μεταλλικών σωλήνων.....	29
2.2.1 Σύμβολα.....	29
2.2.2 Θεωρητική ανάλυση αναδίπλωσης σε μήτρα που φέρει καμπυλότητα-κωνικότητα.....	30
2.2.3 Κριτήρια για εξωτερική αναδίπλωση και ολίσθηση.....	34
2.2.4 Αναδίπλωση σε μήτρα ειδικής μορφής με καμπυλότητα στη βάση.....	37
2.3 Αξονική καταπόνηση σωλήνων τετραγωνικής διατομής που οδηγεί σε διάρρηξη και ανάκαμψη του σωλήνα.....	41
2.3.1 Θεωρητικό μοντέλο και βασικές προϋποθέσεις.....	41

2.3.2 Καθορισμός του φορτίου συμπίεσης και της ακτίνας ανάκαμψης σε quasi-static (οιωνεί-στατική) κατάσταση ..... 44

2.3.4 Επίδραση ρυθμού παραμόρφωσης..... 50

### Κεφάλαιο 3

3. Πειραματικό μέρος ..... 53

3.1 Πειραματικός εξοπλισμός..... 53

3.2 Ειδικές μορφές εργαλείων – μητρών που χρησιμοποιήθηκαν..... 58

3.3 Κατασκευή δοκιμίων ..... 61

3.4 Στατική αξονική συμπίεση δοκιμίων σε κυλινδρική μήτρα ειδικής μορφής με ακτίνα καμπυλότητας  $r = 5\text{mm}$  στη βάση..... 65

3.4.1 Δοκίμιο #1..... 65

3.4.2 Δοκίμιο #2..... 67

3.4.3 Δοκίμιο #3..... 69

3.4.4 Δοκίμιο #4..... 71

3.5 Αξονική συμπίεση δοκιμίων σε κωνική μήτρα ημιγωνίας κορυφής  $\alpha = 65^\circ$  για τα δοκίμια #1,#2,#3 και  $\alpha = 40^\circ$  για το δοκίμιο #4 ..... 73

3.5.1 Δοκίμιο #1..... 73

3.5.2 Δοκίμιο #2..... 75

3.5.3 Δοκίμιο #3..... 77

3.5.4 Δοκίμιο #4..... 78

3.6 Συγκεντρωτικός Πίνακας-Συγκριτικά Γραφήματα..... 80

### Κεφάλαιο 4

4. Αριθμητική Προσομοίωση – Μοντελοποίηση με χρήση λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων LS-DYNA ..... 83

4.1 Γενικά στοιχεία για τα προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων..... 83

4.2 Γενικά στοιχεία για τον κώδικα LS-DYNA .....	84
4.3 Χρήση του προγράμματος .....	85
4.4 Σύγκριση πειραματικών δοκιμών και αριθμητικής προσομοίωσης.....	87
4.4.1 Κυλινδρικό κέλυφος με πάχος τοιχώματος $t=1\text{mm}$ ( $D=48\text{mm}$ ), καταπονούμενο σε κυλινδρική μήτρα με ακτίνα καμπυλότητας $r = 5\text{mm}$ .....	87
4.4.2 Κυλινδρικό κέλυφος ανοπτημένο με πάχος τοιχώματος $t=2\text{mm}$ ( $D=50$ ) καταπονούμενο σε κυλινδρική μήτρα με ακτίνα καμπυλότητας $r= 5\text{mm}$ .....	96
4.4.3 Μεταβολή πάχους τοιχώματος κατά τη διαδικασία αναδίπλωσης στον ανοπτημένο σωλήνα αλουμινίου με αρχικό πάχος τοιχώματος $t = 2\text{mm}$ .....	102
4.4.4 Κατανομή τάσεων κατά τη διαδικασία αναδίπλωσης στον ανοπτημένο σωλήνα αλουμινίου με αρχικό πάχος τοιχώματος $t = 2\text{mm}$ .....	105
 <i>Κεφάλαιο 5</i>	
5. Συμπεράσματα - Παρατηρήσεις .....	107
Βιβλιογραφία .....	111

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η διπλωματική αυτή εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών των Υλικών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ κατά το χρονικό διάστημα Οκτωβρίου 2008 έως Φεβρουαρίου του 2009 στα πλαίσια των προπτυχιακών σπουδών.

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η μελέτη της αξονικής καταπόνησης κυλινδρικών λεπτότοιχων σωλήνων σε μήτρες ειδικής μορφής. Επίσης μελετάται η απορρόφηση ενέργειας που επιτυγχάνεται κατά τη διαδικασία της αξονικής αυτής καταπόνησης και γίνονται πειραματικές δοκιμές και αριθμητική προσομοίωση.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια γενική αναφορά περί των συστημάτων απορρόφησης ενέργειας καθώς επίσης εξηγούνται διάφοροι βασικοί όροι (“crashworthiness”).

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύεται θεωρητικά η αξονική καταπόνηση κυλινδρικών σωλήνων σε μήτρες ειδικής μορφής.

Το τρίτο κεφάλαιο συνιστά το πειραματικό μέρος της διπλωματικής αυτής εργασίας. Γίνεται αναφορά στον τρόπο κατασκευής τόσο των δοκιμών όσο και των χρησιμοποιούμενων μητρών. Στη συνέχεια γίνεται παράθεση όλων των πειραματικών παρατηρήσεων και αποτελεσμάτων για κάθε είδος μήτρας και δοκιμίου ξεχωριστά.

Στο τέταρτο κεφάλαιο επιχειρείται μοντελοποίηση των πειραματικών δοκιμών με χρήση του λογισμικού LS-DYNA. Γίνεται σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με τα αντίστοιχα της αριθμητικής προσομοίωσης και παρατίθενται στοιχεία για κάποια χαρακτηριστικά της αξονικής καταπόνησης που εξάγονται μέσα από την αριθμητική προσομοίωση.

Η διπλωματική εργασία ολοκληρώνεται με το πέμπτο κεφάλαιο στο οποίο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις πειραματικές δοκιμές και την αριθμητική προσομοίωση.

Στο τέλος αναφέρεται η βιβλιογραφία η οποία καλύπτει σε ικανοποιητικό βαθμό όλα τα θέματα που αφορούν το εξεταζόμενο αντικείμενο.

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Επιβλέπων αυτής της εργασίας υπήρξε ο καθηγητής κ. Δημήτριος Ε. Μανωλάκος στον οποίο και επιθυμώ να εκφράσω τις ιδιαίτερες ευχαριστίες μου τόσο για την εμπιστοσύνη και εκτίμηση την οποία επέδειξε προς το πρόσωπό μου αναθέτοντάς μου την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής, όσο και γιατί υπήρξε πολύτιμος συνεργάτης και αρωγός σε οποιοδήποτε πρόβλημα ανέκυψε κατά το χρονικό διάστημα της σπουδής μου στο παρόν αντικείμενο.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες εκφράζονται και προς τον υποψήφιο διδάκτορα και μέλος Ε.Ε.ΔΙ.Π. του εργαστηρίου κ. Πρωτεσίλαο Κωστάζο ο οποίος επέδειξε καθ' όλο το παραπάνω χρονικό διάστημα αμέριστη συμπαράσταση για επίλυση προβλημάτων που προέκυψαν κατά την εκπόνηση της εργασίας και με βοήθησε ιδιαίτερα κατά την εκτέλεση των πειραμάτων καθώς και σε θέματα χρήσης του προγράμματος LS-DYNA. Θερμές ευχαριστίες εκφράζονται επίσης και προς όλο το προσωπικό του εργαστηρίου για την μεγάλη βοήθειά του τόσο κατά την προετοιμασία όσο και κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων που έλαβαν χώρα στο πλαίσιο της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2009

Βελλής Α. Αριστείδης

# **1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

## **1.1 Γενικά**

Στην εποχή μας τα μεταφορικά μέσα αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι της καθημερινότητας του σύγχρονου ανθρώπου. Ωστόσο τα μεταφορικά μέσα εκτός από την εξυπηρέτηση που προσφέρουν στο χρήστη μπορούν να προκαλέσουν σοβαρά ατυχήματα. Έτσι όλοι οι σχεδιαστές καθώς και τα τμήματα έρευνας και ανάπτυξης των μεγάλων βιομηχανιών προσπαθούν να εφεύρουν και να ενσωματώσουν στα σύγχρονα μεταφορικά μέσα νέα συστήματα που αποσκοπούν στην αύξηση του επιπέδου παρεχόμενης ασφάλειας.

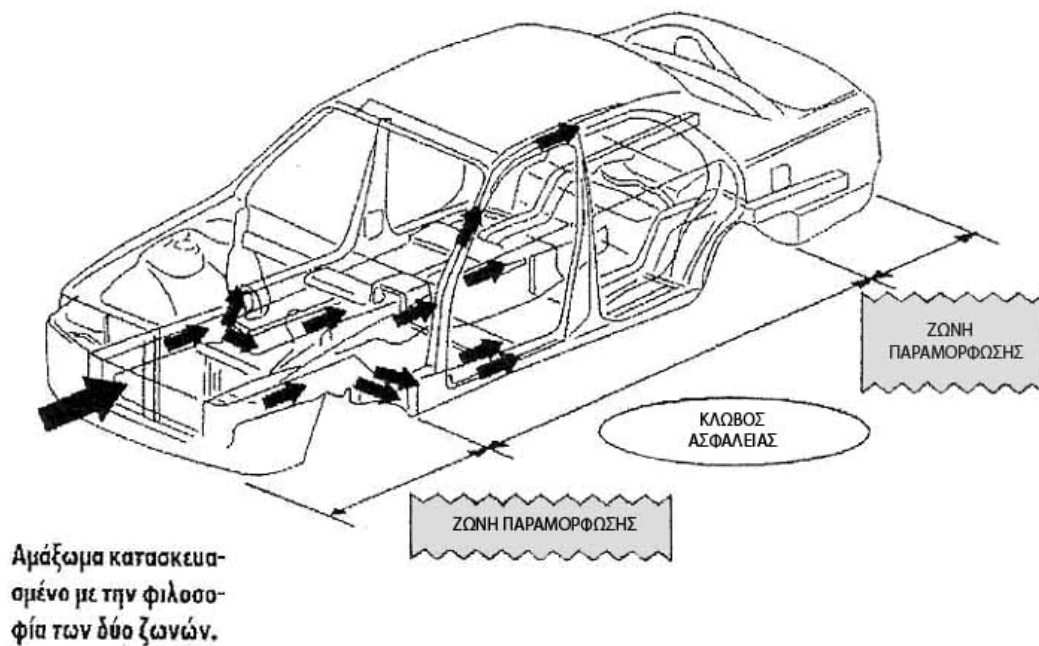
Τα συστήματα αυτά χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, σε αυτά που αποσκοπούν στη βελτίωση της ενεργητικής ασφάλειας και σε εκείνα που προορίζονται για τη βελτίωση της παθητικής ασφάλειας. Τα συστήματα που σχετίζονται με την ενεργητική ασφάλεια βοηθούν στην αποφυγή ενός ατυχήματος, ενώ αν αυτό τελικά συμβεί, η παθητική ασφάλεια είναι αυτή που περιορίζει στο ελάχιστο δυνατό τις συνέπειές του. Για να το επιτύχουν αυτό υιοθετούν στοιχεία και διατάξεις που ως σκοπό έχουν να περιορίσουν τις επιπτώσεις μιας πιθανής σύγκρουσης στους επιβάτες.

Ιστορικά αν δούμε το θέμα παρατηρούμε ότι η κατάσταση πριν από λίγες δεκαετίες ήταν διαφορετική. Το πρόβλημα της επικινδυνότητας των μέσων μεταφοράς δεν κατείχε σημαίνουσα θέση και γενικά υπήρχε η πεποίθηση ότι το όχημα που δεν παραμορφώνεται σε περίπτωση σύγκρουσης ήταν και το πιο ασφαλές. Η παραπάνω άποψη διατυπώθηκε ύστερα από την παρατήρηση πραγματικών ατυχημάτων ανάμεσα σε μικρά οχήματα όταν αυτά συγκρούονταν με μεγαλύτερα. Οι επιβάτες των μεγαλύτερων οχημάτων καταπονούνταν λιγότερο λόγω των μικρότερων επιβραδύνσεων που δέχονταν κατά τη σύγκρουση αφού η αυξημένη μάζα του μεγάλου οχήματος ανέπτυξε λόγω μεγάλης αδράνειας μικρότερη επιβράδυνση από ένα μικρότερο όχημα. Με το πέρασμα των δεκαετιών η ολοένα αυξανόμενη ανάγκη του σύγχρονου ανθρώπου για μετακίνηση έκανε επιτακτική την κατασκευή φθηνών, ελαφρών και μικρών οχημάτων τα οποία ήταν πιο ευέλικτα αλλά δεν είχαν το προτέρημα της μεγάλης μάζας. Η επερχόμενη αύξηση των οχημάτων οδήγησε σε ταυτόχρονη αύξηση των ατυχημάτων με οδυνηρές συνέπειες για το



σύγχρονο άνθρωπο. Το γεγονός αυτό έδωσε ώθηση στους κατασκευαστές για ανάπτυξη έρευνας γύρω από τον τομέα της ασφάλειας των μεταφορικών μέσων. Μακροχρόνιες έρευνες σχετικά με τη σχεδίαση συστημάτων που θα βελτιώναν αισθητά την παθητική ασφάλεια των οχημάτων οδήγησαν στη μέθοδο σχεδίασης του οχήματος με βάση το διαχωρισμό του αμαξώματος σε δύο ζώνες:

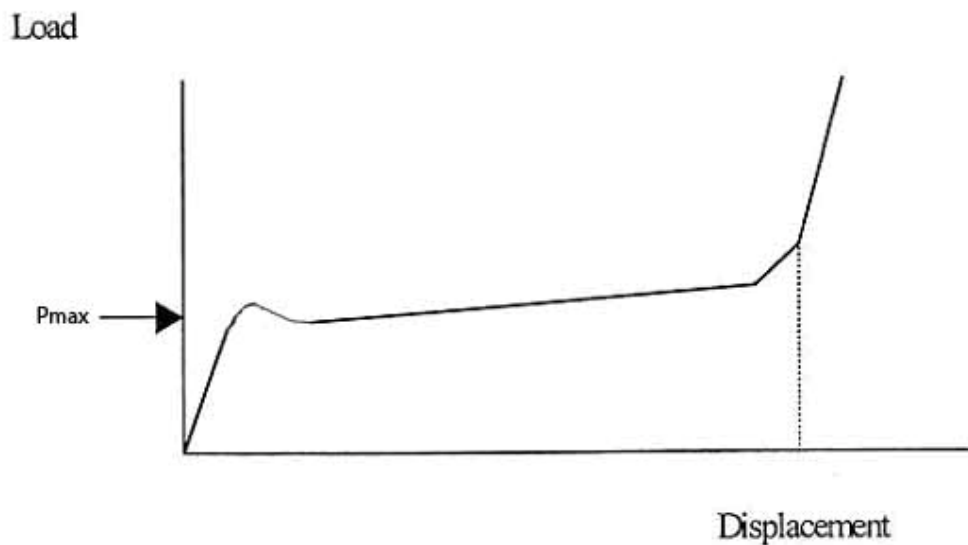
1. τη **ζώνη παραμόρφωσης** η οποία με τη σειρά της διαχωρίζεται στην **εμπρόσθια** και στην **οπίσθια ζώνη**
2. την **άκαμπτη ζώνη** η οποία σχηματίζει ένα κλωβό ασφαλείας γύρω από τους επιβαίνοντες και τους εξασφαλίζει τον αναγκαίο ζωτικό χώρο για να επιβιώσουν σε περίπτωση σοβαρής σύγκρουσης.



Σχήμα 1.1.1 Σχηματική διάταξη αμαξώματος διαχωρισμένου σε δύο ζώνες

Κατά τη διάρκεια μιας μετωπικής σύγκρουσης διακρίνουμε τα εξής τρία στάδια:

1. αρχική επαφή με το εμπρός ή όπισθεν παραμορφώσιμο τμήμα του οχήματος
2. σταδιακή παραμόρφωση του αμαξώματος
3. πιθανή παραμόρφωση της καμπίνας των επιβατών



Σχήμα 1.1.2. Τυπική μορφή καμπύλης φορτίου-μετατόπισης.

Η επιφάνεια κάτω από την καμπύλη αναπαριστά την ενέργεια που μπορεί να απορροφηθεί από το αμάξωμα. Η ενέργεια αυτή εξαρτάται από την μέγιστη παραμόρφωση και το φορτίο λυγισμού. Γενικά υπάρχει ένα μέγιστο όριο στην παραμόρφωση του οχήματος, έτσι για να αυξήσουμε το ποσό της απορροφούμενης ενέργειας αρκεί να αυξήσουμε το φορτίο λυγισμού δηλαδή να κάνουμε την κατασκευή μας στιβαρότερη.

Σκοπός είναι να τεθούν εκείνοι οι περιορισμοί που θα καθορίσουν τους μηχανισμούς βελτίωσης της κατασκευαστικής αντοχής σε σύγκρουση όπως τα όρια που θα πρέπει να τεθούν στις παραμορφώσεις και στην μεταβίβαση φορτίων. Ένας τρόπος για να επιτευχθεί το παραπάνω είναι η εφαρμογή ειδικών μηχανισμών

απορρόφησης ενέργειας. Τέτοιοι μηχανισμοί μπορεί να είναι διάφοροι σωληνωτοί φορείς τοποθετημένοι σε στρατηγικά σημεία του οχήματος.

Τέλος θα πρέπει να αναφερθεί ότι η σύγκρουση ενός οχήματος είναι ένα σύνθετο και πολυπαραγοντικό φαινόμενο και αυτό γιατί η απόκριση πολλών αλληλεπιδρυσών μονάδων που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια μιας σύγκρουσης σπάνια μπορεί να περιγραφεί αποδεκτά με τη συνήθη ανάλυση που περιγράφει την απόκριση μεμονωμένων δομικών στοιχείων.

## 1.2 Αξονική καταπόνηση δοκιμίων-Ικανότητα απορρόφησης ενέργειας

Κατά την αξονική καταπόνηση δοκιμίων η ενέργεια η οποία απορροφάται από το δοκίμιο κατά τη διαδικασία αστοχίας και κατάρρευσής του προκύπτει με εμβαδομέτρηση του χωρίου κάτω από την αντίστοιχη καμπύλη φορτίου – μετατόπισης (συμπίεσης δοκιμίου). Κατά την αξονική καταπόνηση το κέλυφος παραμορφώνεται ελαστικά ενώ το φορτίο αυξάνει με σταθερό ρυθμό, σχεδόν γραμμικά, μέχρι μια μέγιστη τιμή την  $P_{max}$  η οποία εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του υλικού και τη γεωμετρία του κελύφους. Με την προσέγγιση της τιμής αυτής το φορτίο εμφανίζει απότομη πτώση. Ο τρόπος κατάρρευσης της κατασκευής αλλά και οι συνθήκες φόρτισης καθορίζουν τη μορφή της καμπύλης φορτίου-μετατόπισης.

Ως μέγεθος μέτρησης της ικανότητας που εμφανίζει ένα αξονικά καταπονούμενο κέλυφος σε απορρόφηση ενέργειας λαμβάνουμε την ειδική ενέργεια απορρόφησης  $W_s$  (πολλές φορές συναντάται στην βιβλιογραφία και ως  $E_s$ ) :

$$W_s = \frac{W}{m_c} = \frac{W}{\rho V_c}$$

Με  $W$  συμβολίζεται η ενέργεια που απορροφά το κέλυφος κατά την κατάρρευσή του

Με  $m_c$  συμβολίζεται η μάζα του υλικού που έχει αστοχήσει

$\rho$  είναι η πυκνότητα του υλικού

$V_c$  ο αντίστοιχος όγκος του υλικού

### 1.3 Σχεδιασμός συστημάτων απορρόφησης ενέργειας

Το πρόβλημα της ασφάλειας των επιβατών γνωστό και με τον όρο ‘επιβιωσιμότητα’ μετά από κάποιο σοβαρό ατύχημα έχει οδηγήσει τους εκάστοτε ερευνητές αλλά και τα τμήματα έρευνας και ανάπτυξης των μεγάλων βιομηχανιών να εστιάσουν την προσοχή τους στην μελέτη της συμπεριφοράς του υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένος ο περιβάλλοντας χώρος (ή ακόμα και ολόκληρη η κατασκευή) σε καταστροφική καταπόνηση με πρωταρχικής σημασίας παράγοντα την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας.

Η μελέτη της συμπεριφοράς αυτής σε μια κατασκευή, δίδει το μηχανισμό βάσει του οποίου ένα ποσοστό της ενέργειας που προσδίδεται, απορροφάται από την κατασκευή ενώ ένα άλλο μεταβιβάζεται στον επιβάτη. Είναι κατανοητό ότι για να έχει η κατασκευή μας την απαιτούμενη συμπεριφορά η μελέτη σε καταστροφική καταπόνηση πρέπει να γίνει στα πρώτα στάδια σχεδιασμού.

Υπάρχουν δύο μέθοδοι για την εκπόνηση της παραπάνω μελέτης. Η πρώτη είναι με **δοκιμή και αστοχία σε πρωτότυπα της κατασκευής** ενώ η δεύτερη αφορά τη **χρήση λεπτομερούς μαθηματικού μοντέλου** με ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων γνωστή και ως FEA (FINITE ELEMENT ANALYSIS).

Το να ενσωματωθεί η θεωρητική ανάλυση στο πρωταρχικό στάδιο ιδίως όταν απουσιάζουν λεπτομερή στοιχεία, τόσο για την κατασκευή όσο και για το υλικό της, αποτελεί μια ιδιαίτερος δύσκολη εργασία. Από την άλλη η κατασκευή και στη συνέχεια η καταστροφική καταπόνηση πρωτοτύπων ανεβάζει πολύ το κόστος. Για τους παραπάνω λόγους ο μηχανικός είναι απαραίτητο να διαθέτει ένα σύστημα, με βάση το οποίο να μπορεί να μελετήσει εναλλακτικές σχεδιαστικές λύσεις που θα ικανοποιούν τις απαιτούμενες συνθήκες φόρτισης.

Η τεχνική ανάλυση για το βέλτιστο σχεδιασμό μιας κατασκευής συνοψίζεται στα παρακάτω στάδια:

1. **Βάση δεδομένων των στοιχείων της κατασκευής:** Αναπτύσσεται το σκεπτικό για την αρχή του σχεδιασμού. Συλλέγονται στοιχεία για το υλικό που θα βρεθούν με δοκιμές ή με ανάλυση.

2. **Απόκτηση στοιχείων μέσω δοκιμής ή ανάλυσης:** Αν για ένα συγκεκριμένο στοιχείο δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί η βάση δεδομένων, το στοιχείο αυτό κατασκευάζεται και υπόκειται σε δοκιμές για να προσδιοριστεί η συμπεριφορά του.
3. **Συνολική ανάλυση της κατάρρευσης:** Μόλις προσδιοριστούν όλες οι απαιτούμενες (μη γραμμικές) ιδιότητες για όλες τις συνιστώσες της κατάρρευσης (αντοχή και ικανότητα απορρόφησης ενέργειας), εκτελείται στατική (quasi static) ανάλυση της κατασκευής, με σκοπό τον προσδιορισμό της συνολικής ικανότητάς της να φέρει φορτίο. Ο προσδιορισμός αυτός γίνεται με βάση τις ακόλουθες προϋποθέσεις:
  - Η μάζα της καταρρέουσας κατασκευής είναι αμελητέα σε σχέση με την επιβραδύνουσα μάζα
  - Η διεύθυνση και η φορά των φορτίων που αναπτύσσονται στην καταρρέουσα κατασκευή κατά τη δοκιμή μπορούν να προβλεφθούν.
4. **Βελτιστοποίηση της κατασκευής:** Μαζί με την ικανότητα της κατασκευής να φέρει φορτία συνυπολογίζεται η αντοχή και η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας του κάθε στοιχείου της. Αυτές οι πληροφορίες βοηθούν το σχεδιαστή να απομονώσει τα στοιχεία εκείνα που δεν είναι συμβατά με την κατασκευή. Τα κριτήρια που εξετάζονται είναι αν και κατά πόσο κάθε στοιχείο μπορεί να μεταβιβάσει τα επιβαλλόμενα φορτία μέσω της κατασκευής και ταυτόχρονα να απορροφήσει ένα ποσοστό της προσδιδόμενης ενέργειας.
5. **Βελτιώσεις στην αντοχή και στην ικανότητα απορρόφησης ενέργειας του κάθε στοιχείου:** Μόλις προσδιοριστούν τα 'μη συμβατά' στοιχεία, μπορεί να αποφασιστεί το μέγεθος και το είδος βελτίωσης. Εδώ η ανάλυση αποβλέπει στην εκλογή των ιδιοτήτων που πρέπει να βελτιωθούν (κάμψη, θλίψη κλπ) και σε τι ποσοστό για να γίνουν τα αντίστοιχα στοιχεία 'συμβατά' με την κατασκευή.
6. **Υπολογισμός σε κάμψη:** Έχοντας υπολογίσει τις απαιτούμενες ιδιότητες (αντοχή και ικανότητα απορρόφησης ενέργειας) προσδιορίζονται στη συνέχεια οι διαστάσεις του απλοποιημένου στοιχείου που καταπονούμενο

σε θλίψη ή κάμψη, θα φτάσει και θα διατηρήσει το απαιτούμενο εσωτερικό φορτίο.

- 7. Σχεδιασμός του στοιχείου:** Παρά το γεγονός ότι το απλοποιημένο στοιχείο που υπολογίστηκε προηγουμένως αρκεί για τα αρχικά στάδια του σχεδιασμού, αποτελεί μόνο έναν οδηγό για τον υπολογισμό των τελικών διαστάσεων της κατασκευής. Εξαιτίας ποικίλων άλλων απαιτήσεων ο υπολογισμός μετατρέπεται σε μια σύνθετη διεργασία, με αφετηρία τις αρχικά υπολογισμένες απλοποιημένες μορφές.
- 8. Δυναμική ανάλυση:** Η ανάλυση αυτή γίνεται με βάση δύο κριτήρια. Από τη μία , αν η μάζα της καταρρέουσας κατασκευής είναι αμελητέα σε σχέση με την επιβραδύνουσα μάζα και η ταχύτητα κρούσης δεν είναι πολύ μεγάλη (π.χ. ανατροπή ή πλευρική πρόσκρουση οχήματος ), μπορεί να χρησιμοποιηθεί η καμπύλη του φορτίου που παρέχεται από το στάδιο 3. Αν από την άλλη μεριά , υπάρχουν υπολογίσιμες μάζες στην καταρρέουσα κατασκευή , χρησιμοποιούνται απευθείας τα δεδομένα που προκύπτουν από τα στάδια 1,2,6 και 7.
- 9. Προσομοίωση επιβάτη:** Μετά την ολοκλήρωση του σταδίου 8, όπου η ταχύτητα και η υπό κατάρρευση κατασκευή είναι πια γνωστές, μπορεί να είναι απαραίτητο να ληφθεί υπόψη η ασφάλεια των επιβατών ή και του περιεχομένου της κατασκευής γενικότερα, κάτι που είναι πρωταρχικής σημασίας για όλα τα επιβατικά οχήματα.
- 10. Δυναμική βελτιστοποίηση:** Αν στο στάδιο 9 προκύψουν μη παραδεκτά αποτελέσματα όσον αφορά την ασφάλεια του επιβάτη, χρησιμοποιείται και πάλι όλο το σύστημα ανάλυσης μέχρι την επίτευξη παραδεκτών αποτελεσμάτων. Το παραπάνω αποτελεί βασικό στοιχείο της διαδικασίας βελτιστοποίησης, γνωστό και ως **feedback** δηλ. ανατροφοδότηση των εισόδων του συστήματος.

#### 1.4 Αξιολόγηση συμπεριφοράς συστημάτων απορρόφησης ενέργειας

Όπως είναι φυσικό η αξιολόγηση της συμπεριφοράς των συστημάτων απορρόφησης ενέργειας είναι πρωταρχικής σημασίας. Σχεδιαστικό στόχο αποτελεί η μέγιστη δυνατή διάχυση ενέργειας κατά τρόπο μη αντιστρεπτό. Με βάση τα παραπάνω η βέλτιστη συμπεριφορά που αναμένεται από κάποιο υλικό είναι αυτή του απόλυτα πλαστικού υλικού, όπου το διάγραμμα φορτίου-παραμόρφωσης προσδιορίζεται από μία τετραγωνική επιφάνεια.

Γίνεται εύκολα αντιληπτή η ανάγκη για την ύπαρξη κριτηρίων ώστε να ποσοτικοποιείται η συμπεριφορά των συστημάτων απορρόφησης ενέργειας και να είναι εύκολη τόσο η σύγκρισή τους όσο και η αξιολόγηση τους.

Τα βασικότερα κριτήρια είναι:

- **Συνολική απορροφούμενη ενέργεια  $W$ :** Προκύπτει από το διάγραμμα φορτίου  $P$  – μετατόπισης  $s$  με ολοκλήρωση.

$$W = \int P ds$$

- **Μέσο ελαστικό φορτίο  $\bar{P}$  :** με  $\bar{P} = \frac{W}{s}$
- **Ειδική ενέργεια απορρόφησης  $W_s$  ή  $E_s$  :**

$$W_s = \frac{W}{m_c} = \frac{W}{\rho V_c}$$

- **Ομοιομορφία φορτίου (Load Uniformity):**  $LU = \frac{P_{max}}{P}$
- **Πυκνότητα διάχυσης ενέργειας ( Energy Dissipation Density)  $E_v$  :**

$$E_v = \frac{W}{V} \quad \text{με } V : \text{ ο όγκος του κατεστραμμένου υλικού}$$

- **Λόγος  $b$ :**  $b = \frac{P_{dyn}}{P_{stat}}$  με  $P_{dyn}$  : το φορτίο σε δυναμική καταπόνηση  
 $P_{stat}$  : το φορτίο σε στατική καταπόνηση

## **1.5 Χρήση σωλήνων σε συστήματα απορρόφησης ενέργειας**

### **1.5.1 Γενικά**

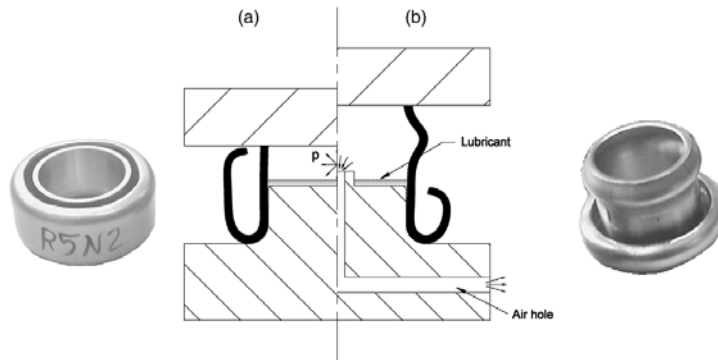
Η χρήση σωλήνων σε συστήματα απορρόφησης ενέργειας παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον λόγω της ικανότητας τους να απορροφούν σημαντικά ποσά ενέργειας όταν συμπίεζονται. Ειδικό ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα συστήματα απορρόφησης ενέργειας τα οποία σε γενική περιγραφή αφορούν αξονική καταπόνηση σωλήνων είτε κυκλικής είτε τετραγωνικής διατομής με χρήση ειδικών μορφών μήτρας. Τα αποτελέσματα οδηγούν στην ενσωμάτωση πολλών τέτοιων συστημάτων απορρόφησης ενέργειας σε μέσα μεταφοράς όπως αυτοκίνητα, αεροσκάφη, τρένα αλλά και σε ποικίλα άλλα πεδία όπως σε συστήματα πυρηνικών αντιδραστήρων και σε εφαρμογές που σχετίζονται με την εξερεύνηση του διαστήματος καθώς και σε πλήθος άλλων εφαρμογών.

Η αξονική συμπίεση των σωλήνων κυκλικής και τετραγωνικής διατομής με χρήση μητρών ειδικής μορφής (κωνικές, κυλινδρικές κ.α.) οδηγεί σε συγκεκριμένες μορφές κατάρρευσης των δοκιμίων που συνίστανται είτε σε αναδίπλωση του άκρου του σωλήνα εξωτερικά ή εσωτερικά (inversion external or internal) είτε σε σκίσιμο και ‘κατσάρωμα’ του άκρου του σωλήνα (splitting or curling) με ταυτόχρονη απορρόφηση σημαντικού ποσού ενέργειας. Επίσης κάποιες μορφές κατάρρευσης (κυρίως το inversion) οδηγούν σε δημιουργία τεμαχίων που είναι δύσκολο να παραχθούν με κάποια άλλη κατεργασία. Μπορεί όμως κατά τη διαδικασία συμπίεσης του δοκιμίου να παραχθούν και κάποιες άλλες μορφές παραμόρφωσης του δοκιμίου όπως :

- I. Λυγισμός Euler (**euler buckling**)
- II. Αξονοσυμμετρικός λυγισμός (**axisymmetric buckling**)
- III. Λυγισμός μορφής διαμαντιού (**diamond buckling**)
- IV. Μη επιθυμητή διάρρηξη του άκρου του σωλήνα (**splitting**)



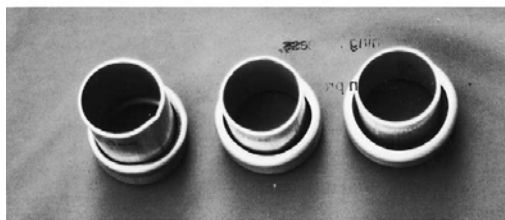
Η απορρόφηση της ενέργειας που επιτυγχάνεται με μια τέτοια διαδικασία θλιπτικής αξονικής καταπόνησης είναι και το θέμα της παρούσας διπλωματικής.



(a)



(b)



(c)



### **1.5.2 Σύντομη αναφορά παλαιότερων αναλύσεων - προσεγγίσεων**

Πολλοί ερευνητές έχουν ασχοληθεί κατά το παρελθόν με το προαναφερθέν ζήτημα. Πιο συγκεκριμένα ο **Kinkead** ανέλυσε την εσωτερική αναδίπλωση σωλήνων κυκλικής διατομής λαμβάνοντας υπόψη το υλικό του σωλήνα, την αναπτυσσόμενη τριβή μεταξύ μήτρας και σωλήνα καθώς και την μεταβολή του πάχους του τοιχώματος του αναδιπλωμένου σωλήνα. Ο **Atkins** παρουσίασε μια ανάλυση σχετικά με τον αριθμό των σπασιμάτων που παρουσιάζονται κατά την αξονική καταπόνηση σωλήνα σε μήτρα. Ο **Chirwa** μελέτησε το μηχανισμό κατάρρευσης ενός λεπτότοιχου σωλήνα ειδικής μορφής (inverbuck tube) και την απορρόφηση ενέργειας που επιτυγχάνεται συγκρίνοντας θεωρητικά με πειραματικά δεδομένα. Ο **Reid** ασχολήθηκε και αυτός με την εσωτερική και εξωτερική αναδίπλωση κυκλικών μεταλλικών σωλήνων. Οι **Miscow και Al-qureshi** χρησιμοποίησαν την αρχή διατήρησης της ενέργειας για να προβλέψουν το φορτίο της δυναμικής αναδίπλωσης.

Οι **Y.H Luo, Z.W. Huang και X.L. Zhang** ανέλυσαν τα χαρακτηριστικά της ενεργειακής απορρόφησης των σωλήνων που αναδιπλώνονται καταπονούμενοι σε κωνική μήτρα κάνοντας χρήση πεπερασμένων στοιχείων. Ο **Reddy** έκανε πειραματικές δοκιμές αλλά και θεωρητική ανάλυση περί της εξωτερικής αναδίπλωσης ή του σκισίματος ανάλογα με την περίπτωση. Παρεμφερές θέμα είχε και η μελέτη των **Rosa, Rodrigues, Baptista και Martins** η οποία αντιμετωπίζει την εξωτερική αναδίπλωση σωλήνων κυρίως σαν κατεργασία για τη δημιουργία διπλότοιχων τεμαχίων τα οποία είναι δύσκολο να κατασκευαστούν με κάποια άλλη κατεργασία και προσομοιώνουν το φαινόμενο με χρήση πεπερασμένων στοιχείων. Με το θέμα ασχολήθηκαν επίσης και οι **Stronge, Yu και Johnson** με προσανατολισμό την απορρόφηση ενέργειας σωλήνων τετραγωνικής διατομής που καταπονούνται αξονικά με σύστημα πίπτουσας μάζας και με χρήση ειδικής μήτρας πυραμιδοειδούς μορφής και οδηγούν σε σκίσιμο του σωλήνα. Ο **Kitazawa et al** ασχολήθηκε επίσης με τα χαρακτηριστικά της εξωτερικής αναδίπλωσης μεταλλικών σωλήνων καθώς και οι **Daw-Kwei Leu και Al-Hassani**.

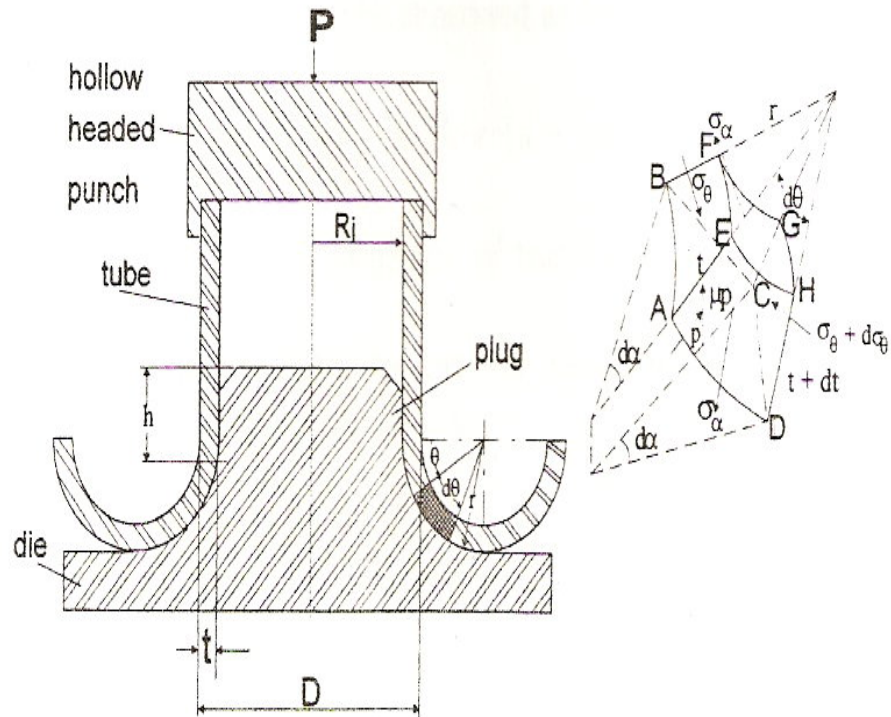
**Πολλοί ακόμα ερευνητές** ασχολήθηκαν με το θέμα κάνοντας πολλές και ενδιαφέρουσες μελέτες που φανερώνουν τόσο την πολυπλοκότητα του φαινομένου όσο και την σημαντική απορρόφηση ενέργειας που επιτυγχάνεται κάτω από ορισμένες συνθήκες.

## 2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

### 2.1 Μηχανική της στατικής και δυναμικής διαδικασίας αναδίπλωσης

#### Σύμβολα

$\sigma_r, \sigma_r^*$	ακτινική τάση
$\sigma_\theta, \sigma_\theta^*$	περιφερειακή τάση
$\sigma_z$	αξονική τάση
$\sigma_f$	τάση λυγισμού
$\sigma_e$	τάση διαρροής
$\sigma_r$	τάση θραύσης
$K, n$	παράγοντες σκλήρυνσης λόγω παραμόρφωσης (εργοσκλήρυνση)
$\bar{\sigma} = K \cdot \bar{\epsilon}^n$	πραγματική (δρώσα) τάση
$R_i, D$	αρχική εσωτερική διάμετρος, εξωτερική διάμετρος σωλήνα
$r$	ακτίνα καμπυλότητας (ράδιο) μήτρας
$r_{cr}$	κρίσιμη ακτίνα καμπυλότητας
$t$	πάχος τοιχώματος
$h$	ύψος ανάμεσα στην καμπυλότητα και το πάνω μέρος της μήτρας
$p$	πίεση επαφής
$\theta$	γωνία αναδίπλωσης ζώνης επαφής
$\mu$	συντελεστής τριβής
$\beta$	γωνία αναδίπλωσης ελεύθερης ζώνης
$\delta$	εμπειρική παράμετρος
$C_1, C_2$	εμπειρικές συναρτήσεις
$R$	στιγμιαία ακτίνα αναδιπλούμενου τμήματος
$h(\theta)$	στιγμιαίο ύψος αναδιπλωμένου σωλήνα
$P_t$	θεωρητικό φορτίο αναδίπλωσης
$P_d$	δυναμικό φορτίο αναδίπλωσης
$P_e$	πειραματικό φορτίο στατικής αναδίπλωσης
$V_t$	θεωρητική ταχύτητα πρόσκρουσης
$Z_t$	θεωρητική αξονική βράχυνση
$M$	πίπτουσα μάζα
$\epsilon_\alpha$	πραγματική περιφερειακή παραμόρφωση
$V_e$	πειραματική ταχύτητα πρόσκρουσης
$Z_e$	πειραματική αξονική βράχυνση



Σχ. 2.1.1 Αξονική καταπόνηση σωλήνα κυκλικής διατομής σε κυλινδρική μήτρα ειδικής μορφής με καθορισμένη καμπυλότητα στη βάση της

Εξετάζουμε την αύξηση του φορτίου θλιπτικής αξονικής καταπόνησης λεπτότοιχου σωλήνα ο οποίος γλιστρά σε κυλινδρική μήτρα ειδικής μορφής με ακτίνα καμπυλότητας στη βάση της όπως φαίνεται στο σχ. 2.1.1. Τελικά ο σωλήνας καμπυλώνεται και οδηγεί σε δημιουργία ενός ακόμα ομόκεντρου παράλληλου σωλήνα. Το ακόλουθο θεωρητικό μοντέλο διατυπώθηκε από τους P.C. MISCOW F. και H. A. AL-QURESHI στην αντίστοιχη εργασία τους (βλέπε βιβλιογραφία [26]). Για τη μελέτη του εφαρμοζόμενου φορτίου αναδίπλωσης αλλά και της αξονικής βράχυνσης του σωλήνα δεχόμαστε ότι ισχύουν οι παρακάτω προϋποθέσεις:

1. Το πάχος του τοιχώματος του σωλήνα παραμένει σταθερό, έχουμε ομαλή παραμόρφωση και αμελούνται οι ελαστικές παραμορφώσεις
2. Η τριβή θεωρείται σταθερή
3. Η αναδίπλωση θεωρείται σταθερή με απουσία της επίδρασης Bauschinger και άλλων τύπων κατάρρευσης

4. Η σκλήρυνση λόγω παραμόρφωσης (εργοσκλήρυνση) του υλικού υπακούει στην έκφραση του Holloman και ισχύει το κριτήριο του Von Mises

Εξετάζοντας το σχήμα 2.2.1 παρατηρούμε ότι ο σωλήνας έρχεται σε επαφή με τη μήτρα μέσω του καμπύλου μέρους της μήτρας που αποτελεί τη ζώνη επαφής και κυμαίνεται μεταξύ των γωνιών  $\theta = 0^\circ$  και  $\theta = 90^\circ$ . Στη συνέχεια το υλικό δημιουργεί ανάκαμψη ('κατσαρώνει') και συνεχίζει να κινείται ελεύθερα από  $\theta = 90^\circ$  μέχρι  $\theta = 180^\circ$  χωρίς να οδηγείται από το εργαλείο - μήτρα και δημιουργεί έναν νέο παράλληλο και ομόκεντρο με τον αρχικό σωλήνα. Αν αναλύσουμε το στοιχειώδες απειροστό στοιχείο του υλικού-σωλήνα, ανεξάρτητα κατά την κίνηση του σε αυτές τις δύο ζώνες, καταλήγουμε σε διαφορετικές εξισώσεις που είναι συναρτήσεις της τάσης και της γεωμετρίας. Θεωρούμε τις διατμητικές τάσεις που αναπτύσσονται αμελητέες και τις άκρες του στοιχείου σαν ευθείες γραμμές διαφορετικών μηκών. Τελικά η γεωμετρία του απειροστού στοιχείου που φαίνεται στο σχήμα δίνεται από τις παρακάτω εκφράσεις:

$$(ABCD) = R \cdot r \cdot dx \cdot d\theta \quad (1)$$

$$(EFGH) = \left( R + t \cdot \cos \theta + \frac{dR + dt \cdot \cos \theta}{2} \right) \cdot \left[ (r - t) - \frac{dt}{2} \right] \quad (2)$$

$$(ABEF) = \left( R + \frac{t}{2} \cdot \cos \theta \right) \cdot t \cdot dx \quad (3)$$

$$(CDGH) = (R \cdot t + R \cdot dt + t \cdot dR) \cdot dx \quad (4)$$

$$(ADFG) = (BCEH) = \left( \frac{2 \cdot r \cdot t + r \cdot dt - t^2 - t \cdot dt}{2} \right) d\theta \quad (5)$$

Για τη ζώνη επαφής ( $\theta = 90^\circ - 0^\circ$ ) η εξίσωση ισορροπίας κατά την ακτινική διεύθυνση δίνεται από:

$$\sigma_r = \frac{R_i}{(r-t/2)} \cdot \left[ \frac{p \cdot r}{t} - \sigma_\theta \right] \quad (6)$$

Η εξίσωση ισορροπίας κατά την εφαπτόμενη διεύθυνση μπορεί να εκφραστεί ακόλουθως:

$$\frac{d[\sigma_\theta \cdot R_i \cdot t]}{d\theta} - \sigma_\theta \cdot R_i \cdot t \cdot \tan \theta + p \cdot R_i \cdot r \cdot (\mu + \tan \theta) = 0 \quad (7)$$

Από την άλλη οι εξισώσεις ισορροπίας για την ελεύθερη ζώνη ( $\theta = 90-180$ ) κατά την ακτινική και κατά την εφαπτομενική διεύθυνση δίνονται αντίστοιχα από τους παρακάτω τύπους:

$$\sigma_r^* = \frac{\sigma_\theta^* \cdot R_i}{(r-t/2) \cdot \sin \beta} \quad (8)$$

Και

$$\frac{d[\sigma_\theta^* \cdot R_i \cdot t]}{d\beta} = \sigma_r^* \cdot t \cdot \left( r - \frac{t}{2} \right) \cdot \cos \beta \quad (9)$$

Οι τάσεις και στις δύο ζώνες μπορούν να καθοριστούν από την επίλυση των παραπάνω εξισώσεων προϋποθέτοντας γνώση της πίεσης επαφής  $p$  και των οριακών συνθηκών. Στην παρούσα ανάλυση θα θεωρηθεί ότι η πίεση επαφής υπακούει στην ακόλουθη έκφραση:

$$p(\theta) = \frac{\sigma_z \cdot t}{r} \cdot \left( 1 - \frac{\theta}{\pi} \cdot \delta \right) \quad (10)$$

Όπου  $\delta$  εμπειρική παράμετρος με τύπο:

$$\delta = \frac{1}{2} \left[ \frac{(1+\mu) \cdot (R_i + r) - 4R_i}{\pi \cdot \sqrt{2} \cdot (1+\mu) \cdot (R_i + r)} + 3 \right] \quad (11)$$

Οι οριακές συνθήκες είναι οι ακόλουθες:

1. ζώνη επαφής:  $\theta = 0^\circ$ ,  $\sigma_r = 0$  και  $\sigma_\theta = \sigma_z$  (12)

2. ζώνη επαφής-ελεύθερη ζώνη:  $\theta = 90^\circ$ ,  $\sigma_\theta = \sigma_\theta^*$ , για τη συνοχή του υλικού (13)

3. ελεύθερη ζώνη:  $\theta = 180^\circ$ ,  $\sigma_\theta^* = \sigma_r^* = \sigma_z^*$  (14)

Θεωρώντας το υλικό ασυμπίεστο οι εκφράσεις για την ακτινική και την εφαπτόμενη τάση δίνονται ακολούθως:

$$\sigma_\theta = C_1 \cdot \sigma_z \quad (15)$$

$$\sigma_r = C_2 \cdot \sigma_z \quad (16)$$

Όπου  $C_1, C_2$  δίνονται από τους τύπους :

$$C_1 = \frac{h(\theta)}{R_i \cdot \cos \theta} - \frac{1}{R_i \cdot \cos \theta} \cdot \left[ r + \frac{\mu \cdot \delta}{\pi} \cdot \left( R_i + \frac{7 \cdot r}{8} \right) \right] \quad (17)$$

$$C_2 = \frac{R_i}{(r-t/2) \cdot \cos \theta} \cdot \left\{ \frac{p \cdot r}{t} - \left[ -\frac{h(\theta)}{R_i \cdot \cos \theta} - \frac{1}{R_i \cdot \cos \theta} \cdot \left( r + \frac{\mu \cdot \delta}{\pi} \cdot \left( R_i + \frac{7 \cdot r}{8} \right) \right) \right] \right\} \quad (18)$$

$$\text{Και} \quad h(\theta) = H_1 + H_2 + H_3 + H_4 \quad (19)$$

με:

$$H_1 = (R_i + r) \cdot \left[ -\cos \theta - \frac{\delta}{\pi} \cdot (\sin \theta - \theta \cdot \sin \theta) \right] \quad (20)$$

$$H_2 = -\frac{r}{2} \cdot \left[ \sin^2 \theta - \frac{\delta}{\pi} \cdot \left( \frac{\sin^2 \theta}{2} - \frac{\theta \cdot \cos 2\theta}{2} \right) \right] \quad (21)$$

$$H_3 = \mu \cdot (R_i + r) \cdot \left[ \sin \theta - \frac{\delta}{\pi} \cdot (\cos \theta + \theta \cdot \sin \theta) \right] \quad (22)$$

$$H_4 = -\mu \cdot r \cdot \left[ \left( \frac{\theta}{2} + \frac{\sin 2\theta}{4} \right) + \frac{\delta}{\pi} \cdot \left( \frac{\theta^2}{4} + \frac{\theta \cdot \sin 2\theta}{4} + \frac{\cos 2\theta}{8} \right) \right] \quad (23)$$

Ο όγκος ενός στοιχείου (όπως αυτό φαίνεται στο παραπάνω σχήμα 2.1.1) ύψους  $dz$  πριν την αναδίπλωση δίνεται από τον τύπο:

$$dV = 2 \cdot \pi \cdot R_i \cdot t \cdot dz \quad (24)$$



Ενώ ο όγκος ενός στοιχείου καμπυλομένου κατά  $d\theta$  στην περιοχή της ακτίνας καμπυλότητας βλέπε σχ. 2.1.1 δίνεται ακολούθως:

$$dV_{\theta} = 2 \cdot \pi \cdot \left( R + \frac{dR}{2} \right) \cdot \left( r - \frac{t}{2} \right) \cdot (t + dt) \cdot d\theta \quad (25)$$

Έτσι η αξονική βράχυνση  $z$  μπορεί να προκύψει από τη συνθήκη μη συμπίεστότητας του υλικού, εξισώνοντας τις (24) και (25) και ολοκληρώνοντας για  $\theta$  ανάμεσα σε  $0^\circ$  και  $90^\circ$ .

$$\text{Τελικά : } z_t = \left( \frac{r - t/2}{R_i} \right) \cdot [(R_i + r) \cdot \theta - r \cdot \sin \theta] \quad (26)$$

Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (15), (16) και το κριτήριο Von Misses και θεωρώντας ότι το υλικό υπακούει στη σχέση  $\bar{\sigma} = K \cdot \bar{\epsilon}^n$  καταλήγουμε για το θεωρητικό αξονικό φορτίο συμπίεσης που προκαλεί την αναδίπλωση :

$$P_t = \frac{K \cdot \bar{\epsilon}^{-n}}{(C_1^2 - C_1 \cdot C_2 + C_2^2)^{1/2}} \cdot 2 \cdot \pi \cdot R_i \cdot t \quad (27)$$

Ο παραπάνω τύπος ισχύει και για οιωνεί-στατική (quasi-static) διαδικασία αναδίπλωσης. Ωστόσο για τον καθορισμό του δυναμικού φορτίου αναδίπλωσης θεωρήθηκε ότι όλη η ενέργεια που παράχθηκε από το εφαρμοζόμενο φορτίο (27) και την αξονική βράχυνση σπαταλείται εξολοκλήρου στην πλαστική παραμόρφωση του σωλήνα. Αυτή η ενέργεια είναι ίση με την επιβράδυνση μιας μάζας ( $M$ ) κινούμενη με ταχύτητα ( $V$ ). Τελικά εξισώνοντας αυτές τις ενέργειες καταλήγουμε για την ταχύτητα πρόσκρουσης:

$$V = \sqrt{\frac{2 \cdot \bar{P}_t \cdot Z_t}{M}} \quad (28)$$

Όπου το  $\bar{P}_i$  είναι το μέσο στατικό φορτίο αναδίπλωσης. Η εξίσωση (28) μπορεί εύκολα να υπολογιστεί γνωρίζοντας τις μηχανικές ιδιότητες και τις λειτουργικές συσχετίσεις. Πειραματικά, αυτή η ταχύτητα μπορεί να μετρηθεί συνδέοντας ειδικούς αισθητήρες στο σύστημα πίπτουσας μάζας.

Το υλικό του σωλήνα περνάει από την καμπυλότητα της μήτρας και θεωρούμε ότι ο όγκος παραμένει σταθερός και η πραγματική περιφερειακή παραμόρφωση για συνθήκες επίπεδης (ομαλής) παραμόρφωσης μπορεί να προσδιοριστεί θεωρώντας την αυξομείωση του πάχους του τοιχώματος πολύ μικρή. Τελικά η πραγματική παραμόρφωση δίνεται από τον τύπο :

$$\bar{\varepsilon} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \varepsilon_\alpha \quad (29)$$

Η περιφερειακή παραμόρφωση προκύπτει από την αυξομείωση του μήκους περιφέρειας. Το αρχικό μήκος περιφέρειας δίνεται:

$$l_0 = 2 \cdot \pi \cdot (R_i + r) \quad (30)$$

Το τρέχον μήκος περιφέρειας για γωνία  $\theta$  εκφράζεται ακολούθως:

$$l_f = 2 \cdot \pi \cdot [R_i + r \cdot (1 - \cos \theta)] \quad (31)$$

Τελικά η έκφραση της πραγματικής περιφερειακής παραμόρφωσης είναι:

$$\varepsilon_\alpha = \ln \left[ \frac{(R_i + t) + (r - t) \cdot (1 - \cos \theta)}{(R_i + t)} \right] \quad (32)$$

Σχετικά με την επιρροή της ακτίνας καμπυλότητας ή ράδιο ( $r$ ) της μήτρας έχει βρεθεί ότι ο σωλήνας μπορεί να αναδιπλωθεί επιτυχώς χωρίς αστάθεια για:

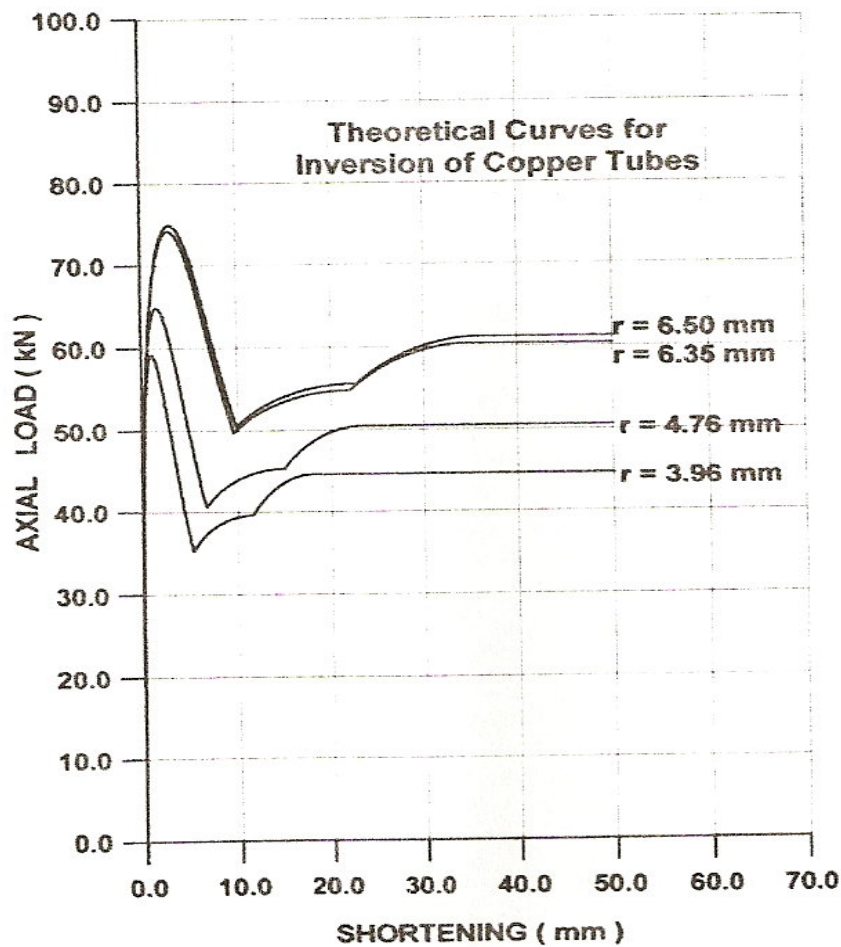
$$r_{cr} = \left( \frac{R_i \cdot t^2}{4 \cdot t + \mu \cdot R_i} \right)^{1/2} \quad (33)$$

Σε περίπτωση που η τριβή της διεπιφάνειας ανάμεσα στο σωλήνα και τη μήτρα είναι πολύ μικρή και μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα με  $\mu = 0$  (περίπτωση χρήσης ειδικών λιπαντικών) τότε η (33) μετασχηματίζεται στην:

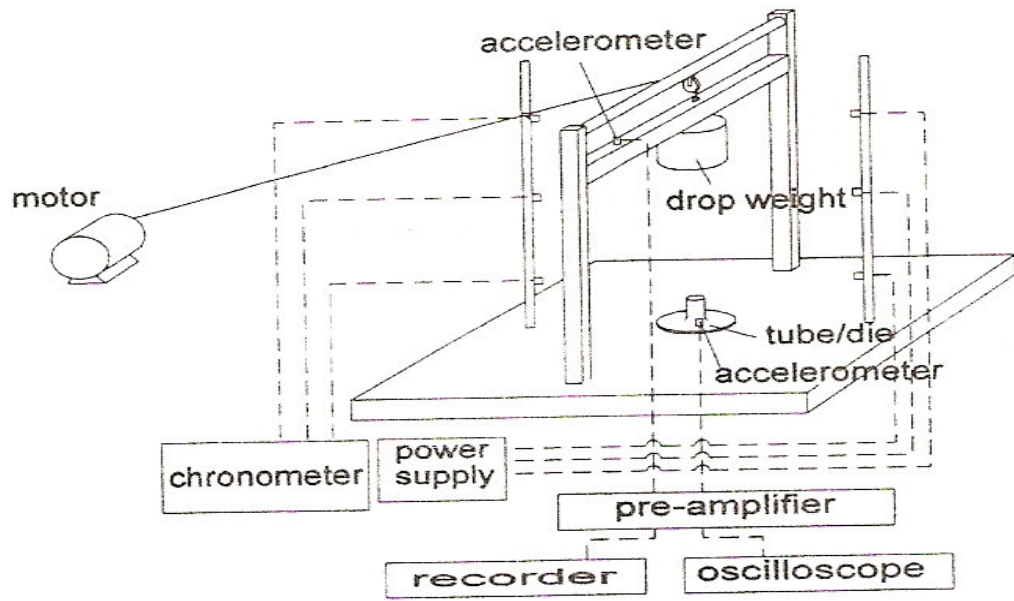
$$r_{cr} = \left( \frac{R_i \cdot t}{2} \right)^{1/2} \quad (34)$$

Η θεωρητική αξονική βράχυνση (26) και το αξονικό φορτίο αναδίπλωσης (27) είναι συναρτήσεις της γωνίας αναδίπλωσης. Αριθμητική επίλυση αυτών των εξισώσεων οδηγεί στον προσδιορισμό της καμπύλης φορτίου – μετατόπισης (αξονικής βράχυνσης)

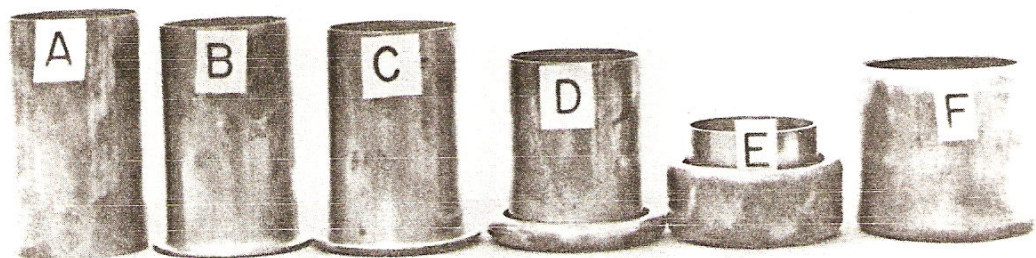
Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνονται μια σειρά τέτοιων καμπυλών που καθεμία αντιστοιχεί σε διαφορετική ακτίνα καμπυλότητας μήτρας.



Σχ. 2.1.2 Καμπύλες φορτίου – μετατόπισης για διάφορες καμπυλότητες



Σχ. 2.1.3 Τυπική διάταξη πίπτουσας μάζας



Σχ. 2.1.4 Δοκίμια που προέκυψαν από αξονική συμπίεση σε μήτρα

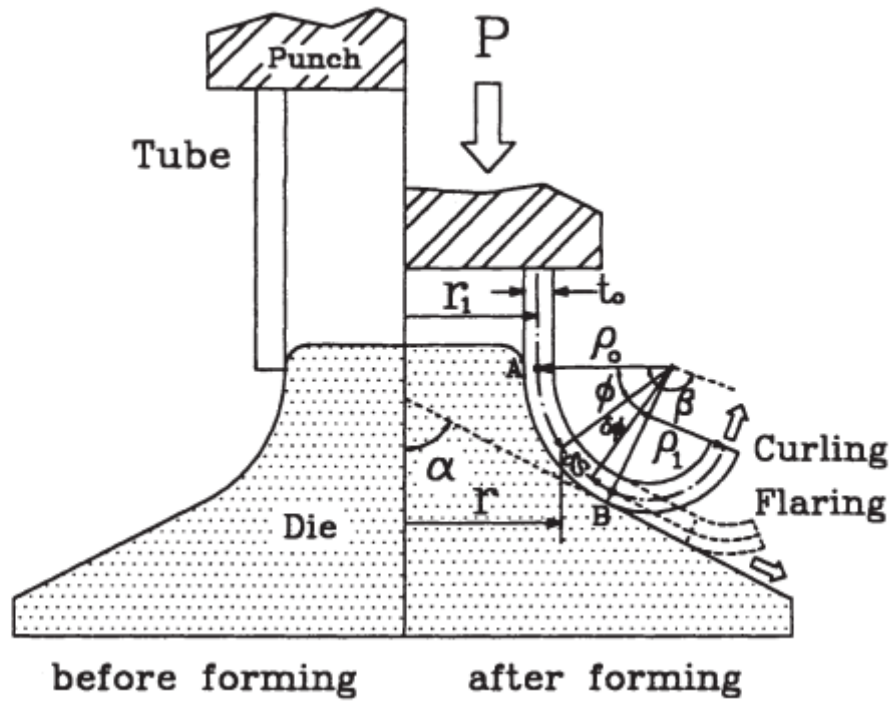
## 2.2 Χαρακτηριστικά εξωτερικής αναδίπλωσης μεταλλικών σωλήνων

Το ακόλουθο θεωρητικό μοντέλο διατυπώθηκε από τον Daw-Kwei Leu στην αντίστοιχη εργασία του (βλέπε βιβλιογραφία[4]).

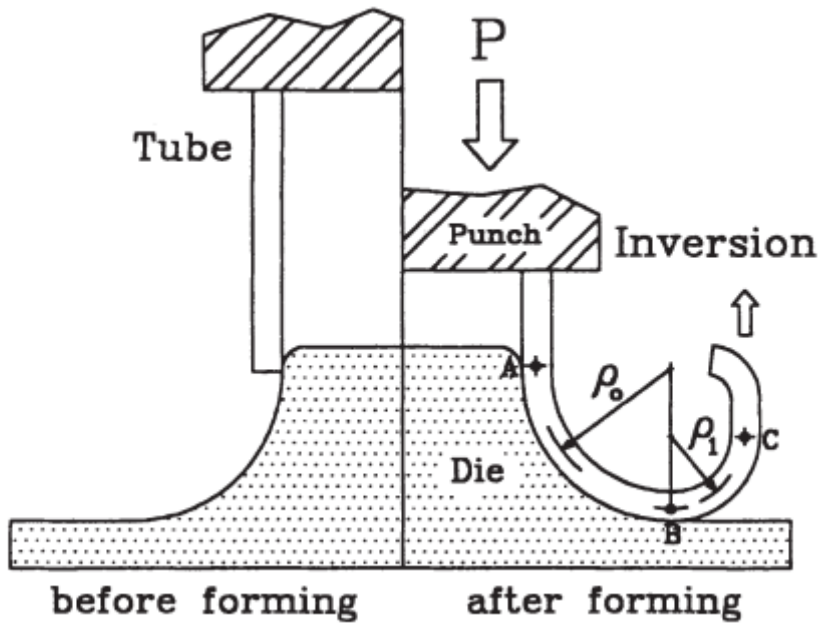
### 2.2.1 Σύμβολα

$\delta W_{B1}, \delta W_{B2}$	ενέργεια καμπύλωσης στα σημεία A και B (βλέπε σχήμα)
$\delta W_{\mu}$	ενέργεια λόγω τριβής στη ζώνη επαφής
$\delta W_{d1}, \delta W_{d2}$	ενέργειας παραμόρφωσης για ανάκαμψη και ολίσθηση
n	εκθέτης εργοσκήρυνσης
$\alpha$	ημιγωνία μήτρας
$r_1$	ακτίνα μήτρας
$\rho_o, \bar{\rho}_o$	ακτίνα και αδιάστατη ακτίνα καμπυλότητας ( $\bar{\rho}_o = \rho_o / \sqrt{D_1 t_o}, D_1 = 2r_1$ )
$\rho_c, \bar{\rho}_c$	όμοια με πριν κρίσιμη για κάμψη ακτίνα (bending) ( $\bar{\rho}_c = \rho_c / \sqrt{D_1 t_o}$ )
$\rho_1, \bar{\rho}_1$	ακτίνα ανάκαμψης και αδιάστατη αντίστοιχα $\bar{\rho}_1 = \rho_1 / \sqrt{D_1 t_o}$
$\rho_o^{\max}, \rho_o^{\min}$	μέγιστη και ελάχιστη τιμή αντίστοιχα για το $\rho_o$ (για ημικυκλικό άκρο σωλήνα 2.2.4)
$\bar{\rho}_o^{\max}, \bar{\rho}_o^{\min}$	η προηγούμενες ποσότητες αδιαστατοποιημένες
$\bar{\Delta}$	αδιάστατο μέγεθος αναδίπλωσης (= $\rho_o + \rho_1$ )
$t_o$	πραγματικό πάχος σωλήνα
$\mu$	συντελεστής τριβής
K	σταθερά υλικού
P	φορτίο συμπίεσης που οδηγεί σε αναδίπλωση
$\sigma_e, \epsilon_e$	πραγματική τάση και παραμόρφωση

2.2.2 Θεωρητική ανάλυση αναδίπλωσης σε μήτρα ειδικής μορφής που φέρει καμπυλότητα-κωνικότητα



Σχ. 2.2.2.1 Αξονική θλιπτική καταπόνηση σε μήτρα με καμπυλότητα-κωνικότητα



Σχ. 2.2.2.2 Αναδίπλωση σε μήτρα ειδικής μορφής με καμπυλότητα στη βάση της

Υπάρχουν δύο σημαντικά στάδια-φάσεις στη διαδικασία αναδίπλωσης σωλήνων :

1. Η ασταθής φάση ανάκαμψης (‘κατσαρώματος’) του σωλήνα όπου ο σωλήνας συμπιέζεται και αναγκάζεται να ακολουθήσει την καμπυλότητα της μήτρας και αρχίζει η αναδίπλωση του
2. Η σταθερή οιωνεί-στατική (quasi-static) φάση όπου η ανάκαμψη σταματά και αρχίζει η αναδίπλωση και δημιουργία νέου τοιχώματος.

Οι περιορισμοί που ισχύουν και εδώ είναι οι ακόλουθοι:

- Η πλαστική εργοσκήλυνση του υλικού υπακούει στην έκφραση του Holloman και χρησιμοποιείται η θεωρία της πλαστικής παραμόρφωσης
- Η επίδραση Bauschinger αμελείται
- Το πάχος του τοιχώματος του σωλήνα παραμένει σταθερό
- Λαμβάνεται η τριβή Coulomb και η επίδραση της ελαστικότητας αμελείται

Ισχύουν επίσης :

$$\bullet \quad \sigma_e = K \varepsilon_e^n \quad (1)$$

$$\bullet \quad \sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2}} \left[ (\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + (\sigma_s - \sigma_z)^2 + (\sigma_s - \sigma_\theta)^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

$$\bullet \quad \varepsilon_e = \frac{\sqrt{3}}{2} \left[ (\varepsilon_e - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_s - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_s - \varepsilon_\theta)^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

Ο αναλυτικός τρόπος της ανάκαμψης του σωλήνα γίνεται εύκολα αντιληπτός αν παρατηρήσουμε το σχήμα 2.2.2.1 . Ο σωλήνας έρχεται αρχικά σε επαφή με τη μήτρα μέσω του τμήματός της που φέρει καμπυλότητα, η ημιγωνία της κορυφής δέχεται τιμές από 0 μέχρι  $\alpha$ . Κατόπιν ο σωλήνας αναδιπλώνεται και δεν έχει επαφή με τη μήτρα-εργαλείο και η ημιγωνία δέχεται τιμές από  $\alpha$  μέχρι  $\beta$ .

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.2.2.1 για το απειροστό στοιχείο  $\delta s$ , το ποσό της καταναλισκόμενης ενέργειας σε πλαστική κάμψη κατά την είσοδο στη ζώνη κάμψης (bending) στο σημείο A είναι:

$$\delta W_{B1} = 2 \int_0^{t_o/2} \sigma_s 2\pi r_1 \eta d\eta d\phi \quad (4)$$

Στην παραπάνω σχέση η τάση στο σημείο A είναι :

$$\sigma_s = (2/\sqrt{3})^{1+n} K(\eta/\rho_o)^n$$

και

$$\delta S = \rho_o d\phi$$

με αντικατάσταση έχουμε:

$$\delta W_{B1} = \frac{4\pi r_1 K \delta S}{2+n} \left( \frac{2}{\sqrt{3}\rho_o} \right)^{1+n} \left( \frac{t_o}{2} \right)^{2+n} \quad (5)$$

Όταν το άκρο του σωλήνα στρίψει στο σημείο B και διαμορφώσει αναδίπλωση της οποίας η ακτίνα είναι  $\rho_1$  τότε το ποσό της ενέργειας λόγω κάμψης στο σημείο B μπορεί να περιγραφεί ακολούθως:

$$\delta W_{B2} = \frac{4\pi r_1 K \delta S}{2+n} \left( \frac{2}{\sqrt{3}} \right)^{1+n} \left( \frac{t_o}{2} \right)^{2+n} \frac{1}{\rho_o^n e^{\mu\alpha}} \left| \frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_1} \right| \quad (6)$$



Στην παραπάνω εξίσωση η τάση στο σημείο B είναι  $\sigma'_s = (r_1/r_2)e^{-\mu\alpha}\sigma_s$  με  $r_2 = r_1 + \rho_o(1 - \cos\alpha)$

Για να υπολογίσουμε την επίδραση της τριβής, μία πίεση διεπιφάνειας  $q$  παράγεται από τις εξισώσεις ισορροπίας του κελύφους στην ζώνη επαφής και περιγράφεται ακολούθως:

$$q \approx \sigma_\theta t_o \cos\phi / r \quad (7)$$

Όπου η τάση  $\sigma_\theta$  είναι  $\sigma_\theta = \left(2/\sqrt{3}\right)^{1+n} K \varepsilon_\theta^n$  και η παραμόρφωση είναι  $\varepsilon_\theta = \ln\left[1 + \rho_o / r_1(1 - \cos\phi)\right] \approx \rho_o / r_1(1 - \cos\phi)$  και  $\varepsilon_\theta^n \approx \left(\rho_o / r_1\right)^n (1 - n \cos\phi)$  για εύρος  $\phi$  από 0 έως  $\alpha$ .

Έτσι η ενέργεια λόγω τριβής  $\delta W_\mu$  περιγράφεται:

$$\delta W_\mu = \int_0^\alpha \mu q 2\pi r \delta S \rho_o d\phi = 2\pi \delta S \rho_o \mu t_o K \left(\frac{2}{\sqrt{3}}\right)^{1+n} \left(\frac{\rho_o}{r_1}\right)^n \left(\sin\alpha - \frac{n\alpha}{2} - \frac{n \sin 2\alpha}{4}\right) \quad (8)$$

Τελικά το έργο παραμόρφωσης του σωλήνα για τη μήκυνση των στοιχείων του σωλήνα μέσω της πλαστικής περιφερειακής μήκυνσης εκφράζεται ακολούθως:

$$\delta W_d = 2\pi K t_o \left(\frac{2}{\sqrt{3}}\right)^{1+n} \delta S \left[ \rho_o \int_0^\alpha \varepsilon_\theta^n \sin\phi d\phi + \rho_1 \int_\alpha^\beta \varepsilon_\alpha^n \sin\phi d\phi \right] \quad (9)$$

Στην παραπάνω σχέση ο όρος  $\varepsilon_\theta^n$  για εύρος από  $\phi = \alpha$  μέχρι  $\phi = \beta$  μπορεί να προσεγγιστεί ακολούθως:

$$\varepsilon_\theta^n = \left\{ \ln \left[ 1 + \frac{\rho_o}{r_1} (1 - \cos\alpha) + \frac{\rho_1}{r_1} (\cos\alpha - \cos\phi) \right] \right\}^n \approx$$

$$\begin{aligned}
&\approx \left[ \frac{\rho_o}{r_1} (1 - \cos \alpha) + \frac{\rho_1}{r_1} (\cos \alpha - \cos \phi) \right]^n \\
&\approx \left( \frac{\rho_o}{r_1} \right)^n \left[ 1 - n \cos \alpha + \frac{n\rho_1}{\rho_o} (\cos \alpha - \cos \phi) \right] \quad (10)
\end{aligned}$$

Η τιμή του  $\delta W_{d^-}$  για τη φάση της ανάκαμψης είναι  $\delta W_{d1}$  και μπορεί να περιγραφεί ακολούθως:

$$\begin{aligned}
\delta W_{d1} = & 2\pi K t_o \left( \frac{2}{\sqrt{3}} \right)^{1+n} \left( \frac{\rho_o}{r_1} \right)^n \delta S \left\{ \rho_o (1 - \cos \alpha - \frac{n}{2} \sin^2 \alpha) + \right. \\
& \left. + \rho_1 \left[ (\cos \alpha - \cos \beta) (1 - n \cos \alpha + \frac{n\rho_1}{\rho_o} \cos \alpha) - \frac{n\rho_1}{2\rho_o} (\sin^2 \beta - \sin^2 \alpha) \right] \right\} \quad (11)
\end{aligned}$$

Η τιμή του  $\delta W_{d^-}$  για τη φάση της ολίσθησης είναι  $\delta W_{d2}$  και μπορεί να περιγραφεί ακολούθως:

$$\begin{aligned}
\delta W_{d2} = & 2\pi K t_o \left( \frac{2}{\sqrt{3}} \right)^{1+n} \left( \frac{\rho_o}{r_1} \right)^n \delta S \left\{ \rho_o (1 - \cos \alpha - \frac{n}{2} \sin^2 \alpha) + \right. \\
& \left. + \rho_1 \sin \alpha \left[ \left( 1 - n \cos \alpha + \frac{n\rho_1}{\rho_o} \cos \alpha \right) (\beta - \alpha) - \frac{n\rho_1}{\rho_o} \sin(\beta - \alpha) \right] \right\} \quad (12)
\end{aligned}$$

### 2.2.3 Κριτήρια για εξωτερική αναδίπλωση και ολίσθηση

Θα προσπαθήσουμε να προσδιορίσουμε την κρίσιμη ακτίνα κάμψης ως κριτήριο διαχωρισμού ανάμεσα στην ανάκαμψη-αναδίπλωση και στην ολίσθηση ενός σωλήνα που θλίβεται αξονικά σε κωνική μήτρα. Οι επιδράσεις της γεωμετρίας, των

παραμέτρων του υλικού, του συντελεστή τριβής καθώς και της ημιγωνίας κορυφής εξετάζονται στη βάση που έχουν τεθεί στην εργασία του Kitazawa. Για λόγους απλουστεύσεως του φαινομένου θεωρείται  $\rho_o = \rho_1$  δηλαδή λαμβάνουμε ως ακτίνα ανάκαμψης την ακτίνα καμπυλότητας  $\rho_o$ . Τότε το ποσό της ολικής ενέργειας παραμόρφωσης για τη φάση της ανάκαμψης  $\delta W_c$  όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.2.2.1 είναι:

$$\delta W_c = \delta W_{B1} + \delta W_{B2} + \delta W_{\mu} + \delta W_{d1} \quad (13)$$

Ομοίως το ποσό της ολικής ενέργειας για τη φάση της ολίσθησης  $\delta W_f$  δίνεται αντιστοίχως:

$$\delta W_f = \delta W_{B1} + \delta W_{B3} + \delta W_{\mu} + \delta W_{d2} \quad (14)$$

Στην παραπάνω εξίσωση με τον όρο  $\delta W_{B3}$  συμβολίζουμε την ενέργεια λόγω ακαμπτότητας (unbending) κατά τη φάση της ολίσθησης, η οποία λαμβάνει χώρα στο σημείο B ή αν ισχύει  $\rho_1 \approx \infty$  για  $\delta W_{B2}$ , και μπορεί να παρασταθεί ως εξής:

$$\delta W_{B3} = \frac{4\pi r_1 K \delta S}{2+n} \left( \frac{2}{\sqrt{3}} \right)^{1+n} \left( \frac{t_o}{2} \right)^{2+n} \frac{e^{-\mu\alpha}}{\rho_o^{1+n}} \quad (15)$$

Εν τω μεταξύ, βασιζόμενοι στην σχέση  $\delta W_c = \delta W_f$ , η σχέση για την κρίσιμη κατάσταση για ανάκαμψη και ολίσθηση υπό τον περιορισμό  $\rho_o = \rho_1$ , παίρνει την παρακάτω μορφή:

$$\frac{e^{-\mu\alpha}}{2+n} \left( \frac{r_1 t_o}{2\rho_o^2} \right)^{1+n} + \sin \alpha [\beta - \alpha - n \sin(\beta - \alpha)] - (\cos \alpha - \cos \beta) + \frac{n}{2} (\sin^2 \beta - \sin^2 \alpha) = 0 \quad (16)$$

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως , η γενική μορφή της ακτίνας  $\rho_o$  μπορεί να περιγραφεί ακολούθως:

$$\rho_o = \sqrt{\frac{r_1 t_o}{2}} e^{-\frac{\mu \alpha}{2(1+n)} (2+n) \frac{-1}{2(1+n)}} \left\{ \cos \alpha - \cos \beta - \sin \alpha [\beta - \alpha - n \sin(\beta - \alpha)] - \frac{n}{2} (\sin^2 \beta - \sin^2 \alpha) \right\}^{\frac{-1}{2(1+n)}} \quad (17)$$

Στην ειδική περίπτωση της παραπάνω εξίσωσης που ισχύει  $n = 0$  και  $\mu = 0$  , τότε:

$$\frac{r_1 t_o}{4\rho_o^2} + (\beta - \alpha) \sin \alpha - (\cos \alpha - \cos \beta) = 0 \quad (18)$$

ή ορίζεται η αδιάστατη ακτίνα  $\rho_o$

$$\bar{\rho}_o = \frac{\rho_o}{\sqrt{D_1 t_o}} = \frac{1}{\sqrt{8[\cos \alpha - \cos \beta - (\beta - \alpha) \sin \alpha]}}$$

στην οποία  $D_1 = 2r_1$

Για ορισμένη τιμή του  $\beta$  έχουμε την φάση ολίσθησης (άκαμπτη φάση), διαφορετικά έχουμε ύπαρξη της φάσης ανάκαμψης. Έχει βρεθεί ότι η ελάχιστη τιμή (κρίσιμη συνθήκη) της εξίσωσης (17) είναι η κρίσιμη ακτίνα διαχωρισμού μεταξύ φάσης ανάκαμψης και ολίσθησης. Έτσι, η γωνία  $\beta$  για την οποία η ακτίνα κάμψης παίρνει την ελάχιστη τιμή μπορεί να προκύψει από τη σχέση  $\partial \rho_o / \partial \beta = 0$  ,

$$\sin \beta - \sin \alpha [1 - n \cos(\beta - \alpha)] - n \sin \beta \cos \beta = 0 \quad (19)$$

ή μπορεί να απλοποιηθεί ακολούθως:

$$\beta = \sin^{-1} \left( \frac{\sin \alpha}{1 + n \sin^2 \alpha} \right)$$

Για την παραπάνω εξίσωση, υπονοείται ότι η κρίσιμη ακτίνα είναι ανεξάρτητη της τριβής και ότι οι παράγοντες  $n$  και  $\alpha$  είναι αυτοί που επηρεάζουν κυρίως την κρίσιμη ακτίνα κάμψης. (είναι διαφορετική από άλλες προσεγγίσεις που εξετάζουν μόνο την επίδραση των γεωμετρικών παραμέτρων)

Θεωρώντας  $\mu = 0$  και  $n = 0$ , η κρίσιμη συνθήκη  $\sin \beta = \sin \alpha$  ή  $\beta - \alpha = \pi - 2\alpha = 0$  μπορεί να οδηγήσει στην παρακάτω σχέση :

$$\bar{\rho}_c = \frac{1}{\sqrt{8[2 \cos \alpha - (\pi - 2\alpha) \sin \alpha]}}$$

(ή παραπάνω σχέση μας παρουσιάζει την ειδική περίπτωση που συμπίπτει με την εξίσωση (13) της προσέγγισης του Kitazawa [14])

#### **2.2.4 Αναδίπλωση σε μήτρα ειδικής μορφής με καμπυλότητα στη βάση**

Στην περίπτωση της εξωτερικής αναδίπλωσης όπως η συγκεκριμένη που εξετάζουμε, η γωνία είναι  $\alpha = 90^\circ$  και το δεύτερο τοίχωμα σχηματίζεται κατάλληλα όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.2.2.2. Η ακτίνα καμπυλότητας  $\rho_o$  έχει μια ελάχιστη τιμή  $\rho_o^{\min}$  για την οποία το άκρο του σωλήνα μόλις έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια της μήτρας. Σε αυτήν την περίπτωση θεωρήθηκε ότι το  $\rho_o$  είναι ίσο με τη μικρότερη κρίσιμη ακτίνα κάμψης και διατηρείται σταθερό άσχετα με το πόσο μικρό είναι το  $\rho_o$ .

Επιπλέον, μία ανώτατη κρίσιμη ακτίνα  $\rho_o^{\max}$  υπάρχει η οποία είναι ίση με την ακτίνα καμπυλότητας της μήτρας επειδή είναι η ελάχιστη τιμή για το εύρος  $\rho_o > \rho_1$ . Έτσι, το εύρος του ημικυκλικού άκρου του σωλήνα για σωλήνα διπλού τοιχώματος έχει ένα διάστημα τιμών  $\rho_o^{\min} < \rho_o < \rho_o^{\max}$ . Πρέπει να αναφερθεί ότι το τελευταίο έχει

επιβεβαιωθεί και από τους Kitazawa και Seino λαμβάνοντας υπόψη μόνο την επίδραση της γεωμετρίας. Αναμένεται στην παρούσα προσέγγιση ότι οι ακτίνες αναδίπλωσης  $\rho_o$  και  $\rho_1$  θα πρέπει να είναι ίσες μεταξύ τους για να σχηματίσουν έναν αναδιπλωμένο σωλήνα δύο παράλληλων τοιχωμάτων με κεκλιμένη ημικυκλική άκρη. Από αυτά που αναφέρθηκαν ανωτέρω, το φορτίο που απαιτείται για να προκαλέσει αναδίπλωση προκύπτει εξισώνοντας το ποσό του έργου που επιτελέστηκε από το φορτίο με το ποσό της πλαστικής ενέργειας που απορροφήθηκε. Τελικά το επιτελούμενο έργο από το φορτίο συμπίεσης  $P$  δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\delta W = \delta W_{B1} + \delta W_{B2} + \delta W_{B4} + \delta W_{\mu} + \delta W_{dl} \quad (21)$$

στον οποίο η ενέργειας λόγω ακαμψότητας  $\delta W_{B4}$  στο σημείο C θεωρήθηκε ίση με αυτήν λόγω κάμψης στο σημείο B και είναι:

$$\delta W_{B4} = \frac{4\pi r_1 K \delta S}{2+n} \left( \frac{2}{\sqrt{3}} \right)^{1+n} \left( \frac{t_o}{2} \right)^{2+n} \frac{e^{-\mu\pi/2}}{\rho_o^n \rho_1} \quad (22)$$

Για τη συνθήκη  $\delta W = P \cdot \delta S$  και  $\rho_o > \rho_1$ , το φορτίο συμπίεσης  $P$  δίνεται ακολούθως:

$$P = 2\pi K t_o \left( \frac{2}{\sqrt{3}} \right)^{1+n} \left\{ \frac{r_1}{(2+n)} \frac{1}{\rho_o^n} \left( \frac{t_o}{2} \right)^{1+n} \left[ \frac{2e^{-\mu\pi/2}}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_o} (1 - e^{-\mu\pi/2}) \right] + \right. \\ \left. + \rho_o \mu \left( \frac{\rho_o}{r_1} \right)^n \left[ \rho_o \left( 1 - \frac{n}{2} \right) + \rho_1 \left( 1 + \frac{n\rho_1}{2\rho_o} \right) \right] \right\} \quad (23)$$

Η ακτίνα ανάκαμψης  $\rho_1$  καθορίστηκε θεωρώντας ότι αποκτά μία τιμή που ελαχιστοποιεί το  $P$ . Έτσι, υπό τη συνθήκη  $\partial P / \partial \rho_1 = 0$  οδηγούμαστε στην παρακάτω σχέση:

$$\left[ \frac{n}{\rho_o} \left( \frac{\rho_o}{r_1} \right)^n \right] \rho_1^3 + \left( \frac{\rho_o}{r_1} \right)^n \rho_1^2 - \frac{2r_1}{2+n} \left( \frac{t_o}{2} \right)^{1+n} \frac{e^{-\mu\pi/2}}{\rho_o^n} = 0 \quad (24)$$

Για λόγους απλούστευσης και για να οδηγηθούμε σε μια αναλυτική λύση για το  $\rho_1$ , ο πρώτος και ο δεύτερος όρος της παραπάνω εξίσωσης μπορούν να απλοποιηθούν θεωρώντας ότι  $1 + n\rho_1/\rho_o \approx 1 + n$  και έτσι έχουμε:

$$\left[ \frac{n}{\rho_o} \left( \frac{\rho_o}{r_1} \right)^n \right] \rho_1^3 + \left( \frac{\rho_o}{r_1} \right)^n \rho_1^2 = \left( \frac{\rho_o}{r_1} \right)^n \rho_1^2 \left( 1 + n \frac{\rho_1}{\rho_o} \right) \approx \left( \frac{\rho_o}{r_1} \right)^n \rho_1^2 (1 + n) \quad (25)$$

Τότε η ακτίνα ανάκαμψης  $\rho_1$  μπορεί να προσεγγιστεί ακολούθως:

$$\rho_1 = \sqrt{\frac{2e^{-\mu\pi/2}}{(1+n)(2+n)}} \left( \frac{r_1 t_o}{2} \right)^{\frac{1+n}{2}} \frac{1}{\rho_o^n} \quad (26)$$

Για την εύρεση του ημικυκλικού άκρου ενός αναδιπλωμένου σωλήνα, η συνθήκη  $\rho_o = \rho_1$  για την παραπάνω εξίσωση συνεπάγεται ένα ανώτατο όριο για το εύρος της ημικυκλικής ανάκαμψης το οποίο είναι :

$$\rho_o^{\max} = \left[ \frac{2}{(1+n)(2+n)} \right]^{\frac{1}{2(1+n)}} \left( \frac{r_1 t_o}{2} \right)^{\frac{1}{2}} e^{-\frac{\pi\mu}{4(1+n)}} \quad (27)$$

Η ειδική περίπτωση της παραπάνω εξίσωσης, στην οποία ισχύει  $n = \mu = 0$ , είναι:

$$\rho_o^{\max} = \sqrt{\frac{r_1 t_o}{2}} \quad (28)$$

Από την άλλη μεριά, υπό τη συνθήκη  $\rho_o \leq \rho_1$ , η ελάχιστη ακτίνα  $\rho_o$  καθορίζεται ως το μικρότερο όριο του εύρους της ημικυκλικής αναδίπλωσης παρόμοια με πριν.

Βασιζόμενοι στην συνθήκη  $\rho_1 = \rho_o$  και από τη σχέση  $\partial P / \partial \rho_o = 0$  για την ελάχιστη  $\rho_o$  έχουμε:

$$\rho_o^{\min} = \sqrt{\frac{r_1 t_o}{2} \left( \frac{1 + e^{-\mu\pi/2}}{2 + n} \right)^{1/(1+n)} \left[ 2 + \mu \left( 1 - \frac{n\pi}{4} \right) \right]^{-1/(1+n)}} \quad (29)$$

ή μπορεί να προσδιοριστεί σαν αδιάστατη ακτίνα κάμψης  $\bar{\rho}_o = \rho_o / \sqrt{D_1 t_o}$

Αν η επίδραση του παράγοντα τριβής της κάμψης, αμεληθεί και υπό την ισχύ της συνθήκης  $n = 0$ , η εξίσωση (29) μπορεί να απλοποιηθεί στην ακόλουθη μορφή:

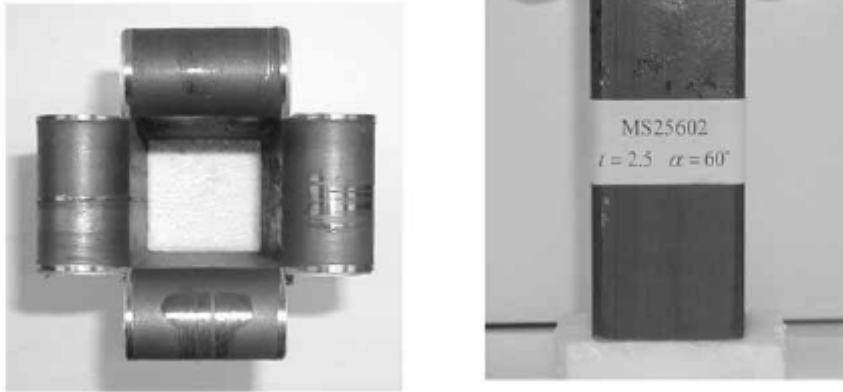
$$\rho_o^{\min} = \sqrt{\frac{r_1 t_o}{2} \frac{1}{(1 + \mu)}} \quad (30)$$

στην οποία αν ο όρος  $\mu$  αγνοηθεί, τότε το αποτέλεσμα είναι  $\rho_o^{\min} = \sqrt{D_1 t_o / 8}$ .

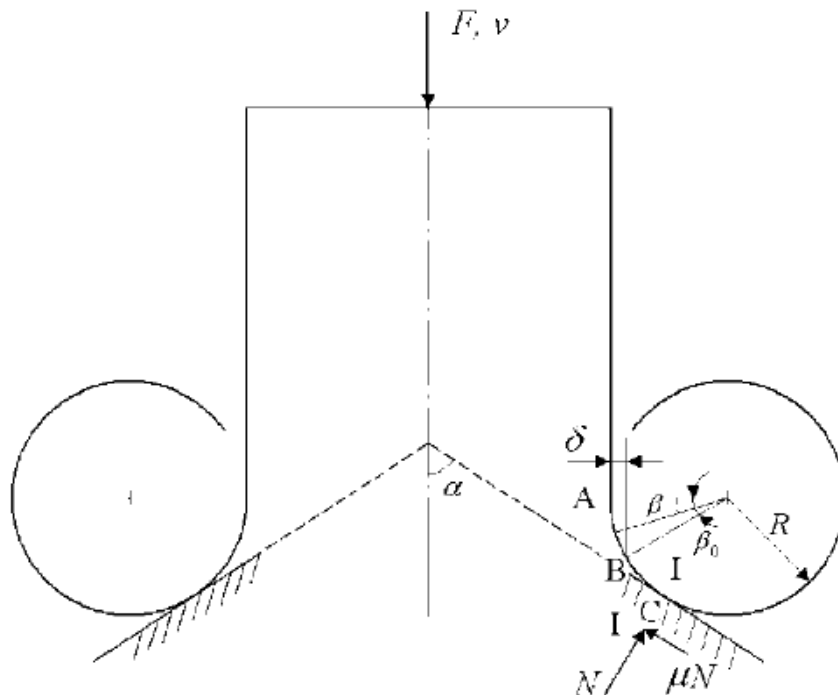
Οι εξισώσεις (27) και (29), που προκύπτουν από το αναλυτικό μοντέλο, δείχνουν ότι οι παράγοντες  $\mu$  και  $n$  επηρεάζουν σε κάποιο βαθμό τη σχηματοποίηση του ημικυκλικού άκρου του σωλήνα. Αυτό διαφοροποιείται από άλλες αντίστοιχες μελέτες που εξετάζουν μόνο την επίδραση των γεωμετρικών παραμέτρων αμελώντας τους παραπάνω παράγοντες.



**2.3 Αξονική καταπόνηση μεταλλικών σωλήνων τετραγωνικής διατομής που οδηγεί σε διάρρηξη και ανάκαμψη του σωλήνα**



**2.3.1 Θεωρητικό μοντέλο και βασικές προϋποθέσεις**



Σχ. 2.3.1.1 Κινηματικό μοντέλο διάρρηξης (σκισίματος) και ανάκαμψης ενός σωλήνα τετραγωνικής διατομής

## Σύμβολα

$\alpha$	στιγμιαία επιτάχυνση
B	πλάτος τετραγωνικού σωλήνα
C	σταθερά ρυθμού παραμόρφωσης
D, $\rho$	δυναμικές σταθερές υλικού
E	ολική ενέργεια εισαγωγής
$E_i$	ολική ενέργεια απόσβεσης
F	αξονική δύναμη
$k_1, k_2$	σταθερές
m	μάζα τεμαχίων
M	πίπτουσα μάζα
$M_0$	ροπή πλαστικής κάμψης
N	κάθετη δύναμη
R	ακτίνα ανάκαμψης
s	μετατόπιση
t, $t_1$	πάχη τοιχωμάτων
$v, v_0$	ταχύτητα
$\dot{W}_e$	ρυθμός επιτελούμενου έργου αξονικής δύναμης
$\dot{W}_F$	ρυθμός επιτελούμενου έργου τριβής
$\dot{W}_p$	ρυθμός ενέργειας πλαστικής κάμψης
$\dot{W}_T$	ρυθμός ενέργειας ρωγμάτωσης/σπασίματος
$\alpha$	ημιγωνία μήτρας
$\beta$	γωνιακή συντεταγμένη
$\beta_0$	γωνία άκρης ρωγμής
$\delta$	παράμετρος COD
$\Delta L$	συνολική βράχυνση σωλήνα
$\mu$	συντελεστής τριβής
$\sigma_0$	τάση ροής
$\sigma_u$	απόλυτη τάση
$\sigma_y$	τάση διαρροής

Το παραπάνω σχήμα απεικονίζει ένα απλό θεωρητικό μοντέλο για ένα σωλήνα τετραγωνικής διατομής που υπόκειται σε θλιπτική αξονική καταπόνηση με μια ταχύτητα  $V$  πάνω σε μια πυραμιδοειδή μήτρα με ημιγωνία κορυφής  $\alpha$ . Το μοντέλο αυτό που θα περιγραφεί στη συνέχεια διατυπώνεται από τους X Huang, G Lu και T X Yu στην αντίστοιχη εργασία τους (βλέπε βιβλιογραφία [9]). Θεωρούμε ότι ο σωλήνας σκίζεται και στρέφεται με σταθερή ακτίνα  $R$ . Το σημείο A είναι το αρχικό σημείο ανάκαμψης. Το σημείο B αποτελεί την αιχμή που αρχίζει η ρωγμή με γωνία  $\beta_0$  όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα. Το σημείο C είναι το σημείο επαφής ανάμεσα στην εμφανιζόμενη ανάκαμψη και στη μήτρα. Κάποιες από τις υποθέσεις που έχουν γίνει με σκοπό να διευκολύνουν την ανάλυση είναι οι ακόλουθες:

1. Το υλικό θεωρείται άκαμπτο, απόλυτα πλαστικό με μέση τάση διαρροής  $\sigma_0$  η οποία θεωρήθηκε ότι είναι η απόλυτη τάση  $\sigma_u$ . Αυτή η τάση έχει την ίδια τιμή για καμπτική και μεμβρανώδη παραμόρφωση. Επίσης δεν υπάρχει αλληλεπίδραση ανάμεσα στη συνισταμένη μεμβρανώδη δύναμη και στην καμπτική ροπή κατά τη διαρροή.
2. Δεν υπάρχει καμία μεταβολή στο πάχος τοιχώματος του σωλήνα κατά τη διάρκεια της συμπίεσης και της κάμψης. Από πειραματική παρατήρηση συμπεραίνεται ότι υπάρχει μια απότομη αλλαγή στη μεσημβρινή κυρτότητα κοντά στις άκρες των ρωγμών. Για απλούστευση θεωρήθηκε ότι όλες οι λωρίδες στρέφονται σε ρολά με σταθερή ακτίνα  $R$ , και η καμπτική ροπή στις άκρες των ρωγμών είναι ίση με την πλαστική καμπτική ροπή του πλευρικού τοιχώματος.
3. Η κατανομή των τάσεων στην περιοχή που αρχίζουν οι ρωγμές, είναι περίπλοκη λόγω διεπιφανειακού εφελκυσμού, out-of-plane διάτμησης και κάμψης. Θεωρήθηκε ότι το σκίσιμο του σωλήνα στις τέσσερις γωνίες προκλήθηκε από in-plane επιμήκυνση και out-of-plane ρωγμάτωση. Η ενέργεια ρωγμάτωσης κυριαρχείται από τον διεπιφανειακό εφελκυσμό κάτω από την επίδραση των τάσεων.

Το σπάσιμο του σωλήνα εξαιτίας της ρωγμάτωσης λόγω ολκιμότητας μπορεί να περιγραφεί αποτελεσματικά με χρήση του κριτηρίου COD. Η προσέγγιση κατά COD είναι μία παραδεκτή μέθοδος για να χαρακτηρίσει τις ιδιότητες σπασίματος-ρωγμάτωσης όλκιμων ελασμάτων. Η άκρη της ρωγμής όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.3.1.1 δεν είναι στο A αλλά στο B λόγω της ολκιμότητας του υλικού δηλ. η συνδετικότητα κρατά τις τέσσερις λωρίδες μαζί και το cross-section του σωλήνα είναι επεκταμένο μέχρι να επιτευχθεί κρίσιμος διαχωρισμός η COD. Η παράμετρος COD,  $\delta$ , ορίζεται όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.3.1.1 και εξαρτάται από το πάχος του τοιχώματος του σωλήνα, την παραμόρφωση του υλικού λόγω σπασίματος καθώς και από την κατανομή των τάσεων. Η γωνία  $\beta_0$  καθορίζεται από τη γεωμετρία του μοντέλου και την τιμή του  $\delta$  όπως φαίνεται και στον τύπο που ακολουθεί:

$$\beta_0 = \cos^{-1} \theta \left( 1 - \frac{\delta}{R} \right) \quad (6)$$

### **2.3.2 Καθορισμός του φορτίου συμπίεσης και της ακτίνας ανάκαμψης σε quasi-static (οιωνεί-στατική) κατάσταση**

Στα quasi-static συστήματα απορρόφησης ενέργειας, υπάρχουν τρεις πρωταρχικές πηγές κατανάλωσης ενέργειας:

- Πλαστική κάμψη του τοιχώματος του σωλήνα
- Διάδοση του σπασίματος-ρηγμάτωσης κατά μήκος των τεσσάρων γωνιών
- Ύπαρξη τριβής

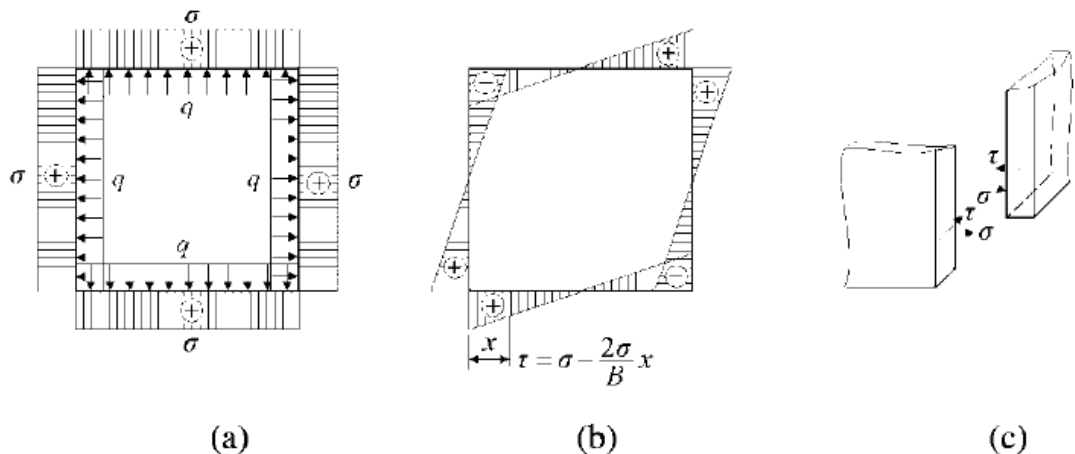
Η ενέργεια λόγω πλαστικής κάμψης είναι συνέπεια της πλαστικής κάμψης των τεσσάρων πλευρικών συστροφών. Συμβολίζοντας την ακτίνα ανάκαμψης με R και θεωρώντας την ίδια και για τις τέσσερις πλευρικές αναδιπλώσεις ο ρυθμός ενέργειας λόγω πλαστικής κάμψης για τις τέσσερις πλευρές είναι:

$$\dot{W}_p = \frac{4M_0}{R} V = \frac{\sigma_0 B t^2}{R} V \quad (7)$$

Όπου το  $M_0 = \sigma_0 B t^2 / 4$  είναι η πλαστική καμπτική ροπή,  $B$  είναι το πλευρικό μήκος του cross section και  $t$  το πάχος.

Ο ρυθμός της ενέργειας ρωγμάτωσης καθορίζεται από την ολοκλήρωση της στοιχειώδους τάσης επιμήκυνσης και του ρυθμού παραμόρφωσης σε όλο τον όγκο της περιοχής παραμόρφωσης. Το τελευταίο αποτυπώνεται στον παρακάτω τύπο:

$$\dot{W}_T = \int_V \sigma \dot{\epsilon} dV \quad (8)$$



Σχ. 2.3.2.1 κατανομή τάσεων στην cross-section ενός τετραγωνικού σωλήνα: (a) μέση τάση (b) διατμητική τάση (c) τάσεις στις γωνίες

Το σχήμα 2.3.2.1 δείχνει την κατανομή των τάσεων σε ένα σωλήνα τετραγωνικής διατομής κοντά στην άκρη των ρωγμών αμελώντας την επίδραση της αξονικής δύναμης. Θεωρείται ότι η ομοιόμορφη εξωτερική πίεση  $q$ , εφαρμόζεται κοντά στη μήτρα. Επίσης θεωρείται ότι υπάρχει μία ομοιόμορφη επιμήκυνση των τεσσάρων τοιχωμάτων του σωλήνα καθώς και ότι η παραμόρφωση είναι ομοιόμορφη κατά μήκος του πλευρικού τοιχώματος του σωλήνα. Κατά συνέπεια η συνισταμένη

μέση τάση,  $\sigma$ , είναι σταθερή και η διατμητική τάση μεταβάλλεται γραμμικά από  $\tau = \sigma$  στις γωνίες μέχρι  $\tau = 0$  στο μέσο του τοιχώματος του σωλήνα όπως βλέπουμε και στο σχήμα 2.3.2.1 Η συνθήκη της τάσης διαρροής μας δίνει:

$$\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2 = \sigma_0^2 \quad (9)$$

Στις τέσσερις γωνίες του σωλήνα ισχύει:  $\sigma_x = \tau_{xy} = \sigma, \sigma_y = 0$ . Επομένως η τάση πλαστικής μήκυνσης κοντά στην άκρη των ρωγμών πριν την έναρξη της ρωγμάτωσης είναι περίπου ίση με  $\sigma_0 / 2$ . Με βάση το σχήμα 2.3.1.1 η παραμόρφωση λόγω μήκυνσης για κάθε πλευρά είναι:

$$\varepsilon = \frac{2R(1 - \cos\beta)}{B} \quad (10)$$

Όπου  $\beta$  είναι γωνιακή συντεταγμένη ( $0 \leq \beta \leq \beta_0$ ). Με αντικατάσταση στην εξίσωση (8) έχουμε για το ρυθμό της ενέργεια ρωγμάτωσης για τις τέσσερις γωνίες:

$$\dot{W}_T = 4\sigma_0 t_1 \delta \quad (11)$$

Η τριβή είναι ένας σημαντικός μηχανισμός κατανάλωσης ενέργειας σε οιωδεί-στατική κατάσταση (quasi-static). Όπως είναι γνωστό η τιμή του συντελεστή τριβής  $\mu$  εξαρτάται από το υλικό, από τις συνθήκες επαφής και από άλλους παράγοντες όπως η θερμοκρασία της επιφάνειας της μήτρας και τυχόν διαμορφώσεις του σωλήνα. Ο ρυθμός κατανάλωσης ενέργειας λόγω τριβής είναι:

$$\dot{W}_F = 4\mu NV \quad (12)$$

Όπου  $N$  είναι η κάθετη δύναμη για κάθε πλευρά του σωλήνα. Υπό quasi-static κατάσταση μπορεί να εκφραστεί ακολούθως:

$$N = \frac{F}{4(\sin\alpha + \mu \cos\alpha)} \quad (13)$$

Για το ρυθμό του έργου της αξονικής δύναμης  $\dot{W}_e = FV$  έχουμε το παρακάτω άθροισμα:

$$\dot{W}_e = \dot{W}_p + \dot{W}_T + \dot{W}_F \quad (14)$$

Με αντικατάσταση στην παραπάνω σχέση των επιμέρους ρυθμών ενέργειας καταλήγουμε για την απαιτούμενη δύναμη διάσπασης και ανάκαμψης του σωλήνα σε μήτρα ημιγωνίας  $\alpha$  :

$$F = \frac{\sigma_0(Bt^2/R + 4t_1\delta)}{1 - \mu/(\sin \alpha + \mu \cos \alpha)} \quad (15)$$

Στην παραπάνω εξίσωση η τιμή της ακτίνας ανάκαμψης είναι άγνωστη και πρέπει να καθοριστεί θεωρητικά. Σύμφωνα με τις παραδοχές μας η ροπή κάμψης στην άκρη των ρωγμών είναι ίση με την πλήρη πλαστική καμπτική ροπή :

$$\frac{FR}{4} \frac{[\sin(\alpha - \beta_0) + \mu \cos(\alpha - \beta_0) - \mu]}{\sin \alpha + \mu \cos \alpha} = M_0 \quad (16)$$

Συνδυαζόμενη με την εξίσωση (15) η μέση ακτίνα αναδίπλωσης δίνεται από:

$$R = \frac{Bt^2}{4\delta t_1} \left[ \frac{\sin \alpha + \mu \cos \alpha - \mu}{\sin(\alpha - \beta_0) + \mu \cos(\alpha - \beta_0) - \mu} - 1 \right] \quad (17)$$

Εισάγουμε τις ακόλουθες αδιάστατες παραμέτρους: (18)

- $f = \frac{F}{4Bt\sigma_0}$
- $\gamma = \frac{\delta}{t_1}$
- $\lambda = \frac{t}{t_1}$
- $b = \frac{B}{t}$

- $r = \frac{R}{t}$

Τότε η αδιάστατη ακτίνα αναδίπλωσης μπορεί να εκφραστεί ακολούθως:

$$r = \frac{b\lambda^2}{4\gamma} \left[ \frac{\sin \alpha + \mu \cos \alpha - \mu}{\sin(\alpha - \beta_0) + \mu \cos(\alpha - \beta_0) - \mu} - 1 \right] \quad (19)$$

Όπου  $\beta_0 = \cos^{-1}(1 - \gamma/\tau\lambda)$ . Έχει βρεθεί ότι η ακτίνα ανάκαμψης είναι ανεξάρτητη του συντελεστή τριβής. Κατά συνέπεια αμελώντας την επίδραση της τριβής στην ακτίνα αναδίπλωσης η αδιάστατη ακτίνα ανάκαμψης μπορεί πιο απλά να εκφραστεί ως:

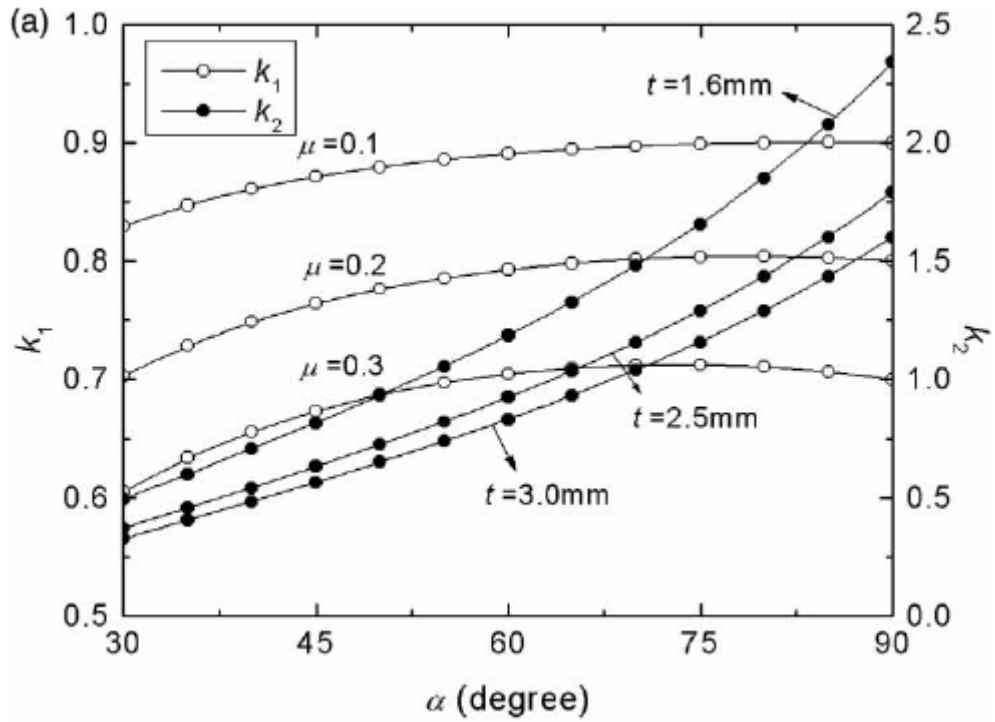
$$r = \frac{b\lambda^2}{4\gamma} \left[ \frac{\sin \alpha}{\sin(\alpha - \beta_0)} - 1 \right] \quad (20)$$

Αυτή αποτελεί μία μη γραμμική εξίσωση επειδή το  $\beta_0$  είναι συνάρτηση της ακτίνας ανάκαμψης  $r$ . Αντικαθιστώντας την εξίσωση (20) στην εξίσωση (15) η αδιάστατη δύναμη κρούσης είναι:

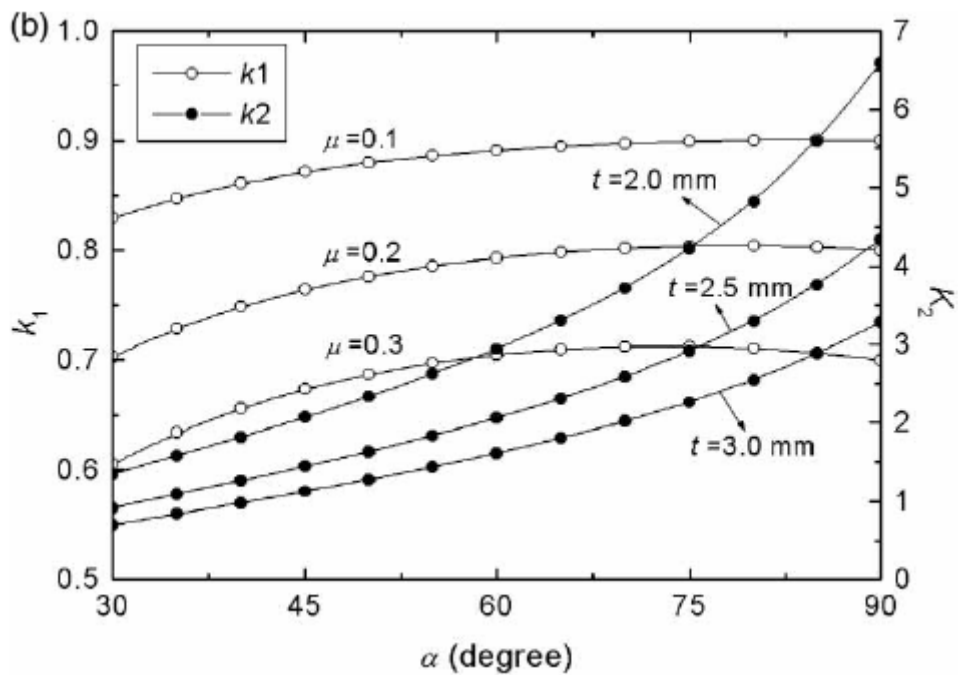
$$f = \frac{k_2 + \gamma\lambda}{k_1 b\lambda^2} \quad (21)$$

Όπου το  $k_1$  είναι μια σταθερά που φανερώνει την επίδραση της τριβής και  $k_2$  μια άλλη καλά καθορισμένη σταθερά που φανερώνει το ποσοστό της ενέργειας πλαστικής κάμψης στην ενέργεια λόγω ρωγμάτωσης. Οι τιμές των  $k_1$  και  $k_2$  με  $\gamma = 1.0$  παριστάνονται στο σχ. 2.3.2.2 για πειραματικούς σωλήνες από μαλακό ατσάλι και στο σχ. 2.3.2.3 για σωλήνες αλουμινίου υποδεικνύοντας ότι ο  $k_1$  εξαρτάται από το συντελεστή τριβής  $\mu$  και την ημιγωνία  $\alpha$  της μήτρας ενώ ο  $k_2$  εξαρτάται από την ημιγωνία της μήτρας και τις διαστάσεις του σωλήνα.





Σχ. 2.3.2.2 Διακύμανση  $k_1$ ,  $k_2$  για σωλήνες από μαλακό ατσάλι



Σχ. 2.3.2.3 Διακύμανση  $k_1$ ,  $k_2$  για σωλήνες από αλουμίνιο

### 2.3.4 Επίδραση ρυθμού παραμόρφωσης

Η σχέση Cowper-Symonds είναι η πιο δημοφιλής εφαρμοζόμενη σχέση για δομικά υλικά. Αυτή η σχέση παρουσιάζει ένα άκαμπτο, απόλυτα πλαστικό υλικό με δυναμική τάση διαρροής ή ροής που εξαρτάται από το ρυθμό παραμόρφωσης. Έτσι ο λόγος της δυναμικής τάσης ροής  $\sigma_0^d$  προς τη στατική τάση ροής  $\sigma_0^s$  είναι:

$$\frac{\sigma_0^d}{\sigma_0^s} = 1 + \left( \frac{\dot{\epsilon}}{D} \right)^{1/p} \quad (24)$$

Όπου με  $\sigma_0^s$  υποδηλώνεται η οιωνει-στατική (quasi-static) τάση ροής του υλικού, με  $\sigma_0^d$  η δυναμική τάση ροής και με  $\dot{\epsilon}$  ο ρυθμός παραμόρφωσης. Το D και το p αποτελούν σταθερές του υλικού που προκύπτουν από πειράματα και έχουν βρεθεί ίσες με  $40 \text{ s}^{-1}$  και 5 για μαλακό ατσάλι και  $6500 \text{ s}^{-1}$  και 4 για αλουμίνιο αντίστοιχα. Αυτό μας υποδεικνύει ότι το μαλακό ατσάλι επηρεάζεται από το ρυθμό παραμόρφωσης ενώ το αλουμίνιο όχι.

Ο χαρακτηριστικός ρυθμός παραμόρφωσης μπορεί να καθοριστεί σαν ο μέσος ρυθμός της περιφερειακής παραμόρφωσης. Από την εξίσωση (10) ο στιγμιαίος ρυθμός περιφερειακής παραμόρφωσης μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$\dot{\epsilon}_\theta = \frac{2 \sin \beta}{B} v \quad (25)$$

Και ο μέσος ρυθμός περιφερειακής παραμόρφωσης είναι:

$$\dot{\epsilon}_{av} = \frac{\int_0^{\beta_0} \dot{\epsilon}_\theta d\beta}{\beta_0} = \frac{2(1 - \cos \beta_0)}{B\beta_0} v \quad (26)$$

Είναι εμφανές ότι ο ρυθμός της περιφερειακής παραμόρφωσης μεταβάλλεται με το χρόνο κατά τη διάρκεια δυναμικής παραμόρφωσης εξαιτίας της διακύμανσης της ταχύτητας κρούσης. Για να απλουστεύσουμε τους υπολογισμούς θεωρούμε ότι η

ταχύτητα κρούσης μειώνεται γραμμικά από  $v_0$  μέχρι την τιμή 0. Έτσι ο χαρακτηριστικός ρυθμός παραμόρφωσης μπορεί να καθοριστεί ακολούθως :

$$\dot{\varepsilon} = \frac{1 - \cos \beta_0}{B\beta_0} v_0 = C v_0 \quad (27)$$

Στην παραπάνω σχέση το C αποτελεί μία σταθερά εξαρτώμενη από τη γεωμετρία του σωλήνα και τη γωνία  $\beta_0$  και κατά συνέπεια από τη χρησιμοποιούμενη μήτρα. Η τιμή του C λαμβάνεται γύρω στο 5 για όλες τις περιπτώσεις . Έτσι η επίδραση του ρυθμού παραμόρφωσης στο σκίσιμο ενός τετραγωνικού σωλήνα μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$\frac{\sigma_0^d}{\sigma_0^s} = 1 + \left( \frac{5v_0}{D} \right)^{1/p} \quad (28)$$

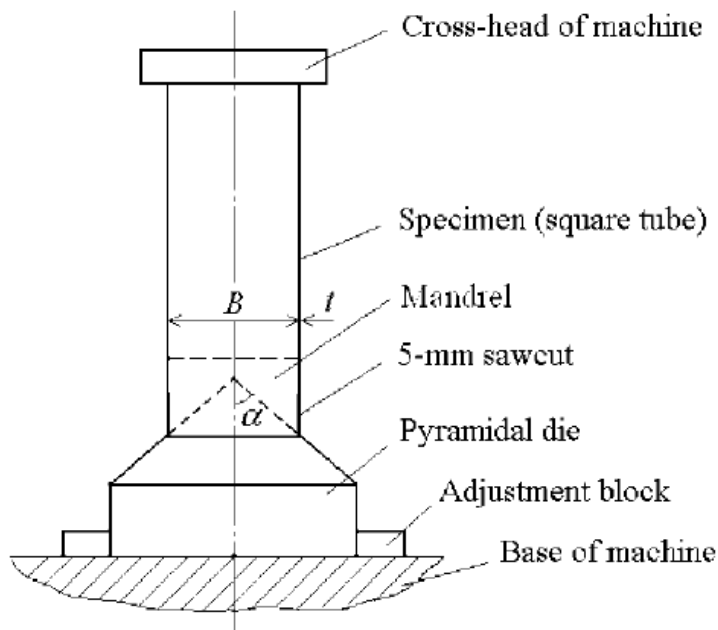
Το στατικό (quasi-static) μοντέλο μπορεί να επεκταθεί και σε δυναμικό μοντέλο με φορτίο λόγω πρόσκρουσης εξετάζοντας την επίδραση του ρυθμού παραμόρφωσης. Για παράδειγμα αντικαθιστώντας την quasi-static τάση ροής με τη δυναμική τάση ροής. Ωστόσο η απόσβεση ενέργειας λόγω τριβής είναι μικρότερη επειδή ο συντελεστής τριβής για δυναμικό μοντέλο είναι μικρότερος από τον αντίστοιχο για quasi-static μοντέλο. Έτσι αμελώντας την επίδραση της τριβής και εξισώνοντας την απορρόφηση ενέργειας με το έργο της εξωτερικής δύναμης έχουμε:

$$f^d = \frac{k_2 + \gamma \lambda}{b\lambda^2} \quad (29)$$

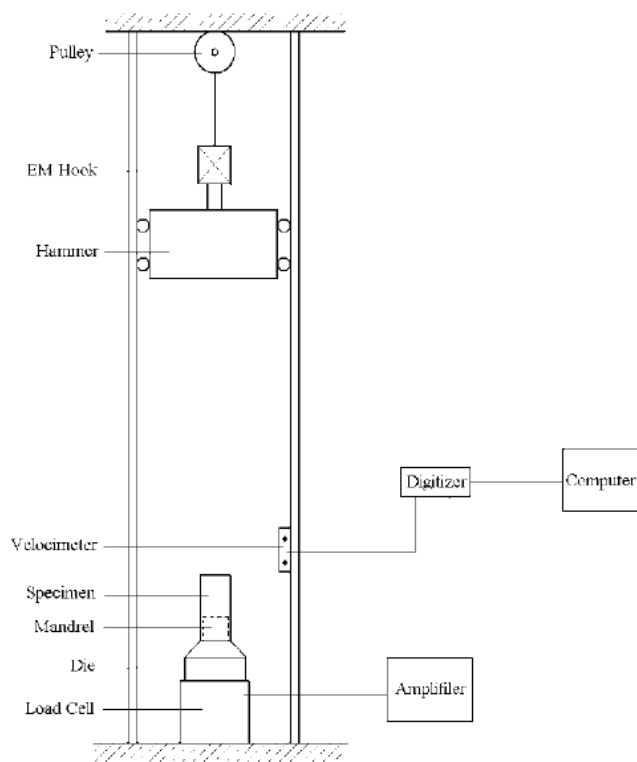
Όπου η αδιάστατη δύναμη στη δυναμική πρόσκρουση δίνεται από τον τύπο  $f^d = F^d / 4Bt\sigma_0^d$  και τελικά η επίδραση του ρυθμού παραμόρφωσης μπορεί να εκφραστεί ως :

$$\frac{\sigma_0^d}{\sigma_0^s} = \frac{F^d}{k_1 F^s} \quad (30)$$

Όπου  $F^s$  είναι η αντίστοιχη quasi-static δύναμη πρόσκρουσης



Σχ. 2.3.4.1 Κατάσταση quasi-static φόρτισης σε πρέσα



Σχ. 2.3.4.2 Κατάσταση δυναμικής φόρτισης σε σύστημα πίπτουσας μάζας

### **3 Πειραματικό μέρος**

#### **Γενικά**

Η πειραματική διαδικασία περιλαμβάνει την στατική αξονική καταπόνηση κελυφών κυκλικής διατομής από αλουμίνιο σε ειδικά διαμορφωμένες χαλύβδινες μήτρες. Σκοπός των πειραμάτων είναι η παρακολούθηση του τρόπου κατάρρευσης των δοκιμίων και η εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την απορρόφηση ενέργειας που επιτυγχάνεται κατά την παραπάνω θλιπτική διαδικασία.

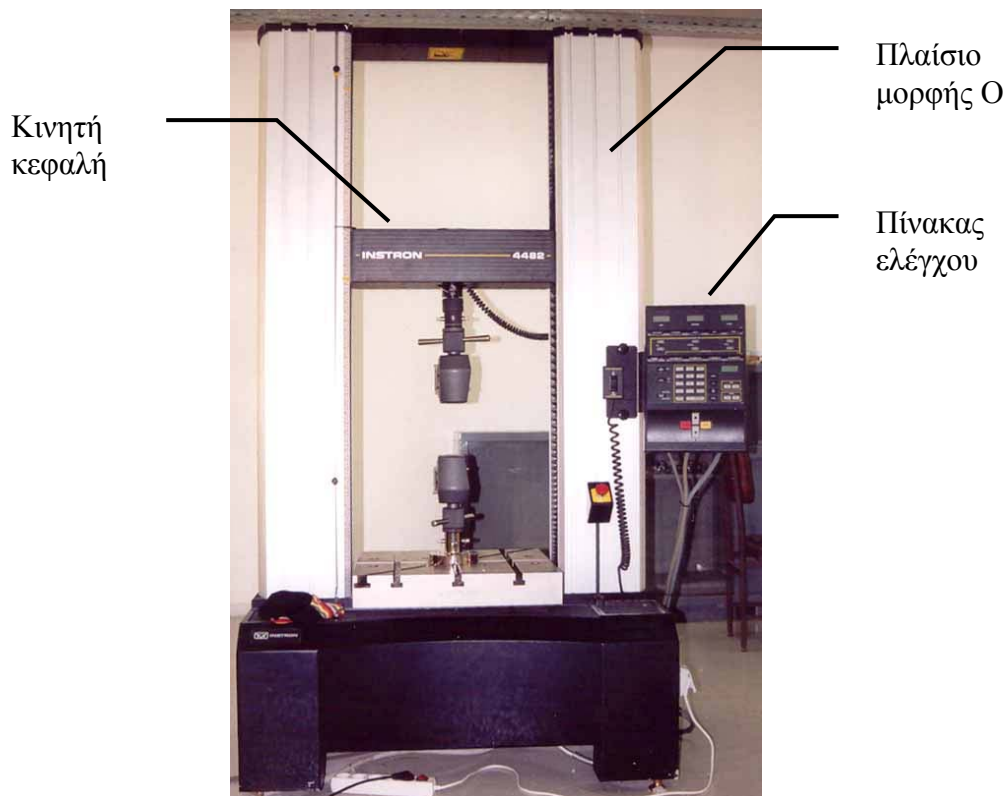
#### **3.1 Πειραματικός εξοπλισμός**

##### **Πρέσα INSTRON 4482**

Για την στατική αξονική καταπόνηση χρησιμοποιήθηκε η πρέσα INSTRON 4482 του εργαστηρίου (Σχ. 3.1.1). Πρόκειται για μηχανική πρέσα (μηχανισμού κοχλία-περικοχλίου) ονομαστικού φορτίου 100 KNt.

Τα βασικά μέρη της πρέσας αυτής είναι:

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



Σχήμα 3.1.1 Μηχανική πρέσα INSTRON 4482, ονομαστικού φορτίου 10 KNt.

Τα βασικά λειτουργικά χαρακτηριστικά της πρέσας είναι :

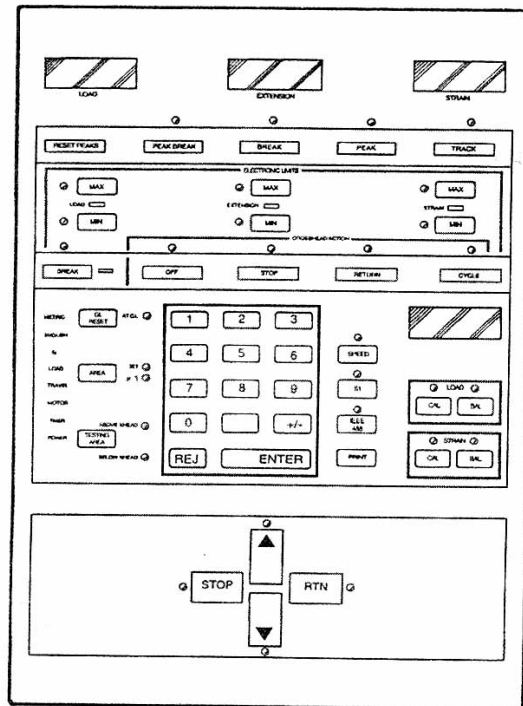
- Ονομαστική δύναμη: 100 KNt.
- Μέγιστη ταχύτητα κινητής κεφαλής:  $500 \text{ mm min}^{-1}$ .
- Ταχύτητα επιστροφής κινητής κεφαλής στην αρχική θέση:  $600 \text{ mm min}^{-1}$ .
- Μέγιστο αναπτυσσόμενο φορτίο στη μέγιστη ταχύτητα: 75 KNt.
- Μέγιστη ταχύτητα κινητής κεφαλής σε μέγιστο φορτίο:  $250 \text{ mm min}^{-1}$ .
- Ευαισθησία κεφαλής πρέσας:  $2 \text{ mV V}^{-1}$ .

Ο πίνακας ελέγχου έχει ενσωματωμένο μικροεπεξεργαστή που αναλαμβάνει τη ρύθμιση όλων των παραμέτρων κατεργασίας και την επεξεργασία των απαραίτητων υπολογισμών.

Όπως φαίνεται στο Σχ. 3.1.2, ο πίνακας ελέγχου απαρτίζεται από τέσσερις κυρίους τομείς από πάνω προς τα κάτω:

- Τον τομέα οθονών υγρών κρυστάλλων.
- Τον τομέα οριοθέτησεως.
- Τον κεντρικό τομέα.

- Τον τομέα κίνησης κεφαλής.



Σχήμα 3.1.2 Πίνακας ελέγχου πρέσας INSTRON 4482.

Στον κεντρικό τομέα υπάρχει αριθμητικό πληκτρολόγιο και οθόνη υγρών κρυστάλλων, τεσσάρων ψηφίων, καθώς και λυχνίες ένδειξης στο αριστερό μέρος, όπου αναγράφεται το χρησιμοποιούμενο σύστημα μέτρησης (SI, ENGLISH, METRIC). Η επιλογή του συστήματος μέτρησης γίνεται μέσω διακόπτη που βρίσκεται στο πίσω μέρος του πίνακα. Από τον κεντρικό τομέα υπάρχει η δυνατότητα για τις εξής ρυθμίσεις,

- Καλιμπράρισμα της μηχανής.
- Επιλογή της ταχύτητας κίνησης της κεφαλής.
- Οριοθέτηση της διαδρομής κίνησης.
- Καθορισμός του εύρους ενεργούς συμπίεσης του δοκιμίου.
- Έλεγχος της διαδικασίας εκτύπωσης των αποτελεσμάτων.
- Ενεργοποίηση της επικοινωνίας του πίνακα ελέγχου με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή.
- Λειτουργία ειδικού λογισμικού διάγνωσης όλων των λειτουργιών της πρέσας.
- Καλιμπράρισμα των μετρητικών φορτίου και παραμόρφωσης.

Στον τομέα οθονών υγρών κρυστάλλων περιέχονται τρεις τετραψήφιες οθόνες υγρών κρυστάλλων καθώς και πλήκτρα, τα οποία επιτρέπουν την επιλογή φορτίου, επιμήκυνσης ή συμπίεσης δοκιμίου, καθώς επίσης και τα ακρότατα αυτών. Όλες οι τιμές αποθηκεύονται και είναι διαθέσιμες προς επεξεργασία μετά το πέρας της δοκιμής. Σε κάθε περίπτωση, η επιλεγείσα λειτουργία υποδεικνύεται από αντίστοιχη λυχνία.

Στον τομέα οριοθέτησης δηλώνεται το όριο οποιασδήποτε λειτουργίας, το οποίο δεν πρέπει να υπερβεί το σύστημα. Τα όρια αυτά πρέπει να εισάγονται για λόγους ασφαλείας στην περίπτωση καταπόνησης δοκιμίου με κρίσιμο ύψος, για την αποφυγή ενδεχομένου συναντήσεως κινητής και σταθερής πλάκας από εσφαλμένο καλιμπράρισμα της μέγιστης διαδρομής. Οι καταχωρήσεις εκτελούνται μέσω του αριθμητικού πληκτρολογίου του πίνακα ελέγχου και οι επιλεγείσες τιμές εμφανίζονται στην οθόνη υγρών κρυστάλλων του κεντρικού τομέα.

Οι λειτουργίες που μπορούν να πραγματοποιηθούν, μόλις επιτευχθούν τα όρια στις τιμές του φορτίου (LOAD), της επιμήκυνσης (EXTENSION), της παραμόρφωσης (STRAIN) και της θραύσης (BREAK) είναι οι εξής:

- Στάση της κεφαλής στη συγκεκριμένη θέση (STOP).
- Επιστροφή της κεφαλής στην αρχική θέση (RETURN).
- Αλλαγή της κατεύθυνσης για επαναλαμβανόμενη κίνηση (CYCLE).
- Σταμάτημα της κίνησης της κεφαλής (OFF).

Στον τομέα κίνησης της κεφαλής, που βρίσκεται στο κάτω μέρος του πίνακα ελέγχου, υπάρχει η δυνατότητα χειροκίνητου ελέγχου της κίνησης της κεφαλής μέσω τεσσάρων πλήκτρων. Να σημειωθεί ότι με την επιλογή του κομβίου «επιστροφή» η κεφαλή δεν κινείται με την προγραμματισμένη ταχύτητα αλλά με την μέγιστη δυνατή και σταματά στο σημείο εκκίνησης.

Στον πίνακα ελέγχου είναι επίσης ενσωματωμένα και τα ολοκληρωμένα κυκλώματα που αναλαμβάνουν τον έλεγχο και την επικοινωνία του συστήματος με τα μετρητικά φορτίου και παραμόρφωσης.

Όσον αφορά την ταχύτητα της δοκιμής είναι ένα μέγεθος που εξαρτάται από πολλές παραμέτρους όπως είναι το υλικό του δοκιμίου, οι αλλαγές που θα υποστεί το δοκίμιο κατά την διάρκεια του πειράματος και η μέγιστη ταχύτητα του εξωτερικού



καταγραφέα-λήπτη που εξαρτάται από το ρυθμό δειγματοληψίας. Η ταχύτητα μπορεί να οριστεί με ακρίβεια ενός δεκαδικού ψηφίου.

Ιδιαίτερη σημασία έχει η σωστή τοποθέτηση του δοκιμίου στην κάτω πλάκα της πρέσας, ώστε να αποφευχθεί τυχόν μετακίνηση του, και οι δύο πλάκες να παραμένουν παράλληλες μεταξύ τους, κατά την διάρκεια της δοκιμής. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγεται η επιβολή μεγάλων φορτίων και εφαρμογή στρεπτικής δύναμης στην πλάκα της βάσης.

Το λογισμικό που χρησιμοποιείται από την πρέσα δοκιμών για την επίτευξη της πειραματικής εργασίας είναι το INSTRON Series IX Automated Material Tester Version 7.00, το οποίο έχει την δυνατότητα να επεξεργαστεί τα λαμβανόμενα αρχεία και σε υπολογιστή που δεν είναι συνδεδεμένος στην πρέσα δοκιμών.

Η αρχική οθόνη του προγράμματος αποτελείται από ένα αριθμό επιλογών που δίνουν πρόσβαση σε διάφορες λειτουργίες όπως αυτές φαίνονται στο Σχ. 3.1.3



Σχήμα 3.1.3 Αρχικές επιλογές του προγράμματος INSTRON Series IX.

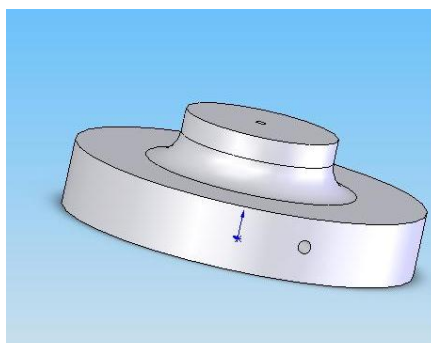
Οι διάφορες λειτουργίες που παρέχονται είναι:

- TEST- Η λειτουργία αυτή επιτρέπει τη διεξαγωγή πειράματος που ήδη έχει προετοιμαστεί.
- METHODS- Σε συνεργασία με το Method Editor, επιτρέπει την εισαγωγή νέων μεθόδων πειραμάτων ή τη μεταβολή των συνθηκών ενός ήδη υπάρχον.
- REPLAY- Δίδει τη δυνατότητα επανάληψης της διαδικασίας ενός πειράματος.
- GRAPH- Εισάγει την διαδικασία δημιουργίας γραφημάτων.
- HELP- Παρέχει βοηθητικές οδηγίες από το Merlin Online Help and Reference στην περίπτωση που παρουσιαστεί κάποιο πρόβλημα.
- EXIT- Έξοδος από το πρόγραμμα.

### **3.2 Ειδικές μορφές εργαλείων – μητρών που χρησιμοποιήθηκαν**

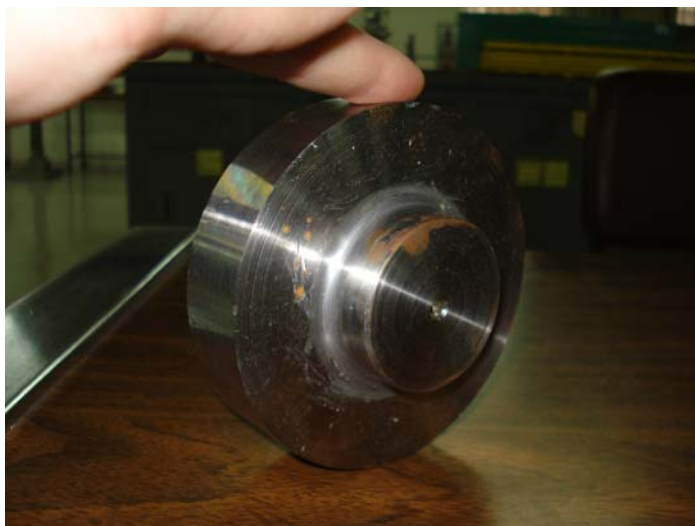
Κατά την πειραματική διαδικασία χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω ειδικές μορφές εργαλείου – μήτρας οι οποίες παίζουν σημαντικότατο ρόλο κατά τη θλιπτική διαδικασία τόσο στη μορφή κατάρρευσης των δοκιμίων όσο και στην ενέργεια που απορροφάται κατά την αξονική καταπόνηση. Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των εργαλείων-μητρών είναι κοινός χάλυβας St37.

- Κυλινδρική μήτρα ειδικής μορφής με καμπυλότητα στη βάση



Σχ. 3.2.1 Κυλινδρική μήτρα-εργαλείο ειδικής μορφής με καμπυλότητα στη βάση σχεδιασμένη με τη βοήθεια του λογισμικού solidworks

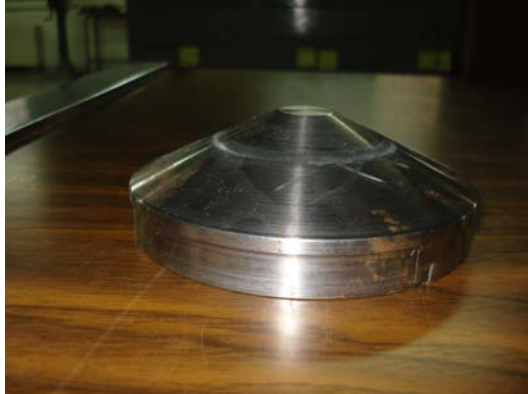
Στο παραπάνω σχήμα απεικονίζεται το προσχέδιο που έγινε με τη βοήθεια του λογισμικού solidworks με σκοπό να γίνει διαστασιολόγηση και να καταλήξουμε στην τελική μορφή εργαλείου – μήτρας που θα δοθεί για κατασκευή από τους τεχνικούς του εργαστηρίου. Έτσι μετά από σχετική μελέτη καταλήξαμε για τις διαστάσεις της μήτρας-εργαλείου σε  $\Phi$  46 mm για τη διάμετρο του κυρίως κυλίνδρου , σε  $\Phi$  100 mm για τη διάμετρο της βάσης, και ακτίνα καμπυλότητας τεταρτοκυκλίου  $r = 5$  mm στη βάση. Επίσης πρέπει να αναφέρουμε ότι διανοίγεται οπή όπως φαίνεται στο σχήμα 7.1.2.1 που λειτουργεί σαν αεραγωγός για τη διαφυγή του αέρα που εγκλωβίζεται κατά τη συμπίεση. Τελικά η μήτρα που κατασκευάστηκε είναι η παρακάτω:



Σχ. 3.2.2 Μήτρα-εργαλείο ειδικής μορφής με ακτίνα καμπυλότητας  $r = 5$  mm

➤ Κωνική μήτρα-εργαλείο

Εδώ χρησιμοποιήθηκε κυρίως μία κωνική μήτρα με διάμετρο βάσης  $\Phi$  100 mm και ημιγωνία κορυφής  $\alpha = 65^\circ$  ενώ έγινε και ένα πείραμα με κωνική μήτρα πολύ μικρότερης ημιγωνίας κορυφής  $\alpha = 40^\circ$  για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την επίδραση της τελευταίας στη μορφή κατάρρευσης του δοκιμίου. Η μήτρα-εργαλείο που κατασκευάστηκε αναπαριστάται στο παρακάτω σχήμα:



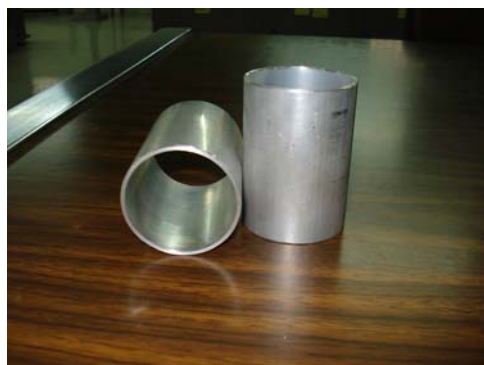
Σχ. 3.2.3 Κωνική μήτρα-εργαλείο ημιγωνίας κορυφής  $\alpha = 65^\circ$



Σχ. 3.2.4 Κωνική μήτρα-εργαλείο ημιγωνίας κορυφής  $\alpha = 40^\circ$

### 3.3 Κατασκευή δοκιμών

Τα δοκίμια που συμπίεστηκαν κατά την πειραματική αξονική καταπόνηση είναι σωλήνες κυκλικής διατομής από αλουμίνιο Al 6063 F-25 με διαστάσεις εξωτερικής διάμετρου  $D = 50\text{mm}$ , πάχος τοιχώματος  $t = 2\text{mm}$  (καθώς και ένα δοκίμιο με  $t = 1\text{mm}$ ,  $D = 48\text{mm}$ ) και με και ύψος δοκιμίου  $h = 70\text{mm}$ .



Σχ. 3.3.1 Δοκίμια κυλινδρικής διατομής



Σχ. 3.3.2 Κοπή δοκιμών και διαστασιολόγησή τους

Για τις ανάγκες των πειραμάτων και την εξαγωγή συμπερασμάτων κάποια από τα δοκίμια Al 6063 F-25 δέχθηκαν θερμική επεξεργασία και έτσι μπορούμε να τα κατηγοριοποιήσουμε σε τρεις ομάδες:

1. Τα μη θερμικά επεξεργασμένα δοκίμια. Πρόκειται για εκείνα τα δοκίμια που καταπονήθηκαν αξονικά χωρίς προηγουμένως να έχουν υποστεί θερμική επεξεργασία με σκοπό τη διαφοροποίηση των αρχικών ιδιοτήτων του υλικού.

2. Δοκίμια που δέχθηκαν θερμική επεξεργασία ως εξής, θέρμανση στους 413 ° C για περίπου 3 ώρες και ψύξη με συγκεκριμένο ρυθμό . Στα δοκίμια αυτά έγινε ανόπτηση- αποκατάσταση.(annealing)
3. Δοκίμια τα οποία δέχθηκαν θερμική επεξεργασία (θέρμανση-ψύξη με συγκεκριμένο ρυθμό) στους 182 ° C για 1 ώρα. Τα δοκίμια αυτά υπέστησαν σκλήρυνση.



Σχ. 3.3.3 Φούρνος OSMUNND 9,5 KW στον οποίο έγινε η θερμική επεξεργασία των δοκιμίων

### **Μηχανικές ιδιότητες των αξονικά καταπονόμενων δοκιμίων**

Το υλικό των δοκιμίων όπως έχει αναφερθεί είναι τυποποιημένο κράμα αλουμινίου Al 6063 F-25 με πυκνότητα  $\rho = 0,0027 \text{ gr/mm}^3$ , μέτρο ελαστικότητας  $E = 70000 \text{ MPa}$  και λόγο Poisson  $\nu = 0,33$ . Η τάση διαρροής με βάση τη βιβλιογραφία είναι  $\text{Sigy} = 200 \text{ MPa}$ . Για την εξαγωγή συμπερασμάτων που θα χρησιμοποιηθούν στο επόμενο κεφάλαιο κατά τη μοντελοποίηση έγιναν δύο δοκιμές εφελκυσμού μία στο μη θερμικά επεξεργασμένο δοκίμιο και μία στον ανοπτημένο σωλήνα με σκοπό τον προσδιορισμό της καμπύλης τάσεων-παραμορφώσεων  $\sigma$ - $\epsilon$ .

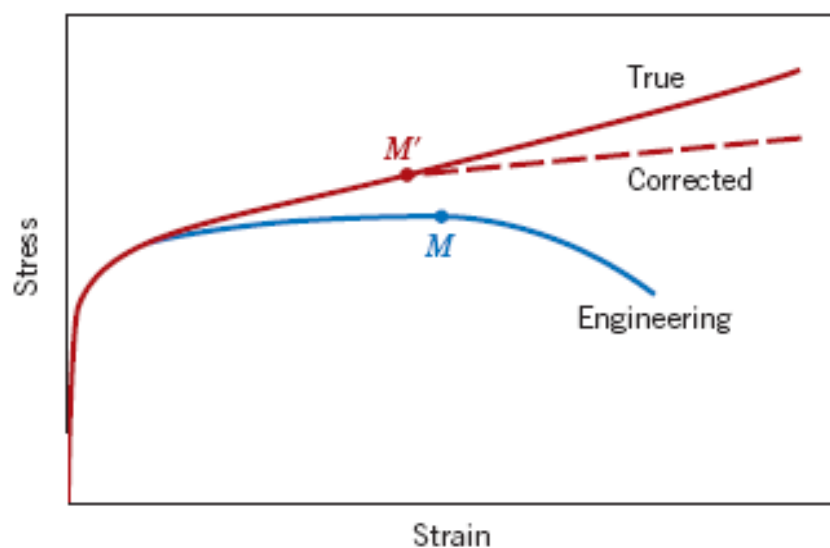
Πρέπει να αναφερθεί ότι ο εφελκυσμός έγινε σε μία λεπτή λωρίδα που αφαιρέθηκε από κάθε δοκίμιο αντίστοιχα. Τα δοκίμια που εφελκύστηκαν δεν είναι πρότυπα και έτσι γίνεται σύγκριση με αντίστοιχες τιμές από βιβλιογραφία, ωστόσο έχουμε μία πολύ καλή προσέγγιση κοντά στις πραγματικές τιμές.

Επίσης γίνεται και μετατροπή από τις μηχανικές τάσεις-παραμορφώσεις, δηλαδή αυτές που εξήχθησαν από την πειραματική διαδικασία, στις πραγματικές σύμφωνα με τους δύο παρακάτω τύπους :

➤  $\sigma_T = \sigma(1 + \epsilon)$

➤  $\epsilon_T = \ln(1 + \epsilon)$

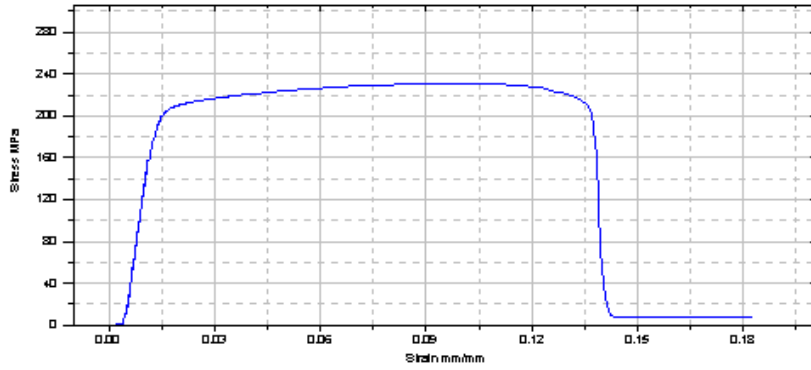
Για την καλύτερη κατανόηση του παραπάνω παρατίθεται το παρακάτω επεξηγηματικό γράφημα:



Σχ. 3.3.4 Σχηματική σύγκριση μεταξύ μηχανικών και πραγματικών τάσεων-παραμορφώσεων

1. Για το υλικό των μη θερμικά επεξεργασμένα δοκίμια:

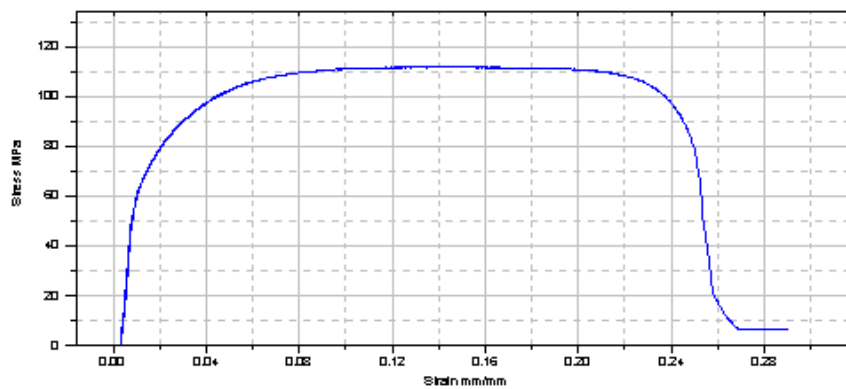
Τάση Διαρροής :  $\text{Sigy} = 196.7 \text{ MPa}$



Σχ. 3.3.5 καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων μη θερμικά επεξεργασμένου Al 6063 F-25

2. Για το υλικό των ανοπτημένων (annealed) δοκιμίων στους  $413^\circ \text{C}$  για 3 ώρες:

Τάση Διαρροής :  $\text{Sigy} = 62.23 \text{ MPa}$



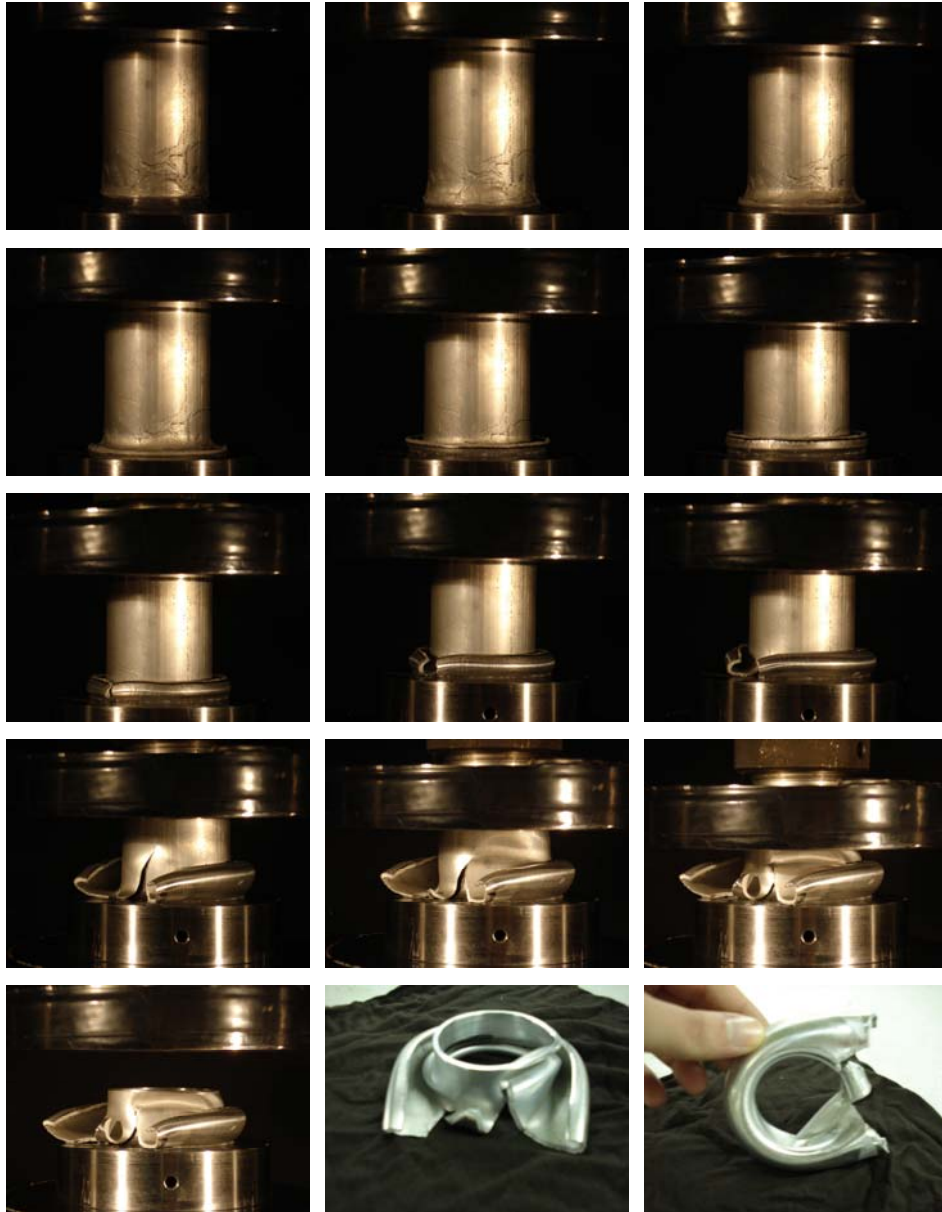
Σχ. 3.3.6 καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων ανοπτημένου Al 6063 F-25

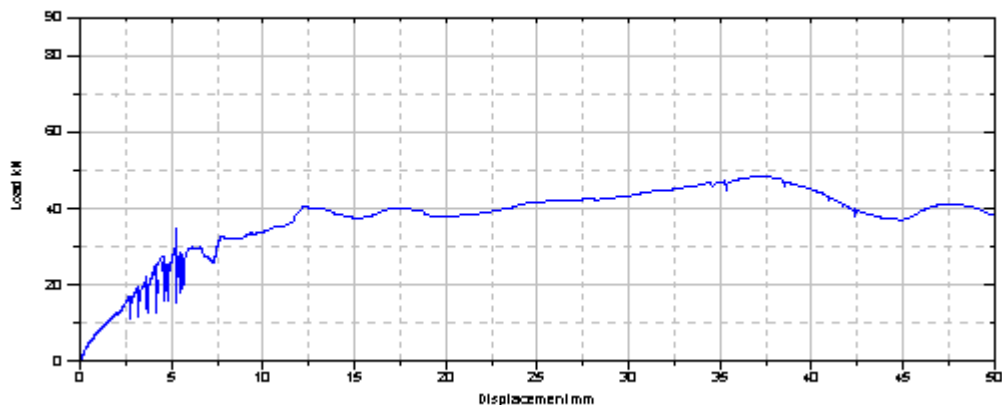


### 3.4 Στατική αξονική συμπίεση δοκιμίων σε κυλινδρική μήτρα ειδικής μορφής με ακτίνα καμπυλότητας $r = 5 \text{ mm}$ στη βάση

#### 3.4.1 Δοκίμιο #1

Δοκίμιο #1 : Μη θερμικά επεξεργασμένος σωλήνας με  $h=70\text{mm}$ ,  $D=50\text{mm}$  και  $t=2\text{mm}$





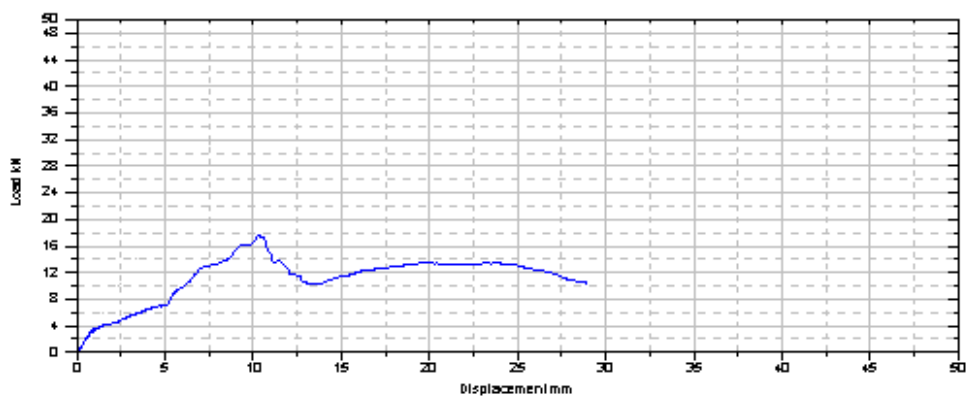
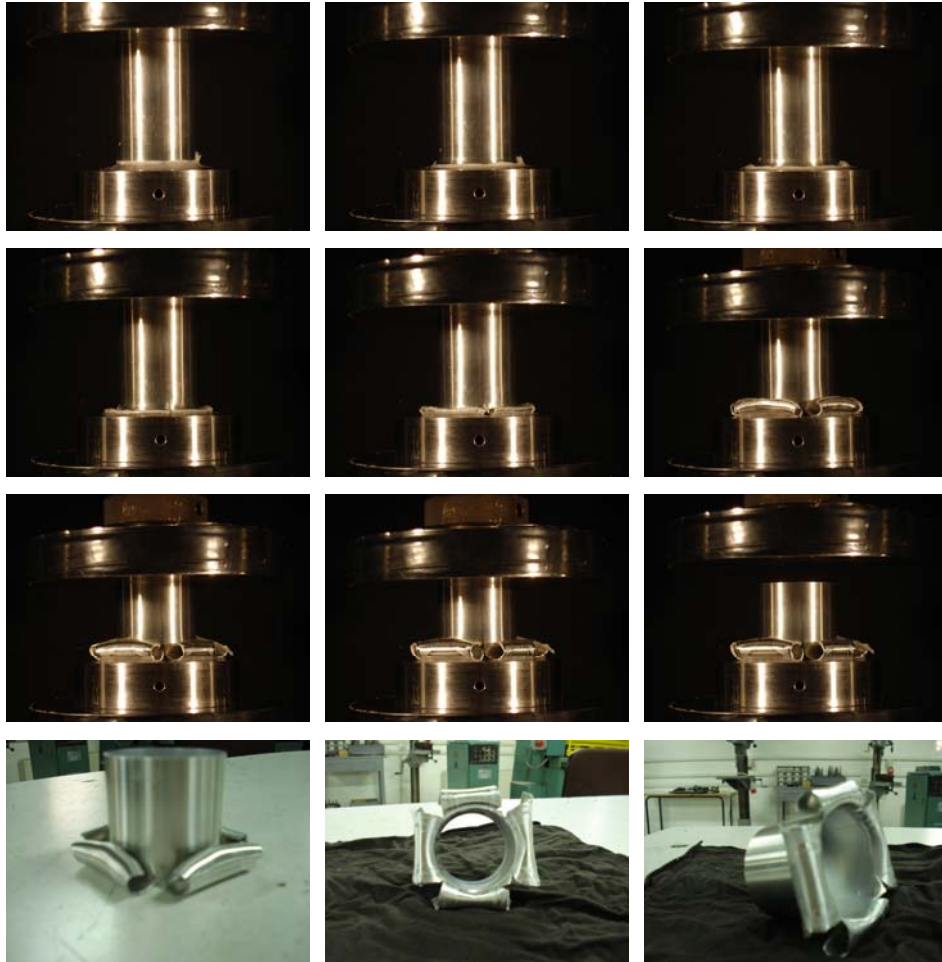
Σχ. 3.4.1.1 Διαδοχικές εικόνες από την κατάρρευση του δοκιμίου #1 και αντίστοιχο γράφημα φορτίου-μετατόπισης που λήφθηκαν από τη δοκιμή

- Μήκος συμπίεσης :  $\Delta l = 50 \text{ mm}$
- Μέγιστο φορτίο συμπίεσης:  $P_{\max} = 48.56 \text{ KNt}$
- Μέσο μεταελαστικό φορτίο συμπίεσης :  $\bar{P} = 37.5 \text{ KNt}$
- Ολική απορροφούμενη ενέργεια :  $W = 1875 \text{ Joule}$

Πρέπει να αναφερθεί ότι σε όλες τις καταπονήσεις στη συγκεκριμένη μήτρα χρησιμοποιείται **λίπανση** μεταξύ δοκιμίου και μήτρας-εργαλείου. Το δοκίμιο #1 συμπιέζεται κατά 50 mm. Αρχικά το δοκίμιο οδηγείται από την καμπυλότητα της μήτρας και δημιουργεί ανάκαμψη. Το δοκίμιο καθώς αναδιπλώνεται σχηματίζει ένα δεύτερο ομόκεντρο σωλήνα. Για συμπίεση 18-20 mm το υλικό του δοκιμίου δεν αντέχει την περιφερειακή παραμόρφωση και σκίζεται όπως φαίνεται και στις αντίστοιχες φωτογραφίες. Η έντονη διακύμανση που παρουσιάζεται στην αρχή της καμπύλη φορτίου-μετατόπισης είναι χαρακτηριστικό της ολίσθησης της εσωτερικής ακμής του μετώπου του άκρου του σωλήνα που αναδιπλώνεται στη μήτρα. Το μέσο φορτίο είναι 37.5 KNt και η ολική απορροφούμενη ενέργεια είναι  $W = 1875 \text{ Joule}$ . Το δοκίμιο καθώς καταρρέει και παίρνει τη συγκεκριμένη μορφή απορροφά ένα σημαντικό ποσό ενέργειας που οφείλεται στην πλαστική παραμόρφωσή του.

### 3.4.2 Δοκίμιο #2

Δοκίμιο #2: Μη θερμικά επεξεργασμένος σωλήνας με  $h=70\text{mm}$ ,  $D=48\text{mm}$  και  $t=1\text{mm}$



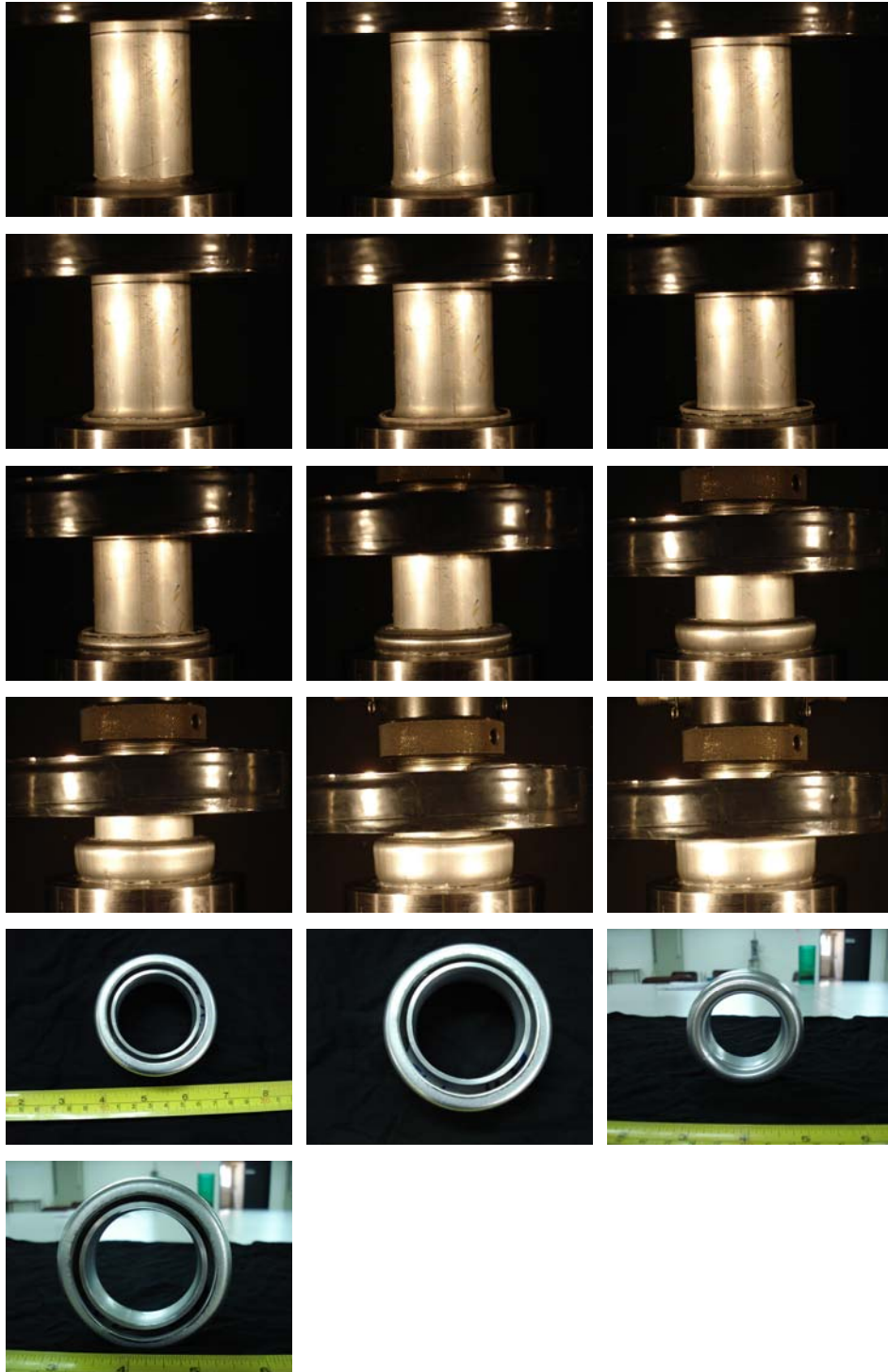
Σχ. 3.4.2.1 Διαδοχικές εικόνες από την κατάρρευση του δοκιμίου #2 και αντίστοιχο γράφημα φορτίου-μετατόπισης που λήφθηκαν από τη δοκιμή

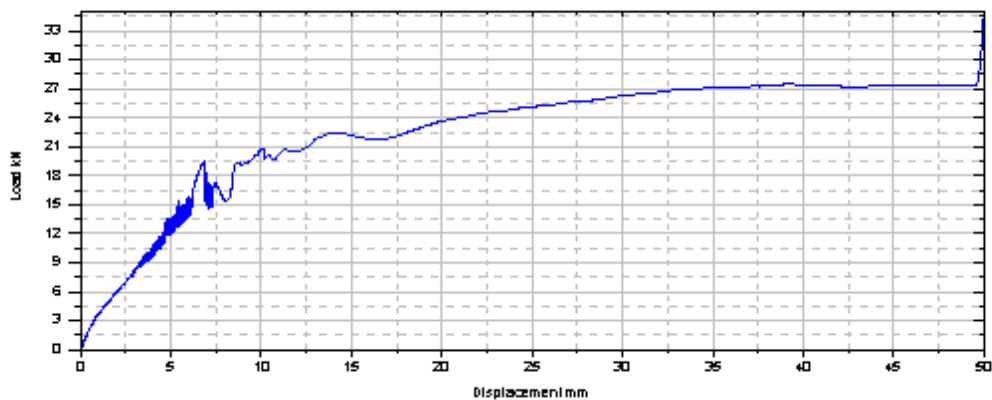
- Μήκος συμπίεσης :  $\Delta l = 28 \text{ mm}$
- Μέγιστο φορτίο συμπίεσης:  $P_{\max} = 17.57 \text{ KNt}$
- Μέσο μεταελαστικό φορτίο συμπίεσης :  $\bar{P} = 11.43 \text{ KNt}$
- Ολική απορροφούμενη ενέργεια :  $W = 320 \text{ Joule}$

Εδώ το δοκίμιο #2 έχει πάχος τοιχώματος  $t=1\text{mm}$  γεγονός που παίζει καθοριστικό ρόλο στην κατάρρευση του. Το δοκίμιο μας συμπιέζεται κατά  $\Delta l = 28 \text{ mm}$ . Η κατάρρευση του δοκιμίου είναι τελείως διαφορετική από την προηγούμενη. Για συμπίεση  $12 \text{ mm}$  το υλικό σκίζεται αφού ο σωλήνας δεν αντέχει την περιφερειακή παραμόρφωση καθώς οδηγείται από τη μήτρα-εργαλείο για εξωτερική αναδίπλωση. Ο σωλήνας σκίζεται συμμετρικά και δημιουργεί τέσσερις συμμετρικές ανά δύο αναδιπλώσεις όπως βλέπουμε και στο σχήμα 3.4.2.1 απορροφώντας ενέργεια  $W=320 \text{ Joule}$ . Συγκρίνοντας τα δοκίμια #1 και #2 για μετατόπιση  $\Delta l=28\text{mm}$  μπορούμε να πούμε ότι το μέσο φορτίο του δοκιμίου #2  $\bar{P} = 11.43 \text{ KNt}$  είναι σημαντικά μικρότερο από αυτό του δοκιμίου #1. Σημαντική επίσης είναι και η μείωση της ολικής απορροφούμενης ενέργειας σε σχέση με την ενέργεια που απορροφάται κατά τη συμπίεση του δοκιμίου #1 εξεταζόμενη πάντα στην ίδια μετατόπιση.

### 3.4.3 Δοκίμιο #3

Δοκίμιο #3: Θερμικά επεξεργασμένος σωλήνας στους 413 ° C (έχει υποστεί ανόπτηση -αποκατάσταση) με  $h=70\text{mm}$ ,  $D=50\text{mm}$  και  $t=2\text{mm}$





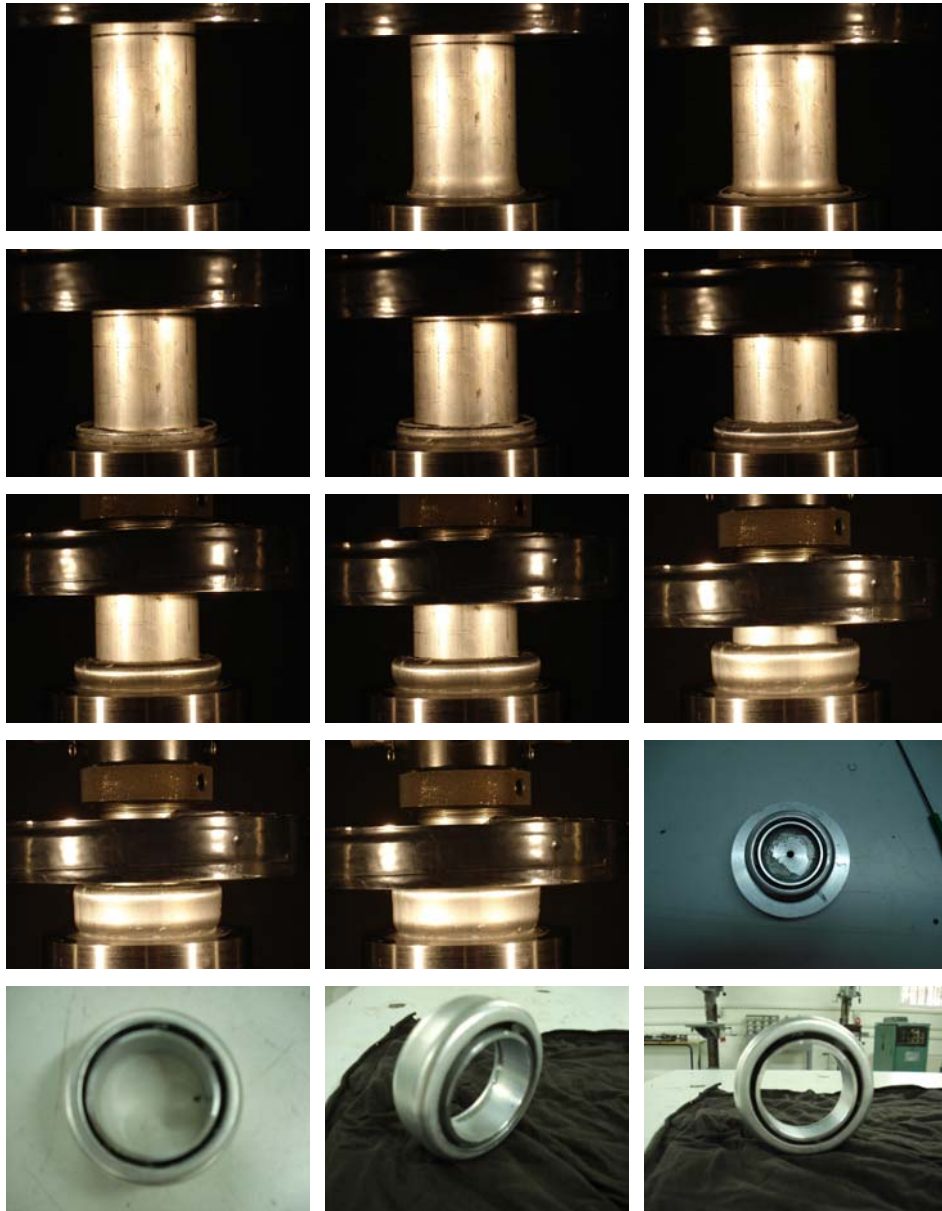
Σχ. 3.4.3.1 Διαδοχικές εικόνες από την κατάρρευση του δοκιμίου #3 και αντίστοιχο γράφημα φορτίου-μετατόπισης που λήφθηκαν από τη δοκιμή

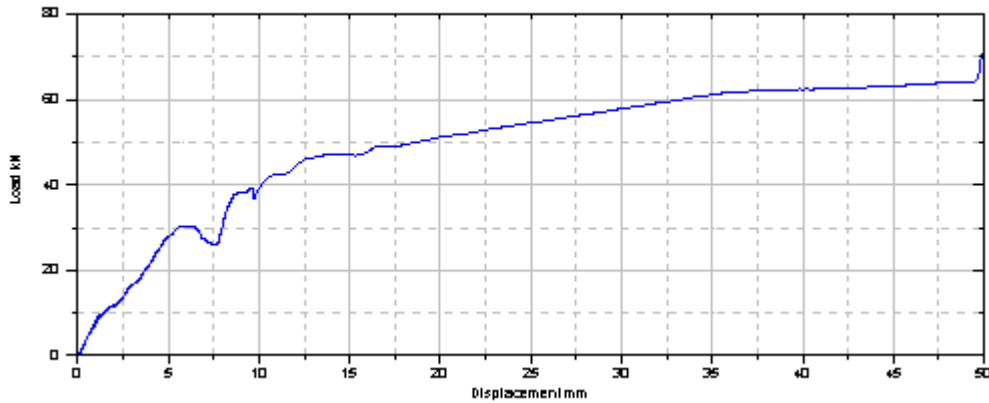
- Μήκος συμπίεσης :  $\Delta l = 50 \text{ mm}$
- Μέγιστο φορτίο συμπίεσης:  $P_{\max} = 37.26 \text{ KN}$
- Μέσο μεταελαστικό φορτίο συμπίεσης :  $\bar{P} = 22.5 \text{ KNt}$
- Ολική απορροφούμενη ενέργεια :  $W = 1125 \text{ Joule}$

Το δοκίμιο #3 αναδιπλώνεται τέλεια κατά τη συμπίεσή του κατά  $\Delta l = 50 \text{ mm}$ . Το δοκίμιο #3 λόγω της θερμικής του επεξεργασίας στους  $413^\circ \text{C}$  έχει γίνει πιο όλκιμο. Αρχικά έχουμε την ασταθή φάση ανάκαμψης όπου ο σωλήνας συμπιεζόμενος αναγκάζεται να ακολουθήσει την καμπυλότητα της μήτρας και αρχίζει να αναδιπλώνεται. Κατόπιν εισέρχεται στη σταθερή φάση της αναδίπλωσης όπου η ανάκαμψη σταματάει και ο σωλήνας αναδιπλώνεται δημιουργώντας νέο παράλληλο τοίχωμα. Το μέσο φορτίο είναι  $\bar{P} = 22.5 \text{ KNt}$  μικρότερο κατά 40% από αυτό του δοκιμίου #1. Η ολική απορροφούμενη ενέργεια είναι  $W = 1125 \text{ Joule}$  και όπως είναι φυσικό παρουσιάζει και αυτή μείωση κατά 40% από αυτή του δοκιμίου #1 κατά αντιστοιχία με το μέσο φορτίο. Συγκρίνοντας για αντίστοιχη μετατόπιση με αυτή του δοκιμίου #2 παρατηρούμε ότι τα δύο αυτά μεγέθη είναι σαφώς μικρότερα για το δοκίμιο #2. Το τελικό τεμάχιο που παράγεται έχει τέλεια μορφή χωρίς ελαττώματα και άλλες ατέλειες.

### 3.4.4 Δοκίμιο #4

Δοκίμιο #4: Θερμικά επεξεργασμένος σωλήνας στους 182° C (έχει υποστεί σκλήρυνση) με  $h=70\text{mm}$ ,  $D=50\text{mm}$  και  $t=2\text{mm}$





Σχ. 3.4.4.1 Διαδοχικές εικόνες από την κατάρρευση του δοκιμίου #4 και αντίστοιχο γράφημα φορτίου-μετατόπισης που λήφθηκαν από τη δοκιμή

- Μήκος συμπίεσης :  $\Delta l = 50 \text{ mm}$
- Μέγιστο φορτίο συμπίεσης:  $P_{\max} = 72.03 \text{ KN}$
- Μέσο μεταελαστικό φορτίο συμπίεσης :  $\bar{P} = 50.5 \text{ KNt}$
- Ολική απορροφούμενη ενέργεια :  $W = 2525 \text{ Joule}$

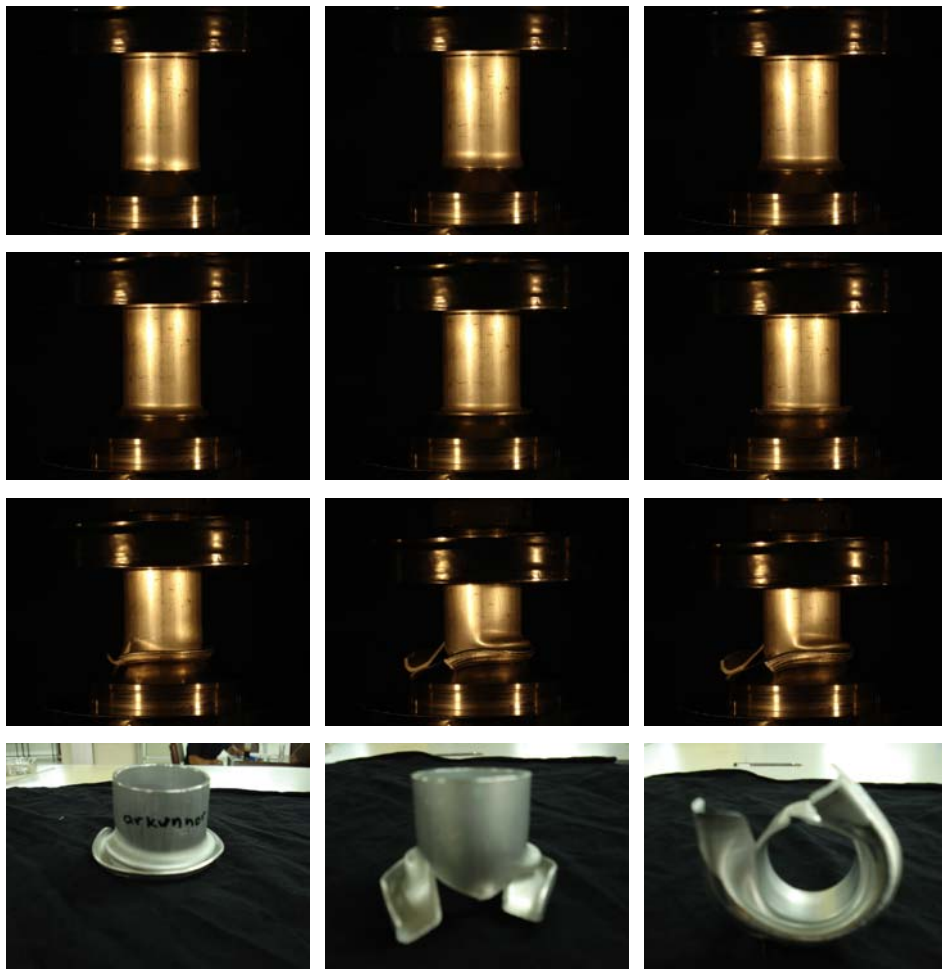
Η περίπτωση του δοκιμίου #4 είναι αντίστοιχη ως προς τη μορφή κατάρρευσης με αυτή του δοκιμίου #3. Και εδώ έχουμε τέλεια αναδίπλωση του δοκιμίου και την ύπαρξη των δύο φάσεων, αλλά επειδή το υλικό μας έχει υποστεί σκλήρυνση έχουμε σαφώς βελτιωμένα χαρακτηριστικά. (Ενδεικτική είναι η ομοιότητα ως προς τη μορφή της καμπύλης φορτίου-μετατόπισης μεταξύ #3 - #4). Αρχικά βλέπουμε πολύ σημαντική αύξηση της απορροφούμενης ενέργειας κατά 124,44% από αυτή του δοκιμίου #3 και κατά 34,66% από αυτή του δοκιμίου #1. Το μέσο φορτίο συμπίεσης  $\bar{P} = 50.5 \text{ KNt}$  ακολουθεί αντίστοιχη όπως είναι φυσικό αύξηση με την ολική απορροφούμενη ενέργεια σε σχέση με το μέσο φορτίο των #1,#3.

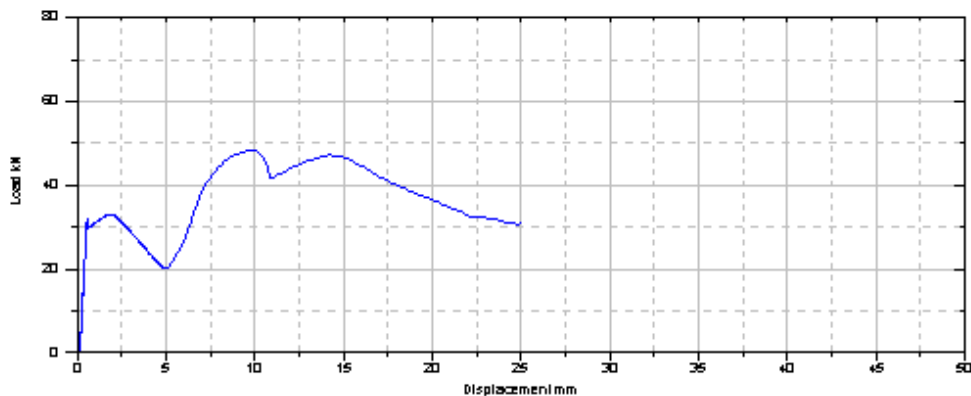


**3.5 Αξονική συμπίεση δοκιμίων σε κωνική μήτρα ημιγωνίας κορυφής  $\alpha = 65^\circ$   
για δοκίμια #1,#2,#3 και  $\alpha = 40^\circ$  για το δοκίμιο #4**

**3.5.1 Δοκίμιο #1**

Δοκίμιο #1: Μη θερμικά επεξεργασμένος σωλήνας με  $h=70\text{mm}$ ,  $D=50\text{mm}$  και  $t=2\text{mm}$





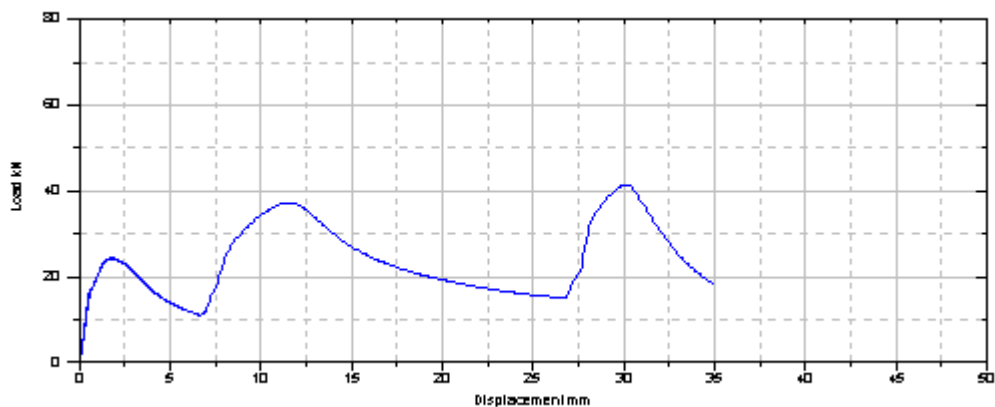
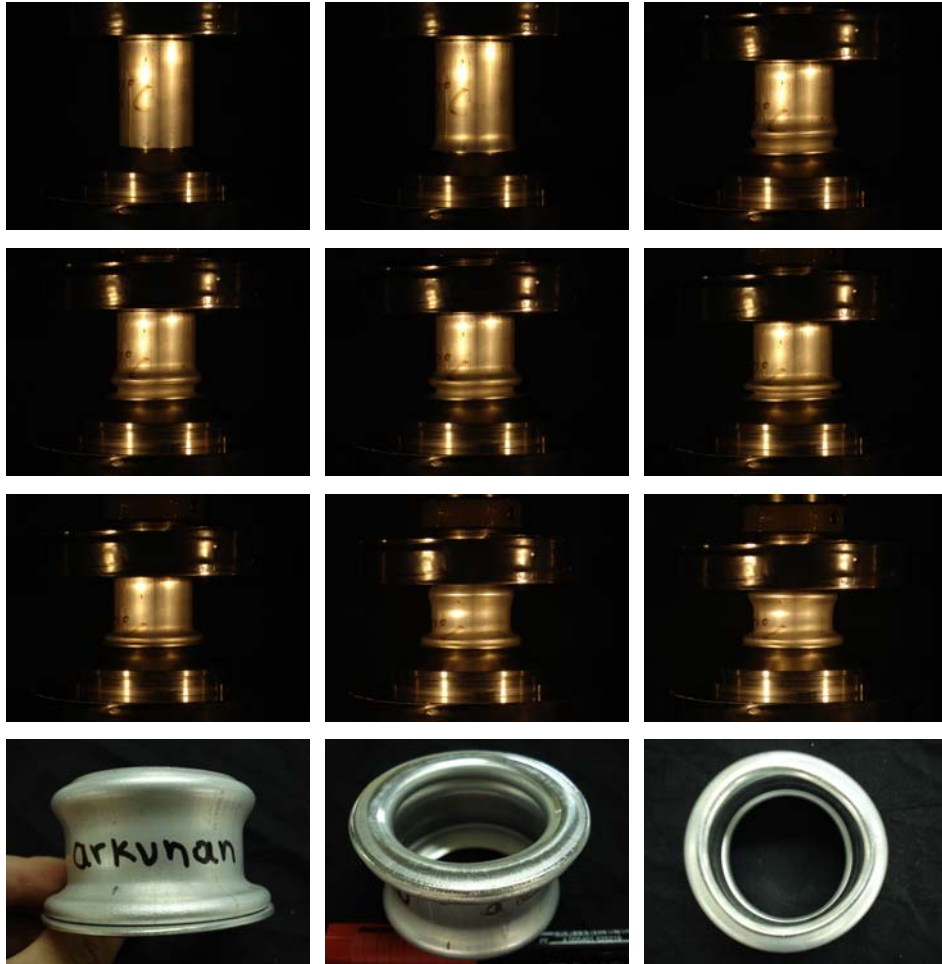
Σχ. 3.5.1.1 Διαδοχικές εικόνες από την κατάρρευση του δοκίμιου #1 και αντίστοιχο γράφημα φορτίου-μετατόπισης που λήφθηκαν από τη δοκιμή

- Μήκος συμπίεσης :  $\Delta l = 25 \text{ mm}$
- Μέγιστο φορτίο συμπίεσης:  $P_{\max} = 48.16 \text{ KN}$
- Μέσο μεταελαστικό φορτίο συμπίεσης :  $\bar{P} = 37 \text{ KNt}$
- Ολική απορροφούμενη ενέργεια :  $W = 925 \text{ Joule}$

Στην παρούσα περίπτωση το δοκίμιό μας καταπονείται σε κωνική μήτρα-εργαλείο. Εδώ ο σωλήνας μας συμπιέζεται κατά  $\Delta l = 25 \text{ mm}$ . Παρατηρούμε αρχικά κατά τη συμπίεση τη φάση της ανάκαμψης. Κατόπιν ο σωλήνας δεν αναδιπλώνεται αφού το υλικό του σωλήνα δεν αντέχει την περιφερειακή παραμόρφωση με αποτέλεσμα το δοκίμιο μας να σκίζεται και να σχηματίζει λοβό πάνω από το σκίσιμο. Η ολική απορροφούμενη ενέργεια είναι  $W = 925 \text{ Joule}$  και το μέσο φορτίο συμπίεσης  $\bar{P} = 37 \text{ KNt}$ .

### 3.5.2 Δοκίμιο #2

Δοκίμιο #2: Θερμικά επεξεργασμένος σωλήνας στους 413°C (έχει υποστεί ανόπτηση-αποκατάσταση) με  $h=70\text{mm}$ ,  $D=50\text{mm}$  και  $t=2\text{mm}$



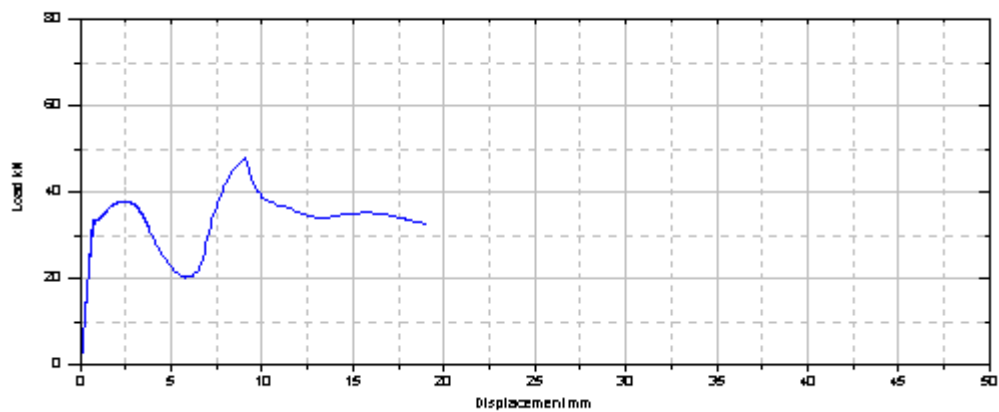
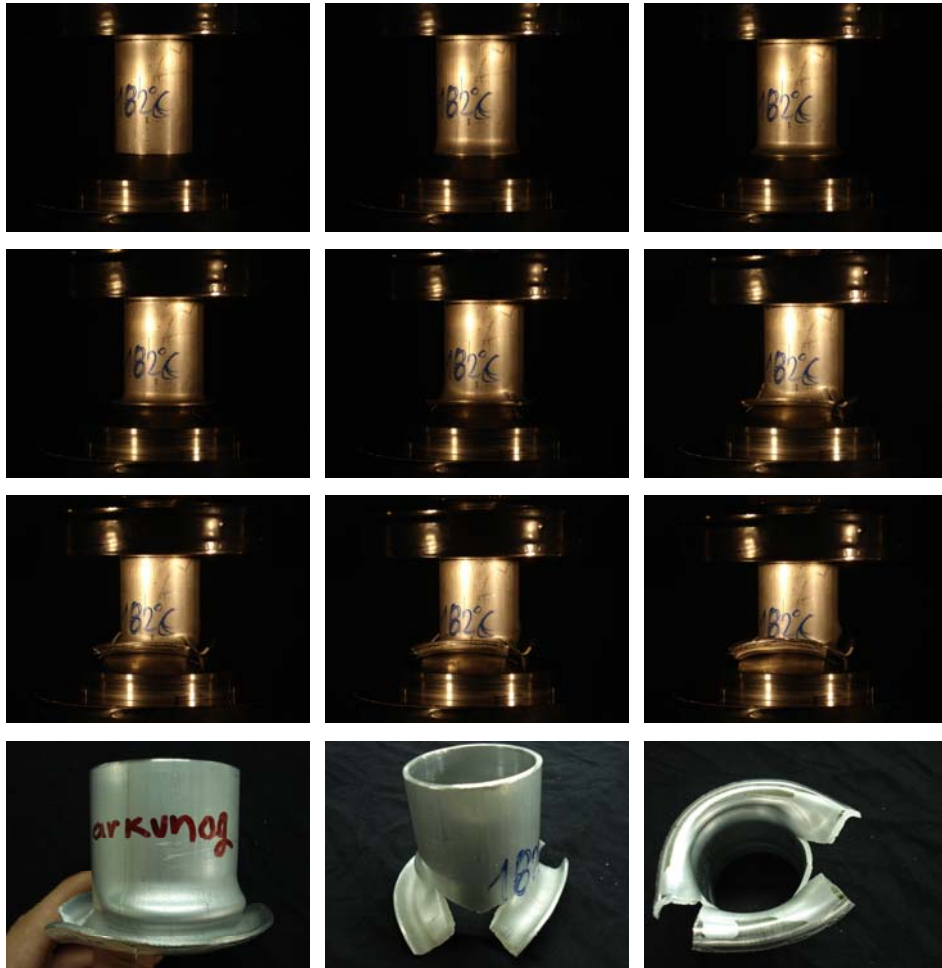
Σχ. 3.5.2.1 Διαδοχικές εικόνες από την κατάρρευση του δοκιμίου #2 και αντίστοιχο γράφημα φορτίου-μετατόπισης που λήφθηκαν από τη δοκιμή

- Μήκος συμπίεσης :  $\Delta l = 35 \text{ mm}$
- Μέγιστο φορτίο συμπίεσης:  $P_{\max} = 41.48 \text{ KN}$
- Μέσο μεταελαστικό φορτίο συμπίεσης :  $\bar{P} = 23.85 \text{ KNt}$
- Ολική απορροφούμενη ενέργεια :  $W = 835 \text{ Joule}$

Στην περίπτωση αυτή παρατηρούμε την επίδραση του υλικού τόσο στον τρόπο κατάρρευσης του δοκιμίου όσο και στα εξεταζόμενα μεγέθη. Το υλικό μας έχει επεξεργαστεί θερμικά στους  $413^\circ \text{C}$  με αποτέλεσμα να γίνει πιο όλκιμο. Παρακολουθώντας την κατάρρευση παρατηρούμε ότι αρχικά το δοκίμιο μας δημιουργεί μια ανάκαμψη αλλά δεν καταφέρνει να αναδιπλωθεί. Σε αντίθεση με την προηγούμενη περίπτωση έχουμε τη δημιουργία δύο λοβών. Ο ένας εμφανίζεται αμέσως πάνω από τη μικρή ανάκαμψη και εμποδίζει την αναδίπλωση ενώ ο άλλος εμφανίζεται στο πάνω μέρος του σωλήνα πλησίον της επιφάνειας του εμβόλου. Το δοκίμιο δεν σκίζεται και καταρρέει διαφορετικά από την προηγούμενη περίπτωση. Το μήκος συμπίεσης είναι  $\Delta l = 35 \text{ mm}$  και το μέσο φορτίο  $\bar{P} = 23.85 \text{ KNt}$ . Η ολική ενέργεια που απορροφάται κατά την κατάρρευση είναι  $W = 835 \text{ Joule}$ . Γενικά θα μπορούσαμε να πούμε ότι επειδή δεν έχουμε εμφάνιση διάρρηξης στο δοκίμιο μας, έχουμε μια πιο ευσταθή διαδικασία κατάρρευσης.

### 3.5.3 Δοκίμιο #3

Δοκίμιο #3: Θερμικά επεξεργασμένος σωλήνας στους 182°C (έχει υποστεί σκλήρυνση) με  $h=70\text{mm}$ ,  $D=50\text{mm}$  και  $t=2\text{mm}$



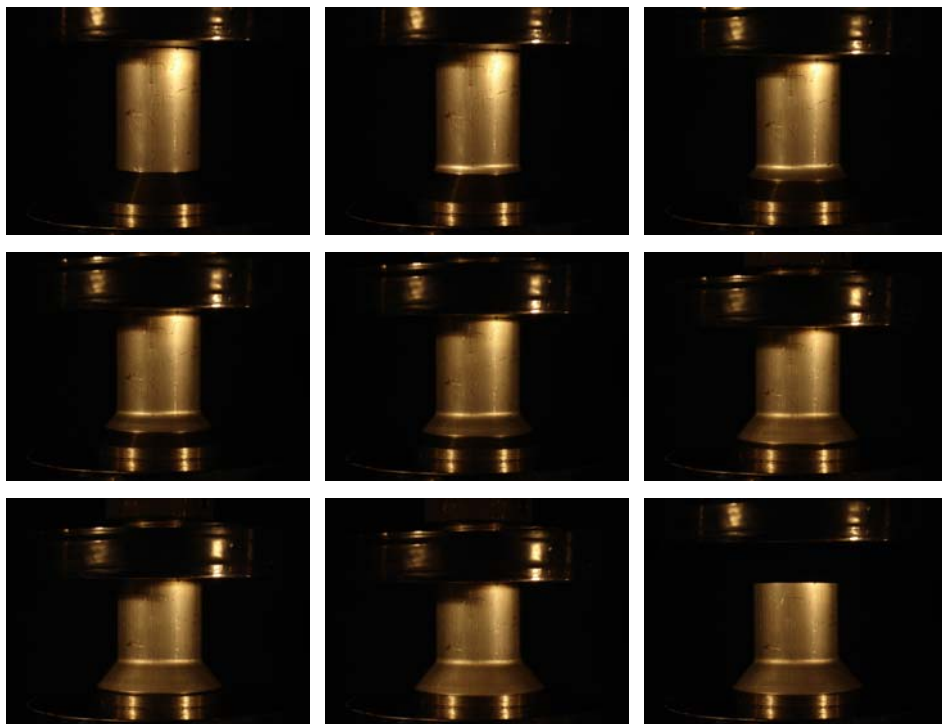
Σχ. 3.5.3.1 Διαδοχικές εικόνες από την κατάρρευση του δοκιμίου #3 και αντίστοιχο γράφημα φορτίου-μετατόπισης που λήφθηκαν από τη δοκιμή

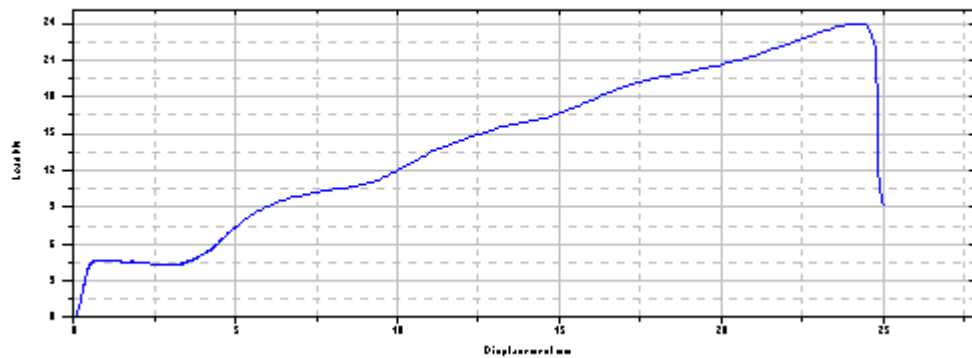
- Μήκος συμπίεσης :  $\Delta l = 18 \text{ mm}$
- Μέγιστο φορτίο συμπίεσης:  $P_{\max} = 48.05 \text{ KN}$
- Μέσο μεταελαστικό φορτίο συμπίεσης :  $\bar{P} = 36.12 \text{ KNt}$
- Ολική απορροφούμενη ενέργεια :  $W = 650 \text{ Joule}$

Η παρούσα κατάρρευση παρουσιάζει ομοιότητες με την αντίστοιχη του δοκιμίου #1. Το δοκίμιο #3 συμπιεζόμενο συνολικά κατά  $\Delta l = 18 \text{ mm}$  παρουσιάζει αρχικά μια μικρή ανάκαμψη ,οδηγούμενο από τη γεωμετρία της μήτρας- εργαλείο, και στη συνέχεια δημιουργεί λοβό πάνω από την τελευταία και σκίζεται. Το μέσο φορτίο είναι  $\bar{P} = 36.12 \text{ KNt}$ . Η ολική ενέργεια απορρόφησης είναι  $W = 650 \text{ Joule}$ . Εδώ γίνεται κατανοητή η επίδραση της θερμικής επεξεργασίας σκλήρυνσης στις ιδιότητες του υλικού και κατά συνέπεια στην κατάρρευση του δοκιμίου.

#### 3.5.4 Δοκίμιο #4

Δοκίμιο #4: Μη θερμικά επεξεργασμένος σωλήνας με  $h=70\text{mm}, D=50\text{mm}$  και  $t=2\text{mm}$





Σχ. 3.5.4.1 Διαδοχικές εικόνες από την κατάρρευση του δοκιμίου #4 και αντίστοιχο γράφημα φορτίου-μετατόπισης που λήφθηκαν από τη δοκιμή

- Μήκος συμπίεσης :  $\Delta l = 25 \text{ mm}$
- Μέγιστο φορτίο συμπίεσης:  $P_{\max} = 24 \text{ KN}$
- Μέσο μεταελαστικό φορτίο συμπίεσης :  $\bar{P} = 14.1 \text{ KNt}$
- Ολική απορροφούμενη ενέργεια :  $W = 352.5 \text{ Joule}$

Η παρούσα πειραματική δοκιμή έγινε σε κωνική μήτρα με πολύ μικρότερη γωνία κορυφής και ως σκοπό έχει να μας δείξει την επίδραση της γεωμετρίας της μήτρας-εργαλείου και συγκεκριμένα της γωνίας κορυφής του κώνου στον τρόπο κατάρρευσης του δοκιμίου. Το δοκίμιο #4 συμπιεζόμενο δεν δημιουργεί ανάκαμψη αλλά ολισθαίνει πάνω στην κωνική επιφάνεια της μήτρας όπως είναι φυσικό σκίζεται. Η τιμή της ολικής απορροφούμενης ενέργειας  $W = 352,5 \text{ Joule}$  είναι πολύ μικρή σε σχέση με την αντίστοιχη του δοκιμίου #1 ( $W=925\text{Joule}$ ) που καταπονήθηκε για ίδιο μήκος συμπίεσης  $\Delta l=25\text{mm}$ . Το ποσοστό μείωσης ανέρχεται περίπου σε 62%.

### 3.6 Συγκεντρωτικός Πίνακας-Συγκριτικά Γραφήματα

ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΗ ΜΗΤΡΑ ΜΕ ΑΚΤΙΝΑ ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑΣ  $r = 5 \text{ mm}$		ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	ΜΗΚΟΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ $\Delta l \text{ (mm)}$	ΦΟΡΤΙΟ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ (Knt)		ΟΛΙΚΗ ΑΠΟΡΡΟΦΟΥ- ΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ $W \text{ (Joule)}$
				Μέγιστο Φορτίο $P_{max}$	Μέσο Φορτίο $\bar{P}$	
ΚΩΝΙΚΗ ΜΗΤΡΑ	$\alpha=65^\circ$	#1	50	48,56	37,5	1875
		#2	28	17,57	11,43	320
		#3	50	37,26	22,5	1125
		#4	50	72,03	50,5	2525
	$\alpha=40^\circ$	#1	25	48,16	37	925
		#2	35	41,48	23,85	835
		#3	18	48,05	36,12	650
	$\alpha=40^\circ$	#4	25	24	14,1	352,5

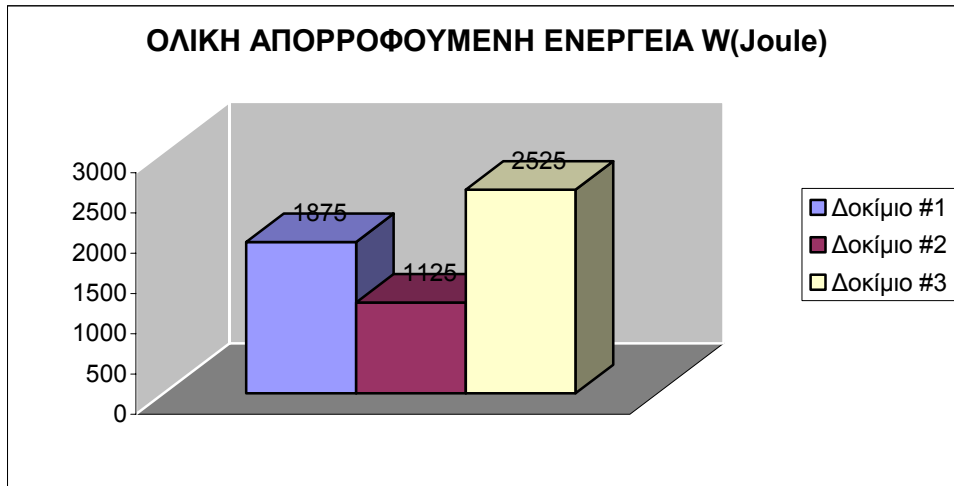
Πίνακας 3.6.1 Συγκεντρωτικός πίνακας πειραματικής διαδικασίας



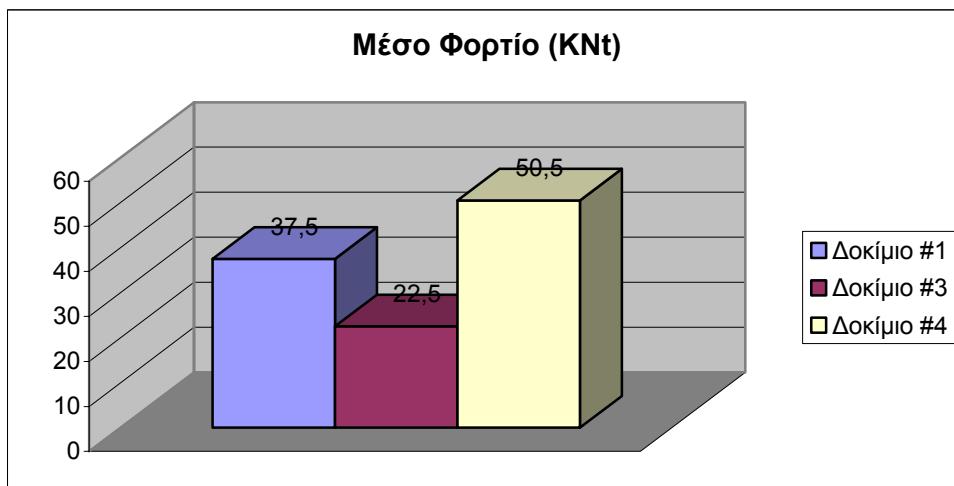
Στα γραφήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται με εποπτικό τρόπο σημαντικά συμπεράσματα που εξήχθησαν από την πειραματική διαδικασία.

Για την κυλινδρική μήτρα ειδικής μορφής με καμπυλότητα στη βάση έχουμε:

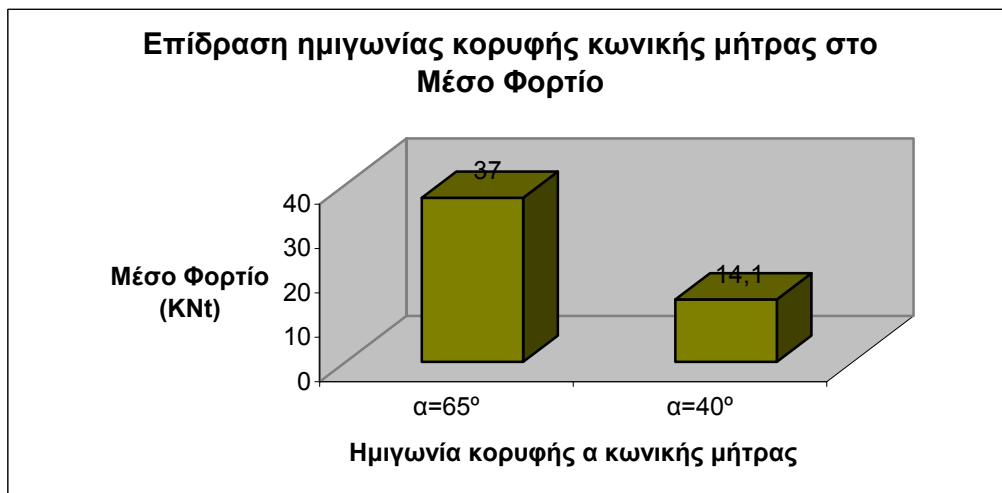
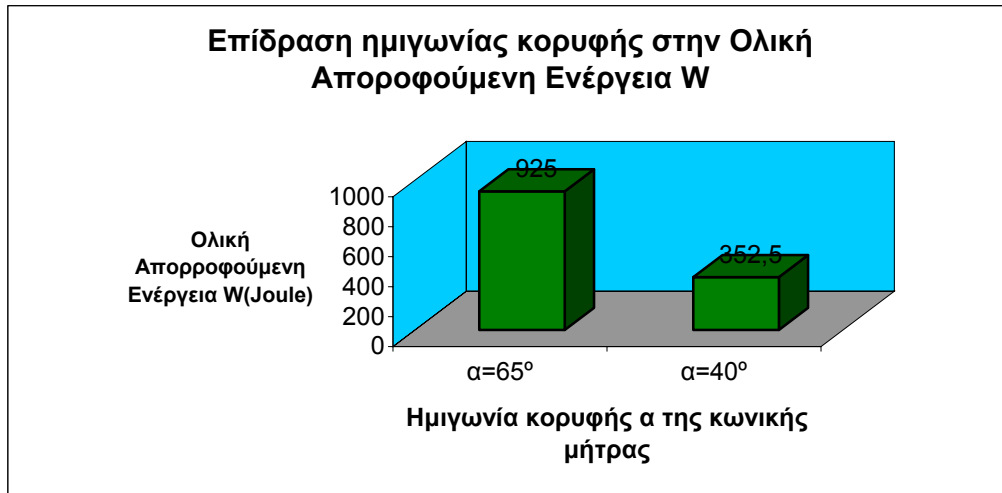
➤ Για την ολική απορροφούμενη ενέργεια  $W$ :



➤ Για το μέσο φορτίο  $\bar{P}$ :



Όσον αφορά στις δύο κωνικές μήτρες, η επίδραση της ημιγωνίας κορυφής  $\alpha$  τόσο στην ολική απορροφούμενη ενέργεια όσο και στο μέσο φορτίο αναπαρίσταται ακολούθως:



## **4. Αριθμητική Προσομοίωση – Μοντελοποίηση με χρήση λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων LS-DYNA**

### **4.1 Γενικά στοιχεία για τα προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων.**

Η χρήση μη γραμμικών και γραμμικών προγραμμάτων πεπερασμένων στοιχείων σε ηλεκτρονικό υπολογιστή ξεκίνησε εδώ και πολλά χρόνια, με σκοπό την προσομοίωση της συμπεριφοράς κατασκευών σε σύνθλιψη και την μελέτη τόσο ολόκληρων συστημάτων όσο και των συνιστωσών τους. Οι περισσότερες από τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν και καταγράφηκαν στη βιβλιογραφία, επιχείρησαν να προβλέψουν τον τρόπο κατάρρευσης και τον αντίστοιχο μηχανισμό σύνθλιψης δίνοντας γενικές κατευθύνσεις που αφορούν τα φαινόμενα αυτά. Ωστόσο, είναι υπό αμφισβήτηση η ακρίβεια που μπορούν να παρέχουν τα προγράμματα αυτά και η ικανότητά τους να περιγράψουν με σαφήνεια τις κρίσιμες παραμέτρους σχεδίασης όπως οι τάσεις, οι παραμορφώσεις και οι αναπτυσσόμενες ροπές.

Για την αξιολόγηση των ικανοτήτων πρόβλεψης των προγραμμάτων πεπερασμένων στοιχείων, πρέπει να έχουμε κατά νου ότι μέχρι σήμερα δεν έχουν διατυπωθεί ενοποιημένες θεωρίες για τις καταστατικές εξισώσεις που διέπουν την συμπεριφορά των υλικών σε περιπτώσεις σύνθετης φόρτισης στη γραμμική περιοχή. Πολλές όμως από τις δυσκολίες αυτές ενδέχεται να ξεπεραστούν στο άμεσο μέλλον, οπότε μαζί με την πρόοδο της επιστήμης των ηλεκτρονικών υπολογιστών που θα παρέχει αυξημένη υπολογιστική ισχύ και ταχύτητα στο μέσο χρήστη, οι επιδόσεις των προγραμμάτων πεπερασμένων στοιχείων αναμένεται να βελτιωθούν σημαντικά.

Το αρχαιότερο εν ενεργεία εμπορικό πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων είναι το NASTRAN ενώ η συστηματική παράθεση των σήμερα υπάρχοντων προγραμμάτων και των δυνατοτήτων τους θα μπορούσε να αποτελέσει ένα ογκώδες εγχειρίδιο. Με την επιφύλαξη παραλείψεων, άλλα γενικής χρήσης προγράμματα είναι τα εξής: ABAQUS, ADINA, ALGOR, ANSYS, COSMOS/M, DYTRAN, MARC, NISA, LS DYNA3D, LUCAS, MSC-NASTRAN, SOLVIA, κλπ.

Εξειδικευμένα προγράμματα για το σχεδιασμό καλουπιών προς παραγωγή πλαστικών τεμαχίων είναι: C MOLD και MOLDFLOW.

Ολοκληρωμένα συστήματα CAD-CAM-CAE είναι: IDEAS, PRO-ENGINEER, SOLIDWORKS, UNIGRAPHICS κ.ά..

Εξειδικευμένα προγράμματα για συνδυασμένη κινηματική και ελαστική ανάλυση μηχανισμών είναι: ADAMS, DADS.

Για την προσομοίωση των πειραματικών δοκιμών χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα LS DYNA3D της εταιρείας Livermore Software Technology Corporation στην έκδοση 970, το οποίο διαθέτει το Εργαστήριο του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών των Υλικών. Ο EXPLICIT κώδικας LS DYNA3D είναι κώδικας πεπερασμένων στοιχείων, κατάλληλος ειδικά στην ανάλυση μη γραμμικών δυναμικών τρισδιάστατων προβλημάτων (προβλήματα πλαστικής παραμόρφωσης).

#### **4.2 Γενικά στοιχεία για τον κώδικα LS-DYNA**

Ο κώδικας LS DYNA 971 που χρησιμοποιήθηκε στη διπλωματική αυτή εργασία αποτελεί εξέλιξη του προκατόχου του DYNA3D, ο οποίος εμφανίστηκε για πρώτη φορά το 1976, προερχόμενος από το Lawrence Livermore National Laboratory. Η βασική χρήση του αφορούσε την μελέτη συγκρούσεων βαρέων συμπαγών κατασκευών, όπου όμως οι αναπτυσσόμενες ταχύτητες ήταν μικρές. Ωστόσο, λόγω και της μικρής εξέλιξης της επιστήμης των υπολογιστών, ο χρόνος που απαιτείτο για να μελετηθεί μια εφαρμογή ήταν αρκετά μεγάλος. Η αρχική αυτή έκδοση έδινε στον χρήστη σχετικά περιορισμένες δυνατότητες, όπως για παράδειγμα διεπιφάνειες ολίσθησης οι οποίες μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σε τυπικά προβλήματα και όχι σε πολύπλοκες περιπτώσεις, καθώς και τριών ειδών πεπερασμένα στοιχεία (truss, membrane, solid), εκ των οποίων τα συμπαγή πεπερασμένα στοιχεία είχαν από 8 ως 20 κόμβους, όμως κόστιζαν αρκετά σε υπολογιστικό χρόνο κατά την εκτέλεση των μοντέλων.

Με το πέρασμα του χρόνου, ο κώδικας εξελίσσεται και προσαρμόζεται στις αυξανόμενες απαιτήσεις. Έτσι, με σταθμούς τις χρονολογίες 1979, 1981, 1982, 1987, 1990 έχουν προστεθεί πολλές νέες δυνατότητες ενώ κάποιες που ήδη υπήρχαν έχουν εξελιχθεί. Νέοι τύποι πεπερασμένων στοιχείων και υλικών, καινούριες διεπιφάνειες ολίσθησης, βελτιωμένο και φιλικότερο περιβάλλον προς τον χρήστη είναι μερικές

από αυτές. Σήμερα, ο κώδικας έχει φτάσει σε πολύ υψηλά επίπεδα και αποτελεί απαραίτητο εργαλείο έρευνας στην αεροδυναμική τεχνολογία, σε πολλές αυτοκινητοβιομηχανίες, σε πανεπιστήμια καθώς και σε εργαστήρια τόσο σε εθνικό όσο και σε βιομηχανικό επίπεδο.

### **4.3 Χρήση του προγράμματος**

Δύο είναι τα βασικά μέρη του προγράμματος, τα οποία συντελούν στη μοντελοποίηση. Αρχικά χρησιμοποιούμε τον preprocessor του προγράμματος ο οποίος προέρχεται από την εταιρεία ETA, του οποίου η τρέχουσα έκδοση είναι η 28, και με το οποίο κατασκευάζουμε το μοντέλο μας. Για να είναι πλήρες το μοντέλο μας θα πρέπει να ακολουθήσουμε τα εξής βήματα,

- να ορίσουμε πλήρως την γεωμετρία του, δίνοντας τις ακριβείς του διαστάσεις,
- να δηλώσουμε το υλικό ή τα υλικά από τα οποία αποτελείται καθώς και τις φυσικές και μηχανικές τους ιδιότητες,
- να το διακριτοποιήσουμε σε πεπερασμένα στοιχεία και να δηλώσουμε τις ιδιότητες των πεπερασμένων στοιχείων,
- να ορίσουμε τις διεπιφάνειες μεταξύ των σωμάτων που πρόκειται να έρθουν σε επαφή κατά την εξέλιξη της προσομοίωσης, ώστε να αποφευχθούν φαινόμενα εισχώρησης ενός τμήματος του μοντέλου εντός ενός άλλου,
- να του προσδιορίσουμε τα εξωτερικά του φορτία καθώς και τις αρχικές συνθήκες (αρχική ταχύτητα, αρχική επιτάχυνση κ.τ.λ.).

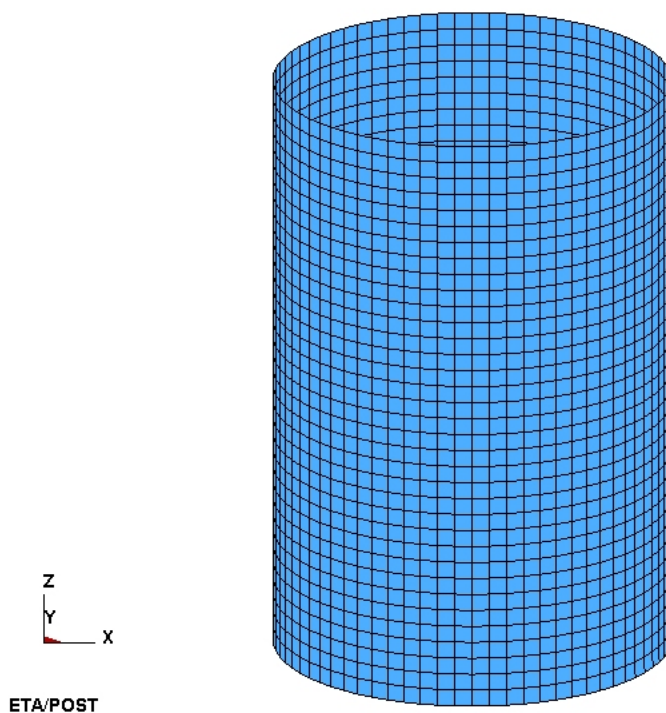
Αυτά τα δεδομένα σώζονται από τον preprocessor σε μορφή ψηφιακού αρχείου τύπου \*.fmb ώστε να είναι δυνατή η φύλαξή τους, η μεταφορά τους και η ανάκτησή τους για τροποποίηση. Επίσης εκτός από το αρχείο fmb μπορεί να τα εξάγει και σαν αρχείο κειμένου τύπου \*.dyn. Το αρχείο αυτό μπορεί να ανοιχτεί από οποιονδήποτε editor και ως εκ τούτου να τροποποιηθεί από τον χρήστη. Αυτή η δυνατότητα είναι ιδιαίτερα χρήσιμη γιατί γλιτώνει τον χρήστη από επίπονη δουλειά όταν οι αλλαγές που επιθυμεί να πραγματοποιήσει είναι σχετικά απλές και μπορούν να πραγματοποιηθούν μέσα από τον editor δίχως να χρειαστεί να εργαστεί στο περιβάλλον του preprocessor.

Το αρχείο `dyn` είναι αυτό που στην συνέχεια επεξεργάζεται το πρόγραμμα για την επίλυση του προβλήματος. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιείται ο SOLVER του LS DYNA που αποτελεί και τον κυρίως κώδικα του προγράμματος. Όταν η επίλυση ολοκληρωθεί το πρόγραμμα εξάγει τα απαραίτητα αρχεία στα οποία έχουν καταγραφεί τα αποτελέσματα της επεξεργασίας. Τα αρχεία αυτά είναι τύπου `*.d3plot` και `*.graph` και χρησιμοποιούνται από τον `postprocessor` και `graph-processor` (εταιρείας ETA) αντίστοιχα για να γίνει η παρουσίαση των αποτελεσμάτων στον χρήστη.

#### 4.4 Σύγκριση πειραματικών δοκιμών και αριθμητικής προσομοίωσης

##### 4.4.1 Κυλινδρικό κέλυφος με πάχος τοιχώματος $t = 1\text{mm}$ ( $D=48\text{mm}$ ), καταπονούμενο σε κυλινδρική μήτρα με ακτίνα καμπυλότητας $r = 5\text{mm}$

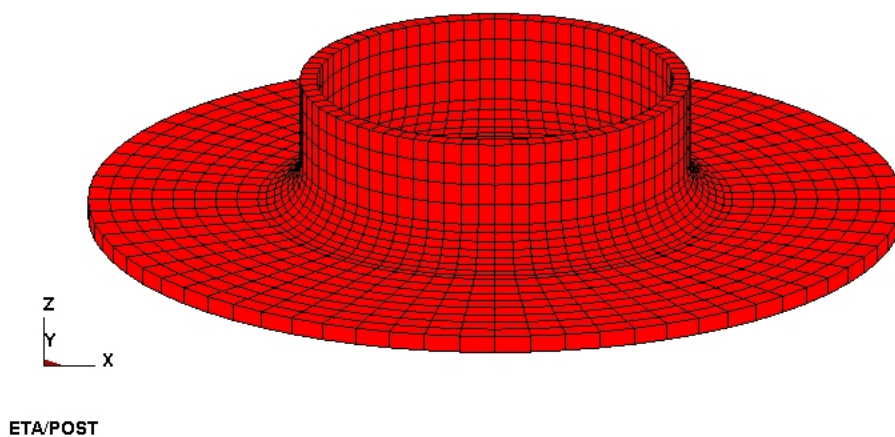
Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η προσομοίωση ξεκινά με τον καθορισμό της γεωμετρίας του μοντέλου μας στον preprocessor και στη συνέχεια με την διακριτοποίηση αυτού. Στο σχήμα 4.4.1.1 βλέπουμε τον κυλινδρικό σωλήνα ο οποίος αποτελείται από 2520 shell elements (τετρακομβικά).



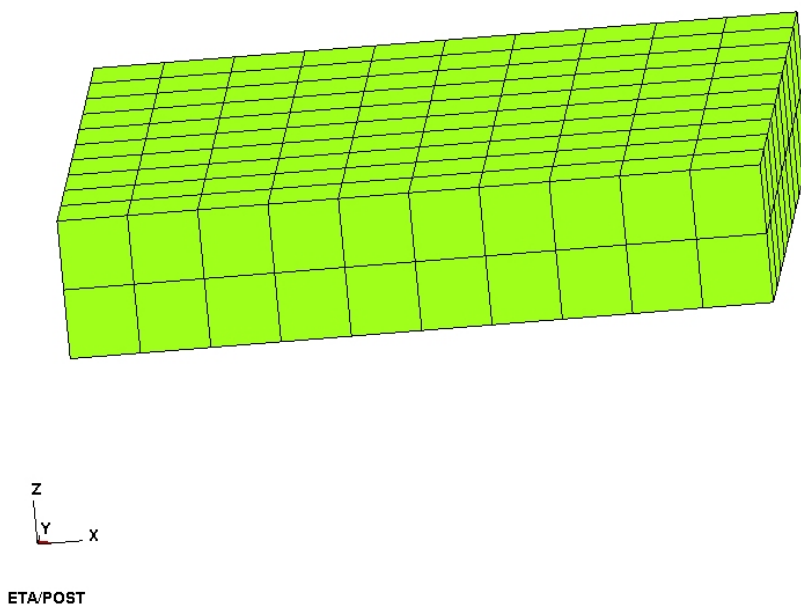
Σχ. 4.4.1.1 Διακριτοποίηση του κυλινδρικού κελύφους με shell elements

Ο τύπος υλικού με το οποίο μοντελοποιήσαμε το αλουμίνιο Al 6063 ήταν MAT PIECEWISE LINEAR PLASTICITY.

Στα σχήματα 4.4.1.2 και 4.4.1.3 βλέπουμε τη διακριτοποίηση της μήτρας-εργαλείου και της πάνω πλάκας αντίστοιχα. Η διακριτοποίηση έγινε με solid elements (οχτακομβικά), 1440 για τη μήτρα και 200 για την επάνω πλάκα.



Σχ. 4.4.1.2 Διακριτοποίηση της μήτρας-εργαλείου με solid elements



Σχ. 4.4.1.3 Διακριτοποίηση της επάνω πλάκας με solid elements

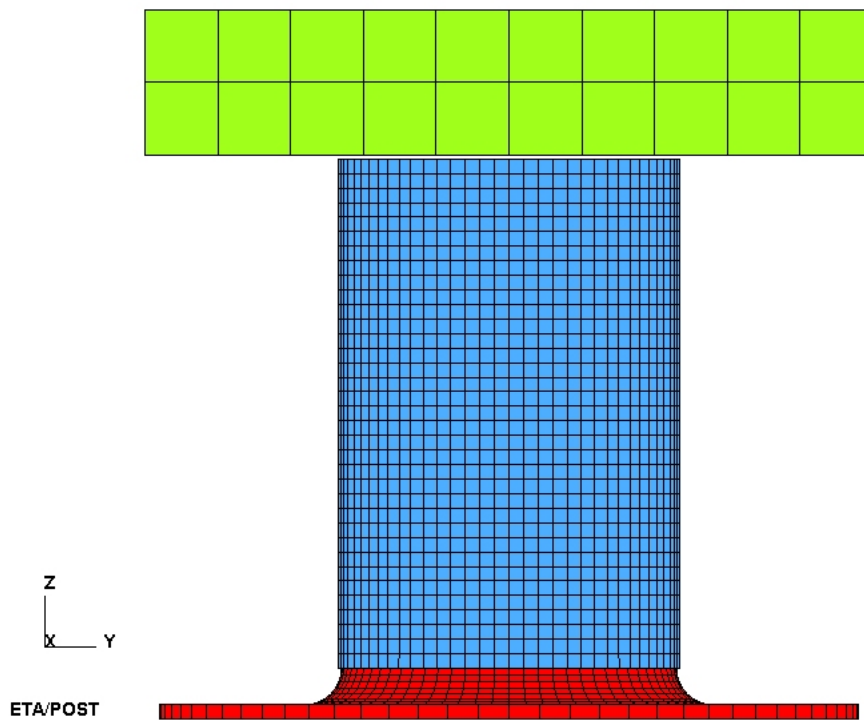


Για την κινούμενη επάνω πλάκα καθώς και τη μήτρα-εργαλείο ο τύπος υλικού που χρησιμοποιήσαμε ήταν απαραμόρφωτο υλικό MAT RIGID.

Για την ορθή προσομοίωση του φαινομένου ορίσαμε τρεις διεπιφάνειες (contacts) μεταξύ των τριών σωμάτων που είναι οι εξής:

- ❖ Διεπιφάνεια μεταξύ της μήτρας-εργαλείου και του κυλινδρικού δοκιμίου (CONTACT\_AUTOMATIC\_SURFACE\_TO\_SURFACE)
- ❖ Διεπιφάνεια μεταξύ της επάνω κινούμενης πλάκας και του κυλινδρικού δοκιμίου (CONTACT\_AUTOMATIC\_SURFACE\_TO\_SURFACE)
- ❖ Διεπιφάνεια μεταξύ των διαφόρων τμημάτων του κυλινδρικού δοκιμίου με το ίδιο το δοκίμιο. (CONTACT\_AUTOMATIC\_SINGLE\_SURFACE)

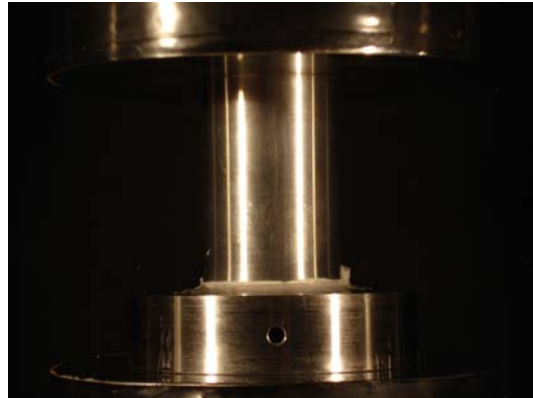
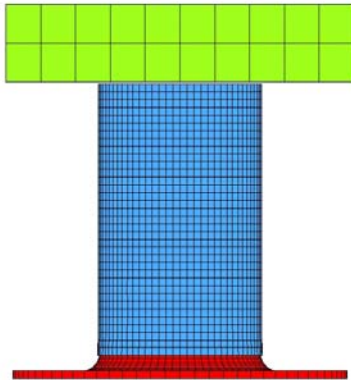
Για να προσομοιώσουμε τη συμπίεση θεωρήσαμε ότι η πλάκα κινείται με σταθερή ταχύτητα  $1 \text{ m sec}^{-1}$  καθ' όλη τη διάρκεια της μετατόπισης. Επειδή ο κώδικας του DYNA είναι EXPLICIT μπορεί να λύνει φαινόμενα που εξελίσσονται με σχετικά μεγάλες ταχύτητες αλλά αργεί πολύ αν η ταχύτητα είναι πολύ μικρή όπως στην περίπτωση της στατικής πειραματικής δοκιμής. Επίσης επειδή το δοκίμιο μοντελοποιήθηκε με shell elements σχεδιάστηκε με τη μέση διάμετρο και δόθηκε πάχος SHELL THICKNESS AT NODE για κάθε element ίσο με 2 mm. Επιπλέον λόγω χρήσης του τύπου AUTOMATIC στις διεπιφάνειες επαφής το DYNA δημιουργεί ένα offset στα αλληλεπιδρώντα τμήματα και για το λόγο αυτό πρέπει να αφαιρεθεί ένα κενό ίσο με  $(t / 2) = 1 \text{ mm}$  μεταξύ δοκιμίου και επάνω κινούμενης πλάκας. Στο σχήμα 4.4.1.4 που ακολουθεί αναπαρίσταται το μοντέλο μας, δηλαδή το δοκίμιο μας ανάμεσα στη μήτρα-εργαλείο και στην κινούμενη πλάκα.



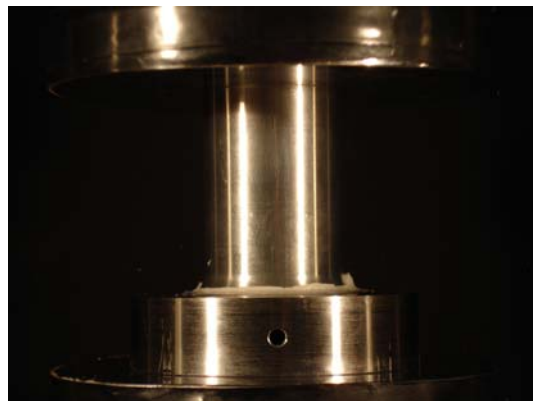
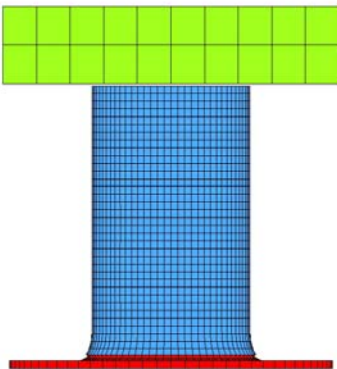
Σχ. 4.4.1.4 Το δοκίμιο ανάμεσα στη μήτρα εργαλείο και στην κινούμενη πλάκα

Στο σχήμα 4.4.1.5 που ακολουθεί παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης και επιχειρείται μία σύγκριση αντιπαραβάλλοντας τις εικόνες από τον postprocessor με αυτές που ελήφθησαν από το πείραμα. Παρατηρούμε μία πολύ καλή προσέγγιση του φαινομένου παρόλο που η αριθμητική προσομοίωση είναι εξιδανικευμένη σε σχέση με την πειραματική, αφού η γεωμετρία του μοντέλου μας ήταν τέλεια και εντελώς συμμετρική. Από την άλλη, το πραγματικό δοκίμιο σίγουρα είχε κάποιες κατασκευαστικές αδυναμίες (στη συγκεκριμένη περίπτωση παράχθηκε από τórνευση σωλήνα πάχους 2mm ) οι οποίες θα επηρεάσουν τον μηχανισμό κατάρρευσης.

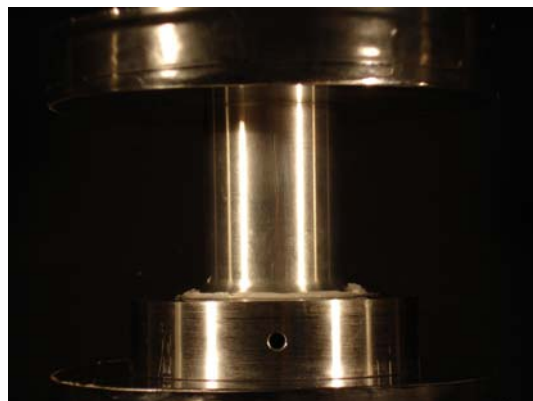
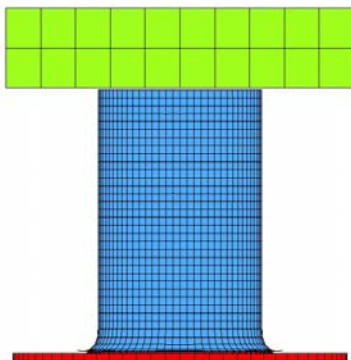
Συμπίεση 2 mm



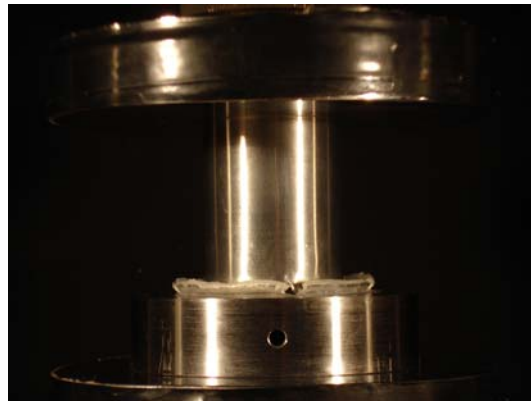
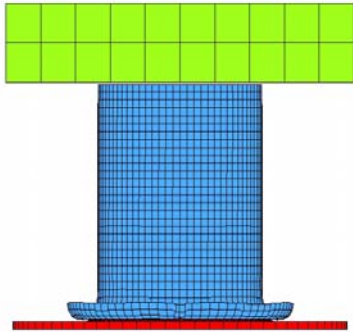
Συμπίεση 4 mm



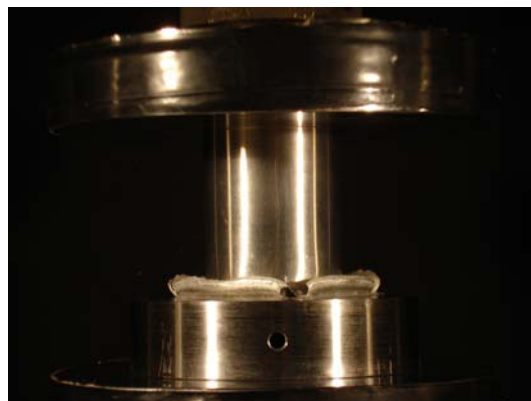
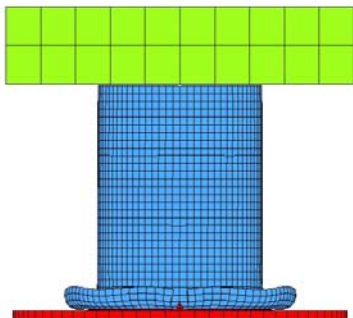
Συμπίεση 6 mm



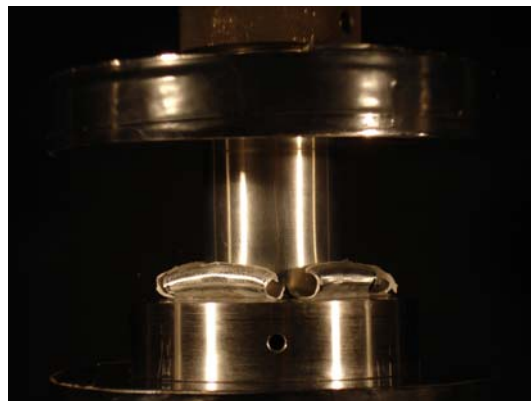
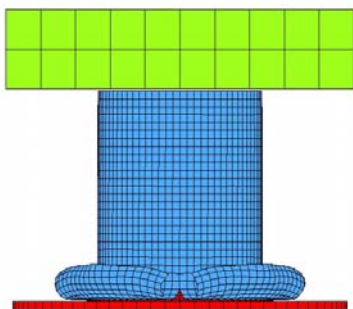
Συμπίεση 15 mm



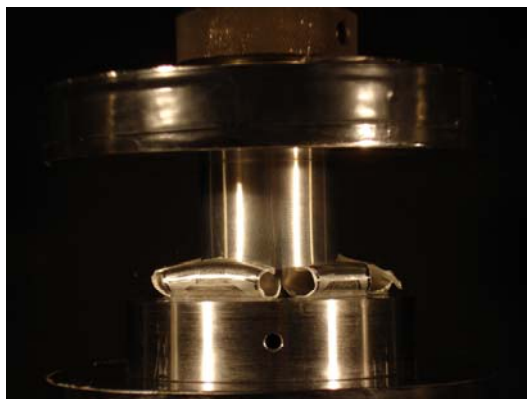
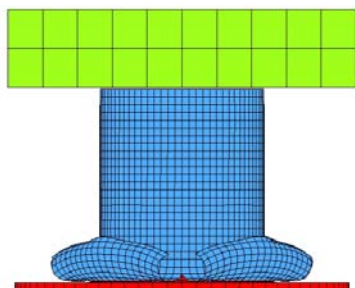
Συμπίεση 17 mm



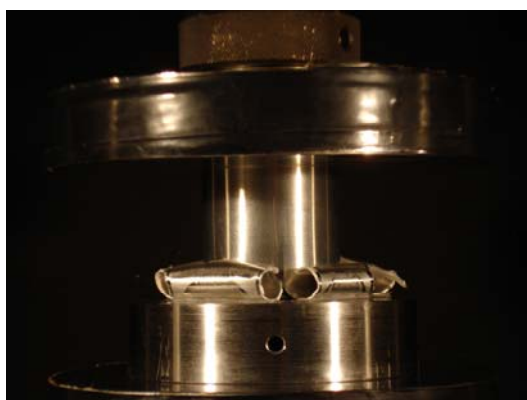
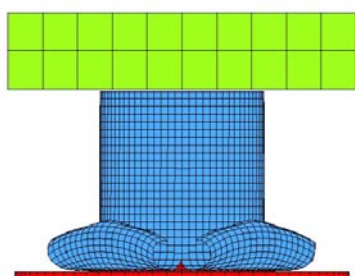
Συμπίεση 22 mm



### Συμπίεση 25 mm

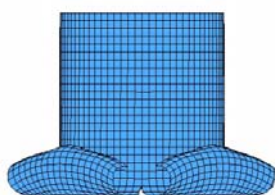


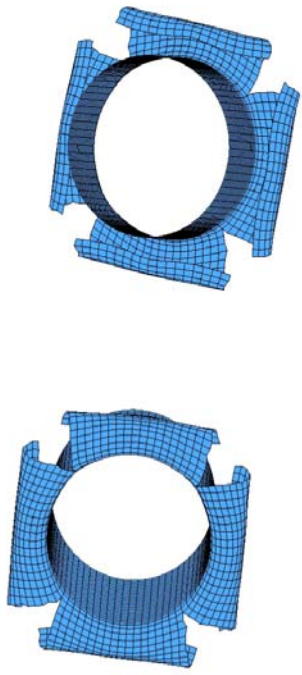
### Συμπίεση 28 mm



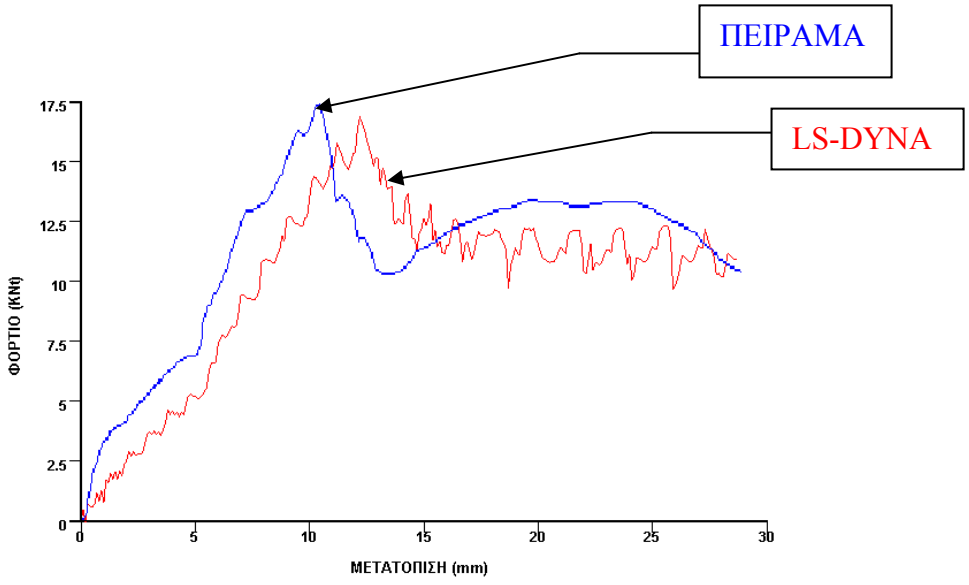
Σχ. 4.4.1.5 Διαδοχικές μορφές κατάρρευσης πειράματος και αριθμητικής προσομοίωσης

### Τελικό τεμάχιο





**Σύγκριση καμπύλης Πειράματος-Μοντελοποίησης**

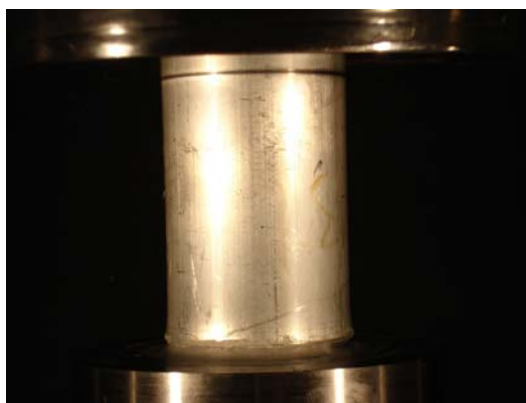
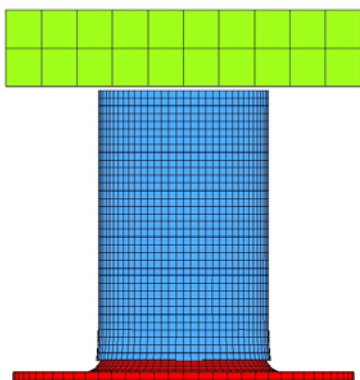


Παρατηρώντας το ανωτέρω γράφημα βλέπουμε ότι έχουμε μία πολύ καλή προσέγγιση του φαινομένου της κατάρρευσης του τορναρισμένου σωλήνα με εξωτερική διάμετρο  $D=48$  mm και πάχος τοιχώματος  $t=1$ mm. Οι δύο καμπύλες σε γενικές γραμμές συμπίπτουν. Στο πείραμα το πρώτο σκίσιμο εμφανίζεται περίπου στα 11 mm ενώ στην προσομοίωση μας εμφανίζεται περίπου στα 13 mm. Το τελευταίο οφείλεται στις ατέλειες στη γεωμετρία του υλικού αλλά και στις οριακές συνθήκες σε σχέση με το εξιδανικευμένο προσομοιωμένο μοντέλο. Επίσης η μορφή της καμπύλης της προσομοίωσης εξαρτάται και από τη μορφή διακριτοποίησης του δοκιμίου γεγονός που δικαιολογεί απόλυτα το fluctuation ( “παίξιμο” ) που εμφανίζεται στην προσομοιωμένη καμπύλη σε σχέση με την καμπύλη που εξάγεται από την πειραματική διαδικασία. Με χρήση της λειτουργίας integer που μας παρέχεται από το Is-dyna ολοκληρώνουμε την προσομοιωμένη καμπύλη και βρίσκουμε ότι η ενέργεια που απορροφάται είναι ίση περίπου με 291 Joule, ενώ η αντίστοιχη πειραματική είναι ίση με 320 Joule. Το μέσο φορτίο  $\bar{P}$  είναι ίσο περίπου με 10,39 KN και 11,43 KN αντίστοιχα. Παρατηρούμε λοιπόν μια απόκλιση της αριθμητικής προσομοίωσης περίπου 9% που είναι απόλυτα δικαιολογημένη λόγω της εξιδανίκευσης της προσομοίωσης σε σχέση με τις πραγματικές συνθήκες.

**4.4.2 Κυλινδρικό κέλυφος ανοπτημένο με πάχος τοιχώματος  $t=2\text{mm}$  ( $D=50$ ) καταπονούμενο σε κυλινδρική μήτρα με ακτίνα καμπυλότητας  $r=5\text{mm}$**

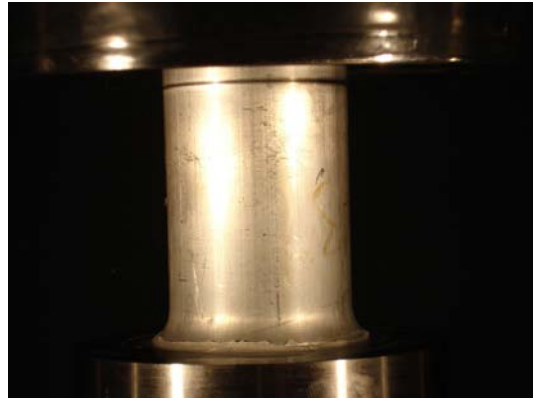
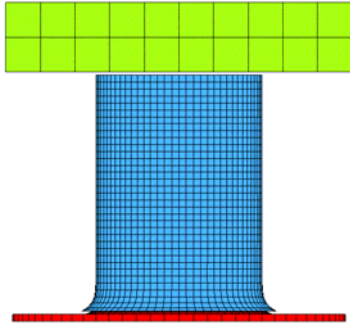
Το μοντέλο μας κατασκευάστηκε και διακριτοποιήθηκε όμοια με τον τρόπο που περιγράφηκε στην παράγραφο 4.4.1 με τη μόνη διαφορά ότι το δοκίμιο (σωλήνας κυκλικής διατομής με  $t=2\text{mm}$ ) κατασκευάστηκε με μέση διάμετρο ίση με  $48\text{mm}$  αφού το πάχος του τοιχώματός του είναι μεγαλύτερο κατά  $1\text{mm}$ . Στο σχήμα 4.4.2.1 που ακολουθεί παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης και επιχειρείται μία σύγκριση αντιπαραβάλλοντας τις εικόνες από τον postprocessor με αυτές που ελήφθησαν από το πείραμα. Συγκρίνοντας τον τρόπο κατάρρευσης μεταξύ της πειραματικής δοκιμής και της αριθμητικής προσομοίωσης παρατηρούμε ότι υπάρχει μια πολύ καλή προσέγγιση του φαινομένου της κατάρρευσης και κατά συνέπεια της εξωτερικής αναδίπλωσης του σωλήνα.

**Συμπύεση 2 mm**

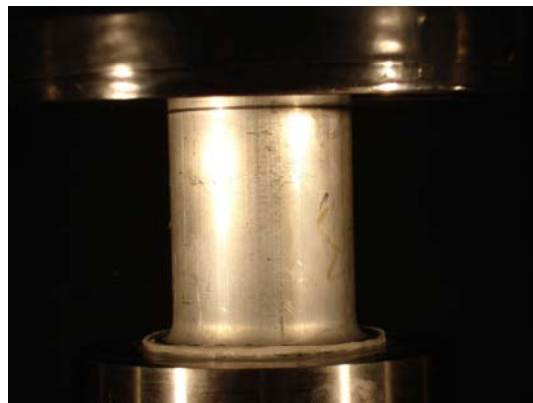
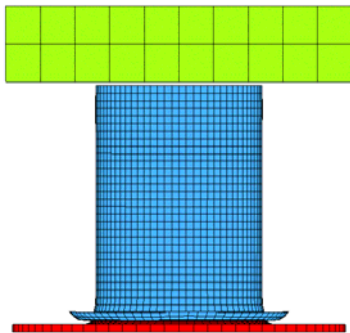




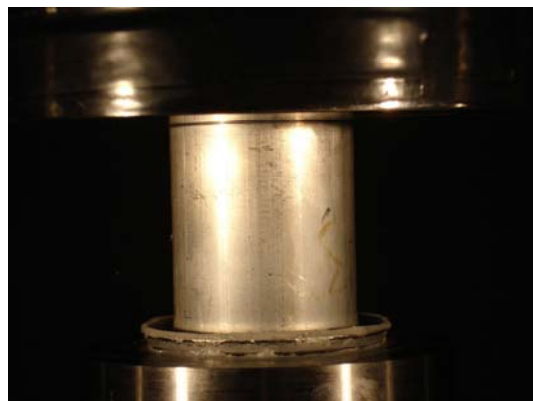
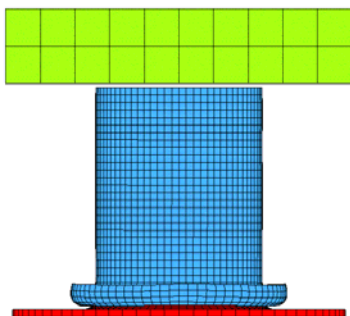
Συμπίεση 6 mm



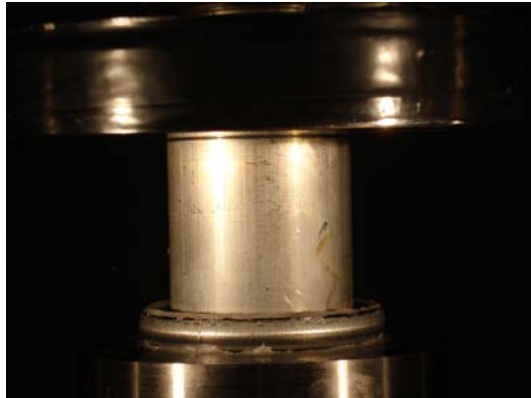
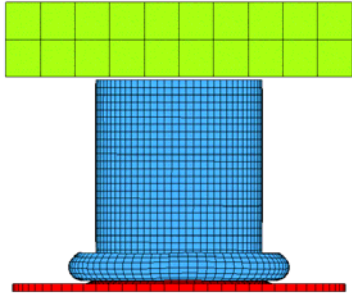
Συμπίεση 12 mm



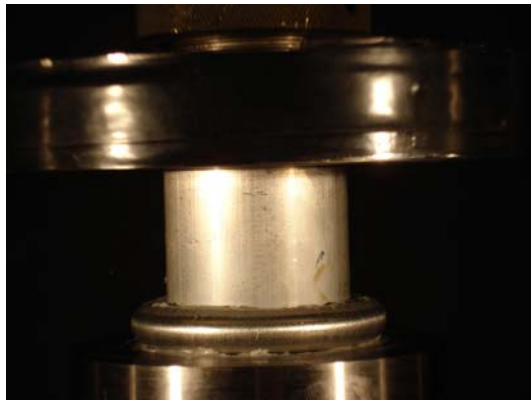
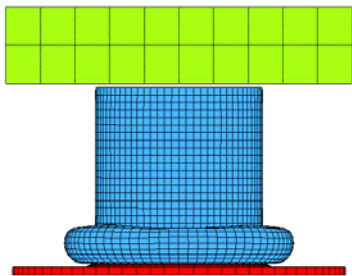
Συμπίεση 16 mm



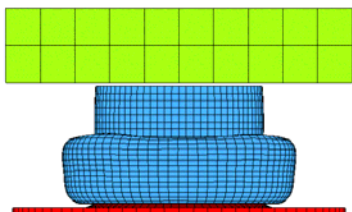
Συμπίεση 20 mm



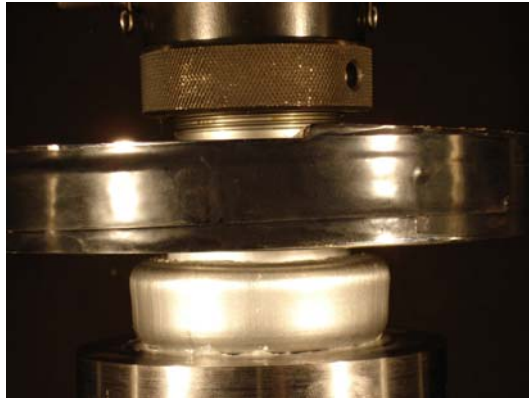
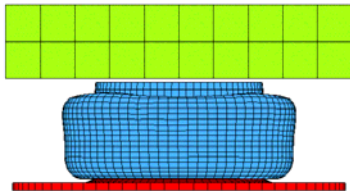
Συμπίεση 28 mm



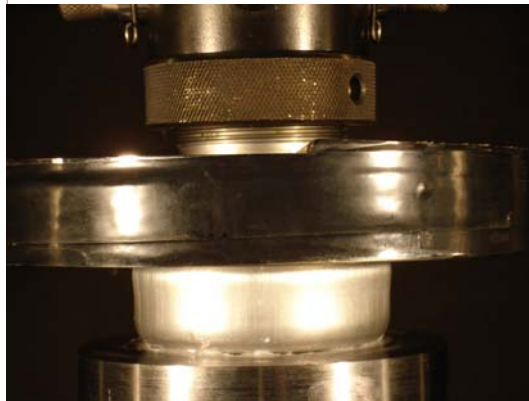
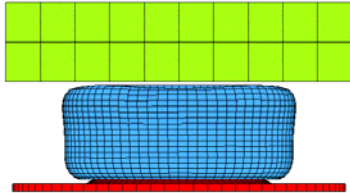
Συμπίεση 42 mm



### Συμπίεση 47 mm

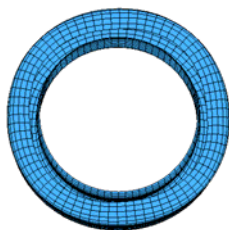


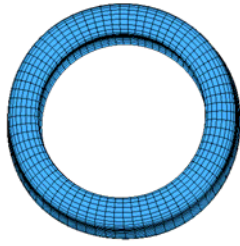
### Συμπίεση 50 mm



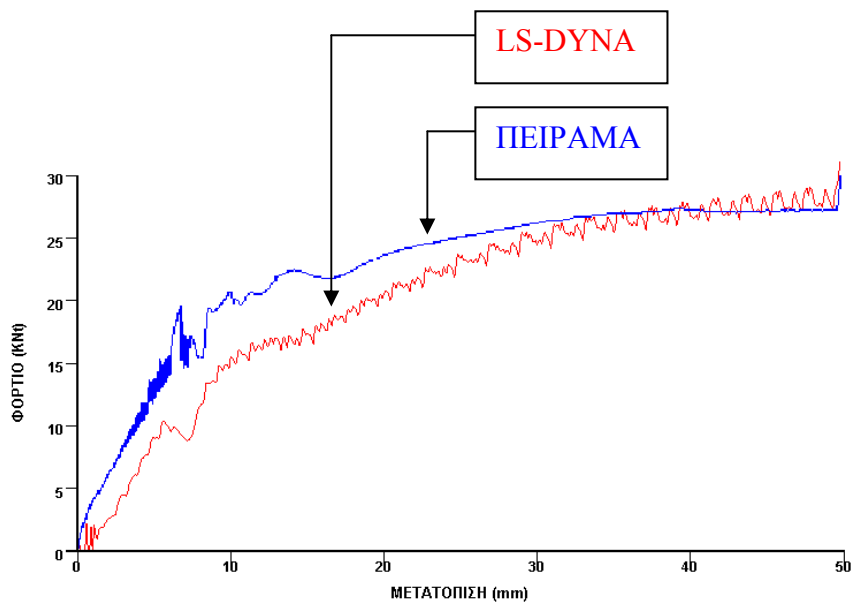
Σχ. 4.4.2.1 Διαδοχικές μορφές κατάρρευσης πειράματος και αριθμητικής προσομοίωσης

### Τελικό τεμάχιο





### Σύγκριση καμπύλης Πειράματος-Μοντελοποίησης



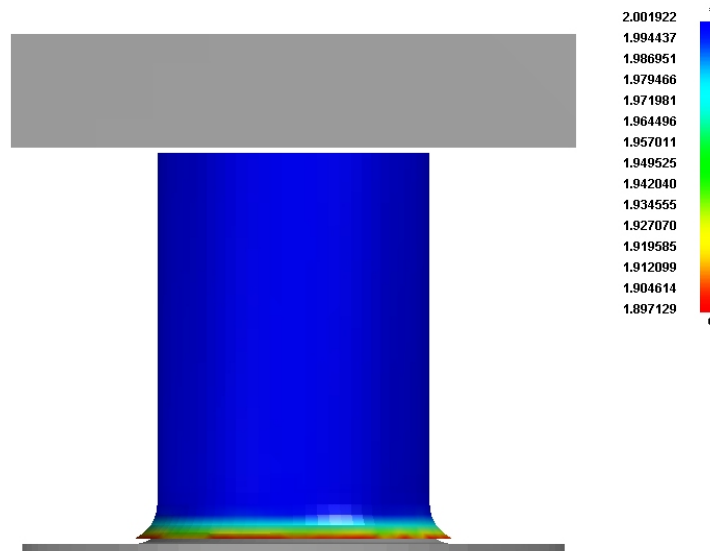
Σχ. 4.4.2.2 Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης Πειράματος-Μοντελοποίησης

Παρατηρώντας το ανωτέρω γράφημα βλέπουμε ότι έχουμε μία ικανοποιητική προσέγγιση του φαινομένου της κατάρρευσης και κατά συνέπεια της εξωτερικής αναδίπλωσης του ανοπτημένου σωλήνα με πάχος τοιχώματος  $t=2\text{mm}$ . Η μορφή της καμπύλης είναι σχεδόν όμοια μεταξύ πειράματος και αριθμητικής προσομοίωσης ωστόσο υπάρχει μια μικρή απόκλιση στις τιμές του φορτίου μέχρι τα 30mm γεγονός που μπορεί να οφείλεται σε ένα πλήθος παραγόντων. Σημαντικότεροι από αυτούς είναι αρχικά ότι το προσομοιωμένο μοντέλο μας είναι εξιδανικευμένο σε σχέση με την πειραματική δοκιμή όπου υπάρχουν κατασκευαστικές και γεωμετρικές ατέλειες δοκιμίου και μήτρας, μη τέλεια συμμετρία του μοντέλου και διαφορετικές οριακές συνθήκες. Δεν πρέπει να ξεχνάμε ότι η διακριτοποίηση του δοκιμίου έγινε με shell elements που όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως έχουν κάποιες ιδιαιτερότητες σε σχέση με τα solid elements. Επίσης το δοκίμιο μας είναι σωλήνας αλουμινίου τον οποίο ανοπτήσαμε και ίσως οι πραγματικές του μηχανικές ιδιότητες να έχουν μία πολύ μικρή απόκλιση από αυτές που προσδιορίστηκαν μέσω της πειραματικής εφελκυστικής δοκιμής και της βιβλιογραφίας. Ωστόσο τα γενικά χαρακτηριστικά όπως η απορροφούμενη και το μέσο φορτίο της αριθμητικής προσομοίωσης προσεγγίζουν πολύ καλά τα αντίστοιχα πειραματικά. Με χρήση της λειτουργίας integer που μας παρέχεται από το Is-dyna ολοκληρώνουμε την προσομοιωμένη καμπύλη και βρίσκουμε ότι η ενέργεια που απορροφάται κατά την κατάρρευση είναι ίση περίπου με 1048 Joule, ενώ η αντίστοιχη πειραματική είναι ίση με 1125 Joule. Το μέσο φορτίο  $\bar{P}$  είναι ίσο περίπου με 20,96 KN και 22.5 KN αντίστοιχα. Παρατηρούμε λοιπόν μια απόκλιση της αριθμητικής προσομοίωσης περίπου 7% που είναι απόλυτα δικαιολογημένη λόγω της εξιδανίκευσης της προσομοίωσης σε σχέση με τις πραγματικές συνθήκες.

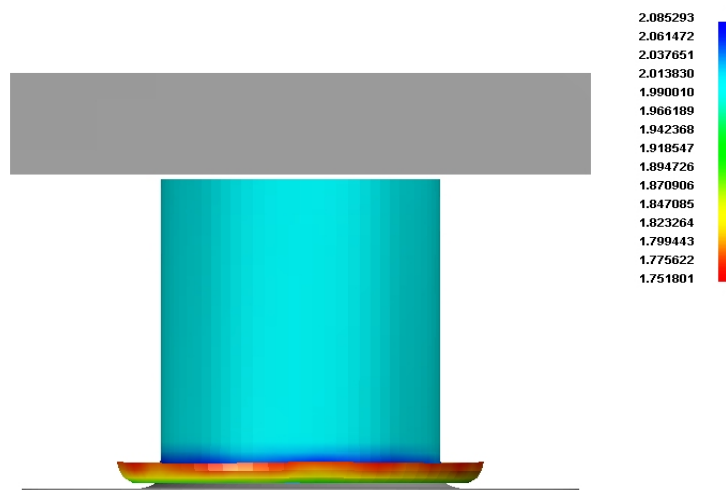
#### 4.4.3 Μεταβολή πάχους τοιχώματος κατά τη διαδικασία αναδίπλωσης στον ανοπτημένο σωλήνα αλουμινίου με αρχικό πάχος τοιχώματος $t = 2\text{mm}$

Παρά το γεγονός ότι συχνά κατά τη διατύπωση θεωρητικών μοντέλων για την εξωτερική αναδίπλωση σωλήνων κυκλικής διατομής το πάχος τοιχώματος του σωλήνα λαμβάνεται ως αμετάβλητο, για λόγους απλουστεύσεως του φαινομένου, στην πραγματικότητα αυτό μεταβάλλεται. Στο σχήμα 4.4.3.1 παρατίθενται οι μεταβολές του πάχους τοιχώματος του ανοπτημένου σωλήνα με  $t=2\text{mm}$  κατά τις διάφορες χρονικές στιγμές της διαδικασίας εξωτερικής αναδίπλωσης. Στη δεξιά βαθμονομημένη μπάρα απεικονίζονται οι max και οι min τιμές του πάχους τοιχώματος.

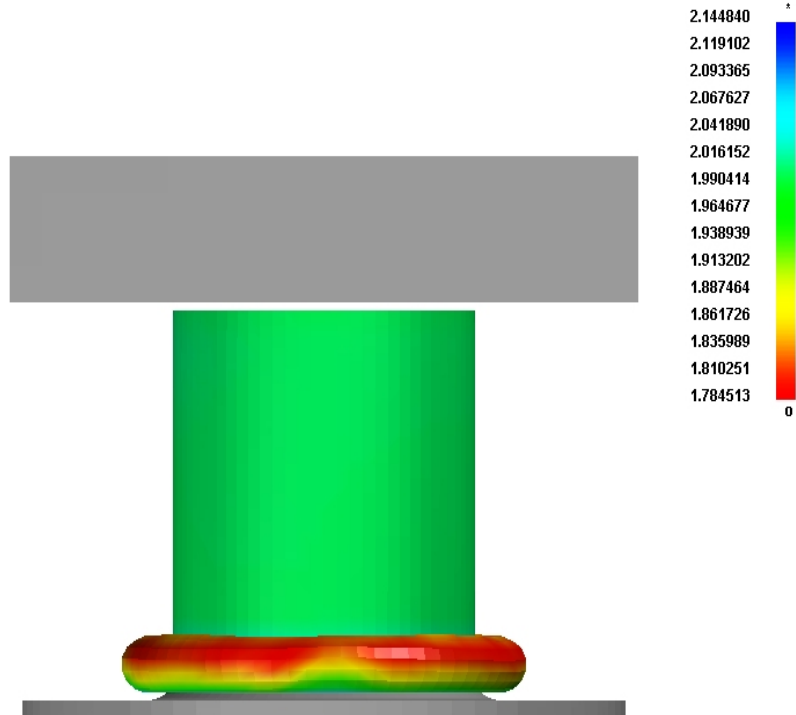
##### Συμπίεση 6mm



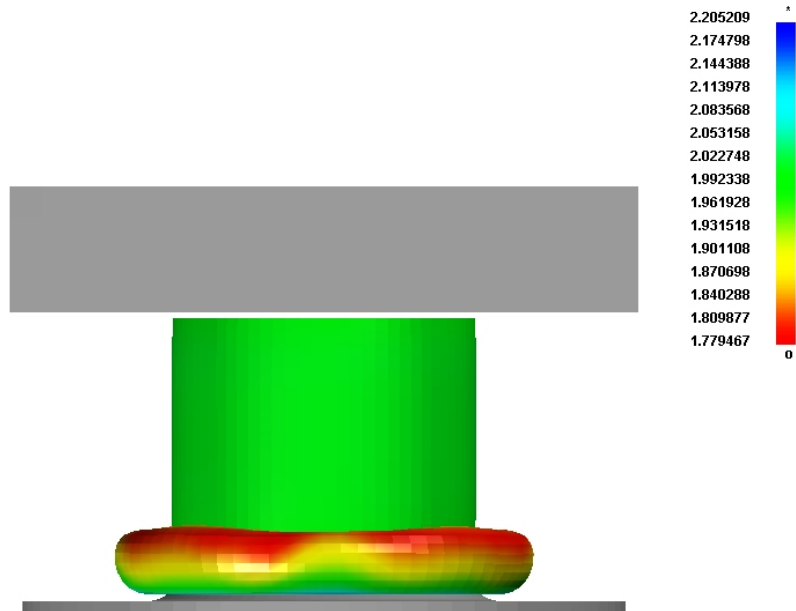
##### Συμπίεση 14mm



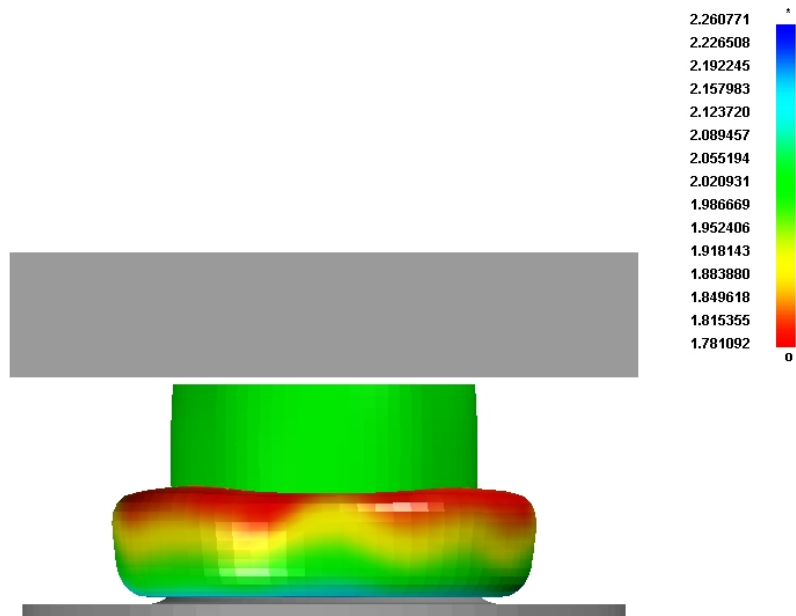
### Συμπίεση 22mm



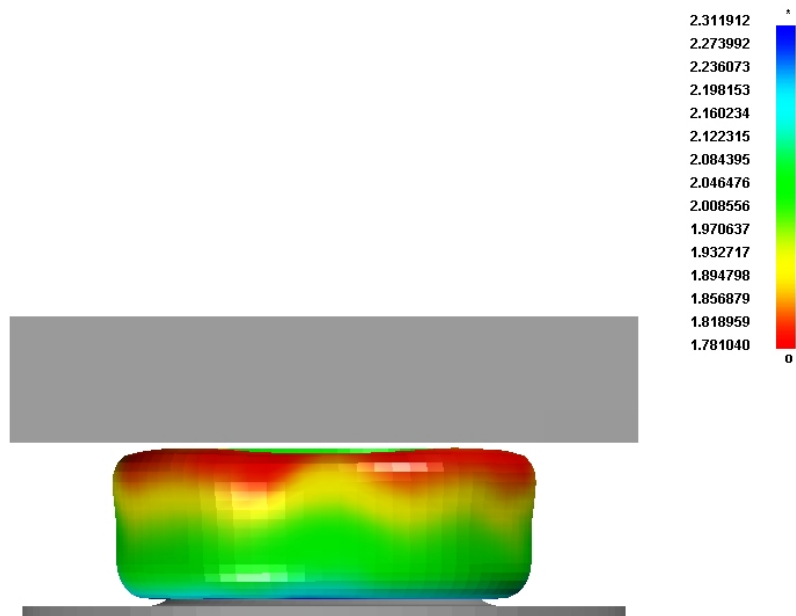
### Συμπίεση 30mm



### Συμπίεση 40mm



### Συμπίεση 50mm



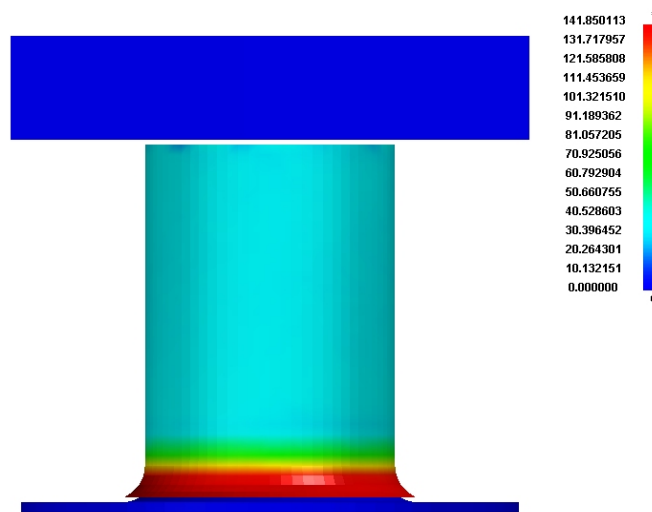
Σχ. 4.4.3.1 Μεταβολή τοιχώματος κατά την εξωτερική αναδίπλωση του ανοπτημένου σωλήνα με αρχικό πάχος τοιχώματος  $t=2\text{mm}$



#### 4.4.4 Κατανομή τάσεων κατά τη διαδικασία αναδίπλωσης στον ανοπτημένο σωλήνα αλουμινίου με αρχικό πάχος τοιχώματος $t = 2\text{mm}$

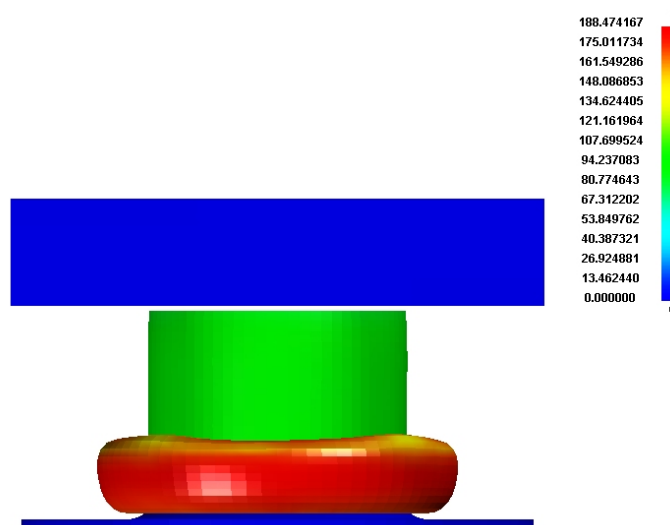
Στο σχήμα 4.4.4.1 που ακολουθεί αναπαρίστανται οι ισοδύναμες τάσεις κατά Von Mises κατά τη διάρκεια της εξωτερικής αναδίπλωσης του ανοπτημένου σωλήνα αλουμινίου με αρχικό πάχος τοιχώματος  $t=2\text{mm}$ . Στη δεξιά βαθμονομημένη μπάρα απεικονίζονται οι max και οι min τιμές της ισοδύναμης τάσης και η διακύμανση της.

##### Συμπίεση 6mm



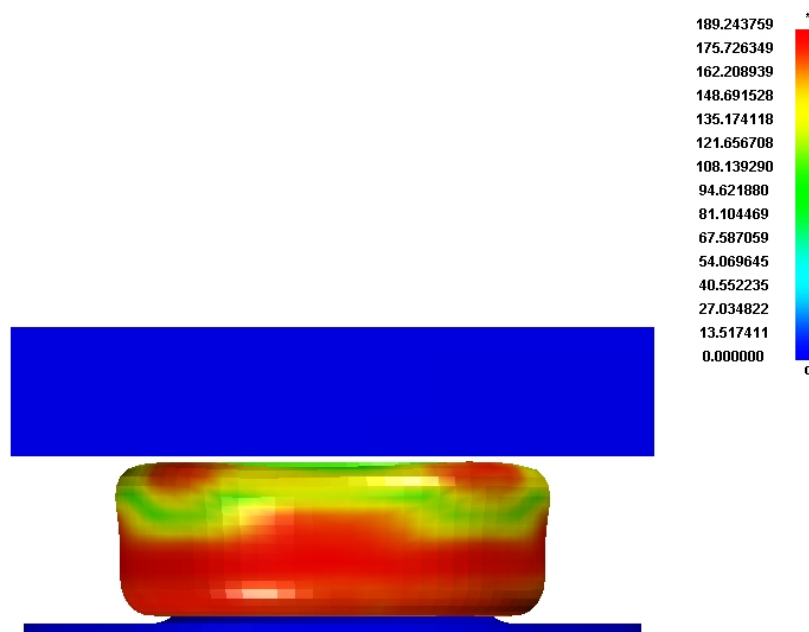
Εδώ βλέπουμε, όπως είναι αναμενόμενο, ότι η μέγιστη τάση εμφανίζεται στην περιοχή όπου ο σωλήνας έρχεται σε επαφή με την καμπυλότητα της μήτρας και αρχίζει να αναδιπλώνεται.

##### Συμπίεση 36mm



Σύμφωνα με την παραπάνω απεικόνιση ο σωλήνας οδηγείται από την καμπυλότητα της μήτρας και αναδιπλώνεται δημιουργώντας ένα παράλληλο με το αρχικό τοίχωμα. Όπως είναι αναμενόμενο η μέγιστη τάση εμφανίζεται περιφερειακά στο νέο τοίχωμα που δημιουργείται καθώς προχωράει η συμπίεση

### Συμπίεση 50mm



Εδώ απεικονίζεται η κατανομή των τάσεων στο τέλος της συμπίεσης. Όμοια με πριν η μέγιστη τάση εμφανίζεται περιφερειακά στο νέο παράλληλο τοίχωμα που δημιουργείται, όπως είναι αναμενόμενο, αφού αυτή η περιοχή καταπονείται περισσότερο. Αξίζει να σημειωθεί η ύπαρξη μιας μικρής ζώνης στην περιφέρεια του δοκιμίου όπου η τιμή της ισοδύναμης τάσης είναι σχετικά μικρή σε σχέση με το υπόλοιπο περιφερειακό κομμάτι.

## **5. Συμπεράσματα - Παρατηρήσεις**

Στο πρώτο μέρος της διπλωματικής εργασίας ασχοληθήκαμε με την πειραματική μελέτη της στατικής αξονικής καταπόνησης λεπτότοιχων κυλινδρικών κελυφών από αλουμίνιο με χρήση δύο μητρών-εργαλείων ειδικής μορφής. Εξετάζεται ο τρόπος που η μήτρα-εργαλείο οδηγεί την κατάρρευση του σωλήνα και υπό συγκεκριμένες προϋποθέσεις αναγκάζει το σωλήνα να αναδιπλωθεί δημιουργώντας ένα νέο παράλληλο προς το αρχικό τοίχωμα. Ιδιαίτερη προσοχή δίνεται στην επίδραση τόσο της γεωμετρίας της μήτρας όσο και της επεξεργασίας(θερμική) η μη του δοκιμίου στη μορφή κατάρρευσής του. Διερευνώνται οι μορφές κατάρρευσης αλλά και η ικανότητά τους προς απορρόφηση ενέργειας κατά τη διαδικασία συμπίεσης.

Αρχικά μελετήθηκε η αξονική καταπόνηση λεπτότοιχων κυλινδρικών κελυφών από αλουμίνιο με χρήση δύο ειδών μήτρας-εργαλείου. Το πρώτο είδος μήτρας-εργαλείου αναφέρεται σε κυλινδρική μήτρα με καθορισμένη ακτίνα καμπυλότητας στη βάση του κυλίνδρου όπως φαίνεται και από τις εικόνες του κεφαλαίου 3. Το δεύτερο είδος μήτρας-εργαλείου αναφέρεται σε κωνική μήτρα με ημιγωνία κορυφής  $\alpha$  όπως φαίνεται και στα αντίστοιχα σχήματα του κεφαλαίου 3. Για το πρώτο είδος μήτρας-εργαλείου έγιναν αξονικές καταπονήσεις σε τέσσερα διαφορετικά δοκίμια. Το πρώτο ήταν λεπτότοιχο κυλινδρικό κέλυφος από αλουμίνιο πάχους τοιχώματος  $t=2\text{mm}$  μη θερμικά επεξεργασμένο. Το δεύτερο ήταν επίσης μη θερμικά επεξεργασμένο κυλινδρικό κέλυφος αλλά με πάχος τοιχώματος  $t=1\text{mm}$ . Το τρίτο και το τέταρτο είδος δοκιμίων ήταν θερμικά επεξεργασμένοι σωλήνες με  $t=2\text{mm}$ , ένας ανοπτημένος σωλήνας και ένα δοκίμιο το οποίο υπέστη σκλήρυνση αντίστοιχα. Για το δεύτερο είδος της κωνικής μήτρας-εργαλείου έγιναν τέσσερις διαφορετικές δοκιμές σε αξονική καταπόνηση. Αρχικά εξετάσθηκε η κατάρρευση σε κωνική μήτρα με μεγάλη ημιγωνία κορυφής  $\alpha = 65^\circ$  τριών ειδών κυλινδρικών σωλήνων με πάχος τοιχώματος  $t=2\text{mm}$ : Ένας σωλήνας μη θερμικά επεξεργασμένος, ένας ανοπτημένος σωλήνας και ένας σωλήνας ο οποίος υπέστη σκλήρυνση. Κατόπιν έγινε μια αξονική καταπόνηση σε κωνική μήτρα με σχετικά μικρή ημιγωνία κορυφής  $\alpha = 40^\circ$  ενός μη θερμικά επεξεργασμένου κυλινδρικού κελύφους με  $t=2\text{mm}$ .

Συνοψίζοντας τα κυριότερα συμπεράσματα που προκύπτουν από την καταγραφή και σύγκριση όλων των αποτελεσμάτων για το πρώτο είδος μήτρας-εργαλείου μπορούμε να εξάγουμε τα εξής:

Η μορφή της κατάρρευσης με άμεση συνέπεια στην ικανότητα φόρτισης αλλά και στην ικανότητα προς απορρόφηση ενέργειας εξαρτάται από το υλικό του δοκιμίου και τις αντίστοιχες μηχανικές του ιδιότητες(δηλ. αν είναι θερμικά επεξεργασμένο ή όχι το δοκίμιό μας). Ο μη θερμικά επεξεργασμένος σωλήνας ενώ αρχικά οδηγείται από την καμπυλότητα της μήτρας και αναδιπλώνεται δεν αντέχει την περιφερειακή παραμόρφωση με αποτέλεσμα να σκίζεται. Οι θερμικά επεξεργασμένοι σωλήνες (ανοπτημένο και σκληρυμένο δοκίμιο) δίνουν σταθερές μορφές αναδίπλωσης αφού οδηγούνται τέλεια από την καμπυλότητα της μήτρας και ανακάμπτουν. Η απορροφούμενη ενέργεια κατά τη διαδικασία της αξονικής καταπόνησης καταγράφεται και υπολογίζεται από τις καμπύλες φορτίου μετατόπισης και είναι πολύ μεγαλύτερη για το σκληρυμένο δοκίμιο σε σχέση με το ανοπτημένο και το μη θερμικά επεξεργασμένο δοκίμιο. Το ανοπτημένο δοκίμιο κατά τη διαδικασία αναδίπλωσής του απορροφά μικρότερη ενέργεια από το μη θερμικά επεξεργασμένο δοκίμιο. Ωστόσο, επειδή το μη θερμικά επεξεργασμένο δοκίμιο σκίζεται, η μορφή κατάρρευσης του είναι πιο ασταθής από την αντίστοιχη του ανοπτημένου. Τα παραπάνω που ισχύουν για την απορροφούμενη ενέργεια ισχύουν αντίστοιχα και για το μέσο φορτίο αφού αναφερόμαστε σε ίδια μήκος συμπίεσης  $\Delta l$ . Όσον αφορά το δοκίμιο με πάχος τοιχώματος  $t=1\text{mm}$  αυτό καταρρέει τελείως διαφορετικά από τα προηγούμενα. Αρχικά οδηγείται από την καμπυλότητα της μήτρας αλλά μην αντέχοντας την περιφερειακή παραμόρφωση σκίζεται σε τέσσερα σημεία που είναι συμμετρικά ανά δυο. Οι τέσσερις δημιουργούμενες λωρίδες αναδιπλώνονται συμμετρικά απορροφώντας μικρότερο ποσό ενέργειας από τα αντίστοιχα ποσά των άλλων δοκιμίων για μήκος συμπίεσης  $\Delta l=28\text{mm}$ .

Συνοψίζοντας τα κυριότερα συμπεράσματα που προκύπτουν από την καταγραφή και σύγκριση όλων των αποτελεσμάτων για το δεύτερο είδος μήτρας-εργαλείου μπορούμε να εξάγουμε τα εξής:

Η μορφή κατάρρευσης εξαρτάται από τη γωνία κορυφής της κωνικής μήτρας. Τα τρία πρώτα δοκίμια που καταπονήθηκαν σε κώνο με μεγάλη γωνία κορυφής, άσχετα με την τελική μορφή κατάρρευσης, αρχικά οδηγήθηκαν από τη μήτρα σε αναδίπλωση ενώ το τέταρτο που καταπονήθηκε σε κώνο με μικρή γωνία κορυφής δεν

μπήκε σε διαδικασία αναδίπλωσης αφού ολίσθησε πάνω στη μήτρα χωρίς να ανακάμψει(αναδιπλωθεί).

Όσον αφορά τα τρία πρώτα δοκίμια τα δοκίμια που είναι λιγότερο όλκιμα όπως το μη θερμικά επεξεργασμένο και το σκληρυμένο σκίζονται δίνοντας ασταθείς φάσεις κατάρρευσης σε αντίθεση με τον ανοπτημένο σωλήνα που καταρρέει ευσταθώς και δίνει συγκεκριμένη μορφή. Η μορφή αυτή χαρακτηρίζεται από μία μικρή ανάκαμψη-αναδίπλωση στη βάση και δύο λοβούς έναν εσωτερικό και έναν εξωτερικό στη βάση και το πάνω μέρος του σωλήνα αντίστοιχα. Οι παραπάνω σωλήνες αρχικά οδηγούνται από τη μήτρα-εργαλείο και σχηματίζουν μια μικρή ανάκαμψη αλλά στη συνέχεια είτε σκίζονται ασταθώς είτε δημιουργούνται λοβοί εμποδίζοντας την περαιτέρω αναδίπλωση. Μία λύση για τον ανοπτημένο (όλκιμο) σωλήνα θα μπορούσε να είναι η χρήση μιας μήτρας η οποία πριν την κωνικότητα θα είχε έναν κυλινδρικό οδηγό διαστάσεως αντίστοιχης με την εσωτερική διάμετρο του σωλήνα που θα στήριζε το κυλινδρικό κέλυφος εμποδίζοντας την εμφάνιση λοβών. Όσον αφορά την απορροφούμενη ενέργεια (και κατά αντιστοιχία το μέσο φορτίο) αυτή επηρεάζεται τόσο από τη γεωμετρία του κώνου όσο και από το ίδιο το υλικό του δοκιμίου. Έτσι τα σκληρά δοκίμια ενώ αναπτύσσουν λόγω της αντίστασης μεγαλύτερο μέσο φορτίο, σκίζονται και από ένα σημείο και μετά καταρρέουν τελείως ασταθώς σε αντίθεση με τον όλκιμο ανοπτημένο σωλήνα ο οποίος καταρρέει συγκριτικά με τα προηγούμενα, με μεγαλύτερη ευστάθεια για πολύ μεγαλύτερο μήκος συμπίεσης.

Στο δεύτερο μέρος ασχοληθήκαμε με την αριθμητική προσομοίωση του φαινομένου της αξονικής καταπόνησης σωλήνων κυκλικής διατομής σε κυλινδρική μήτρα με καμπυλότητα στη βάση της. Οι μορφές κατάρρευσης που προέκυψαν από την προσομοίωση μοιάζουν πάρα πολύ με τις αντίστοιχες πειραματικές. Έτσι χαρακτηριστική ήταν η ομοιότητα τόσο της προσομοιωμένης μορφής αναδίπλωσης όσο και των τεσσάρων αναδιπλούμενων συμμετρικών λωρίδων. Επίσης ικανοποιητική ήταν η ομοιότητα της καμπύλης φορτίου-μετατόπισης που προέκυψε από την αριθμητική προσομοίωση με την αντίστοιχη πειραματική. Επιπροσθέτως γίνεται μελέτη της μεταβολής του πάχους του τοιχώματος κατά τη διαδικασία της εξωτερικής αναδίπλωσης καθώς και των ισοδύναμων τάσεων που αναπτύσσονται. Έγινε προσπάθεια μέσα από επιμέρους πειράματα στα δοκίμια και βιβλιογραφία ώστε οι φυσικές και μηχανικές ιδιότητες που εισήχθησαν στη μοντελοποίηση να ταυτίζονται με τις πραγματικές και θεωρείται ότι οι τιμές που εισήχθησαν

προσεγγίζουν τις πραγματικές σε ικανοποιητικό βαθμό. Οι όποιες μικρές διαφορές μεταξύ πειράματος και αριθμητικής προσομοίωσης οφείλονται κύρια στις κατασκευαστικές αδυναμίες που είχαν τα πραγματικά δοκίμια και η μήτρα, στις μικρές διαφορές των οριακών συνθηκών καθώς και στην διαφορετική ταχύτητα καθόδου του εμβόλου μεταξύ πειράματος και εξιδανικευμένης αριθμητικής προσομοίωσης.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

1. ABRAMOWICZ W. and JONES N., Dynamic axial crushing of circular tubes. *International Journal of Impact Engineering*, 1984,2(3), 263-281
2. ALEXANDER, J. M., An approximate analysis of the collapse of cylindrical shells under axial loading. *Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*,1960,13(10), 10-15
3. CHANG CHONGHOU, LIU YANSHENG, YOSHIAKI GOTO, Plastic Buckling of Cylindrical Shells Under Transverse Loading, *Tsinghua Science and Technology*, Volume 13, No 2, 2008, pp. 202-210
4. DAW-KWEI LEU, The curling characteristics of static inside-out inversion of metal tubes, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 40 (2000) 65-80
5. GUIST, L. R. and MARBLE, D. P., Prediction of the inversion load of a circular tube, *NASA*,tech. Note D-3622(1966)
6. GUPTA P. K. and KHAPRE R. N., Finite element simulation of nosing metallic tubes
7. GUPTA P. K. and KHAPRE R. N.,2006, Finite element modeling of circular subjected to axial compression between flat and curved surface dies, *Proc. National Conference on Rapid Prototyping Applications Conference*, Visvesvaraya National Institute of Technology , Nagpur 47 - 55
8. Heat Treating, *ASM Handbook*, Volume 4
9. HUANG X., LU G. and YU T. X., Collapse of square metal tubes in splitting and curling mode, *Proc. IMechE Vol 220 Part C: J. Mechanical Engineering Science*
10. HUANG X., LU G., YU T. X., On the axial splitting and curling of circular metal tubes, *International Journal of Mechanical Sciences* 44 (2002) 2369-2391
11. JOHNSON W. and MAMALIS A. G., *Crashworthiness of Vehicles*. Mechanical Engineering Publication Ltd, London (1978)
12. JOHNSON W., Inversion tubes, in: *Impact Strength of Materials* EDWARD ARNOLD,1972,pp. 190-193
13. JOHNSON W., REID S. R., Metallic energy dissipation system, *Applied Mechanics Reviews* 31 (1978) 277-288

14. K. KITAZAWA, Criteria for outward curling of tubes, Journal of Engineering for Industry Trans, ASME 115(1993) 466-471
15. KINKEAD A. N., Analysis for inversion load and energy absorption of a circular tube, Journal of Strain Analysis 18(3) (1983)177-188
16. LS-DYNA, KEYWORD USER'S MANUAL, Livermore Software Technology Corporation, Version 971, July 2006
17. LU, G. and YU, T. X., Energy absorption of structure and material,(Woodhead Publishing, Cambridge)
18. LUO Y. H., HUANG Z. W., ZHANG X. L., Fem analysis of external inversion and energy absorbing characteristics of inverted tubes, Journal of Materials Processing Technology 187-188(2007)279-282
19. MAMALIS A. G., MANOLAKOS D. E., SAIGAL F.,VIEGELAHN and JOHNSON W., Extensible plastic collapse of thin wall frusta as energy absorber, International Journal of Mechanical Science, Vol 28, pp. 219/229, 1986
20. MAMALIS A. G., W. JOHNSON AND G.L. VIEGELAHN, The crumpling of steel thin-walled tubes and frusta under axial compression at elevated strain-rates: some experimental results. Int. J. Mech. Sci. 26, 537 (1984).
21. MAMALIS A.G, MANOLAKOS D.E, VIEGELAHN G.L, Deformation Characteristics of Crashworthy Components, Fortschritt-Berichte der VDI-Zeitschriften, Reihe 18,Nr 62,1989
22. MAMALIS A.G, MANOLAKOS D.E, VIEGELAHN G.L, JOHNSON W., The modelling of the progressive extensible plastic collapse of thin-wall shells, International Symposium on Structural Failure, MIT, Boston, 1988  
International Journal of Mechanical Science, Vol. 30, pp. 249/261,1988
23. MAMALIS A.G., MANOLAKOS D.E., BALDOUKAS A.K., VIEGELAHN G.L., Deformation characteristics crashworthy thin-walled steel tubes subjected to bending, Proc. Institution of Mechanical Engineers, Part C, Journal of Mechanical Engineering Science, Vol 203, pp. 411/417, 1989
24. MANOLAKOS D.E., Τεχνολογία Εργαλείων και Μητρών, σημειώσεις μαθήματος
25. McGRAW-HILL, Dictionary of Engineering, 2003, second edition
26. P. C. MISCOW F. and H. A. AL-QURESHI, Mechanics of static and dynamic



- inversion processes, *Int. J. Mech. Sci.* Vol 39, No 2, pp. 147-161, 1997
27. PEDRO A. ROSA, RUI M. O. BAPTISTA, JORGE M. C. RODRIGUES, PAULO A. F. MARTINS, An investigation on the external inversion of thin-walled tubes using a die, *International Journal of Plasticity* 20 (2004) 1931-1946
  28. REDDY, T. Y. and REID, S. R., Axial splitting of circular metal tubes, *International Journal of Mechanical Sciences*, 1986
  29. REID S. R., HARRIGAN J. J., Transient effects in the quasi-static and dynamic internal inversion and nosing of metal tubes, *Int. J. Mech. Sci.* Vol 40, No 2-3, pp.263-280,1998
  30. REID S. R., Plastic deformation mechanisms in axially compressed metal tubes used as impact energy absorbers, *Int. J. Mech. Sci.* Vol 35, No 12, pp 1035-1052,1993
  31. ROSA P. A. R., RODRIGUES J. M. C., MARTINS P. A. F., External inversion of thin-walled tubes using a die: experimental and theoretical investigation, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 43(2003) 787-796
  32. S. P. TIMOSHENCO AND J. M. GERE, *Theory of elastic stability*. McGraw-Hill New York (1961)
  33. S. T. S. AL-HASSANI, W. JOHNSON, W. T. LOWE, Characteristics of inversion tube under axial loads, *J. Mech. Engag. Sci.* 14 (1972) 370-381
  34. SEKHON G. S. , GUPTA N. K. and GUPTA P. K., An analysis of external inversion tubes, *Journal of Materials Processing Technology*,133,(2003) 243-256
  35. STRONGE W. J., YU T. X. and JOHNSON W., Long stroke energy dissipation in splitting tubes, *Int. J. Mech. Sci.* Vol 25, No 9-10, pp. 637-647,1983
  36. TAN H. J., CHAN K. C., Numerical analysis of an inside-out process, *Journal of Materials Processing Technology* 66(1997) 130-136
  37. WILLIAM D. CALLISTER, JR., *Material Science and Engineering*, Seventh Edition, John Willey & Sons, Inc (2007)
  38. YUUNG MING-HUANG, Finite element analysis of tube inversion process with radiused dies, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* (2005) 26:991-998
  39. Z. C. SUN, H. YANG, Free deformation mechanism and change of forming mode in tube inversion under conical die, *Journal of Materials Processing Technology* 177 (2006) 171-176

## Ηλεκτρονικές Πηγές

1. <http://www.azom.com>
2. <http://www.world-aluminium.org>
3. <http://www.tribology-abc.com>
4. <http://www.keytometals.com>
5. <http://www.efunda.com>
6. <http://www.lstc.com>
7. <http://www.ls-dyna.com>