



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
Τομέας Τεχνολογίας των Κατεργασιών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ & ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΔΙΕΛΑΣΗΣ ΔΙΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΣΩΛΗΝΩΝ

Μαργαρίτα Στ. Μπέη

Διευθυντής Τομέα: Α.Γ. Μάμαλης
Επιβλέπων Καθηγητής: Δ.Ε. Μανωλάκος

Αθήνα
Μάρτιος 2008

*Η εργασία αυτή αφιερώνεται
στην οικογένειά μου
και στον Πάρη*

*«...ήδη θα το κατάλαβες οι Ιθάκες τι
σημαίνουν.»*

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο της σειράς μαθημάτων «Κατεργασίες Μετάλλων» κατά τη διάρκεια των προπτυχιακών σπουδών στο τμήμα Κατασκευαστή Μηχανολόγου Μηχανικού της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Η εκπόνηση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας υποστηρίχτηκε από το Εργαστήριο Τεχνολογίας των Κατεργασιών των Υλικών.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συντελεστές που βοήθησαν ουσιαστικά στη διάθεση και συλλογή στοιχείων, καθώς και στη χρήση μεθόδων προκειμένου να ολοκληρωθεί επιτυχώς η εκπόνηση και η συγγραφή του παρόντος συγγράμματος.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον Διευθυντή του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών των Υλικών, Καθηγητή και Ακαδημαϊκό κ. Α.Γ. Μάμαλη, για την εμπιστοσύνη και την πολύτιμη παροχή τεχνικής βοήθειας μέσω του εργαστηρίου και του έμπυχου δυναμικού του τομέα, χωρίς την ύπαρξη της οποίας δεν θα είχε ολοκληρωθεί η παρούσα Διπλωματική Εργασία.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον Δάσκαλο και Επιβλέποντα Καθηγητή μου κ. Δημήτριο Ε.Μανωλάκο, Καθηγητή της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για την ανάθεση του θέματος της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας και την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπο μου. Η συνεχής καθοδήγηση του, οι πολύτιμες συμβουλές του, καθώς και οι ακαδημαϊκές γνώσεις και πρακτικές που μου προσέφερε υπήρξαν καθοριστικές για την ολοκλήρωση αυτής της εργασίας.

Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Υποψήφιο Διδάκτορα (ΥΔ) κ. Πρωτεσίλαο Κωστάζο για την παραχώρηση πολύτιμων τεχνικών συμβουλών στη γενική χρήση του LS-DYNA, τη συνεργασία και την υποστήριξη που μου παρείχε κατά την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας, καθώς και την υπομονή του. Ευχαριστώ επίσης τον ΥΔ κ. Σωτήρη Γεωργιόπουλο για τις πολύτιμες εισηγήσεις του αναφορικά με την πειραματική διαδικασία και για την ευγενική παραχώρηση δεδομένων των πειραμάτων που ο ίδιος είχε εκτελέσει.

Δεν πρέπει να λησμονήσω τα μέλη του τεχνικού προσωπικού για την υποστήριξη και την συμπαράσταση που μου παρείχαν καθ'όλη την διάρκεια των προπτυχιακών σπουδών μου, καθώς επίσης και για τις τεχνικές πληροφορίες που μου έδωσαν.

Τέλος, θα ήθελα πάνω απ' όλα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στα μέλη της οικογένειάς μου, που πίστεψαν σε μένα και στις δυνατότητες μου καθώς και για την αμέριστη υποστήριξή τους σε όλη τη διάρκεια των προπτυχιακών σπουδών μου.

Αθήνα, Μάρτιος 2008
Μαργαρίτα Στ. Μπέη

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την ανάπτυξη ενός πειραματικά βασισμένου μοντέλου αριθμητικής προσομοίωσης της κατεργασίας διέλασης διμεταλλικών σωλήνων, ώστε να κατανοηθεί πληρέστερα η ροή των υλικών κατά τη συνδιέλαση μετάλλων και συνακόλουθα να βελτιστοποιηθούν οι παράμετροι που αφορούν στον σχεδιασμό εργαλείων και στον έλεγχο της διαδικασίας, που θα έχουν ως αποτέλεσμα τελικό προϊόν υψηλής ποιότητας. Προφανώς, αυτό περιλαμβάνει εργαλεία αριθμητικού σχεδιασμού, τα οποία ενσωματώνουν τις μηχανικές ιδιότητες των μετάλλων, την επιθυμητή γεωμετρία των σωλήνων, όπως επίσης την γεωμετρία της αρχικής μπιγιέτας και τις παραμέτρους της διέλασης.

Οι διμεταλλικοί σωλήνες αποτελούνται από δύο διαφορετικά μέταλλα ή κράματα συνδεδεμένα μεταξύ τους μέσω συγκόλλησης ή με σφικτή συναρμογή. Οι σωλήνες αυτοί προτιμώνται έναντι των μονομεταλλικών σε κατασκευές ιδιαίτερων απαιτήσεων. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμοι σε εφαρμογές όπου οι συνθήκες εντός του σωλήνα και εκτός αυτού είναι διαφορετικές και απαιτούν χαρακτηριστικά και ιδιότητες που δεν επιτυγχάνονται με την χρήση ενός μόνο υλικού.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η κατεργασία της διέλασης διμεταλλικών σωλήνων, καθώς υπάρχει αυξημένη ανάγκη για σωλήνες διατομής διαφορετικής από τις τυποποιημένες καθώς επίσης και για συνδυασμούς μετάλλων που δεν απαντώνται συχνά στο εμπόριο. Γενικά, οι μέθοδοι που εφαρμόζονται στην διέλαση μονομεταλλικών σωλήνων απαιτείται να τροποποιηθούν ή να επεκταθούν προκειμένου να μελετηθεί η παραμόρφωση σύνθετων πολυστρωματικών σωλήνων.

Μακροπρόθεσμος στόχος είναι να αποφευχθούν από μέρους των βιομηχανιών που δραστηριοποιούνται στον τομέα αξιοσημείωτα λάθη, που σχετίζονται με τις μεθόδους «δοκιμής-και-λάθους» (trial-and-error) που ακολουθούνται επί του παρόντος και να διευκολυνθεί η αξιολόγηση των πιθανών συνδυασμών μετάλλων προς συνδιέλαση, προτού αυτά εισέλθουν στην παραγωγική διαδικασία.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αρχικά μελετάται η διέλαση διμεταλλικών σωλήνων από θεωρητική και μαθηματική άποψη. Κατόπιν παρουσιάζονται αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών. Ακολουθεί μοντελοποίηση και παραμετρική μελέτη της κατεργασίας με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, τα αποτελέσματα της οποίας συγκρίνονται με τα αντίστοιχα πειραματικά.

Στο 1ο Κεφάλαιο δίνονται αρχικά ο ορισμός της διέλασης καθώς και τα γενικά χαρακτηριστικά της. Κατόπιν επιχειρείται η ταξινόμηση των μεθόδων διέλασης σε 4 κατηγορίες. Ακολουθεί σύντομη αναφορά στη ροή του υλικού κατά τη διέλαση και στις 4 διακριτές φάσεις της άμεσης διέλασης. Στη συνέχεια εξετάζονται γενικά τα χαρακτηριστικά των διμεταλλικών σωλήνων και ορισμένα βασικά στάδια παραγωγής τους. Ακολουθεί ειδική μνεία στις εφαρμογές των διμεταλλικών σωλήνων. Σε επόμενη ενότητα γίνεται αναφορά στην ήδη υπάρχουσα βιβλιογραφία επί του θέματος της διέλασης διμεταλλικών σωλήνων. Πιο συγκεκριμένα, ανάμεσα στα αμέτρητα σχετικά επιστημονικά άρθρα, γίνεται ειδική μνεία σε ορισμένες δημοσιευμένες εργασίες που θεωρήθηκε ότι παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Παρουσιάζονται μία σύντομη περίληψη της εκάστοτε δημοσίευσης καθώς και τα πολύτιμα συμπεράσματα στα οποία κατέληξαν οι ερευνητές. Στις περισσότερες των περιπτώσεων, τα συμπεράσματα αυτά αξιοποιήθηκαν για την εκπόνηση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας. Τέλος, παρατίθεται η μαθηματική ανάλυση της διέλασης διμεταλλικών σωλήνων και δίνονται οι εξισώσεις που προκύπτουν και περιγράφουν επαρκώς το μοντέλο.

Στο 2ο Κεφάλαιο παρουσιάζεται το πειραματικό μέρος πάνω στο οποίο βασίστηκε ολόκληρη η εργασία. Περιλαμβάνει παρουσίαση του εργαλείου, αναφορά στα υλικά από τα οποία ήταν κατασκευασμένα το εργαλείο και τα δοκίμια, παράθεση των τεχνικών χαρακτηριστικών της πρέσσας στην οποία διεξήχθησαν τα πειράματα, την παρουσίαση των δοκιμών, τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας καθώς και κάποια σύντομα σχόλια.

Στο 3ο Κεφάλαιο κρίθηκε σκόπιμο να δοθούν ορισμένα βασικά στοιχεία σχετικά με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων, καθώς και τα βασικά βήματα που ακολουθεί προκειμένου να αναλύσει και να μοντελοποιήσει μηχανικά προβλήματα, τα οποία δεν είναι εύκολα ή / και καθόλου επιλύσιμα με τις κλασικές αναλυτικές μηχανικές μεθόδους. Επίσης, δίνεται με την βοήθεια φωτογραφιών η κατασκευή της γεωμετρίας των μοντέλων. Στη συνέχεια αναλύονται οι παράμετροι της μοντελοποίησης, όπως είναι η ταχύτητα μοντελοποίησης, τα υλικά των δοκιμών, οι συνθήκες επαφής και άλλα στοιχεία. Οι παράμετροι αυτές εισήχθησαν στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ώστε να προκύψει λύση του προβλήματος της συνδιέλασης διμεταλλικών σωλήνων.

Στο 4ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για καθένα εκ των 12 δοκιμών. Τα αποτελέσματα αυτά ελήφθησαν με την βοήθεια του Post-Processor (ETA POST-GL) του LS-DYNA και αφορούν τις φάσεις της κατεργασίας, την παραμόρφωση του πλέγματος των υπό εξέταση δοκιμών – για καθένα σωλήνα ξεχωριστά, αλλά και συνολικά για το διμεταλλικό δοκίμιο – κατά την διάρκεια της διέλασης, το διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης, καθώς και την ανάλυση του τασικού πεδίου. Όλα τα αποτελέσματα συνοδεύονται από μετρήσεις, διαγράμματα και κατατοπιστικές εικόνες.

Στο 5ο Κεφάλαιο παρατίθενται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη μελέτη της πειραματικής και αριθμητικής προσομοίωσης της κατεργασίας διέλασης διμεταλλικών σωλήνων. Αφορούν μεν και την πειραματική διαδικασία, ωστόσο επικεντρώνονται στην αριθμητική προσομοίωση της κατεργασίας. Ακολουθούν μία σύντομη αναφορά σε αδυναμίες και πλεονεκτήματα της μεθόδου καθώς και προτάσεις για μελλοντικές επεκτάσεις.

Σε επόμενη ενότητα γίνεται αναφορά στις βιβλιογραφικές πηγές στις οποίες βασίστηκε η παρούσα διπλωματική εργασία.

Τέλος, στα Παραρτήματα καταγράφονται οι εντολές για την κατασκευή της γεωμετρίας των μοντέλων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων στον Προ-επεξεργαστή του LS-DYNA και παρουσιάζεται το αρχείο δεδομένων *.dyn το οποίο εισάγεται στον επιλυτή του προγράμματος.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Κεφάλαιο 1

Διέλαση Διμεταλλικών Σωλήνων - Θεωρητικό Μέρος

1.0 Εισαγωγή.....	2
1.1 Γενικά περί Διέλασης.....	2
1.1.1 Η Ροή του Μετάλλου στη Διέλαση	3
1.1.2 Φάσεις της Διέλασης	4
1.2 Γενικά Χαρακτηριστικά Διμεταλλικών Σωλήνων	5
1.2.1 Παραγωγή Διμεταλλικών Σωλήνων	6
1.2.2 Εφαρμογές Διμεταλλικών Σωλήνων.....	8
1.3 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	10
1.3.1 Διέλαση Μέσω Κωνικής Μήτρας – Διερεύνηση Συνθηκών Επαφής.....	10
1.3.2 Διέλαση Διμεταλλικών Σωλήνων με Πορώδες Εσωτερικό Στρώμα Μέσω Κωνικής Μήτρας	10
1.3.3 Διέλαση Πολυστρωματικών Σύνθετων Σωλήνων	11
1.3.4 Αστάθειες στα Διμεταλλικά Στρώματα	11
1.3.5 Επέκταση Υπαρχουσών Μεθόδων Ανάλυσης.....	12
1.3.6 Διέλαση Διμεταλλικών Μπιγетών	12
1.3.7 Αναλυτική Προσέγγιση Τασικού Πεδίου	13
1.3.8 Ανάλυση της Διέλασης Διμεταλλικών Σωλήνων με Αριθμητική Προσομοίωση	14
1.4 Ανάπτυξη Μαθηματικού Μοντέλου	15
1.4.1 Ανάλυση Κυλινδρικού Τμήματος του Δοκιμίου	16
1.4.2 Ανάλυση Τμήματος Δοκιμίου εντός Κωνικής Μήτρας	20

Κεφάλαιο 2

Διέλαση Διμεταλλικών Σωλήνων - Πειραματικό Μέρος

2.0 Εισαγωγή	28
2.1 Εργαλείο (Μήτρα – Έμβολο)	28
2.2 Υλικά Δοκιμίων	30
2.3 Πρέσσα	33
2.4 Παρουσίαση των Δοκιμίων και Αποτελέσματα	34
2.4.1 Δοκίμιο #1.....	34
2.4.2 Δοκίμιο #2.....	37
2.4.3 Δοκίμιο #3.....	39
2.4.4 Δοκίμιο #4.....	41
2.4.5 Δοκίμιο #5.....	43
2.4.6 Δοκίμιο #6.....	45
2.4.7 Δοκίμιο #7.....	47
2.4.8 Δοκίμιο #8.....	49
2.4.9 Δοκίμιο #9.....	51
2.4.10 Δοκίμιο #10	53
2.4.11 Δοκίμιο #11	55
2.4.12 Δοκίμιο #12	57

Κεφάλαιο 3

Δημιουργία Μοντέλων με Χρήση του LS-DYNA

3.0 Εισαγωγή	61
3.1 Βασικά Στοιχεία της Μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων	61
3.2 Στάδια Επίλυσης Προβλήματος με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων	62
3.3 Πρόγραμμα Πεπερασμένων Στοιχείων LS-DYNA	64
3.4 Παρουσίαση των Μοντέλων	66
3.4.1 Μοντελοποίηση Εμβόλου	66
3.4.2 Μοντελοποίηση Μήτρας	68
3.4.3 Μοντελοποίηση Δοκιμίων	70
3.5 Επιλογή Συστήματος Μονάδων	74
3.6 Επιλογή Ιδιοτήτων Υλικών των Δοκιμίων & του Εργαλείου	74
3.7 Επιλογή Συνθηκών Τριβής	77
3.8 Επιλογή Τύπου Επαφής των Στρωμάτων του Διμεταλλικού Σωλήνα	79
3.9 Επιλογή Ταχύτητας Μοντελοποίησης	80

Κεφάλαιο 4

Διέλαση Διμεταλλικών Σωλήνων –

Αποτελέσματα Αριθμητικής Προσομοίωσης

4.0 Εισαγωγή	82
4.1 Αποτελέσματα Προσομοίωσης - Δοκίμιο #1	82
4.2 Αποτελέσματα Προσομοίωσης - Δοκίμιο #2	92
4.3 Αποτελέσματα Προσομοίωσης - Δοκίμιο #3	101
4.4 Αποτελέσματα Προσομοίωσης - Δοκίμιο #4	110
4.5 Αποτελέσματα Προσομοίωσης - Δοκίμιο #5	119
4.6 Αποτελέσματα Προσομοίωσης - Δοκίμιο #6	128
4.7 Αποτελέσματα Προσομοίωσης - Δοκίμιο #7	136
4.8 Αποτελέσματα Προσομοίωσης - Δοκίμιο #8	144
4.9 Αποτελέσματα Προσομοίωσης - Δοκίμιο #9	153
4.10 Αποτελέσματα Προσομοίωσης - Δοκίμιο #10	162
4.11 Αποτελέσματα Προσομοίωσης - Δοκίμιο #11	171
4.12 Αποτελέσματα Προσομοίωσης - Δοκίμιο #12	180

Κεφάλαιο 5

Συζήτηση και Συμπεράσματα

5.0 Εισαγωγή	191
5.1 Γενικά Σχόλια	191
5.2 Επικύρωση Αποτελεσμάτων Προσομοίωσης	194
5.3 Πιθανές Επεκτάσεις	195

Βιβλιογραφία

.....196

Παράρτημα 1

Πίνακας Ιδιοτήτων AI 6063 F25

Παράρτημα 2

Εντολές Κώδικα LS-DYNA

Παράρτημα 3

*Αρχείο *.dyn Δεδομένων Εισαγωγής στον Επιλυτή*

Κεφάλαιο 1

Διέλαση Διμεταλλικών Σωλήνων

Θεωρητικό Μέρος

1.0 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο δίνονται αρχικά ο ορισμός της διέλασης καθώς και τα γενικά χαρακτηριστικά της. Κατόπιν επιχειρείται η ταξινόμηση των μεθόδων διέλασης σε 4 κατηγορίες. Ακολουθεί σύντομη αναφορά στη ροή του υλικού κατά τη διέλαση και στις 4 διακριτές φάσεις της άμεσης διέλασης. Στη συνέχεια εξετάζονται γενικά τα χαρακτηριστικά των διμεταλλικών σωλήνων και ορισμένα βασικά στάδια παραγωγής τους. Ακολουθεί ειδική μνεία στις εφαρμογές των διμεταλλικών σωλήνων. Σε επόμενη ενότητα γίνεται αναφορά στην ήδη υπάρχουσα βιβλιογραφία επί του θέματος της διέλασης διμεταλλικών σωλήνων. Πιο συγκεκριμένα, ανάμεσα στα αμέτρητα επιστημονικά άρθρα, γίνεται ειδική μνεία σε ορισμένες δημοσιευμένες εργασίες που θεωρήθηκε ότι παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Παρουσιάζονται μία σύντομη περίληψη της εκάστοτε δημοσίευσης καθώς και τα πολύτιμα συμπεράσματα στα οποία κατέληξαν οι ερευνητές. Στις περισσότερες των περιπτώσεων, τα συμπεράσματα αυτά αξιοποιήθηκαν για την εκπόνηση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας. Τέλος, παρατίθεται η μαθηματική ανάλυση της διέλασης διμεταλλικών σωλήνων και δίνονται οι εξισώσεις που προκύπτουν και περιγράφουν επαρκώς το μοντέλο.

1.1 Γενικά περί Διέλασης

Κατά τη διέλαση (extrusion) το τεμάχιο συμπιέζεται μέσω ενός εμβόλου μέσα σε μεταλλικό θάλαμο, στο άλλο άκρο του οποίου ευρίσκεται κατάλληλα διαμορφωμένη μήτρα, και αναγκάζεται να εξέλθει από το άνοιγμα της μήτρας αποδίδοντας προϊόν με μικρότερη διατομή και μεγαλύτερο μήκος, [10], βλ. Σχ. 1.1.

Κατά συνέπεια, το εργαλείο διέλασης περιλαμβάνει:

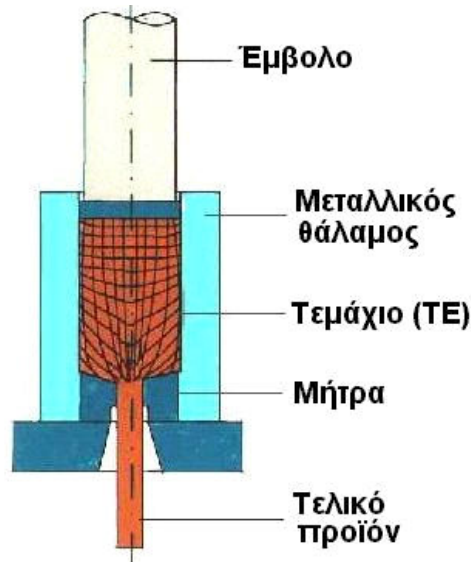
- το μεταλλικό θάλαμο,
- τη μήτρα,
- το έμβολο και
- το συμπληρωματικό εξοπλισμό (δακτυλίους συγκράτησης κλπ.).

Είναι δυνατόν η διέλαση να πραγματοποιείται εν ψυχρώ (ψυχρή διέλαση) ή εν θερμώ (θερμή διέλαση).

Η χρησιμοποιούμενη εργαλειομηχανή (EM) για την εκτέλεση της διέλασης είναι πρέσα, συνήθως υδραυλική και οριζόντια για τη θερμή διέλαση και κατακόρυφη για την ψυχρή διέλαση. Οι μέθοδοι διέλασης ταξινομούνται σε 4 κατηγορίες, [13]:

i. Άμεση διέλαση (Direct extrusion)

- Είναι η κλασική περίπτωση διέλασης.
- Η ροή του υλικού έχει την κατεύθυνση της κίνησης του εμβόλου.
- Το τεμάχιο «γλιστρά» στα τοιχώματα του μεταλλικού θαλάμου κατά τη διάρκεια της κατεργασίας, αναπτύσσοντας ισχυρές δυνάμεις τριβής.



Σχήμα 1.1: Σχηματική αναπαράσταση της άμεσης διέλασης

ii. Έμμεση διέλαση (Indirect extrusion)

Στο μέτωπο του εμβόλου έχει ενσωματωθεί η μήτρα.

iii. Υδροστατική διέλαση (Hydrostatic extrusion)

Ο μεταλλικός θάλαμος πληρούται με υγρό, το οποίο συμπιέζεται από το έμβολο. Η αναπτυσσόμενη υδραυλική πίεση μεταφέρεται ομοιόμορφα στη μπιγέτα, η οποία και διελάσσεται.

iv. Κρουστική διέλαση (Impact extrusion)

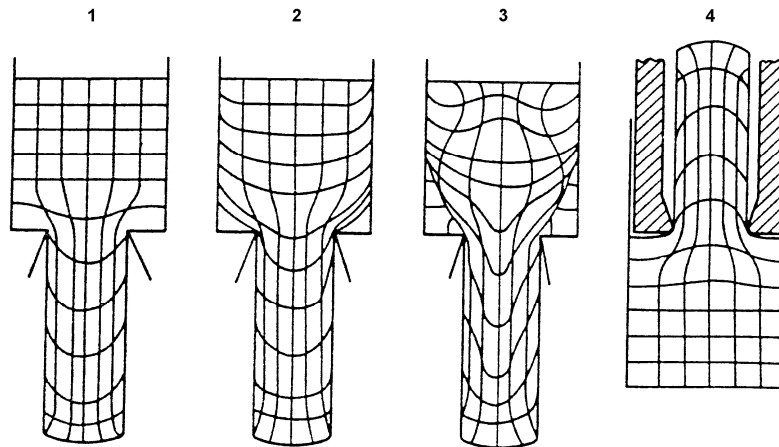
Πρόκειται για μια μορφή έμμεσης διέλασης και εκτελείται με μεγάλη ταχύτητα εμβόλου.

Στην πειραματική διαδικασία, η οποία περιγράφεται στο επόμενο κεφάλαιο, οι δοκιμές εκτελέστηκαν εν ψυχρώ και με την άμεση μέθοδο διέλασης.

1.1.1 Η Ροή του Μετάλλου στη Διέλαση

Στο σχήμα 1.2 παρουσιάζονται χαρακτηριστικές περιπτώσεις της ροής του υλικού κατά τη διέλαση.

Όπως παρατηρείται με τη χρήση πλεγμάτων σε διαίρετες μπιγέτες, χαρακτηριστική είναι η ανάπτυξη νεκρών ζωνών στην έξοδο, η εμφάνιση των οποίων ευνοείται από τις μεγάλες τριβές.

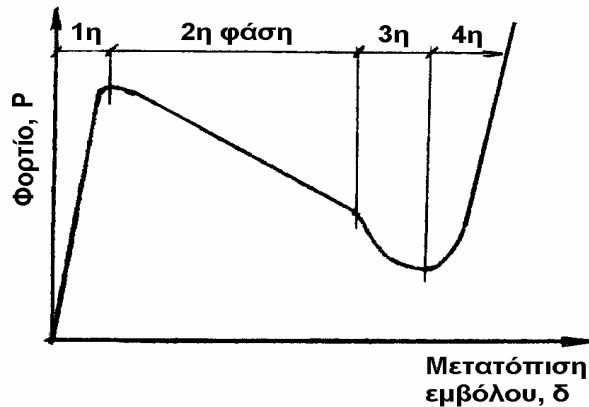


Σχήμα 1.2: Ροή του υλικού κατά τη διέλαση.

- 1: Χαμηλή τριβή/πολύ καλή λίπανση στα τοιχώματα του θαλάμου,
- 2: Μεγαλύτερη τριβή/ανάπτυξη «νεκρής ζώνης» μετάλλου (DMZ) στην έξοδο της μήτρας,
- 3: Εντόνως μεγάλη τριβή/ανομοιογενής ροή μετάλλου,
- 4: Ροή υλικού στην έμμεση διέλαση (χαμηλή τριβή).

1.1.2 Φάσεις της Διέλασης

Διακρίνουμε τις ακόλουθες φάσεις μιας άμεσης διέλασης μαζί με την επίδραση καθεμιάς στη διαμόρφωση του φορτίου κατεργασίας (Σχ. 1.3):



Σχήμα 1.3: Διάγραμμα φάσεων της διέλασης

Φάση 1: Αρχική ή μεταβατική φάση

- Βαθμιαία πλήρωση του μεταλλικού θαλάμου με το κατεργαζόμενο υλικό ΤΕ.
- Απότομη αύξηση του φορτίου μέχρι μια μέγιστη τιμή, που αντιστοιχεί στην έναρξη εμφάνισης του πρώτου τμήματος προϊόντος στην έξοδο της μήτρας.

Φάση 2: Ευσταθής φάση

- Ομαλή διεξαγωγή της διέλασης με σταθερό ρυθμό.
- Ανάπτυξη νεκρής ζώνης (ακίνητο υλικό) στην έξοδο της μήτρας.
- Μείωση του μήκους της μπιγέτας μέσα στο θάλαμο με συνέπεια τη μείωση της αντίστασης τριβών.

Φάση 3: Φάση αστάθειας

- Όταν το μήκος της μπιγέτας μέσα στο μεταλλικό θάλαμο γίνει πολύ μικρό (το έμβολο πλησιάζει τη νεκρή ζώνη), παρατηρείται τριγμός στο εργαλείο διέλασης και θόρυβος.
- Το φαινόμενο συνοδεύεται με απότομη μείωση του φορτίου μέχρι μια ελάχιστη τιμή.

Φάση 4: Ανάπτυξη ελαττώματος

- Κατά τη φάση αυτή σημειώνεται απότομη αύξηση του φορτίου κατεργασίας και συνιστάται η διακοπή της κατεργασίας.

1.2 Γενικά Χαρακτηριστικά Διμεταλλικών Σωλήνων

Οι διμεταλλικοί σωλήνες αποτελούνται από δύο διαφορετικά μέταλλα ή κράματα συνδεδεμένα μεταξύ τους μέσω συγκόλλησης ή με σφικτή συναρμογή. Οι διμεταλλικοί σωλήνες προτιμώνται έναντι των μονομεταλλικών σε κατασκευές ιδιαίτερων απαιτήσεων, όπως θα φανεί παρακάτω, παρά το αυξημένο κόστος παραγωγής τους.



Σχήμα 1.4: Διμεταλλικός Σωλήνας Αλουμινίου με Επικάλυψη Χαλκού

Οι σωλήνες αυτού του είδους χρησιμοποιούνται ευρέως στις βιομηχανικές εφαρμογές εξαιτίας της ποικιλίας των ιδιοτήτων που παρουσιάζουν.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η κατεργασία της διέλασης διμεταλλικών σωλήνων, καθώς υπάρχει αυξημένη ανάγκη για σωλήνες διατομής διαφορετικής από τις τυποποιημένες καθώς επίσης και για συνδυασμούς μετάλλων που δεν απαντώνται συχνά στο εμπόριο.

Κατά τη διάρκεια της διέλασης των σύνθετων ράβδων η διαφορά που παρουσιάζεται ανάμεσα στις τάσεις ροής των μετάλλων προκαλεί μερικές φορές την αύξηση της μεταβλητότητας του λόγου των επιφανειών διατομής των προϊόντων, ο οποίος μπορεί να διαφέρει σε πολύ μεγάλο βαθμό από τον αρχικό λόγο, πριν από την πραγματοποίηση της κατεργασίας. Ακόμα ο μηχανισμός πλαστικής παραμόρφωσης στο εσωτερικό της μήτρας, κατά τη διάρκεια της διέλασης των σύνθετων ράβδων, είναι περισσότερο πολύπλοκος από τον αντίστοιχο μηχανισμό της διέλασης απλών μετάλλων.

Τα πλεονεκτήματα των διμεταλλικών σωλήνων έναντι των μονομεταλλικών συνοψίζονται στα ακόλουθα:

- Ελαχιστοποίηση θερμικής διαστολής
- Συνολική μείωση των τάσεων στην κατασκευή
- Υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα (με συνέπεια την μειωμένη θερμοκρασία λειτουργίας του μετάλλου και άρα την μειωμένη διάβρωση)
- Λιγότερο συχνή συντήρηση και αυξημένη διάρκεια ζωής
- Αυξημένη αντοχή σε κόπωση

- Μειωμένο βάρος των κατασκευών σε σχέση με τις αντίστοιχες αποτελούμενες από συμβατικούς σωλήνες
- Περιορισμός της σπατάλης των ακριβών μετάλλων και κραμάτων
- Δυνατότητα συνεχούς παραγωγής
- Υψηλή αντοχή σε διάβρωση, οξείδωση ή φθορά, κατόπιν κατάλληλου συνδυασμού.
- Διμεταλλικοί σωλήνες με διατομή διαφόρων (και μη τυποποιημένων ενδεχομένως) μεγεθών και σχημάτων.

1.2.1 Παραγωγή Διμεταλλικών Σωλήνων

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, [26], η τυπική μέθοδος παραγωγής διμεταλλικών σωλήνων αποτελείται από τα ακόλουθα στάδια:

1. Παραγωγή των μονομεταλλικών σωλήνων που πρόκειται να συγκολληθούν
2. Χημική προετοιμασία των εφαπτόμενων επιφανειών
3. Συγκόλληση των σωλήνων με προϊόν τον διμεταλλικό σωλήνα
4. Θερμή διέλαση
5. Χημική επεξεργασία των σωλήνων
6. Επιθεώρηση με υπερήχους
7. Ψυχρή κατεργασία
8. Αποπεράτωση

Πιο αναλυτικά, τα ανωτέρω στάδια περιλαμβάνουν:

1. *Παραγωγή των μονομεταλλικών σωλήνων που πρόκειται να συγκολληθούν*

Η σωληνοποίηση επιτυγχάνεται σε κωνικές μήτρες, κατασκευασμένες από χάλυβα, καρβίδια ή συνθετικό διαμάντι. Το κατάλληλο λιπαντικό είναι απολύτως αναγκαίο κατά την σωληνοποίηση, ανεξαρτήτως εάν πρόκειται για ξηρά ή υγρή διαδικασία.

2. *Χημική προετοιμασία των εφαπτόμενων επιφανειών*

Περιλαμβάνει απογράσσωμα των σωλήνων και εμβάπτιση σε λουτρό βιομηχανικού καθαρισμού. Μετά την χημική προετοιμασία, οι σωλήνες τοποθετούνται ανά ζεύγη. Για να αποφευχθεί η εισχώρηση του αέρα στις συνδέσεις, πιέζονται από κοινού με κοινή φλάντζα σε κατακόρυφη συνήθως υδραυλική πρέσσα. Πριν την διαστολή, λιπαίνεται η εξωτερική επιφάνεια του βύσματος της μήτρας και η εργαζόμενη επιφάνεια του εσωτερικού σωλήνα.

3. *Συγκόλληση των σωλήνων με τελικό προϊόν τον διμεταλλικό σωλήνα [14]*

Οι δύο σωλήνες συνδέονται με τη μέθοδο της συγκόλλησης με πίεση ή με τριβή. Η τελευταία μέθοδος περιλαμβάνει τα ακόλουθα:

Η συγκόλληση με τριβή είναι διαδικασία σύνδεσης μετάλλων, στην οποία οι επιφάνειες των συνδεόμενων εξαρτημάτων θερμαίνονται ώστε να δημιουργηθούν οι συνθήκες που ευνοούν τη συγκόλληση.

Η σχετική μετατόπιση των επιφανειών (δημιουργώντας τις συνθήκες τριβής) πραγματοποιείται με:

- Την περιστροφική κίνηση: η συνδεόμενη επιφάνεια του ενός εξαρτήματος περιστρέφεται αξονικά προς την άλλη συνδεόμενη επιφάνεια.
- Τη γωνιακή ταλάντωση: η συνδεόμενη επιφάνεια του ενός εξαρτήματος μετακινείται με γωνιακή ταλάντωση ως προς την συνδεόμενη επιφάνεια του άλλου εξαρτήματος γύρω από κοινό άξονα.
- Τη γραμμική ταλάντωση: η συνδεόμενη επιφάνεια του ενός εξαρτήματος μετακινείται με γραμμική κίνηση ταλάντωσης ως προς τη συνδεόμενη επιφάνεια του άλλου εξαρτήματος.

Οι ωφέλιμες οικονομο-τεχνικές παράμετροι της συγκόλλησης με τριβή είναι οι ακόλουθες:

- Μεγάλη απόδοση
- Μικρή απαιτούμενη ισχύς
- Μικρή κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας
- Μεγάλη σταθερότητα της διαδικασίας
- Πολύ καλές ιδιότητες των συνδέσεων
- Ασφαλείς και υγιεινές συνθήκες εργασίας

4. **Θερμή (συνήθως) διέλαση**

Οι μεγάλες θερμοκρασίες κατεργασίας μειώνουν την τάση ροής ή την αντίσταση σε παραμόρφωση του υλικού ΤΕ. Η θερμοκρασία κατεργασίας πρέπει να είναι η ελάχιστη δυνατή, η οποία θα εξασφαλίζει επαρκή πλαστικότητα στο υλικό ΤΕ και δεν θα προκαλεί θερμική συστολή.

5. **Χημική επεξεργασία των σωλήνων**

Οι σωλήνες εμβαπτίζονται σε λουτρό υδατικού διαλύματος θειικού οξέος περιεκτικότητας 15-20% και ακολούθως καθαρίζονται σε υδατικό διάλυμα υδροχλωρικού οξέος περιεκτικότητας 10-12%.

6. **Επιθεώρηση με υπερήχους**

Ακολουθεί η επιθεώρηση με υπερήχους, ώστε να επιβεβαιωθεί η σταθερότητα της κατεργασίας θερμής διέλασης και η άριστη συγκόλληση των δυο επιφανειών. Αυτό καταδεικνύεται από το γεγονός ότι δεν παρατηρείται διαχωρισμός μεταξύ των δύο μεταλλικών στρωμάτων.

7. **Ψυχρή κατεργασία**

Η ψυχρή κατεργασία έχει ως στόχο την επίτευξη των επιθυμητών διαστάσεων του τελικού τεμαχίου.

8. **Κατεργασία αποπεράτωσης**

Για την επίτευξη υψηλής διαστατικής ακρίβειας, απαιτείται κατεργασία αποπεράτωσης, συνήθως τόννευση, κατά την οποία επιτυγχάνεται μικρή μόνο μείωση διαμέτρου.

Ωστόσο, η μόνιμη σύνδεση των 2 σωλήνων μπορεί να επιτευχθεί και με τη μέθοδο της εκρηκτικής συγκόλλησης, [5].

Είναι σαφές ότι για την παραγωγή αποδεκτών τελικών προϊόντων, πρέπει να πληρούνται κάποιες προϋποθέσεις κατά την εκτέλεση των παραπάνω εργασιών, καθώς επίσης το τελικό προϊόν να ανταποκρίνεται σε κάποια κριτήρια. Οι προϋποθέσεις αυτές συνοψίζονται στα ακόλουθα, [20]:

- Ισχυρή σύνδεση μεταξύ του βασικού και του επικαλύπτοντος μετάλλου. Η σύνδεση αυτή δεν θα πρέπει να σπάει κατά τις διάφορες τεχνολογικές δοκιμές.
- Απουσία ψαθυρών στρωμάτων στην μεταλλική διεπιφάνεια
- Σταθερότητα στις φυσικές, χημικές και μηχανικές ιδιότητες του διμεταλλικού προϊόντος
- Στρώματα εντός των δοθέντων διαστασιολογικών ανοχών
- Υψηλή ποιότητα επιφανείας, η οποία θα ανταποκρίνεται στα πρότυπα και τις εκάστοτε τεχνικές προδιαγραφές.
- Συνήθως υψηλή διαστασιολογική ακρίβεια
- Είναι δε κεφαλαιώδους σημασίας και βασική προϋπόθεση για την παραγωγή τελικού προϊόντος υψηλής ποιότητας οι δύο επιφάνειες που πρόκειται να έρθουν σε επαφή να έχουν προηγουμένως υποστεί χημική προετοιμασία και σχολαστικό καθαρισμό.

1.2.2 Εφαρμογές Διμεταλλικών Σωλήνων

Οι διμεταλλικοί σωλήνες είναι ιδιαίτερα χρήσιμοι σε εφαρμογές όπου οι συνθήκες εντός του σωλήνα και εκτός αυτού είναι διαφορετικές και απαιτούν χαρακτηριστικά και ιδιότητες που δεν επιτυγχάνονται με την χρήση ενός μόνο υλικού, [29]. Εφαρμογές όπου το διαβρωτικό περιβάλλον περιορίζεται στην μία επιφάνεια του σωλήνα απαιτούν περισσότερα του ενός μέταλλα ή κράματα. Επιλέγοντας τα κατάλληλα μέταλλα ή κράματα, βελτιστοποιείται η συνολική αντοχή σε διάβρωση καθώς επίσης και οι επιθυμητές μηχανικές ιδιότητες.

Προς το παρόν, η μέθοδος της διέλασης είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική για σωλήνες μικρών διαμέτρων, που λειτουργούν σε χαμηλές θερμοκρασίες, ώστε να γίνεται πλήρης εκμετάλλευση των πλεονεκτημάτων τους [19].

Στο παρελθόν, η διάβρωση είχε αρνητική επίδραση όχι μόνο στην λειτουργία της εκάστοτε εγκατάστασης, αλλά επίσης αποτελούσε τροχοπέδη για την ανάπτυξη και βελτίωση της ίδιας της παραγωγικής διαδικασίας. Ωστόσο, η χρήση διμεταλλικών σωλήνων έδωσε λύση στο πρόβλημα. Παρά το γεγονός ότι οι διμεταλλικοί σωλήνες παρουσιάζουν αυξημένο κόστος λόγω της περίπλοκης κατασκευής τους σε σχέση με τους αντίστοιχους μονομεταλλικούς, οι μοναδικές και εξειδικευμένες ιδιότητες τους αντισταθμίζουν το κόστος, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις όπου ενδιαφέρει η συνολική υψηλή ποιότητα του έργου.

Επίσης, ο κατάλληλος συνδυασμός διαφορετικών μετάλλων μπορεί να οδηγήσει σε αξιοσημείωτη βελτίωση συγκριτικά με την χρήση μονομεταλλικού εξαρτήματος, το οποίο θα μπορούσε να είναι είτε ακατάλληλο είτε εξαιρετικά υψηλού κόστους.

Είναι φανερό πως είναι δύσκολο για μεμονωμένα ομογενή μέταλλα να ικανοποιήσουν απαιτήσεις αυξημένης αντοχής και αξιοπιστίας. Οπότε κρίνεται απαραίτητο να συνδυαστούν ή να συνδεθούν διαφορετικά υλικά ώστε να εκπληρωθούν οι επιθυμητές απαιτήσεις για διαφορετικές ιδιότητες.

Παραδείγματα εφαρμογών

Εξαιτίας των απαιτήσεων για επαναλαμβανόμενη και μακρά λειτουργία σε καυστήρες υψηλών θερμοκρασιών, όπως αυτοί των κινητήρων διαστημικών σκαφών, [7], τα υλικά των καυστήρων θα πρέπει να έχουν καλή κατεργασιμότητα, υψηλή θερμική αντοχή και υψηλή αντοχή σε

θερμική κόπωση. Οι διμεταλλικοί σωλήνες, με συνδυασμό των κατάλληλων μετάλλων, μπορούν να επιτύχουν αυτά τα χαρακτηριστικά.

Οι διμεταλλικοί σωλήνες βρίσκουν εξαιρετική εφαρμογή στην ηλεκτρική, χημική και πυρηνική βιομηχανία, όπου οι ιδιαίτερες συνθήκες απαιτούν διαφορετικές ιδιότητες στην εξωτερική και στην εσωτερική επιφάνεια ενός σωλήνα. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει εξαρτήματα που εμφανίζουν τόσο υψηλή αντοχή όσο και αυξημένη ηλεκτρική αγωγιμότητα.

Μια ενδιαφέρουσα ακόμα εφαρμογή είναι στην μεταφορά πετρελαίου από πετρελαιοπηγές. Στην συγκεκριμένη εφαρμογή, όπως και σε πολλές άλλες, απαιτείται υψηλή αντοχή σε διάβρωση, όπως επίσης και υψηλή μηχανική αντοχή. Υπό αυτές τις συνθήκες, ο συνδυασμός 2 μετάλλων αποδεικνύεται πιο συμφέρων οικονομικά, σε σχέση με ένα μεταλλικό σωλήνα κατασκευασμένο από κράμα ανθεκτικό σε διάβρωση.

Η γρήγορη και δυναμική ανάπτυξη σε βιομηχανικούς κλάδους, όπως αυτοί των ηλεκτρονικών και των τηλεπικοινωνιών, [6], απαιτεί έναν μεγάλο όγκο διμεταλλικών προϊόντων, ιδίως σε σύρματα και καλώδια ή σε αγωγούς εξαιρετικά μικρής διατομής.

Οι **εφαρμογές** που βρίσκουν γενικά σε διάφορες κατασκευές και εγκαταστάσεις οι διμεταλλικοί σωλήνες είναι, [22], [28] :

- Σωλήνες λεβήτων βιομάζας
- Λέβητες αστικών αποβλήτων (οι σωλήνες των υπερθερμαντών και των εξατμιστών στους λέβητες αποτέφρωσης απορριμάτων εκτίθενται σε ισχυρά διαβρωτικά περιβάλλοντα)
- Σωληνογραμμές σε εγκαταστάσεις διυλιστηρίων, επεξεργασίας καυσίμων αερίων, παραγωγής λιπασμάτων και χημικών.
- Αγωγοί και σωληνώσεις σε χημικές και πετροχημικές βιομηχανίες, ιδίως για την διαδικασία διάσπασης του αιθυλενίου.
- Ναυπηγική
- Φίλτρα
- Στοιχεία μετάδοσης θερμότητας
- Εφαρμογές φαρμακοβιομηχανιών
- Εφαρμογές βιομηχανιών τροφίμων
- Ατμολέβητες
- Εναλλάκτες θερμότητας
- Μεταφορά ρευστών με διαφορετικά διαβρωτικά χαρακτηριστικά
- Εφαρμογές υψηλής πίεσης σε προηγμένα ενεργειακά συστήματα και συστήματα ανάκτησης ενέργειας (συστήματα υψηλής θερμοκρασίας).

1.3 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Στη συγκεκριμένη ενότητα παρουσιάζονται, με τη μορφή σύντομων περιλήψεων, ορισμένες μελέτες και ερευνητικές εργασίες που παρουσιάστηκαν κατά καιρούς και σχετίζονται άμεσα με το θέμα της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας.

1.3.1 Διέλαση Μέσω Κωνικής Μήτρας – Διερεύνηση Συνθηκών Επαφής

Οι **A.G.Mamalis, G.L.Petrosyan, D.E.Manolakos, M.B.Safaryan & H.G.Petrosyan**, σε δημοσιευμένη εργασία τους [1] ασχολήθηκαν με τη διερεύνηση των ιδιαιτεροτήτων της κατεργασίας διέλασης διμεταλλικών κυλινδρικών σωλήνων μέσω κωνικής μήτρας υπό διαφορετικές συνθήκες επαφής μεταξύ των 2 στρωμάτων και μετέπειτα κατεργασία των διμεταλλικών σωλήνων με υψηλές δυνατότητες βιομηχανικής εκμετάλλευσης. Σοβαρές παράμετροι που διέπουν τα εν λόγω φαινόμενα, όπως ο ρόλος των λιπαντικών, η επίδραση της τριβής, το ποσό της παραμόρφωσης των υλικών των στρωμάτων κλπ ελήφθησαν υπόψη από τεχνολογικής άποψης. Κατασκευάστηκε ένα εργαλείο, αποτελούμενο από έναν συνδυασμό κωνικής μήτρας και βύσματος (mandrel), προκειμένου να γίνει η κατεργασία υδροστατικής διαμόρφωσης.

Μαλακά υλικά, όπως μόλυβδος, αλουμίνιο και χαλκός, χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των διμεταλλικών σωλήνων, ενώ διμεταλλικοί σωλήνες με διαφορετική χάρη μεταξύ των 2 στρωμάτων ελέγχθηκαν προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση της τριβής στην περίπτωση της σχετικής κίνησης των 2 κυλίνδρων κατά την αξονική διεύθυνση καθ'όλη την διάρκεια της κατεργασίας.

Επίσης, οι **A.G.Mamalis, G.L.Petrosyan, D.E.Manolakos, M.B.Safaryan & H.G.Petrosyan** σε άλλη δημοσιευμένη εργασία τους [2], κατέληξαν στο ότι, κατά την διερεύνηση των παραμέτρων κατεργασίας διμεταλλικών σωλήνων υπό διαφορετικές συνθήκες επαφής μεταξύ των 2 στρωμάτων, δύο είναι οι δυνατές περιπτώσεις επαφής:

- α) Τα 2 στρώματα των σωλήνων ολισθαίνουν το ένα σε σχέση με το άλλο κατά την αξονική διεύθυνση του κυλίνδρου καθ'όλη τη διάρκεια της διέλασης. Υπάρχει μεταξύ τους τριβή με διαφορετικούς συντελεστές και οι αξονικές παραμορφώσεις διαφέρουν μεταξύ των 2 κυλίνδρων.
- β) Δεν υπάρχει ολίσθηση μεταξύ των κυλίνδρων του διμεταλλικού σωλήνα, οπότε τα 2 μεταλλικά στρώματα παραμορφώνονται σαν ενιαίο σώμα και προφανώς οι παραμορφώσεις τους είναι ίσες.

1.3.2 Διέλαση Διμεταλλικών Σωλήνων με Πορώδες Εσωτερικό Στρώμα Μέσω Κωνικής Μήτρας

Οι **A.G.Mamalis, G.L.Petrosyan, D.E.Manolakos & A.F. Hambardzumyan** σε επιστημονικό άρθρο τους [4] προχώρησαν σε μαθηματική ανάλυση της διέλασης διμεταλλικών σωλήνων, κατασκευασμένων από μεταλλικά (εξωτερικό στρώμα) και πορώδη (εσωτερικό στρώμα) υλικά. Χρησιμοποιήθηκε η Θεωρία Πλαστικότητας για Πορώδη Υλικά (Plasticity Theory of Real Porous

Materials, PTRPM) για την εξαγωγή διαφορικών εξισώσεων που διέπουν το φαινόμενο. Ακολούθως συντάχθηκε ένας αλγόριθμος ολοκλήρωσης του συστήματος των διαφορικών εξισώσεων. Το δημιουργηθέν μοντέλο επιτρέπει την επισκόπηση της επίδρασης του αρχικού πορώδους, της εφαρμοζόμενης φόρτισης, την κατανομή της παραμόρφωσης, την σκλήρυνση του υλικού καθώς και άλλων τεχνολογικών παραμέτρων της εντατικής κατάστασης της κατεργασίας. Το συμπέρασμα που προέκυψε από την ανωτέρω ανάλυση περιγράφει επαρκώς την έντονη παραμόρφωση κατά την διέλαση διμεταλλικών σωλήνων μέσω κωνικής μήτρας. Οι υπολογισμοί κατέδειξαν ότι το εξωτερικό μη-πορώδες στρώμα μετάλλου υπόκειται σε μεγαλύτερες τάσεις και παραμορφώσεις σε σχέση με το εσωτερικό πορώδες μεταλλικό στρώμα και δρα σαν ένα προστατευτικό στρώμα για το εσωτερικό. Επίσης, σε άλλη εργασία τους, [3], οι **A.G.Mamalis, G.L.Petrosyan, D.E.Manolakos & H.G.Petrosyan** μελέτησαν από μαθηματική άποψη τον ίδιο συνδυασμό υλικών, για το κυλινδρικό μέρος των δοκιμίων.

1.3.3 Διέλαση Πολυστρωματικών Σύνθετων Σωλήνων

Οι **Wenquan Zhang, Jianxin Xie & Congzeng Wang** σε σχετική εργασία τους [27] μελέτησαν την περίπτωση σύνθετων πολυστρωματικών σωλήνων από μέταλλα και κεραμικά με βάθμωση μικροδομής κατά την αξονική διεύθυνση, οι οποίοι κατασκευάστηκαν μέσω διέλασης και συμπίεσης. Όπως αναφέρεται, δεν εντοπίστηκαν μακροσκοπικές ατέλειες στην όψη των διηλασμένων πολυστρωματικών σωλήνων και δεν παρατηρήθηκαν ευδιάκριτες ατέλειες σε όλα τα είδη των στρωμάτων όπως επίσης και στα όρια αυτών. Μετά την συμπίεση, κάποια όρια μεταξύ παρακείμενων στρωμάτων ήταν μακροσκοπικά ευδιάκριτα και δεν παρουσιάστηκε δυσκολία στο να διακρίνει κανείς μικροσκοπικά τα συνορεύοντα στρώματα. Καταλήγοντας, οι πολυστρωματικοί σύνθετοι σωλήνες με βαθμωτή μεταβολή μικροδομής αποδείχτηκε ότι κατέχουν ικανοποιητικό δεσμό στην διεπιφάνεια των στρωμάτων.

1.3.4 Αστάθειες στα Διμεταλλικά Στρώματα

Σε εκτεταμένη εργασία του, ο **J.L.Alcaraz, [16]**, μελέτησε τις αστάθειες που παρατηρούνται στα διμεταλλικά στρώματα. Η εν λόγω εργασία εκπονήθηκε προκειμένου να αναλυθεί η διακύμανση της πυκνότητας κατά την κατεργασία διέλασης διμεταλλικών σωλήνων. Για ένα ορθοτροπικό, βηματικά γραμμικό στερεό, η πιθανότητα ανομοιομόρφων λύσεων κοντά στην διμεταλλική διεπιφάνεια διερευνήθηκε θεωρώντας μια αρχική διαταραχή καθ'όλο το μήκος της διεπιφάνειας. Η εξίσωση διακλάδωσης (bifurcation equation) για το πρόβλημα επιλύθηκε αρχικά αριθμητικά ώστε να προκύψει μια τιμή κρίσιμης παραμόρφωσης αναφορικά με το αντίστροφο του αριθμού κυματώσεων.

Κατόπιν η εξίσωση διακλάδωσης επιλύθηκε για παραμορφώσεις άνω της κρίσιμης, ώστε να αναλυθεί η ανάπτυξη και διάδοση της διαταραχής, μέσω μιας παραμέτρου αστάθειας. Ο ερευνητής κατέληξε στο συμπέρασμα ότι αύξηση του λόγου των ορίων διαρροής μεταξύ των 2 υλικών που αποτελούν το διμεταλλικό στρώμα, οδηγεί σε εκκίνηση και εξέλιξη του φαινομένου της αστάθειας. Επίσης, όταν το σκληρότερο εκ των 2 υλικών τοποθετείται εσωτερικά του σωλήνα, και πάλι ευνοείται η ανάπτυξη του εν λόγω φαινομένου. Τέλος, ανάμεσα στα 3

μοντέλα τα οποία εξετάστηκαν (Voce, Prager, Hollomon), το μοντέλο Prager είναι αυτό το οποίο παρέχει τις χειρότερες συνθήκες και κατά συνέπεια ευνοείται ιδιαίτερα η εμφάνιση ασταθειών.

1.3.5 Επέκταση Υπαρχουσών Μεθόδων Ανάλυσης

Οι **N.R.Chitkara & A. Aleem** σε άρθρο τους [21] σχετικά με τις μεθόδους ανάλυσης της κατεργασίας διέλασης διμεταλλικών σωλήνων κατέληξαν στο ότι η γενικευμένη μέθοδος του «άνω οριακού φορτίου» (upper bound analysis) η οποία προηγούμενα είχε εφαρμοστεί για να προσδιοριστούν οι πιέσεις κατά την διέλαση-διάτρηση συμπαγών μπιγέτων ώστε να διαμορφωθούν κοίλοι μονομεταλλικοί σωλήνες, μπορεί να επεκταθεί για να αναλυθεί το πρόβλημα της διέλασης διμεταλλικών σωλήνων μέσω διαφόρων συνδυασμών μήτρας και βύσματος. Τα θεωρητικά αποτελέσματα των μέσων πιέσεων διέλασης τα οποία προέκυψαν από την γενικευμένη μέθοδο του άνω οριακού φορτίου συγκρίθηκαν με αυτά τα οποία προέκυψαν νωρίτερα από την ανάλυση με την μέθοδο λόφου-τριβής (slab method analysis) και με ορισμένα πειράματα.

Τα συμπεράσματα συνοψίζονται στα εξής:

- i) Οι εκτιμήσεις των πιέσεων κατά την διέλαση, βασισμένες στις δύο υπό συζήτηση μεθόδους ανάλυσης, δηλαδή στην γενικευμένη μέθοδο του άνω οριακού φορτίου και στην γενικευμένη μέθοδο ανάλυσης μέσω οδογράφων, οι οποίες υιοθετήθηκαν για την ανάλυση της διέλασης διμεταλλικών σωλήνων έδειξαν ότι κινούνται κοντά στις τιμές που προέκυψαν από την πειραματική διαδικασία. Αυτό αληθεύει υπό την προϋπόθεση ότι η ακτίνα της διεπιφάνειας μεταξύ του πυρήνα και του περιβλήματος στον σωλήνα που έχει υποστεί διέλαση είναι γνωστή εκ των προτέρων, εφόσον η ανάλυση δεν δύναται να προβλέψει την εν λόγω ακτίνα.
- ii) Από παρατηρήσεις στις παραμορφώσεις του πλέγματος γύρω από τις διεπιφάνειες μεταξύ του πυρήνα και του περιβλήματος καθώς επίσης και των παρακείμενων επιφανειών μήτρας-μετάλλου και βύσματος-μετάλλου, προέκυψε ότι ο συντελεστής τριβής στην διεπιφάνεια μεταξύ των παραμορφούμενων υλικών είναι σημαντικά μεγαλύτερος συγκριτικά με τον αντίστοιχο συντελεστή στην διεπιφάνεια μήτρας-μετάλλου και βύσματος-μετάλλου.

1.3.6 Διέλαση Διμεταλλικών Μπιγέτων

Οι **S.Berski, H.Dyja, A.Maranda, J.Nowaczewski & G. Banaszek** σε εργασία τους [24] ασχολήθηκαν με την ανάλυση ποιότητας της διμεταλλικής μπιγέτας, αφού είχε υποστεί κατεργασία διέλασης. Στο εν λόγω άρθρο παρουσιάστηκε επίσης η ανάλυση της κατεργασίας διέλασης διμεταλλικής κυλινδρικής μπιγέτας. Το δοκίμιο ήταν κατασκευασμένο από μπιγέτα αλουμινίου 1050A και σωλήνα χαλκού M1E. Σε αυτό το πείραμα τόσο ο χαλκός όσο και το αλουμίνιο είχαν παρόμοια χαρακτηριστικά ροής, κάτι το οποίο είναι ιδιαίτερα σημαντικό για διμεταλλικά δοκίμια που υφίστανται την κατεργασία της διέλασης.

Σύμφωνα με την μελέτη, η ανομοιογένεια στην ταχύτητα ροής του διμεταλλικού στρώματος μειώνεται κοντά στα τοιχώματα της μήτρας εξαιτίας των δυνάμεων τριβής που αναπτύσσονται, καθώς επίσης και εξαιτίας της αύξησης της αντίστασης ροής του εξωτερικού στρώματος. Κατά την διέλαση η τάση διαρροής είναι σημαντικός παράγοντας από οικονομική άποψη, καθώς εγγυάται την αποδοτικότητα και κερδοφορία της παραγωγής.

Επίσης, οι **A.K.Tayal & R.Natarajan** δημοσίευσαν εργασία [11], στην οποία έγινε ανάλυση της διέλασης πολυστρωματικών μπιγερών με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Η εν λόγω διαδικασία, σημειώνουν, είναι ανεξάρτητη του αριθμού των μεταλλικών στρωμάτων που απαρτίζουν το δοκίμιο καθώς επίσης και από την γεωμετρία της μήτρας. Ένα εξέχον χαρακτηριστικό της μεθόδου είναι η ικανότητα πρόβλεψης της γεωμετρίας της διεπιφάνειας μεταξύ των 2 υλικών, η οποία καθορίζεται από μια συνεχή ενημέρωση της θέσης της διεπιφάνειας. Διερευνήθηκε η επίδραση της σχετικής σκληρότητας μεταξύ των 2 στρωμάτων (πυρήνας και εξωτερική επένδυση) στην πίεση διέλασης, στην γεωμετρία της διεπιφάνειας, στην κατανομή του ρυθμού παραμόρφωσης και στην αξονική ταχύτητα.

Γενικά, οι μέθοδοι που εφαρμόζονται στην διέλαση μονομεταλλικών σωλήνων απαιτείται να τροποποιηθούν ή να επεκταθούν προκειμένου να μελετηθεί η παραμόρφωση σύνθετων πολυστρωματικών σωλήνων.

Η παρούσα μέθοδος αντιμετώπισε την ροή των μετάλλων όπως την ροή παχύρρευστων (υψηλού ιξώδους), μη -Νευτώνιων και ασυμπιεστων ρευστών. Η αντιμετώπιση αυτή, σε συνδυασμό με την ανάλυση με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων παρέχει μία ενοποιημένη προσέγγιση στα προβλήματα της πολυστρωματικής διέλασης.

Μολονότι για την ανάλυση έγινε η αρχική υπόθεση ότι δεν υπάρχουν συνθήκες τριβής, και τα 2 μέταλλα είναι συγκολλημένα, προέκυψαν κάποια χρήσιμα συμπεράσματα, τα οποία μπορούν να εφαρμοστούν και σε γενικότερα προβλήματα. Είναι βέβαια σαφές ότι η εισαγωγή συνθηκών τριβής και η υπόθεση σύνδεσης και όχι συγκόλλησης των 2 μεταλλικών στρωμάτων θα τροποποιήσει κατά πολύ τα αποτελέσματα. Επίσης η εισαγωγή συνθηκών τριβής θα επιφέρει αύξηση στο υπολογιστικό κόστος.

Η πίεση διέλασης πιθανόν να σχετίζεται με την ενεργή τάση διαρροής (effective yield stress) του σύνθετου υλικού και τον λόγο διέλασης κατά τρόπο αντίστοιχο με την πίεση διέλασης μονομεταλλικού υλικού.

Η προκύπτουσα κατανομή των τάσεων και των παραμορφώσεων κατά μήκος του άξονα του δοκιμίου και κοντά σε αυτόν υποδηλώνει ότι η ζώνη παραμόρφωσης εκτείνεται πέρα από την έξοδο της μήτρας στην περίπτωση που το υλικό της εξωτερικής επένδυσης είναι σκληρότερο από το υλικό του πυρήνα. Η καμπύλη ταχύτητας κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της μήτρας έδειξε ότι στην ανωτέρω περίπτωση συνδυασμού υλικών, η ανάπτυξη της ταχύτητας είναι γρηγορότερη απ' ότι στην αντίθετη περίπτωση (δηλαδή όταν το υλικό της εξωτερικής επένδυσης είναι πιο μαλακό από το υλικό του πυρήνα).

Γενικά μπορεί να ειπωθεί ότι η εν λόγω μέθοδος παρέχει περισσότερες πληροφορίες απ' ότι άλλες συμβατικές μέθοδοι.

1.3.7 Αναλυτική Προσέγγιση Τασικού Πεδίου

Με το εν λόγω θέμα ασχολήθηκαν οι **J.L.Alcaraz & J.M.Martinez-Esnaola** σε εκτεταμένη εργασία τους [18]. Από τη συγκεκριμένη μελέτη προέκυψε μία αναλυτική επίλυση για την διέλαση διμεταλλικών σωλήνων, θεωρώντας αξονοσυμμετρική ροή υλικού κατά την ακτινική διεύθυνση, μέσω κωνικής μήτρας. Διαφορετικές συνθήκες επαφών και διαφορετικοί συνδυασμοί μετάλλων μελετήθηκαν προκειμένου να προσδιοριστούν τα μεγέθη των τάσεων στις κρίσιμες ζώνες. Παρουσιάστηκαν επιλύσεις για τις δύο πιθανές θέσεις του σκληρότερου μετάλλου (εσωτερική και εξωτερική επένδυση). Η ανάλυση τονίζει ιδιαίτερα την επίδραση ορισμένων παραμέτρων κατά την κατεργασία της διέλασης, όπως είναι ο λόγος των τάσεων διαρροής

μεταξύ των 2 υλικών, η γωνία κωνικότητας της μήτρας και το ποσοστό όγκου του σκληρότερου υλικού.

Μολονότι η ανάλυση οδήγησε σε μια πρώτη προσέγγιση της διαδικασίας, κατέληξε σε ορισμένα ιδιαίτερος χρήσιμα συμπεράσματα:

- Η σύνδεση κατά μήκος της διεπιφάνειας δεν διαδραματίζει κάποιο ρόλο στην μέθοδο αυτή.
- Η ταχύτητα του εμβόλου που υπολογίστηκε με την εν λόγω μέθοδο παρέχει μία τιμή παρόμοια ή/και ίδιας τάξης μεγέθους με αυτή των Durban, Blazynski και Townley. Διαφέρει ωστόσο από αυτή της πειραματικής διαδικασίας γιατί δεν λαμβάνει υπόψη τις ασυνέχειες κατά την είσοδο και έξοδο/στάση καθώς επίσης και άλλες πιθανές παραμέτρους.
- Σε σύγκριση με τους υπολογισμούς με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (Alcaraz, 1993), υπό παρόμοιες συνθήκες, οι προκύπτουσες τιμές τάσης είναι της ίδιας τάξης μεγέθους. Οι μεγαλύτερες διαφορές εμφανίζονται στην κατανομή των διατμητικών τάσεων.
- Η ακτινική και η ορθή συνιστώσα της τάσης εμφανίζουν πολύ μικρή εξάρτηση από την γωνιακή συνιστώσα, κάτι το οποίο υποδηλώνει οριζοντιομοίμορφη ροή. Επιπλέον, η διατμητική συνιστώσα της τάσης δεν εξαρτάται από την ακτινική συνιστώσα.
- Όταν το σκληρότερο μέταλλο τοποθετείται εσωτερικά, τα γραφήματα της τάσης υποδεικνύουν ότι η ακτινική τάση είναι θετική και η διατμητική αρνητική για το σκληρότερο υλικό. Τα πρόσημα αλλάζουν για την αντίθετη τοποθέτηση. Οι ορθές τάσεις είναι αρνητικές σε όλες τις περιπτώσεις και παρουσιάζουν μία τάση μείωσης καθώς προσεγγίζεται η έξοδος της μήτρας.
- Από μία σύγκριση των μεγεθών των τάσεων στην διεπιφάνεια εξόδου της μήτρας προκύπτει ότι υψηλότερες τάσεις παρουσιάζονται όταν ο λόγος των ορίων διαρροής των 2 υλικών αυξάνεται, όπως επίσης και η γωνία κωνικότητας της μήτρας και όταν η αναλογία όγκου του σκληρότερου υλικού αυξάνεται στην εσωτερική πλευρά του διμεταλλικού σωλήνα. Ωστόσο, μικρότερες διατμητικές και ακτινικές τάσεις εμφανίζονται όταν το σκληρότερο υλικό είναι η εξωτερική επένδυση του διμεταλλικού σωλήνα.
- Οι τιμές των τάσεων στην διεπιφάνεια χρησιμοποιούνται επίσης για να προσδιοριστεί ένας παράγοντας ενδεικτικός της όλκιμης θραύσης του σωλήνα. Προέκυψε το συμπέρασμα ότι οι πιο σημαντικές παράμετροι φαίνεται να είναι ο λόγος των ορίων διαρροής των 2 υλικών και η τριβή (ιδιαίτερα μεταξύ διμεταλλικού σωλήνα και μήτρας). Οι υψηλότερες τιμές αυτού του παράγοντα λαμβάνονται όταν μειώνεται η πυκνότητα του σκληρότερου μεταλλικού στρώματος.

1.3.8 Ανάλυση της Διέλασης Διμεταλλικών Σωλήνων με Αριθμητική Προσομοίωση

Οι J.L. Alcaraz & J.Gil-Sevillano στην εργασία τους [17] παρουσίασαν μια αριθμητική ανάλυση της θερμής διέλασης διμεταλλικών σωλήνων, κατασκευασμένων από 2 προ-συνδεδεμένα υλικά με διαφορετικές ιδιότητες. Η ανάλυση έγινε για διαφορετικές γεωμετρίες και συνδυασμούς μετάλλων μέσω ενός κώδικα πεπερασμένων στοιχείων. Θεωρήθηκε αρχικά ελαστο-πλαστική συμπεριφορά που εξαρτάται από το ρυθμό παραμόρφωσης. (ελαστο-πλαστικό μοντέλο).

Αποτιμήθηκε η επίδραση διαφόρων παραμέτρων της διέλασης, όπως είναι ο λόγος των τάσεων διαρροής των 2 υλικών, η θέση (εξωτερική-εσωτερική) των 2 στρωμάτων και η σχετική τους πυκνότητα, καθώς επίσης και η γωνία κωνικότητας της μήτρας. Ο λόγος των τάσεων διαρροής των 2 υλικών αποδείχτηκε η πιο κρίσιμη παράμετρος της διαδικασίας για την παραγωγή αποδεκτών προϊόντων. Λόγοι που υπερβαίνουν το 3.5 δεν συστήνονται. Επιπλέον, οι διακυμάνσεις της πυκνότητας του υλικού μεγαλύτερης σκληρότητας στο τελικό προϊόν

αναλύθηκαν για αρκετούς συνδυασμούς μετάλλων. Αυτές οι διακυμάνσεις πιθανόν να οδηγήσουν σε μη αποδεκτές τελικές γεωμετρίες υπό ορισμένες συνθήκες.

Επίσης, η διεπιφάνεια των υλικών των δύο στρωμάτων συμπεριφέρεται ως κρίσιμη ζώνη αναφορικά με την όλη διαδικασία.

Η συμφωνία μεταξύ των προβλεπόμενων τιμών και των μετρηθεισών από παρόμοιες βιομηχανικές εφαρμογές είναι αξιοσημείωτη, λαμβάνοντας υπόψη τις απλουστευτικές παραδοχές που εισήχθησαν στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων.

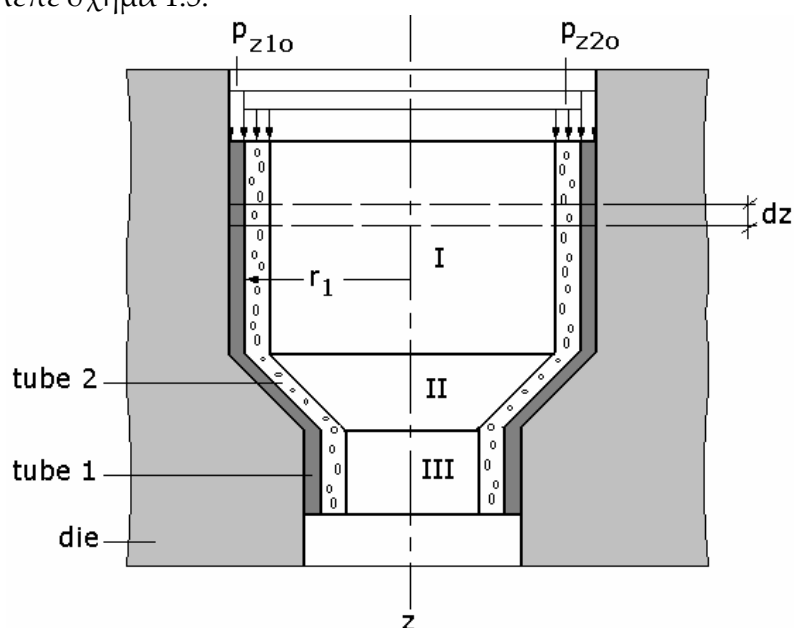
Ο μεταλλουργικός δεσμός μεταξύ των 2 στρωμάτων μοντελοποιήθηκε θεωρώντας τέλεια διεπιφάνεια. Ωστόσο, τοπικές μικρο-αποκολλήσεις πιθανόν να συνέβησαν και ακόμη και κάποια ρωγμή να εμφανίστηκε και να διαδόθηκε. Γι'αυτό η μοντελοποίηση της διεπιφάνειας δρα σαν περιοριστικός παράγοντας της ανάλυσης.

Όσον αφορά στη γεωμετρία, υπήρξαν προβλήματα σύγκλισης της μεθόδου με γωνία κωνικότητας της μήτρας μεγαλύτερη των 45° .

Αναλύθηκε η γεωμετρία της μήτρας και προέκυψε ότι για τον ίδιο λόγο διέλασης καθώς επίσης και για το ίδιο μήκος μήτρας, η σύγκλιση της μεθόδου όταν η γωνία κωνικότητας της μήτρας αλλάζει βαθμιαία είναι ταχύτερη απ' ό,τι όταν η μεταβολή της κλίσης είναι απότομη. Επίσης, με αύξηση της γωνίας κωνικότητας της μήτρας αυξάνεται η τάση συμπίεσης και υπάρχει αυξημένη πιθανότητα να συμβεί αστοχία.

1.4 Ανάπτυξη Μαθηματικού Μοντέλου

Το μαθηματικό μοντέλο ανάλυσης της διέλασης διμεταλλικών σωλήνων που παρουσιάζεται παρακάτω βασίστηκε στις μελέτες [3] & [4]. Παρόλο που οι μελέτες αναφέρονται σε διέλαση διμεταλλικών σωλήνων με πορώδες εσωτερικό στρώμα, οι εξισώσεις προσαρμόστηκαν ώστε να ισχύουν για την περίπτωση συμπαγών υλικών και για τα δύο στρώματα. Αρχικά δίνεται το μοντέλο εξισώσεων για το κυλινδρικό τμήμα του δοκιμίου, το οποίο συμπιέζεται από το έμβολο και κατόπιν παρουσιάζεται το μοντέλο για το τμήμα του δοκιμίου που βρίσκεται εντός της κωνικής μήτρας, βλέπε σχήμα 1.5.



Σχήμα 1.5: Διέλαση διμεταλλικού σωλήνα μέσω κωνικής μήτρας.

Διακρίνονται το κυλινδρικό τμήμα του δοκιμίου που συμπιέζεται από το έμβολο, καθώς επίσης και το τμήμα του δοκιμίου που βρίσκεται εντός του κωνικού τμήματος της μήτρας.

1.4.1 Ανάλυση Κυλινδρικού Τμήματος του Δοκιμίου

Εισαγωγικά

Στην ενότητα αυτή εξετάζεται η περίπτωση ενός διμεταλλικού σωλήνα, ο οποίος υπόκειται σε θλίψη στο κυλινδρικό μέρος μιας μήτρας διέλασης μέσω του αρχικού σταδίου διαμόρφωσης. Εάν r_1 είναι η ακτίνα στην επιφάνεια επαφής κάτω από τις προαναφερόμενες συνθήκες, μπορούν να αναπαρασταθούν οι αυξήσεις της πλαστικής παραμόρφωσης κατά την αξονική και εφαπτομενική διεύθυνση με τις ακόλουθες σχέσεις:

$$d\varepsilon_{m_1} = d\varepsilon_{m_2} \quad (\text{αξονική διεύθυνση})$$

$$d\varepsilon_{\theta_1} = d\varepsilon_{\theta_2} = 0 \quad (\text{εφαπτομενική διεύθυνση})$$

Οι έννοιες της ισοδύναμης τάσης και ισοδύναμης αύξησης της πλαστικής παραμόρφωσης συνδυάζονται με τον νόμο διατήρησης της μάζας και το νόμο ροής και συνδέονται με τις συνθήκες διαρροής ως ακολούθως:

$$\text{Ισοδύναμη Τάση: } \sigma_{eq} = \sigma_i \quad (1\alpha.1)$$

$$\text{Μέση Ισοδύναμη Παραμόρφωση: } \overline{d\varepsilon_{eq}} = \frac{\sqrt{d\varepsilon_i}}{\rho} \quad (1\alpha.2)$$

$$d\varepsilon_{ij} = \frac{3\rho\overline{d\varepsilon_{eq}}}{2\sigma_{eq}} \cdot (\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma_0) \quad (1\alpha.3)$$

Όπου:

σ_i : ένταση των τάσεων

σ_{ij} : συνιστώσες του τανυστή των τάσεων

$\sigma_0 = \frac{\delta_{ij}\sigma_{ij}}{3}$: η μέση τάση

$d\varepsilon_i$: η ένταση των συνιστωσών της πλαστικής παραμόρφωσης

$d\varepsilon_{ij}$: συνιστώσες του τανυστή αύξησης της παραμόρφωσης

δ_{ij} : το σύμβολο του Kronecker

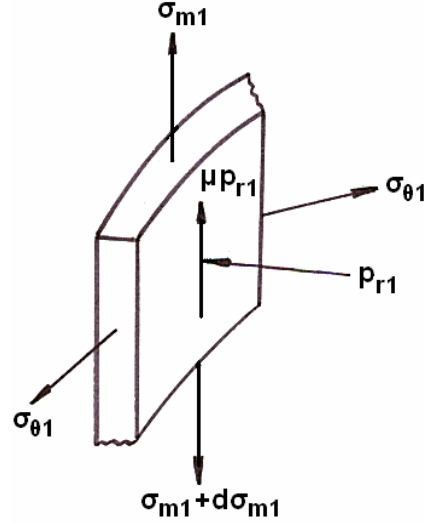
Μελέτη Εξωτερικού Σωλήνα

Για τη μελέτη του εξωτερικού σωλήνα χρησιμοποιείται στο εξής ο δείκτης 1.

Σε συμφωνία με τις αρχές της θεωρίας των λεπτού πάχους κελυφών και λαμβάνοντας υπόψη ότι οι εφαπτομενικές τάσεις m_{r_1} είναι πολύ μικρές, η τασική κατάσταση του εξωτερικού στρώματος μπορεί να εκφραστεί με όρους συνιστωσών των κύριων τάσεων σαν:

$$\sigma_1 = \sigma_{r_1} = -p_{r_1}, \quad \sigma_2 = \sigma_{\theta_1}, \quad \sigma_3 = \sigma_{m_1} \quad (1\alpha.4)$$

Όπου $\sigma_r, \sigma_{\theta}, \sigma_m$ οι ακτινικές, εφαπτομενικές και μεσημβρινές συνιστώσες τάσεις αντίστοιχα και p_{r_1} η πίεση επαφής μεταξύ των στρωμάτων, βλέπε σχήμα 1.6.



Σχήμα 1.6: Εντατική κατάσταση του εξωτερικού σωλήνα

$$\sigma_i = \sqrt{\left\{ \frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \right\}} \quad (1\alpha.5)$$

$$\overline{d\varepsilon_i} = \sqrt{\left\{ \frac{2}{9} [(d\varepsilon_1 - d\varepsilon_2)^2 + (d\varepsilon_2 - d\varepsilon_3)^2 + (d\varepsilon_3 - d\varepsilon_1)^2] \right\}} \quad (1\alpha.6)$$

$$d\varepsilon_{ij} = \frac{3\overline{d\varepsilon_i}}{2\sigma_i} \cdot (\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma_0) \quad (1\alpha.7)$$

Αντικαθιστώντας τις (1α.4) στην (1α.5) προκύπτει:

$$\sigma_i = \sqrt{\left\{ \frac{1}{2} [(p_{r1} + \sigma_{\theta1})^2 + (\sigma_{\theta1} - \sigma_{m1})^2 + (\sigma_{m1} + p_{r1})^2] \right\}} \text{ με λύση: } \sigma_{\theta1} = \frac{1}{2} (\sigma_{m1} - p_{r1} \pm Q_1) \quad (1\alpha.8)$$

$$\text{Όπου } Q_1 = \sqrt{[4\sigma_i^2 - 3(\sigma_{m1} + p_{r1})^2]} \quad (1\alpha.9)$$

Η λαμβάνοντας υπόψη την αξονική θλίψη του στρώματος, δηλαδή $\sigma_{m1} = -p_{z1}$ η (1α.8) γίνεται:

$$\sigma_{\theta1} = \frac{1}{2} (-p_{z1} - p_{r1} - Q_1) \quad (1\alpha.10)$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (1α.7) για τις συνιστώσες της αύξησης της πλαστικής παραμόρφωσης και λόγω της σχέσης που αφορά την κύρια τάση για συμπαγή υλικά $\sigma_0 = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$, προκύπτει για την αύξηση της πλαστικής παραμόρφωσης στην αξονική και εφαπτομενική διεύθυνση αντίστοιχα:

$$d\varepsilon_{m1} = \frac{\overline{d\varepsilon_i}}{2\sigma_i} (2\sigma_{m1} - \sigma_{\theta1} + p_{r1}) \quad (1\alpha.11^a)$$

$$d\varepsilon_{\theta_1} = \frac{d\varepsilon_i}{2\sigma_i} (2\sigma_{\theta_1} - \sigma_{m_1} + p_{r_1}) \quad (1\alpha.11^\beta)$$

Η συνδυάζοντας τις (1α.10) & (1α.11):

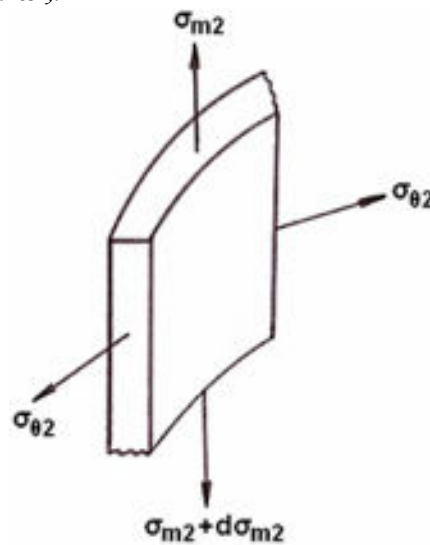
$$d\varepsilon_{m_1} = \frac{d\varepsilon_i}{4\sigma_i} [3(\sigma_{m_1} + p_{r_1}) + Q_1] \quad (1\alpha.12^\alpha)$$

$$d\varepsilon_{\theta_1} = -\frac{d\varepsilon_i}{2\sigma_i} Q_1 \quad (1\alpha.12^\beta)$$

Μελέτη Εσωτερικού Σωλήνα

Για τη μελέτη του εσωτερικού σωλήνα χρησιμοποιείται στο εξής ο δείκτης 2.

Η τασική κατάσταση του εσωτερικού στρώματος, βλέπε σχήμα 1.7, εκφράζεται με όρους των κύριων συνιστωσών των τάσεων ως:



Σχήμα 1.7: Εντατική κατάσταση του εσωτερικού σωλήνα

$$\sigma_1 \approx 0, \sigma_2 = \sigma_{\theta_2}, \sigma_3 = \sigma_{m_2} \quad (1\alpha.13)$$

Αντικαθιστώντας στην (1α.1) και ακολουθώντας την ίδια διαδικασία που ακολουθήθηκε για τον εξωτερικό σωλήνα, προκύπτει:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\left\{ \frac{1}{2} [\sigma_{\theta_2}^2 + (\sigma_{\theta_2} - \sigma_{m_2})^2 + \sigma_{m_2}^2] \right\}} \quad (1\alpha.14)$$

και λύνοντας ως προς σ_{θ_2} :

$$\sigma_{\theta_2} = \frac{\sigma_{m_2} \pm Q_2}{2} \quad (1\alpha.15)$$

$$\text{Όπου } Q_2 = \sqrt{[\sigma_{eq}^2 - 3\sigma_{m_2}^2]} \quad (1\alpha.16)$$

Η λαμβάνοντας υπόψη την αξονική θλίψη του στρώματος, δηλαδή $\sigma_{m_2} = -p_{z_2}$ η (1α.15) γίνεται:

$$\sigma_{\theta_2} = \frac{-p_{z_2} - Q_2}{2} \quad (1\alpha.17)$$

Αντικαθιστώντας στην (1α.3) και λόγω των (1α.13), λαμβάνονται για τις αυξήσεις της παραμόρφωσης για το εσωτερικό στρώμα οι παρακάτω σχέσεις:

$$d\varepsilon_{m_2} = \frac{\overline{\rho d\varepsilon_{eq}}}{4\sigma_{eq}} [3\sigma_{m_2} + Q_2] \quad (1\alpha.18^a)$$

$$d\varepsilon_{\theta_2} = -\frac{\overline{\rho d\varepsilon_{eq}}}{2\sigma_{eq}} Q_2 \quad (1\alpha.18^b)$$

Από την αύξηση της παραμόρφωσης και για τα 2 στρώματα, όπως προκύπτει από τις εξισώσεις (1α.12) και (1α.18) και με την προϋπόθεση να πληρούνται οι συνθήκες επαφής : $d\varepsilon_{m_1} = d\varepsilon_{m_2}$ και $d\varepsilon_{\theta_1} = d\varepsilon_{\theta_2} = 0$ προκύπτει:

$$\frac{\overline{d\varepsilon_i}}{4\sigma_i} [3(\sigma_{m_1} + p_{r_1}) + Q_1] = \frac{\overline{\rho d\varepsilon_{eq}}}{4\sigma_{eq}} [3\sigma_{m_2} + Q_2] \quad (1\alpha.19)$$

$$\text{Και } \frac{\overline{d\varepsilon_i}}{2\sigma_i} Q_1 = \frac{\overline{\rho d\varepsilon_{eq}}}{2\sigma_{eq}} Q_2 = 0 \Rightarrow Q_1 = Q_2 = 0 \quad (1\alpha.20)$$

Με βάση τις συνθήκες (1α.20) και λόγω των (1α.9) και (1α.16) προκύπτει:

$$\sigma_{m_1} = \frac{-p_{r_1} - 2\sigma_i}{\sqrt{3}} \quad (1\alpha.21)$$

$$\sigma_{m_2} = \frac{-2\sigma_{eq}}{\sqrt{3}} \quad (1\alpha.22)$$

Αντικαθιστώντας τις τιμές $Q_1 = Q_2 = 0$ στην (1α.19) προκύπτει:

$$\frac{\overline{d\varepsilon_i}}{4\sigma_i} (\sigma_{m_1} + p_{r_1}) = \frac{\overline{\rho d\varepsilon_{eq}}}{4\sigma_{eq}} \sigma_{m_2} \quad (1\alpha.23)$$

Η οποία γίνεται:

$$\frac{\overline{d\varepsilon_i}}{d\varepsilon_{eq}} = \frac{\overline{\rho \sigma_i \sigma_{m_2}}}{\sigma_{eq} (\sigma_{m_1} + p_{r_1})} \quad (1\alpha.24)$$

Με συνδυασμό των (1α.3) και (1α.7) παράγονται παρόμοιες εκφράσεις για την αύξηση της ακτινικής παραμόρφωσης για κάθε στρώμα:

$$d\varepsilon_{r_1} = -\frac{\overline{d\varepsilon_i}}{2\sigma_i} (2p_{r_1} + \sigma_{m_1} + \sigma_{\theta_1}) \quad (1\alpha.25^a)$$

$$d\varepsilon_{r_2} = -\frac{\overline{\rho d\varepsilon_{eq}}}{2\sigma_{eq}} (\sigma_{m_2} + \sigma_{\theta_2}) \quad (1\alpha.25^b)$$

Από την εξέταση των συνθηκών ισορροπίας για ένα απειροελάχιστο στοιχείο ενός αξονοσυμμετρικού κελιού του εσωτερικού σωλήνα, προέκυψε:

$$\frac{\sigma_{m_2}}{r_{m_2}} + \frac{\sigma_{\theta_2}}{r_{\theta_2}} = -\frac{p_{v_2}}{\delta_2} \quad (1\alpha.26)$$

Όπου r_m η ακτίνα καμπυλότητας ενός μεσημβρινού τομέα, r_θ η ακτίνα καμπυλότητας τομέα κάθετου στο μεσημβρινό τόξο, δ το πάχος του κελιού και p_v η ένταση του φορτίου. Για το κυλινδρικό εσωτερικό στρώμα ισχύει:

$r_{m_2} = \infty$, $r_{\theta_2} = r_1$, $p_{v_2} = p_{r_1}$ και για το λόγο αυτό η (1α.26) με τη συμβολή της (1α.17) ανάγεται στη

$$\text{μορφή: } p_{r_1} = -\frac{\delta_2}{2r_1} \sigma_{m_2} \quad (1\alpha.27)$$

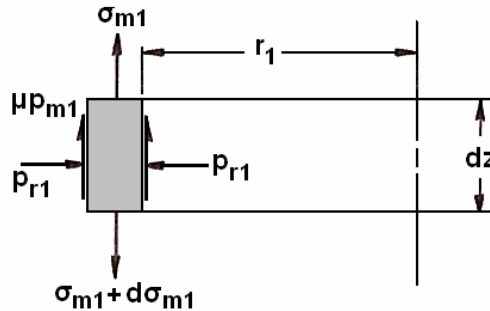
Για το εξωτερικό σωλήνα, και λαμβάνοντας υπόψη ότι $r_{m_1} = \infty$, $r_{\theta_1} = r_1$, $\delta = \delta_1$, $\sigma_\theta = \sigma_{\theta_1}$, $p_v = p_{v_1}$, $p_r = p_{r_1}$, εξαιτίας της εξίσωσης (1α.10) προκύπτει:

$$p_{r_1} = p_{r_i} + \frac{\delta_1}{2r_1}(p_{z_1} + p_{r_i}) \quad (1\alpha.28)$$

Εξετάζοντας την ισορροπία ενός δακτυλιοειδούς στοιχείου του εξωτερικού στρώματος, βλέπε σχήμα 1.8, λαμβάνεται η ακόλουθη έκφραση για την αξονική τάση σ_{m_1} :

$$\sigma_{m_1} = \sigma_{m_{1o}} + \frac{\mu p_{r_1} z}{r_1} \quad (1\alpha.29)$$

Όπου $\sigma_{m_{1o}}$ η αρχική τιμή της αξονικής τάσης, μ ο συντελεστής τριβής στην επιφάνεια επαφής με τη μήτρα, z η απόσταση του τομέα από το έμβολο.



Σχήμα 1.8: Ισορροπία στοιχειώδους δακτυλιοειδούς στοιχείου εξωτερικού στρώματος

1.4.2 Ανάλυση Τμήματος Δοκιμίου εντός Κωνικής Μήτρας

Εισαγωγικά

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται ένα μοντέλο μαθηματικών εξισώσεων το οποίο θεωρείται ότι περιγράφει επαρκώς την πραγματική διεργασία παραμόρφωσης διμεταλλικού σωλήνα σε κωνική μήτρα, βλ. Σχήμα 1.5.

Οι έννοιες της ισοδύναμης τάσης και ισοδύναμης αύξησης της πλαστικής παραμόρφωσης συνδυάζονται με τον νόμο διατήρησης της μάζας και το νόμο ροής και συνδέονται με τις συνθήκες διαρροής ως ακολούθως:

$$\text{Ισοδύναμη Τάση: } \sigma_{eq} = \sigma_i \quad (1\beta.1)$$

$$\text{Μέση Ισοδύναμη Παραμόρφωση: } \overline{d\varepsilon_{eq}} = \frac{\sqrt{d\varepsilon_i}}{\rho} \quad (1\beta.2)$$

$$d\varepsilon_{ij} = \frac{3\rho \overline{d\varepsilon_{eq}}}{2\sigma_{eq}} \cdot (\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma_0) \quad (1\beta.3)$$

Όπου:

σ_i : ένταση των τάσεων

σ_{ij} : συνιστώσες του τανυστή των τάσεων

$\sigma_0 = \frac{\delta_{ij}\sigma_{ij}}{3}$: η μέση τάση

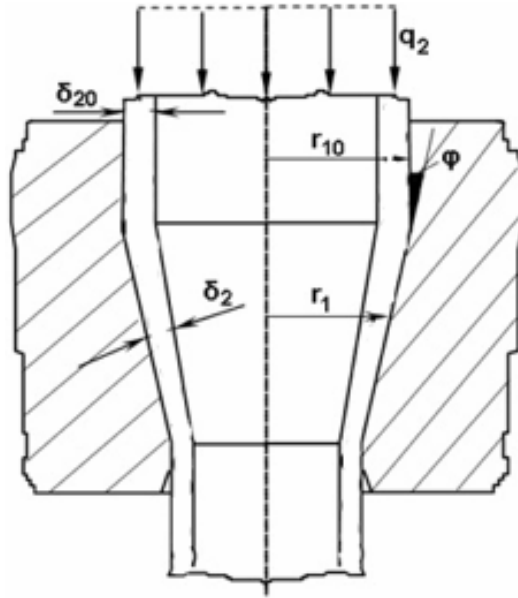
$d\varepsilon_i$: η ένταση των συνιστωσών της πλαστικής παραμόρφωσης

$d\epsilon_{ij}$: συνιστώσες του τανυστή αύξησης της παραμόρφωσης

δ_{ij} : το σύμβολο του Kronecker

Μελέτη Εσωτερικού Σωλήνα

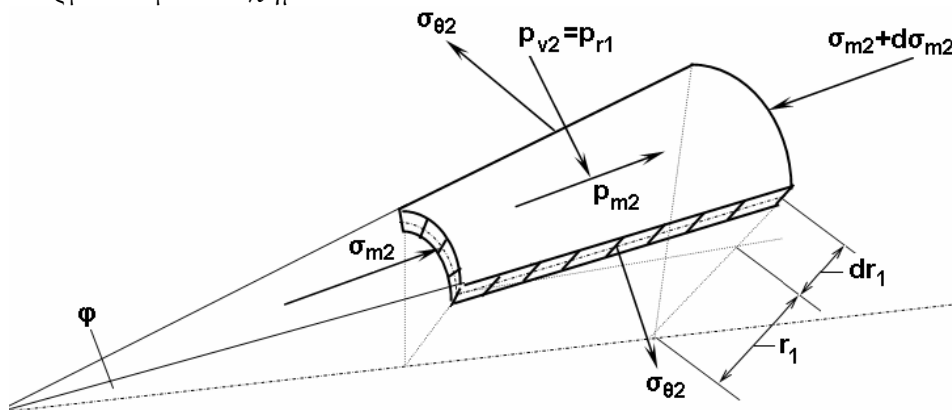
Για την θεωρητική έρευνα του μηχανισμού παραμόρφωσης του διμεταλλικού σωλήνα είναι απαραίτητο να βρεθεί η τασική κατάσταση και των δύο στρωμάτων λαμβάνοντας ταυτόχρονα υπόψη τις συνθήκες επαφής. Αρχικά εξετάζεται η τασική κατάσταση του εσωτερικού στρώματος, βλ. Σχήμα 1.9.



Σχήμα 1.9: Αποψη του εσωτερικού στρώματος

Βάσει αυτής της εκτίμησης αναπτύσσεται ένα θεωρητικό μοντέλο, συνδυάζοντας την κλασική θεωρία του λόφου τριβής και τη θεωρία λεπτότοιχων κελυφών.

Αγνοώντας την επίδραση των καμπτικών ροπών προκύπτουν οι ακόλουθες εξισώσεις ισορροπίας, σε αρμονία με το σχήμα 1.10:



Σχήμα 1.10: Τασική κατάσταση του εσωτερικού στρώματος

Εξισώσεις ισορροπίας:

$$\frac{d}{dr_1} (\sigma_{m_2} r_1 \delta_2) - \sigma_{\theta_2} \delta_2 + \frac{p_{m_2} r_1}{\sin \phi} = 0 \quad (1\beta.4)$$

$$\frac{\sigma_{m_2}}{\rho_m} + \frac{\sigma_{\theta_2}}{\rho_\theta} = -\frac{p_{v_2}}{\delta_2} \quad (1\beta.5)$$

$$d\varepsilon_{\theta_2} = \frac{dr_1}{r_1}, \quad d\varepsilon_{v_2} = \frac{d\delta_2}{\delta_2} \quad (1\beta.6)$$

Όπου:

r : η ακτίνα της κυκλικής διατομής

ρ_m : η ακτίνα καμπυλότητας της μεσημβρινής τομής

ρ_θ : η ακτίνα καμπυλότητας σε διεύθυνση κάθετη στο μεσημβρινό τόξο

δ_2 : το πάχος τοιχώματος του εσωτερικού σωλήνα

ϕ : η ημιγωνία του κωνικού τμήματος της μήτρας

σ_{m_2} : αξονική τάση

σ_{θ_2} : εφαπτομενική τάση

p_{m_2} : κάθετη πίεση στην αξονική διεύθυνση

$p_{v_2} = p_{r_1}$: κάθετη πίεση στην ορθή διεύθυνση

Για το κωνικό τμήμα, μπορούμε να υποθέσουμε ότι $\rho_m = \infty$, $\rho_\theta = \frac{r_1}{\cos\phi}$ και ότι η αύξηση της παραμόρφωσης στην εφαπτομενική ($d\varepsilon_\theta$) και ορθή ($d\varepsilon_v$) διεύθυνση σχετίζονται με την αύξηση της ακτίνας του σωλήνα και το πάχος του τοιχώματος με τις ακόλουθες εκφράσεις, αντιστοίχως:

$$d\varepsilon_{\theta_2} = \frac{dr_1}{r_1}, \quad d\varepsilon_{v_2} = \frac{d\delta_2}{\delta_2}$$

Εισάγοντας τις κατάλληλες αδιάστατες ποσότητες, έχουμε:

$$\frac{d\overline{\sigma_{m_2}}}{d\overline{r_1}} = \frac{k(\overline{\sigma_{m_2}} - \overline{Q_2})}{2\overline{r_1}} - \frac{\overline{\sigma_{m_2}}(3\overline{\sigma_{m_2}} + \overline{Q_2})}{2\overline{r_1}\overline{Q_2}} \quad (1\beta.7)$$

$$k = 1 + \mu \cot\phi \quad (1\beta.8)$$

$$\frac{d\overline{\delta_2}}{d\overline{r_1}} = \frac{\overline{\delta_2}(3\overline{\sigma_{m_2}} - \overline{Q_2})}{2\overline{r_1}\overline{Q_2}} \quad (1\beta.9)$$

$$\frac{d\overline{\varepsilon_{eq_2}}}{d\overline{r_1}} = -\frac{\overline{\sigma_{eq_2}}}{\rho_2 \overline{r_1} \overline{Q_2}} \quad (1\beta.10)$$

$$\overline{\sigma_{\theta_2}} = \frac{\overline{\sigma_{m_2}} - \overline{Q_2}}{2} \quad (1\beta.11)$$

$$d\varepsilon_{m_2} = \frac{3\rho_2 d\overline{\varepsilon_{eq_2}}}{2\overline{\sigma_{eq_2}}} \cdot \left[\overline{\sigma_{m_2}} - \frac{\overline{\sigma_{m_2}} + \overline{\sigma_{\theta_2}}}{3} \right] \quad (1\beta.12)$$

$$d\varepsilon_{\theta_2} = \frac{3\rho_2 \overline{d\varepsilon_{eq}}}{2\overline{\sigma_{eq}}} \cdot \left[\overline{\sigma_{\theta_2}} - \frac{\overline{\sigma_{m_2}} + \overline{\sigma_{\theta_2}}}{3} \right] \quad (1\beta.13)$$

$$\overline{Q_2} = \sqrt{4\overline{\sigma_{eq}^2} - 3\overline{\sigma_{m_2}^2}} \quad (1\beta.14)$$

$$\overline{p_{r_1}} = \overline{p_{v_2}} = -\frac{\overline{\sigma_{\theta_2}} \overline{\delta_2} \cos\varphi}{r_1} \cdot \frac{\delta_{20}}{r_{10}} \quad (1\beta.15)$$

$$\overline{p_{m_2}} = \mu \overline{p_{v_2}} \quad (1\beta.16)$$

Όπου:

r_{10} : αρχική τιμή της αρχικής ακτίνας του σωλήνα

δ_{20} : αρχική τιμή του πάχους τοιχώματος του σωλήνα

μ : συντελεστής τριβής στην διεπιφάνεια των στρωμάτων

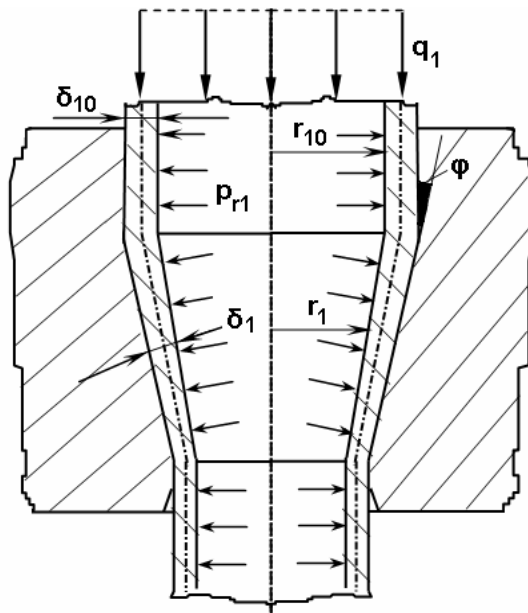
σ_{y_2} : τάση διαρροής του υλικού του εσωτερικού στρώματος και

$$\overline{\sigma_{m_2}} = \frac{\overline{\sigma_{m_2}}}{\overline{\sigma_{y_2}}}, \quad \overline{\sigma_{\theta_2}} = \frac{\overline{\sigma_{\theta_2}}}{\overline{\sigma_{y_2}}}, \quad \overline{\sigma_{eq_2}} = \frac{\overline{\sigma_{eq_2}}}{\overline{\sigma_{y_2}}}, \quad \overline{Q_2} = \frac{Q_2}{\overline{\sigma_{y_2}}}, \quad \overline{p_{v_2}} = \frac{p_{v_2}}{\overline{\sigma_{y_2}}}, \quad \overline{p_{m_2}} = \frac{p_{m_2}}{\overline{\sigma_{y_2}}}, \quad \overline{r_1} = \frac{r_1}{r_{10}}, \quad \overline{\delta_2} = \frac{\delta_2}{\delta_{20}}$$

Μελέτη Εξωτερικού Σωλήνα

Το εσωτερικό στρώμα κατά την διάρκεια της διαδικασίας παίρνει το σχήμα του εξωτερικού.

Ο εξωτερικός σωλήνας υπόκειται σε εξωτερικές (p_{v_1}) και εσωτερικές (p_{r_1}) πιέσεις, βλ. σχήμα 1.11.



Σχήμα 1.11: Άποψη του εξωτερικού στρώματος

Εξισώσεις ισορροπίας:

Από την ισορροπία ενός απειροστού τμήματος έχουμε:

$$\frac{\sigma_{m_1}}{\rho_m} + \frac{\sigma_{\theta_1}}{\rho_\theta} = -\frac{p_{v_1} - p_{r_1}}{\delta_1} - \left(\frac{1}{\rho_m} + \frac{1}{\rho_\theta} \right) \cdot \frac{p_{v_1} + p_{r_1}}{2} \quad (1\beta.17)$$

Για το κωνικό τμήμα, έχουμε ήδη δεχτεί ότι $\rho_m = \infty$, $\rho_\theta = \frac{r_1}{\cos \varphi}$.

Επίσης, $\overline{p_{m_2}} = \overline{\mu p_{v_2}}$ και συνδυάζοντας την (2.4) με την (2.17) προκύπτει:

$$r_1 \frac{d\sigma_{m_1}}{dr_1} + \sigma_{m_1} + \frac{r_1}{\delta_1} \cdot \frac{d\delta_1}{dr_1} \sigma_{m_1} - c_1 \sigma_{\theta_1} + \frac{c_2 r_1 p_{r_1}}{\delta_1} = 0 \quad (1\beta.18)$$

$$\text{όπου: } c_1 = 1 + \frac{2\mu r_1 \cot \varphi}{2r_1 + \delta_1 \cos \varphi} \text{ και } c_2 = \frac{\mu(2r_1 - \delta_1 \cos \varphi)}{(2r_1 + \delta_1 \cos \varphi) \sin \varphi} \quad (1\beta.19)$$

Από την (1β.18) προκύπτει η κατανομή των εφαρμοζόμενων μεσημβρινών τάσεων κατά μήκος του κωνικού τμήματος:

$$\frac{d\sigma_{m_1}}{dr_1} = \frac{1}{r_1} \left[c_1 \sigma_{\theta_1} - \frac{c_2 r_1 p_{r_1}}{\delta_1} - \sigma_{m_1} \left(1 + \frac{r_1}{\delta_1} \cdot \frac{d\delta_1}{dr_1} \right) \right] \quad (1\beta.20)$$

Επίσης, είναι:

$$d\varepsilon_{\theta_1} = \frac{3}{2} \cdot \frac{d\varepsilon_i}{\sigma_i} \cdot (\sigma_{\theta_1} - \sigma_{01}) \text{ και } d\varepsilon_{v_1} = \frac{3}{2} \cdot \frac{d\varepsilon_i}{\sigma_i} \cdot (-p_{r_1} - \sigma_{01}) \quad (1\beta.21)$$

όπου

$d\varepsilon_{\theta_1}$: αύξηση της πλαστικής παραμόρφωσης στην εφαπτομενική διεύθυνση

$d\varepsilon_{v_1}$: αύξηση της πλαστικής παραμόρφωσης στην ορθή διεύθυνση

$d\varepsilon_i$: ένταση της αύξησης της πλαστικής παραμόρφωσης

σ_i : ένταση των τάσεων

$$\sigma_{01} = \frac{\sigma_{m_1} + \sigma_{\theta_1} - p_{r_1}}{3} \text{ η μέση τιμή των τάσεων} \quad (1\beta.22)$$

Αντικαθιστώντας με την (1β.22) στην (1β.21) προκύπτει:

$$d\varepsilon_{\theta_1} = \frac{3}{2} \cdot \frac{d\varepsilon_i}{\sigma_i} \cdot (2\sigma_{\theta_1} - \sigma_{m_1} + p_{r_1}) \quad (1\beta.23^a)$$

$$d\varepsilon_{v_1} = \frac{3}{2} \cdot \frac{d\varepsilon_i}{\sigma_i} \cdot (-2p_{r_1} - \sigma_{\theta_1} - \sigma_{m_1}) \quad (1\beta.23^b)$$

Σχηματίζοντας τον λόγο $\frac{d\varepsilon_v}{d\varepsilon_{\theta_1}}$ και λαμβάνοντας υπόψη την (1β.6), οι (1β.23^a), (1β.23^b) γίνονται:

$$\frac{-2p_{r_1} - \sigma_{\theta_1} - \sigma_{m_1}}{2\sigma_{\theta_1} - \sigma_{m_1} + p_{r_1}} = \frac{d\delta_1}{\delta_1} \cdot \frac{r_1}{dr_1} \quad (1\beta.24)$$

Κατανομή πάχους του εξωτερικού τοιχώματος από την (1β.24):

$$\frac{d\delta_1}{dr_1} = -\frac{\delta_1}{r_1} \cdot \frac{2p_{r_1} + \sigma_{\theta_1} + \sigma_{m_1}}{2\sigma_{\theta_1} - \sigma_{m_1} + p_{r_1}} \quad (1\beta.25)$$

Εξισώνοντας τα πρώτα μέλη των (1β.6), (1β.23) προκύπτει:

$$\frac{d\varepsilon_i}{2\sigma_i} \cdot (2\sigma_{\theta_1} - \sigma_{m_1} + p_{r_1}) = \frac{dr_1}{r_1} \quad (1\beta.26)$$

ή τελικά:

$$\frac{d\varepsilon_i}{dr_i} = \frac{2\sigma_i}{r_1(2\sigma_{\theta_1} - \sigma_{m_1} + p_{r_1})} \quad (1\beta.27)$$

Η ασκούμενη από την μήτρα πίεση στον σωλήνα προσδιορίζεται χρησιμοποιώντας την εξίσωση (1β.18), οπότε:

$$\frac{\sigma_{\theta_1}}{r_1} \cos \varphi = -\frac{p_{v_1} - p_{r_1}}{\delta_1} - \frac{\cos \varphi}{r_1} \frac{p_{v_1} + p_{r_1}}{2} \quad (1\beta.28)$$

Η (1β.28) μετά από μαθηματικές απλοποιήσεις δίνει:

$$p_{v_1} = \frac{p_{r_1} \cdot (2r_1 - \delta_1 \cos \varphi) - 2\delta_1 \sigma_{\theta_1} \cos \varphi}{2r_1 + \delta_1 \cos \varphi} \quad (1\beta.29)$$

Η συνθήκη διαρροής γράφεται για μη πορώδη υλικά, θεωρώντας ότι :

$$\sigma_1 \equiv \sigma_{m_1}, \quad \sigma_2 \equiv \sigma_{\theta_1}, \quad \sigma_3 \equiv -p_{r_1} \quad (1\beta.30)$$

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{m_1} - \sigma_{\theta_1})^2 + (\sigma_{\theta_1} + p_{r_1})^2 + (-p_{r_1} - \sigma_{m_1})^2}$$

και μειώνεται στην ακόλουθη τετραγωνική εξίσωση:

$$\sigma_{\theta_1}^2 + (p_{r_1} - \sigma_{m_1})\sigma_{\theta_1} + \sigma_{m_1}^2 + p_{r_1}^2 - \sigma_i^2 + p_{r_1}\sigma_{m_1} = 0 \quad (1\beta.31)$$

Θέτοντας:

$$D = 4\sigma_i^2 - 3p_{r_1}^2 - 3\sigma_{m_1}^2 - 6p_{r_1}\sigma_{m_1} \quad (1\beta.32)$$

και θεωρώντας την ποσότητα:

$$Q_1 = \sqrt{D} = \sqrt{4\sigma_i^2 - 3p_{r_1}^2 - 3\sigma_{m_1}^2 - 6p_{r_1}\sigma_{m_1}} \quad (1\beta.33)$$

η εφαιπτομενική τάση προκύπτει ίση με:

$$\sigma_{\theta_1} = \frac{\sigma_m - p_{r_1} \pm Q_1}{2} \quad (1\beta.34)$$

Το πρόσημο του Q_1 επιλέγεται σύμφωνα με την συνθήκη αύξησης της απόλυτης τιμής του σ_{θ_1} , δηλαδή της $|\sigma_{\theta_1}|$, κατά την διάρκεια της διέλασης, οπότε:

$$\sigma_{\theta_1} = \frac{\sigma_m - p_{r_1} - Q_1}{2} \quad (1\beta.35)$$

Εισάγοντας τις ακόλουθες αδιάστατες ποσότητες:

$$\overline{\sigma_{m_1}} = \frac{\sigma_{m_1}}{\sigma_{y_1}}, \quad \overline{\sigma_{\theta_1}} = \frac{\sigma_{\theta_1}}{\sigma_{y_1}}, \quad \overline{\sigma_i} = \frac{\sigma_i}{\sigma_{y_1}}, \quad \overline{Q_1} = \frac{Q_1}{\sigma_{y_1}}, \quad \overline{\delta_1} = \frac{\delta_1}{\delta_{10}}, \quad d\delta_1 = d \frac{\delta_1}{\delta_{10}}, \quad \overline{p_{v_1}} = \frac{p_{v_1}}{\sigma_{y_1}}$$

όπου σ_{y_1} το όριο διαρροής του υλικού του εξωτερικού στρώματος, προκύπτει το ακόλουθο σετ εξισώσεων, που περιγράφει την πλαστική παραμόρφωση του εξωτερικού στρώματος:

$$d\bar{\sigma}_{m_1} = \frac{d\bar{r}_1}{r_1} \cdot \left[c_1 \bar{\sigma}_{\theta_1} - \frac{c_2 \bar{r}_1 p_{r_1}}{\delta_1} \frac{1}{k_1} - \bar{\sigma}_{m_1} \left(1 + \frac{\bar{r}_1}{\delta_1} \frac{d\bar{\delta}_1}{d\bar{r}_1} \right) \right] \quad (1\beta.36)$$

$$\bar{c}_1 = 1 + \frac{2\mu\bar{r}_1 \cot \phi}{2\bar{r}_1 + \delta_1 k_1 \cos \phi} \quad \text{και} \quad \bar{c}_2 = \frac{\mu(2\bar{r}_1 - \delta_1 k_1 \cos \phi)}{(2\bar{r}_1 + \delta_1 k_1 \cos \phi) \sin \phi} \quad (1\beta.37)$$

$$\frac{d\bar{\delta}_1}{d\bar{r}_1} = -\frac{\bar{\delta}_1(2\bar{p}_{r_1} + \bar{\sigma}_{\theta_1} + \bar{\sigma}_{m_1})}{r_1(2\bar{\sigma}_{\theta_1} - \bar{\sigma}_{m_1} + \bar{p}_{r_1})} \quad (1\beta.38)$$

$$\frac{d\bar{\varepsilon}_i}{d\bar{r}_1} = \frac{2\bar{\sigma}_i}{r_1(2\bar{\sigma}_{\theta_1} - \bar{\sigma}_{m_1} + \bar{p}_{r_1})} \quad (1\beta.39)$$

$$\bar{p}_{r_1} = \frac{\bar{p}_{r_1}(2\bar{r}_1 - \delta_1 k_1 \cos \phi) - 2\delta_1 \bar{\sigma}_{\theta_1} k_1 \cos \phi}{2\bar{r}_1 + \delta_1 k_1 \cos \phi} \quad (1\beta.40)$$

$$\bar{\sigma}_{\theta_1} = \frac{\bar{\sigma}_{m_1} - \bar{p}_{r_1} - \bar{Q}_1}{2} \quad (1\beta.41)$$

$$\bar{Q}_1 = \sqrt{4\bar{\sigma}_i^2 - 3\bar{p}_{r_1}^2 - 3\bar{\sigma}_{m_1}^2 - 6\bar{p}_{r_1}\bar{\sigma}_{m_1}} \quad (1\beta.42)$$

$$d\bar{\varepsilon}_{m_1} = \frac{d\bar{\varepsilon}_i}{2\bar{\sigma}_i} \cdot (2\bar{\sigma}_{m_1} - \bar{\sigma}_{\theta_1} + \bar{p}_{r_1}) \quad (1\beta.43)$$

$$d\bar{\varepsilon}_{\theta_1} = \frac{d\bar{\varepsilon}_i}{2\bar{\sigma}_i} \cdot (2\bar{\sigma}_{\theta_1} - \bar{\sigma}_{m_1} + \bar{p}_{r_1}) \quad (1\beta.44)$$

όπου $k_1 = \frac{\delta_{10}}{r_{10}}$ ο γεωμετρικός συντελεστής του εξωτερικού λεπτότοιχου στρώματος του διμεταλλικού σωλήνα.

Στο σημείο αυτό ολοκληρώνεται η θεωρητική μελέτη της κατεργασίας διέλασης διμεταλλικών σωλήνων μέσω κωνικής μήτρας. Το θεωρητικό υπόβαθρο που αναπτύχθηκε στις ενότητες 1.1 έως 1.3 στα προηγούμενα θα χρησιμοποιηθεί στο εξής για την ερμηνεία των πειραματικών αποτελεσμάτων και τον έλεγχο της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων της αριθμητικής προσομοίωσης. Στόχος είναι να διαπιστωθεί κατά πόσο μπορεί να προκύψει μία αξιόπιστη, γενική μέθοδος η οποία να ανταποκρίνεται στην συγκεκριμένη πειραματική διαδικασία και, ει δυνατόν, να μπορεί να χρησιμοποιηθεί αντί των πειραμάτων στο μέλλον.

Κεφάλαιο 2

Διέλαση Διμεταλλικών Σωλήνων

Πειραματικό Μέρος

2.0 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται το πειραματικό μέρος πάνω στο οποίο βασίστηκε ολόκληρη η εργασία. Περιλαμβάνει παρουσίαση του εργαλείου, αναφορά στα υλικά από τα οποία ήταν κατασκευασμένα το εργαλείο και τα δοκίμια, παράθεση των τεχνικών χαρακτηριστικών της πρέσσας στην οποία διεξήχθησαν τα πειράματα, την παρουσίαση των δοκιμίων, τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας καθώς και κάποια σύντομα σχόλια.

2.1 Εργαλείο (Μήτρα – Έμβολο)

■ Στην πειραματική διαδικασία η μήτρα αποτελείτο από τα ακόλουθα τμήματα:

α. Τμήμα εξόδου

Πρόκειται για κυλινδρικό δακτύλιο εξωτερικής διαμέτρου $D_{out}=90.00\text{mm}$, εσωτερικής διαμέτρου $D_{in}=20.00\text{mm}$ και ύψους $H=57.74\text{mm}$.

Αυτό το τμήμα της μήτρας ήταν κατασκευασμένο από εργαλειοχάλυβα και έφερε ειδική εσωτερική διαμόρφωση για την τοποθέτηση της κωνικής μήτρας, βλέπε Εικόνα 2.1.



Εικόνα 2.1: Τμήμα εξόδου της μήτρας, φέρων διαμόρφωση για την τοποθέτηση του κωνικού δακτυλίου.

β. Κωνικό τμήμα

Πρόκειται για κώλουρο κωνικό δακτύλιο με ημιγωνία κωνικότητας 15° . Αρχικής εσωτερικής διαμέτρου: $D_1=25.00\text{mm}$, τελικής εσωτερικής διαμέτρου: $D_2=20.00\text{mm}$ και ύψους: $H=9.26\text{mm}$. Αυτό το τμήμα της μήτρας ήταν κατασκευασμένο από χάλυβα CK 45 και τοποθετήθηκε στην ειδική διαμόρφωση του τμήματος εξόδου της μήτρας, βλέπε Εικόνες 2.2.



Εικόνες 2.2: Κωνικό τμήμα της μήτρας και άποψη του συνόλου «τμήμα εξόδου-κωνικό τμήμα»

γ. Δακτύλιος συγκράτησης και τμήμα εισόδου

Πρόκειται για κυλινδρικό δακτύλιο, εσωτερικής διαμέτρου $D_{in}=25.00\text{mm}$, ο οποίος συγκρατεί το κωνικό τμήμα της μήτρας και αποτελεί το μεταλλικό θάλαμο. Τοποθετείται όπως φαίνεται στις ακόλουθες εικόνες. Επίσης, φαίνεται και ένας επιπλέον κυλινδρικός δακτύλιος εξωτερικής διαμέτρου $D_{out}=90.00\text{mm}$, εσωτερικής διαμέτρου $D_{in}=25.00\text{mm}$ και ύψους $H=67.00\text{mm}$. Αυτό το τμήμα της μήτρας ήταν κατασκευασμένο από εργαλειοχάλυβα.



Εικόνες 2.3: Άποψη του δακτυλίου συγκράτησης και του τμήματος εισόδου στο συναρμολογημένο σύνολο.

Στο όλο σύνολο τοποθετήθηκε ένας επιπλέον κυλινδρικός δακτύλιος για λόγους στιβαρότητας. Η τελική μορφή του συνόλου δίνεται στην επόμενη εικόνα:



Εικόνα 2.4: Άποψη του συναρμολογημένου συνόλου των εξαρτημάτων της μήτρας

■ Στην πειραματική διαδικασία το έμβολο ήταν ένας συμπαγής κύλινδρος διαμέτρου $D=25.00\text{mm}$ και ύψους $H=80.00\text{mm}$. Το έμβολο ήταν κατασκευασμένο από κοινό χάλυβα.

2.2 Υλικά Δοκιμών

α) Εξωτερικοί Σωλήνες (Καθαρός Χαλκός)

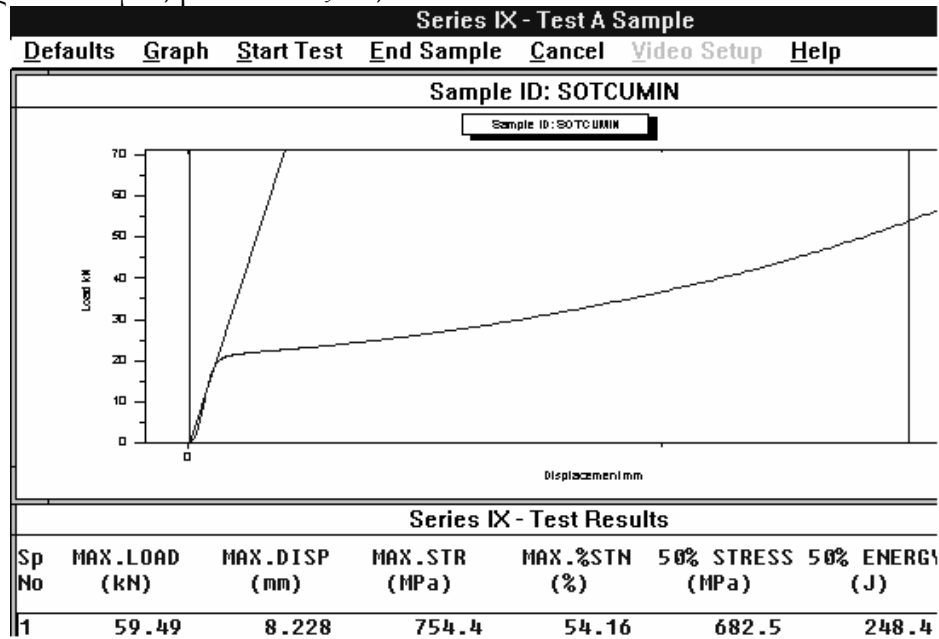
Πυκνότητα: $\rho = 0.008913 \text{ gr/mm}^3$

Μέτρο Ελαστικότητας: $E = 119,000 \text{ MPa}$

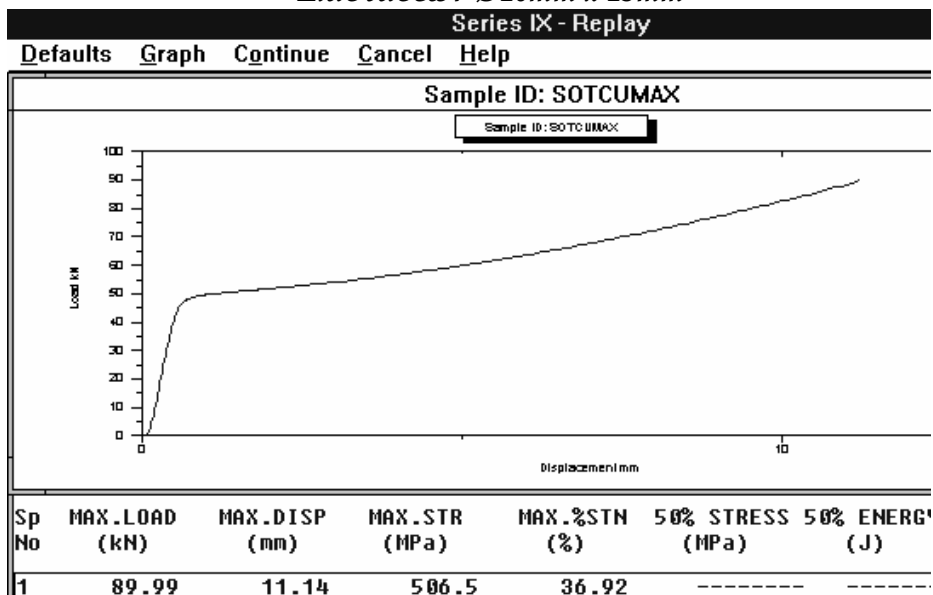
Λόγος Poisson: $\nu = 0.35$

Τάση Διαρροής: $\text{Sigy} = 266 \text{ MPa}$ [23]

Από δοκιμές θλίψης που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών, προέκυψαν οι ακόλουθες 2 συμβατικές καμπύλες φορτίου-μετατόπισης για ισάριθμα κυλινδρικά δοκίμια, βλ. Εικόνες 2.5, 2.6 .



Εικόνα 2.5: Καμπύλη Φορτίου – Μετατόπισης Δοκιμίου από Χαλκό, Διαστάσεων $\text{Ø}10\text{mm} \times 15\text{mm}$



Εικόνα 2.6: Καμπύλη Φορτίου – Μετατόπισης Δοκιμίου από Χαλκό, Διαστάσεων $\text{Ø}15\text{mm} \times 30\text{mm}$

β) Εσωτερικοί Σωλήνες

Οι εσωτερικοί σωλήνες των δοκιμίων # 3-5 και # 8-12 ήταν κατασκευασμένοι από τυποποιημένο κράμα αλουμινίου, το Al-6063 F25. Το Αλουμίνιο αυτό έχει τις εξής ιδιότητες:

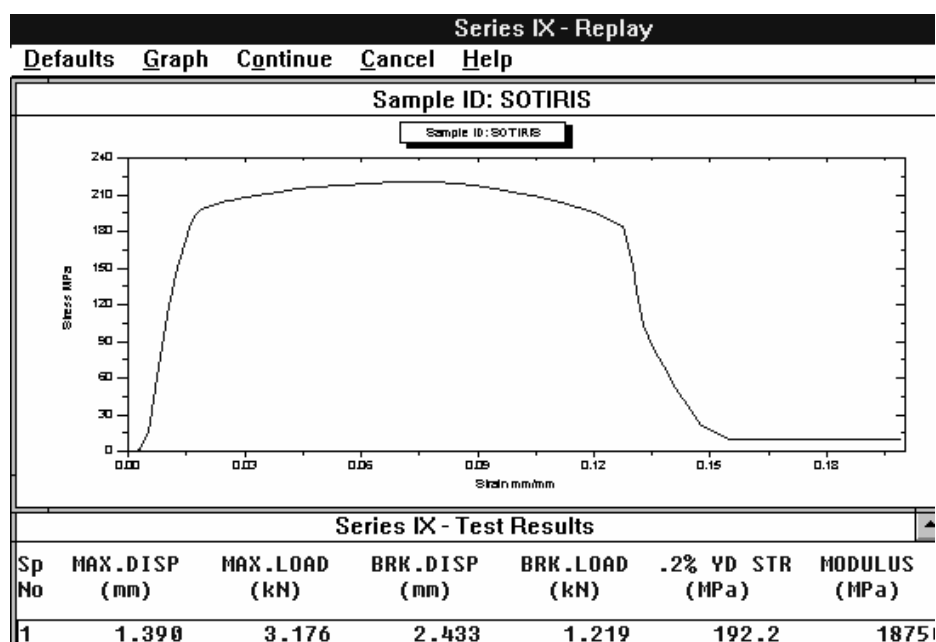
Πυκνότητα: $\rho = 0.0027\text{gr/mm}^3$

Μέτρο Ελαστικότητας: $E=70,000\text{MPa}$

Λόγος Poisson: $\nu=0.34$

Τάση Διαρροής: $\text{Sigy}=192,2\text{ MPa}^1$

Από δοκιμές θλίψης που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών, προέκυψε η ακόλουθη καμπύλη τάσεων – παραμορφώσεων, βλ. Εικόνα 2.7.



Εικόνα 2.7: Συμβατική Καμπύλη Τάσεων - Παραμορφώσεων Δοκιμίου από Al-6063 F25

Οι εσωτερικοί σωλήνες των δοκιμίων # 1-2 και # 6-7 ήταν κατασκευασμένοι από χυτό αλουμίνιο Al-6063 F25, για το οποίο δεν υπάρχουν πρότυπες ιδιότητες, παρότι έχει την ίδια χημική σύσταση με το προηγούμενο υλικό, διότι δεν έχει ακολουθηθεί η ίδια διαδικασία βελτίωσης των ιδιοτήτων του (π.χ. θερμικές κατεργασίες). Από σχετικές μετρήσεις και παραδοχές προέκυψαν οι τιμές των ακόλουθων ιδιοτήτων:

Πυκνότητα: $\rho = 0.0027\text{gr/mm}^3$

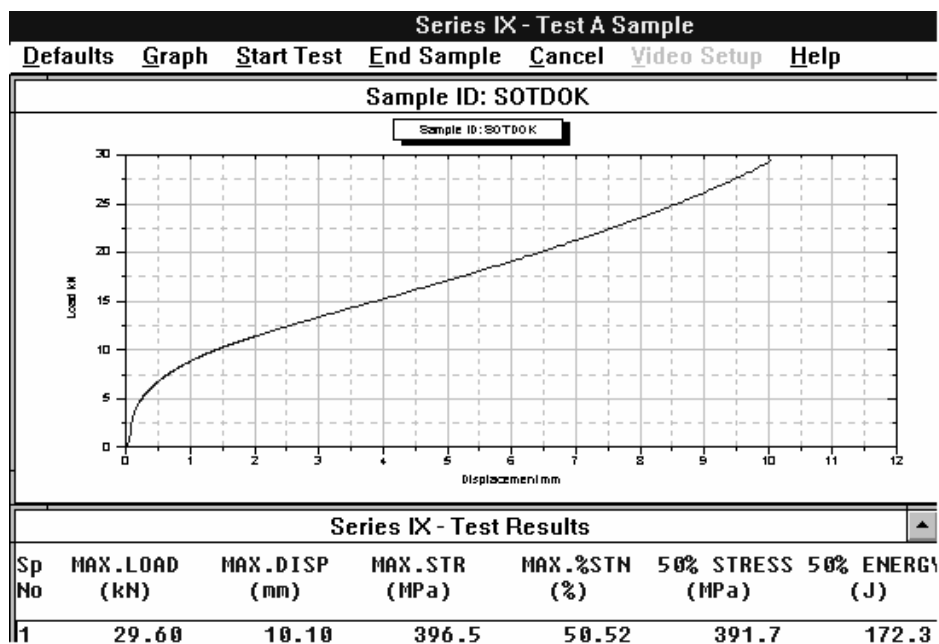
Μέτρο Ελαστικότητας: $E=70,000\text{MPa}$

Λόγος Poisson: $\nu=0.34$

Τάση Διαρροής: $\text{Sigy}=63.7\text{ MPa}$

¹ Η τάση διαρροής για το συγκεκριμένο υλικό, όπως φαίνεται στο Παράρτημα 1 είναι $\text{Sigy}=195\text{MPa}$ [e4]. Ωστόσο κατά την δοκιμή θλίψης στο εργαστήριο προέκυψε η τιμή $\text{Sigy}=192.2\text{MPa}$, η οποία είναι παρόμοια με την τυποποιημένη.

Από δοκιμές εφελκυσμού που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών, προέκυψε η ακόλουθη καμπύλη φορτίου – μετατόπισης για κυλινδρικό δοκίμιο, βλ. Εικόνα 2.8.



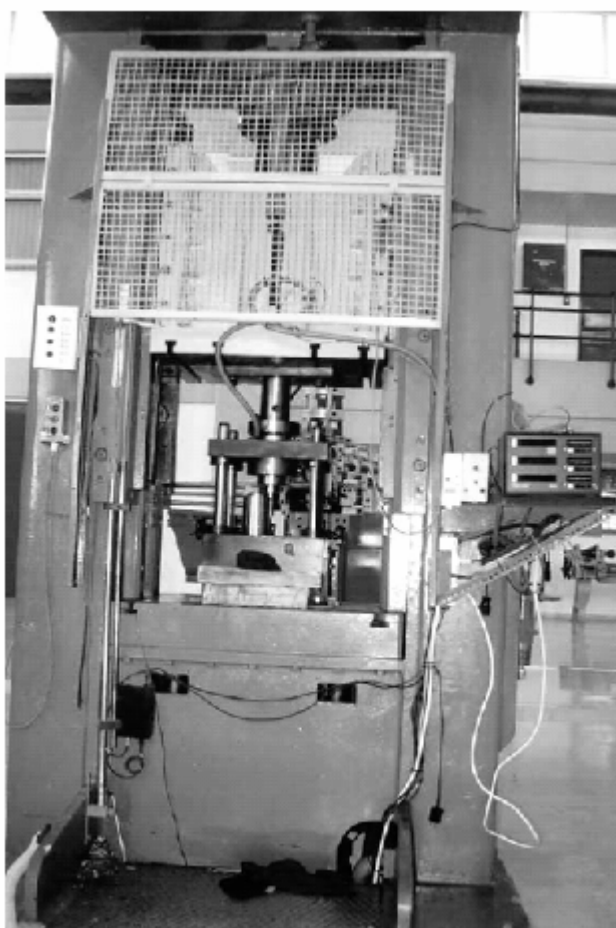
Εικόνα 2.8: Καμπύλη Φορτίου – Μετατόπισης Δοκιμίου από Χυτό Αλουμίνιο Al-6063 F25, Διαστάσεων $\varnothing 10\text{mm} \times 20\text{mm}$

Σημείωση: Επιπλέον στοιχεία για τα υλικά των πειραμάτων δίνονται στο Κεφάλαιο 3.

2.3 Πρέσσα

Η διέλαση των διμεταλλικών σωλήνων κυκλικής διατομής διεξήχθη με την Υδραυλική πρέσσα του εργαστηρίου του Τομέα, ονομαστικού φορτίου 100 tn. Πρόκειται για πρέσσα διπλής ενεργείας, η οποία κατασκευάστηκε από την εταιρεία SMG στην Γερμανία. Είναι πρέσσα ορθού πλαισίου (ή τύπου O). Το κύριο έμβολο (άνω) κινείται από επάνω προς τα κάτω και έχει μέγιστη διαδρομή 600 mm. Τέσσερις πείροι σταθερά προσαρμοσμένοι σε μία πλάκα οδηγούν με ακρίβεια μία δεύτερη πλάκα προσαρμοσμένη στο έμβολο, ώστε να εξασφαλίζουν την ευθύτητα της κίνησης. Επίσης, υπάρχει και δευτερεύον (κάτω) έμβολο, το οποίο χρησιμοποιείται κυρίως σε κατεργασία βαθείας κοίλανσης και χρησιμεύει ως μηχανικός εξολκέας.

Όλες οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν με σταθερή ταχύτητα πρόωσης του εμβόλου 10 mm/min.



Εικόνα 2.9: Πρέσσα ονομαστικού φορτίου 100 tn.

2.4 Παρουσίαση των Δοκιμών και Αποτελέσματα

Για όλα τα διμεταλλικά κυλινδρικά δοκίμια ισχύει ότι:

Υλικό εξωτερικού Σωλήνα: Καθαρός Χαλκός

Εξωτερική Διάμετρος: $D_{out}=25.00\text{ mm}$.

Ύψος Δοκιμίων: $H=40.00\text{mm}$

Τα δοκίμια κατασκευάστηκαν με σύσφιξη (σφικτή συναρμογή) των 2 σωλήνων με την βοήθεια μέγγενης.

Διαφέρουν τα υλικά των εσωτερικών σωλήνων, καθώς επίσης και τα πάχη, τόσο του εξωτερικού όσο και του εσωτερικού σωλήνα.

Από τον Πίνακα 2.1 μπορεί κανείς να δει συγκεντρωτικά τις διαστάσεις των δοκιμίων.

Διαστάσεις Δοκιμίων							
α/α δοκιμίου	Εσωτερικός Κύλινδρος			Εξωτερικός Κύλινδρος			Ύψος
	Πάχος Υλικού (mm)	Εσωτερική Διάμετρος (mm)	Εξωτερική Διάμετρος (mm)	Πάχος Υλικού (mm)	Εσωτερική Διάμετρος (mm)	Εξωτερική Διάμετρος (mm)	(mm)
1	4	15	23	1	23	25	40
2	3	15	21	2	21	25	40
3	2.5	15	20	2.5	20	25	40
4	2	15	19	3	19	25	40
5	1	15	17	4	17	25	40
6	3	17	23	1	23	25	40
7	2	17	21	2	21	25	40
8	1	17	19	3	19	25	40
9	2	19	23	1	23	25	40
10	1.5	19	22	1.5	22	25	40
11	1	19	21	2	21	25	40
12	1	21	23	1	23	25	40

Πίνακας 2.1: Διαστάσεις δοκιμίων πειραματικής διαδικασίας

2.4.1 Δοκίμιο #1

Το εξωτερικό στρώμα (χαλκός) έχει πάχος $t_{out}=1.00\text{ mm}$ και το εσωτερικό στρώμα (χυτό αλουμίνιο Al 6063 F25) έχει πάχος $t_{in}=4.00\text{mm}$. Συνεπώς, η εσωτερική διάμετρος του διμεταλλικού σωλήνα είναι $D_{in}=15.00\text{ mm}$.

Στις επόμενες φωτογραφίες φαίνεται η μορφή του δοκιμίου Δ1.



Εικόνες 2.10: Απόψεις του δοκιμίου #1 (Δ1) πριν την κατεργασία της διέλασης

Μετά την διέλαση μέσω κωνικής μήτρας, η εικόνα του διμεταλλικού δοκιμίου είναι η ακόλουθη:



Εικόνα 2.11: Άποψη του δοκιμίου #1 (Δ1) μετά την κατεργασία της διέλασης

Παρατηρείται εντονότερη ροή του εσωτερικού στρώματος του διμεταλλικού σωλήνα κατά την αξονική διεύθυνση, σε σχέση με την αντίστοιχη ροή του εξωτερικού στρώματος. Κατά τη διάρκεια της διέλασης το εσωτερικό στρώμα είναι σαν να διέρχεται μέσω νέου καλουπιού που αποτελούν η μήτρα και το εξωτερικό στρώμα μαζί. Ο βαθμός παραμόρφωσης των δύο στρωμάτων είναι διαφορετικός και το καθένα διελάσσεται με το δικό του τρόπο. Επίσης παρατηρούνται κάποιες κυματώσεις στην επιφάνεια του αλουμινίου και έντονα ωσειδής τελική μορφή του άνω τμήματος εξαιτίας της ανάπτυξης ισχυρών θλιπτικών φορτίων στην περιοχή αυτή. Βέβαια, αυτό δεν ενδιαφέρει τόσο, καθώς αυτό το τμήμα του δοκιμίου αποκόπτεται, ώστε να προκύψει το τελικό προϊόν.

Τελικό Μήκος Εσωτερικού Στρώματος: 45.8mm (+14.5%)

Τελικό Μήκος Εξωτερικού Στρώματος: 41.6mm (+4.0%)

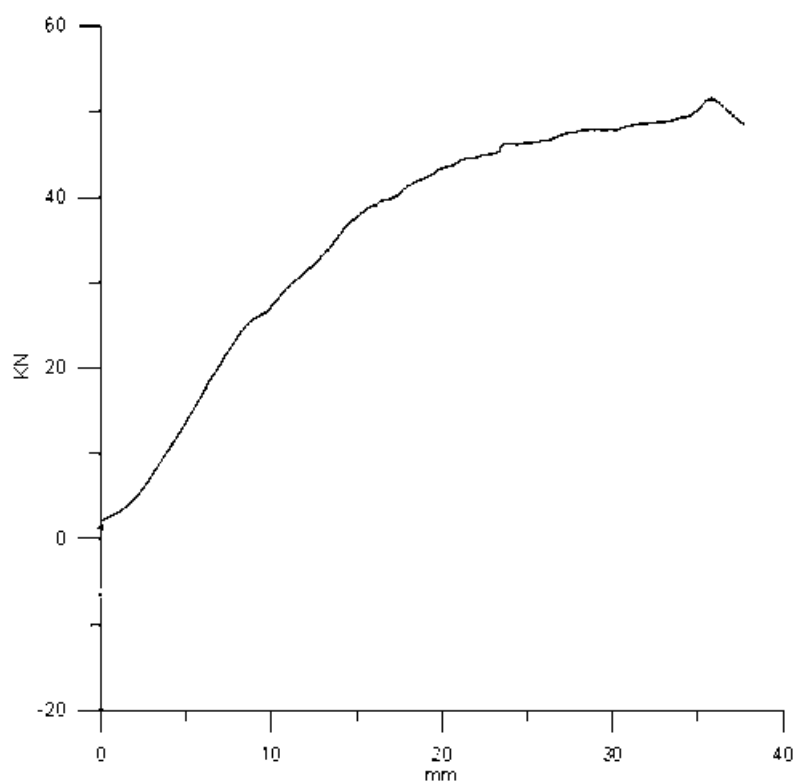
Τελική Διάμετρος: 20.1mm

Τελικό Πάχος Χαλκού: 1.2mm (+20.0%)

Η επιθυμητή τελική διάμετρος του σωλήνα είναι 20.0mm. Η διαφορά της τάξης του 0.1mm παρατηρείται πιθανώς εξαιτίας ελαστικής επαναφοράς της ροής του υλικού.

Διαπιστώνεται δε ότι ο χαλκός παραμορφώνεται περισσότερο κατά το πάχος και λιγότερο κατά το μήκος.

Στο επόμενο διάγραμμα δίνεται η καμπύλη φορτίου-μετατόπισης για το συγκεκριμένο πείραμα.



Διάγραμμα 2.1: Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης για την κατεργασία διέλασης του δοκιμίου #1

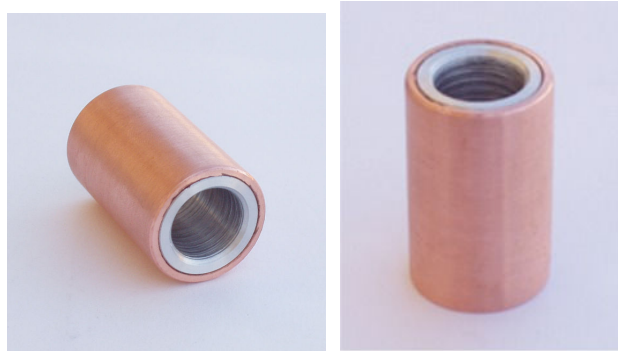
Η διαδρομή του εμβόλου ήταν 38.00mm και το μέγιστο φορτίο, το οποίο σημειώνεται λίγο πριν το τέλος της διαδρομής του εμβόλου, είναι 51.50kN.

Παρατηρείται ότι η καμπύλη είναι αρκετά «λεία» και έχει συνεχή ανοδική πορεία μέχρι την φάση της αστάθειας. Το διάγραμμα παρουσιάζει αυτή την μορφή, η οποία δεν είναι τυπική μορφή διαγράμματος διέλασης, πιθανότατα λόγω του υλικού του εσωτερικού σωλήνα, το οποίο δημιουργεί εν γένει προβλήματα στην κατεργασία.

2.4.2 Δοκίμιο #2

Το εξωτερικό στρώμα (χαλκός) έχει πάχος $t_{out}=2.00$ mm και το εσωτερικό στρώμα (χυτό αλουμίνιο Al 6063 F25) έχει πάχος $t_{in}=3.00$ mm. Συνεπώς, η εσωτερική διάμετρος του διμεταλλικού σωλήνα είναι $D_{in}=15.00$ mm.

Στις επόμενες φωτογραφίες φαίνεται η μορφή του δοκιμίου Δ2.



Εικόνες 2.12: Απόψεις του δοκιμίου #2 (Δ2) πριν την κατεργασία της διέλασης

Μετά την διέλαση μέσω κωνικής μήτρας, η εικόνα του διμεταλλικού δοκιμίου είναι η ακόλουθη:



Εικόνα 2.13: Άποψη του δοκιμίου #2 (Δ2) μετά την κατεργασία της διέλασης

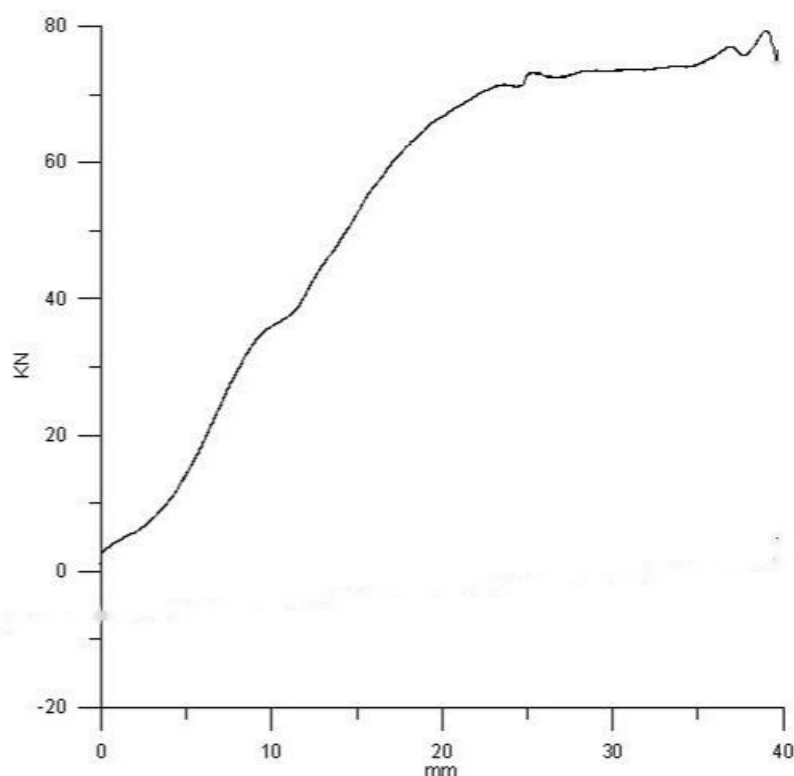
Παρατηρείται εντονότερη ροή του εσωτερικού στρώματος του διμεταλλικού σωλήνα κατά την αξονική διεύθυνση, σε σχέση με την αντίστοιχη ροή του εξωτερικού στρώματος, όπως και στην προηγούμενη δοκιμή. Κατά τη διάρκεια της διέλασης το εσωτερικό στρώμα είναι σαν να διέρχεται μέσω νέου καλουπιού που αποτελούν η μήτρα και το εξωτερικό στρώμα μαζί. Ο βαθμός παραμόρφωσης των δύο στρωμάτων είναι διαφορετικός και το καθένα διελάσσεται με το δικό του τρόπο. Επίσης παρατηρούνται κάποιες κυματώσεις στην επιφάνεια του αλουμινίου και ελαφρά ωσειδής τελική μορφή του άνω τμήματος εξαιτίας της ανάπτυξης ισχυρών θλιπτικών φορτίων στην περιοχή αυτή από το έμβολο. Βέβαια, και πάλι αυτό δεν ενδιαφέρει τόσο, καθώς αυτό το τμήμα του δοκιμίου αποκόπτεται, ώστε να προκύψει το τελικό προϊόν.

Τελικό Μήκος Εσωτερικού Στρώματος: 46.1mm (+15.3%)

Τελικό Μήκος Εξωτερικού Στρώματος: 40.9mm (+2.3%)

Τελική Διάμετρος: 20.0mm

Διαπιστώνεται ότι ο χαλκός παραμορφώνεται λιγότερο κατά το μήκος σε σχέση με το αλουμίνιο. Στο επόμενο διάγραμμα δίνεται η καμπύλη φορτίου-μετατόπισης για το συγκεκριμένο πείραμα.



Διάγραμμα 2.2: Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης για την κατεργασία διέλασης του δοκιμίου #2

Η διαδρομή του εμβόλου ήταν 39.70mm και το μέγιστο φορτίο, το οποίο σημειώνεται λίγο πριν το τέλος της διαδρομής του εμβόλου, είναι 79.80kN.

Παρατηρείται ότι, εξαιρουμένων κάποιων μικρών διακυμάνσεων, η καμπύλη έχει ανοδική πορεία, μέχρι την φάση της αστάθειας. Το διάγραμμα παρουσιάζει αυτή την μορφή, η οποία δεν είναι τυπική μορφή διαγράμματος διέλασης, πιθανότατα λόγω του υλικού του εσωτερικού σωλήνα, το οποίο δημιουργεί εν γένει προβλήματα στην κατεργασία, όπως συνέβη και στην προηγούμενη δοκιμή.

2.4.3 Δοκίμιο #3

Το εξωτερικό στρώμα (χαλκός) έχει πάχος $t_{out}=2.50\text{mm}$ και το εσωτερικό στρώμα (κράμα αλουμινίου Al 6063 F25) έχει πάχος $t_{in}=2.50\text{mm}$. Συνεπώς, η εσωτερική διάμετρος του διμεταλλικού σωλήνα είναι $D_{in}=15.00\text{ mm}$.

Στις επόμενες φωτογραφίες φαίνεται η μορφή του δοκιμίου Δ3



Εικόνες 2.14: Απόψεις του δοκιμίου #3 (Δ3) πριν την κατεργασία της διέλασης

Μετά την διέλαση μέσω κωνικής μήτρας, η εικόνα του διμεταλλικού δοκιμίου είναι η ακόλουθη:



Εικόνα 2.15: Άποψη του δοκιμίου #3 (Δ3) μετά την κατεργασία της διέλασης

Παρατηρείται εντονότερη ροή του εσωτερικού στρώματος του διμεταλλικού σωλήνα κατά την αξονική διεύθυνση, σε σχέση με την αντίστοιχη ροή του εξωτερικού στρώματος, όπως και στην προηγούμενη δοκιμή. Κατά τη διάρκεια της διέλασης το εσωτερικό στρώμα είναι σαν να διέρχεται μέσω νέου καλουπιού που αποτελούν η μήτρα και το εξωτερικό στρώμα μαζί. Ο βαθμός παραμόρφωσης των δύο στρωμάτων είναι διαφορετικός και το καθένα διελάσσεται με το δικό του τρόπο. Επίσης παρατηρείται και απομάκρυνση των 2 στρωμάτων στην κορυφή του δοκιμίου. Το αποτέλεσμα μάλλον δεν κρίνεται ως ιδιαίτερα ικανοποιητικό.

Τελικό Μήκος Εσωτερικού Στρώματος: 51.3mm (+28.3%)

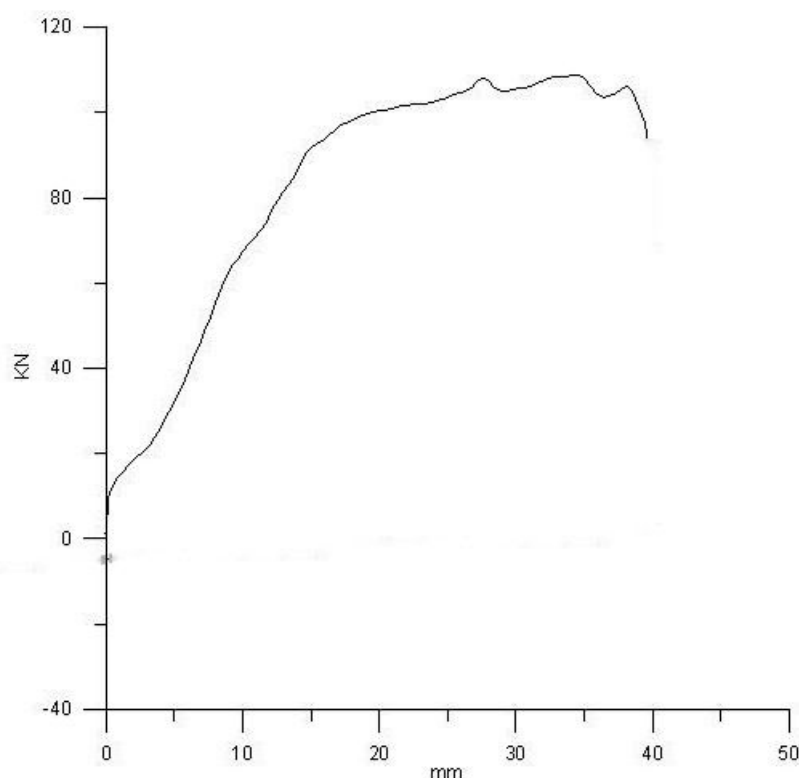
Τελικό Μήκος Εξωτερικού Στρώματος: 40.5mm (+1.3%)

Τελική Διάμετρος: 20.1mm

Η επιθυμητή τελική διάμετρος του σωλήνα είναι 20.0mm. Η διαφορά της τάξης του 0.1mm παρατηρείται πιθανώς εξαιτίας ελαστικής επαναφοράς της ροής του υλικού.

Διαπιστώνεται ότι ο χαλκός παραμορφώνεται πολύ λιγότερο κατά το μήκος σε σχέση με το αλουμίνιο.

Στο επόμενο διάγραμμα δίνεται η καμπύλη φορτίου-μετατόπισης για το συγκεκριμένο πείραμα.



Διάγραμμα 2.3: Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης για την κατεργασία διέλασης του δοκιμίου #3

Η διαδρομή του εμβόλου ήταν 40.10mm και το μέγιστο φορτίο 108.70kN.

Διακρίνονται η μεταβατική φάση της διέλασης (περίπου ως τα 18mm), η ευσταθής φάση (περίπου ως τα 37mm) και η φάση αστάθειας. (Για τις φάσεις διέλασης, βλ. Κεφάλαιο 1).

2.4.4 Δοκίμιο #4

Το εξωτερικό στρώμα (χαλκός) έχει πάχος $t_{out}=3.00\text{mm}$ και το εσωτερικό στρώμα (κράμα αλουμινίου Al 6063 F25) έχει πάχος $t_{in}=2.00\text{mm}$. Συνεπώς, η εσωτερική διάμετρος του διμεταλλικού σωλήνα είναι $D_{in}=15.00\text{ mm}$.

Στις επόμενες φωτογραφίες φαίνεται η μορφή του δοκιμίου Δ4.



Εικόνες 2.16: Απόψεις του δοκιμίου #4 (Δ4) πριν την κατεργασία της διέλασης

Μετά την διέλαση μέσω κωνικής μήτρας, η εικόνα του διμεταλλικού δοκιμίου είναι η ακόλουθη:



Εικόνα 2.17: Άποψη του δοκιμίου #4 (Δ4) μετά την κατεργασία της διέλασης

Παρατηρείται εντονότερη ροή του εσωτερικού στρώματος του διμεταλλικού σωλήνα κατά την αξονική διεύθυνση, σε σχέση με την αντίστοιχη ροή του εξωτερικού στρώματος, όπως και στην προηγούμενη δοκιμή. Κατά τη διάρκεια της διέλασης το εσωτερικό στρώμα είναι σαν να διέρχεται μέσω νέου καλουπιού που αποτελούν η μήτρα και το εξωτερικό στρώμα μαζί. Ο βαθμός παραμόρφωσης των δύο στρωμάτων είναι διαφορετικός και το καθένα διελάσσεται με το δικό του τρόπο. Επίσης, παρατηρείται και μετατόπιση του υλικού του εσωτερικού σωλήνα προς τα πάνω. Αυτό το φαινόμενο εξηγείται ως εξής: Κατά την εξόλκευση, το δοκίμιο συμπιέζεται με έμβολο διαμέτρου $D=20.00\text{mm}$ με φορά από το τμήμα εξόδου της μήτρας προς το

τμήμα εισόδου (βλέπε Εικόνες 2.1 & 2.3). Ο εσωτερικός σωλήνας λοιπόν, καθώς συμπιέστηκε κατά την εξόλκευση ολίσθησε προς την αντίθετη κατεύθυνση και γι' αυτό εμφανίζεται αυτή η μορφή. Στην ουσία, το άνω προεξέχον τμήμα του σωλήνα είναι η αξονική παραμόρφωση που έλαβε κατά την διάρκεια της διέλασης, όπως στην περίπτωση όλων των άλλων δοκιμίων. Βέβαια, αυτό δεν ενδιαφέρει τόσο, καθώς αυτό το τμήμα του δοκιμίου αποκόπτεται, ώστε να προκύψει το τελικό προϊόν.

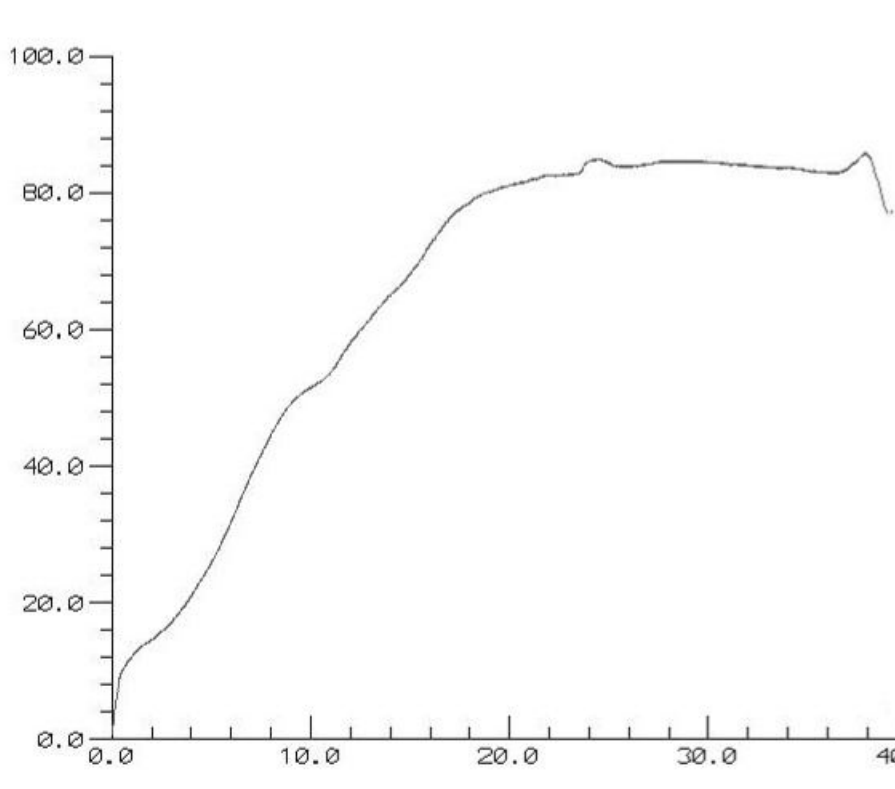
Τελικό Μήκος Εσωτερικού Στρώματος: 48.7mm (+21.8%)

Τελικό Μήκος Εξωτερικού Στρώματος: 43.9mm (+9.8%)

Τελική Διάμετρος: 20.1mm

Η επιθυμητή τελική διάμετρος του σωλήνα είναι 20.0mm. Η διαφορά της τάξης του 0.1mm παρατηρείται πιθανώς εξαιτίας ελαστικής επαναφοράς της ροής του υλικού.

Διαπιστώνεται ότι ο χαλκός παραμορφώνεται λιγότερο κατά το μήκος σε σχέση με το αλουμίνιο. Στο επόμενο διάγραμμα δίνεται η καμπύλη φορτίου-μετατόπισης για το συγκεκριμένο πείραμα.



Διάγραμμα 2.4: Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης για την κατεργασία διέλασης του δοκιμίου #4

Η διαδρομή του εμβόλου ήταν 39.25mm και το μέγιστο φορτίο 85.70kN.

Διακρίνονται η μεταβατική φάση της διέλασης (περίπου ως τα 17mm), η ευσταθής φάση (περίπου ως τα 36mm) και η φάση αστάθειας. (Για τις φάσεις διέλασης, βλ. Κεφάλαιο 1).

2.4.5 Δοκίμιο #5

Το εξωτερικό στρώμα (χαλκός) έχει πάχος $t_{out}=4.00\text{mm}$ και το εσωτερικό στρώμα (κράμα αλουμινίου Al 6063 F25) έχει πάχος $t_{in}=1.00\text{mm}$. Συνεπώς, η εσωτερική διάμετρος του διμεταλλικού σωλήνα είναι $D_{in}=15.00\text{ mm}$.

Στις επόμενες φωτογραφίες φαίνεται η μορφή του δοκιμίου Δ5



Εικόνες 2.18: Απόψεις του δοκιμίου #5 (Δ5) πριν την κατεργασία της διέλασης

Μετά την διέλαση μέσω κωνικής μήτρας, η εικόνα του διμεταλλικού δοκιμίου είναι η ακόλουθη:



Εικόνα 2.19: Άποψη του δοκιμίου #5 (Δ5) μετά την κατεργασία της διέλασης

Δεν παρατηρείται εντονότερη ροή του εσωτερικού στρώματος του διμεταλλικού σωλήνα κατά την αξονική διεύθυνση, σε σχέση με την αντίστοιχη ροή του εξωτερικού στρώματος. Ωστόσο, παρατηρούνται κάποιες κυματώσεις στην επιφάνεια του αλουμινίου και ελαφρά ωσειδής τελική μορφή του άνω τμήματος εξαιτίας της ανάπτυξης ισχυρών θλιπτικών φορτίων στην περιοχή αυτή. Βέβαια, αυτό δεν ενδιαφέρει τόσο, καθώς αυτό το τμήμα του δοκιμίου αποκόπεται, ώστε να προκύψει το τελικό προϊόν.

Τελικό Μήκος Εσωτερικού Στρώματος: 42.9mm (+7.3%)

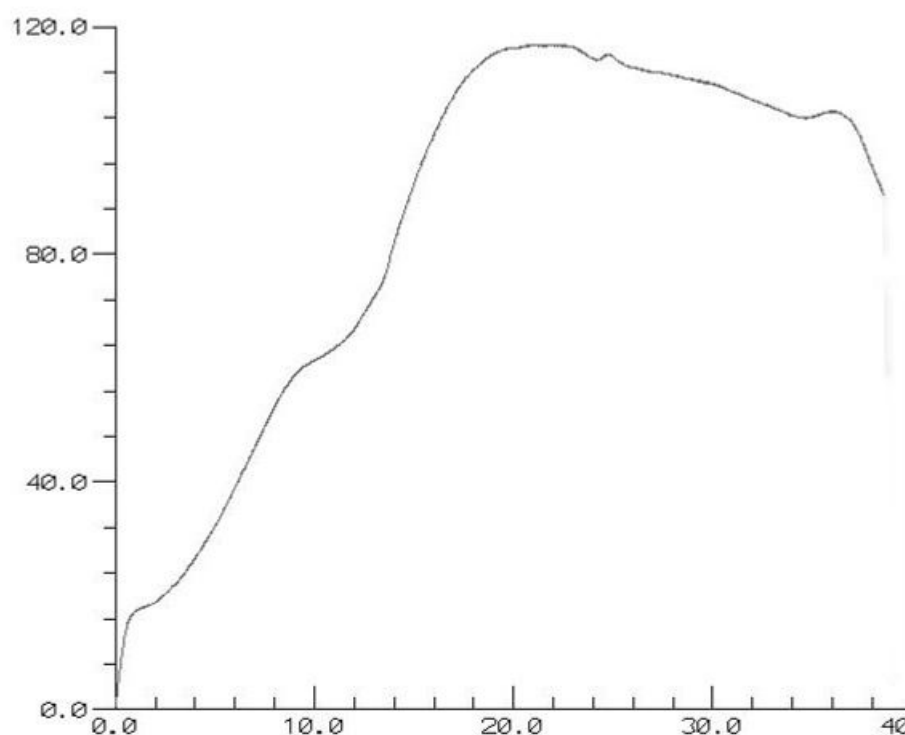
Τελικό Μήκος Εξωτερικού Στρώματος: 42.3mm (+5.8%)

Τελική Διάμετρος: 20.2mm

Η επιθυμητή τελική διάμετρος του σωλήνα είναι 20.0mm. Η διαφορά της τάξης του 0.2mm παρατηρείται πιθανώς εξαιτίας ελαστικής επαναφοράς της ροής του υλικού.

Διαπιστώνεται ότι ο χαλκός παραμορφώνεται κατά τι λιγότερο κατά το μήκος σε σχέση με το αλουμίνιο.

Στο επόμενο διάγραμμα δίνεται η καμπύλη φορτίου-μετατόπισης για το συγκεκριμένο πείραμα.



Διάγραμμα 2.5: Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης για την κατεργασία διέλασης του δοκιμίου #5

Η διαδρομή του εμβόλου ήταν 38.80mm και το μέγιστο φορτίο, το οποίο σημειώθηκε όταν το έμβολο είχε διανύσει περί τα 21mm, ήταν 116.80kN.

Η καμπύλη εμφανίζει μεγάλες διακυμάνσεις και είναι σχετικά δύσκολο να προσδιοριστούν οι διάφορες φάσεις της διέλασης, αλλά κατά προσέγγιση θεωρείται ότι η μεταβατική φάση διαρκεί ως τα 20mm περίπου, και ακολουθεί η ευσταθής φάση, ως τα 34mm, από όπου ξεκινά η ασταθής φάση.

2.4.6 Δοκίμιο #6

Το εξωτερικό στρώμα (χαλκός) έχει πάχος $t_{out}=1.00\text{mm}$ και το εσωτερικό στρώμα (χυτό αλουμίνιο Al 6063 F25) έχει πάχος $t_{in}=3.00\text{mm}$. Συνεπώς, η εσωτερική διάμετρος του διμεταλλικού σωλήνα είναι $D_{in}=17.00\text{ mm}$.

Στις επόμενες φωτογραφίες φαίνεται η μορφή του δοκιμίου Δ6.



Εικόνες 2.20: Απόψεις του δοκιμίου #6 (Δ6) πριν την κατεργασία της διέλασης

Μετά την διέλαση μέσω κωνικής μήτρας, η εικόνα του διμεταλλικού δοκιμίου είναι η ακόλουθη:



Εικόνα 2.21: Άποψη του δοκιμίου #6 (Δ6) μετά την κατεργασία της διέλασης

Παρατηρείται εντονότερη ροή του εσωτερικού στρώματος του διμεταλλικού σωλήνα κατά την αξονική διεύθυνση, σε σχέση με την αντίστοιχη ροή του εσωτερικού στρώματος. Κατά τη διάρκεια της διέλασης το εσωτερικό στρώμα είναι σαν να διέρχεται μέσω νέου καλουπιού που αποτελούν η μήτρα και το εξωτερικό στρώμα μαζί. Ο βαθμός παραμόρφωσης των δύο στρωμάτων είναι διαφορετικός και το καθένα διελάσσεται με το δικό του τρόπο. Επίσης παρατηρούνται ιδιαίτερα έντονες κυματώσεις στην επιφάνεια του αλουμινίου και ανομοιογενής, έντονα ωσειδής τελική μορφή του άνω τμήματος εξαιτίας της ανάπτυξης ισχυρών θλιπτικών φορτίων στην περιοχή αυτή. Ενδεχομένως γι' αυτό να ευθύνεται και το

υλικό του εσωτερικού σωλήνα, το οποίο έχει ιδιότητες που δεν είναι τυποποιημένες. Βέβαια, αυτό δεν ενδιαφέρει τόσο, καθώς αυτό το τμήμα του δοκιμίου αποκόπτεται, ώστε να προκύψει το τελικό προϊόν.

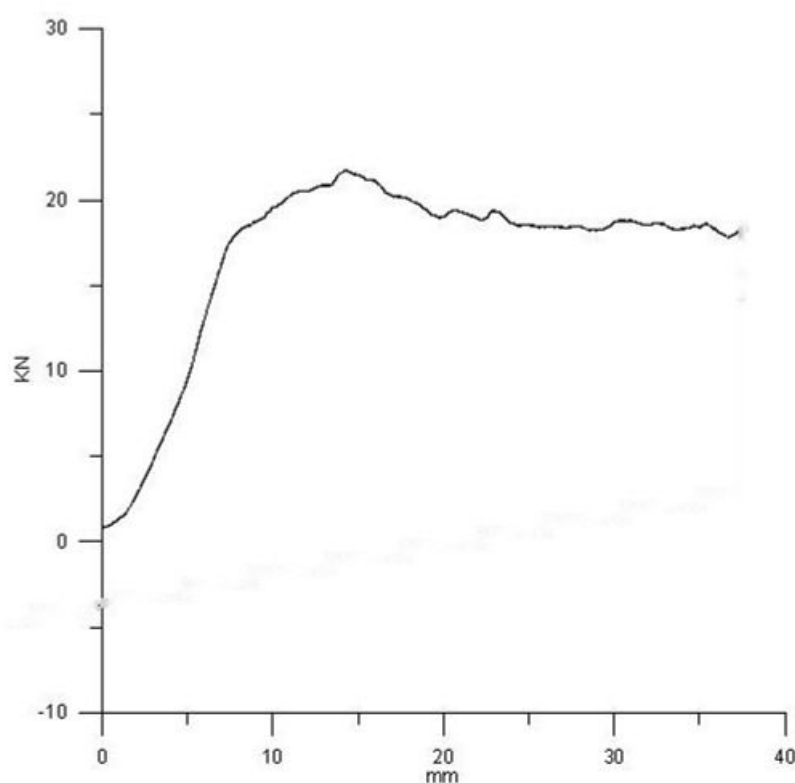
Τελικό Μήκος Εσωτερικού Στρώματος: 46.4mm (+16.0%)

Τελικό Μήκος Εξωτερικού Στρώματος: 42.5mm (+6.3%)

Τελική Διάμετρος: 20.1mm

Η επιθυμητή τελική διάμετρος του σωλήνα είναι 20.0mm. Η διαφορά της τάξης του 0.1mm παρατηρείται πιθανώς εξαιτίας ελαστικής επαναφοράς της ροής του υλικού.

Διαπιστώνεται ότι ο χαλκός παραμορφώνεται λιγότερο κατά το μήκος σε σχέση με το αλουμίνιο. Στο επόμενο διάγραμμα δίνεται η καμπύλη φορτίου-μετατόπισης για το συγκεκριμένο πείραμα.



Διάγραμμα 2.6: Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης για την κατεργασία διέλασης του δοκιμίου #6

Η διαδρομή του εμβόλου ήταν 37.50mm και το μέγιστο φορτίο, το οποίο σημειώθηκε όταν το έμβολο είχε διανύσει περί τα 15mm, ήταν 21.70kN.

Διακρίνονται η μεταβατική φάση της διέλασης (περίπου ως τα 8mm), και η ευσταθής φάση (ως το τέλος της κατεργασίας). Στο διάγραμμα εμφανίζεται αυτή η μορφή, η οποία δεν είναι τυπική μορφή διαγράμματος διέλασης, πιθανότατα λόγω του υλικού του εσωτερικού σωλήνα, το οποίο δημιουργεί εν γένει προβλήματα στην κατεργασία.

2.4.7 Δοκίμιο #7

Το εξωτερικό στρώμα (χαλκός) έχει πάχος $t_{out}=2.00\text{mm}$ και το εσωτερικό στρώμα (χυτό αλουμίνιο Al 6063 F25) έχει πάχος $t_{in}=2.0\text{mm}$. Συνεπώς, η εσωτερική διάμετρος του διμεταλλικού σωλήνα είναι $D_{in}=17.00\text{ mm}$.

Στις επόμενες φωτογραφίες φαίνεται η μορφή του δοκιμίου Δ7.



Εικόνες 2.22: Απόψεις του δοκιμίου #7 (Δ7) πριν την κατεργασία της διέλασης

Μετά την διέλαση μέσω κωνικής μήτρας, η εικόνα του διμεταλλικού δοκιμίου είναι η ακόλουθη:



Εικόνα 2.23: Άποψη του δοκιμίου #7 (Δ7) μετά την κατεργασία της διέλασης

Παρατηρείται ελαφρώς εντονότερη ροή του εσωτερικού στρώματος του διμεταλλικού σωλήνα κατά την αξονική διεύθυνση, σε σχέση με την αντίστοιχη ροή του εξωτερικού στρώματος, όπως και στην προηγούμενη δοκιμή. Κατά τη διάρκεια της διέλασης το εσωτερικό στρώμα είναι σαν να διέρχεται μέσω νέου καλουπιού που αποτελούν η μήτρα και το εξωτερικό στρώμα μαζί. Ο βαθμός παραμόρφωσης των δύο στρωμάτων είναι διαφορετικός και το καθένα διελάσσεται με το δικό του τρόπο. Επίσης παρατηρούνται κάποιες κυματώσεις στην επιφάνεια του αλουμινίου εξαιτίας της ανάπτυξης ισχυρών θλιπτικών φορτίων στην περιοχή αυτή και απομάκρυνση των 2 στρωμάτων στο άνω τμήμα του δοκιμίου.

Τελικό Μήκος Εσωτερικού Στρώματος: 45.3mm (+13.3%)

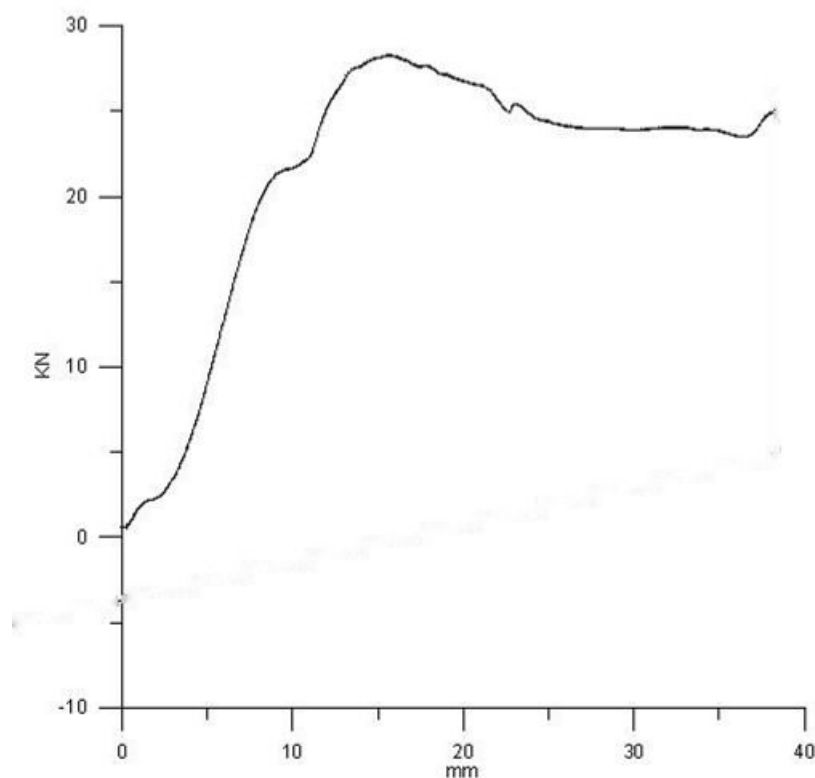
Τελικό Μήκος Εξωτερικού Στρώματος: 43.5mm (+8.8%)

Τελική Διάμετρος: 20.1mm

Η επιθυμητή τελική διάμετρος του σωλήνα είναι 20.0mm. Η διαφορά της τάξης του 0.1mm παρατηρείται πιθανώς εξαιτίας ελαστικής επαναφοράς της ροής του υλικού.

Διαπιστώνεται ότι ο χαλκός παραμορφώνεται λιγότερο κατά το μήκος σε σχέση με το αλουμίνιο.

Στο επόμενο διάγραμμα δίνεται η καμπύλη φορτίου-μετατόπισης για το συγκεκριμένο πείραμα.



Διάγραμμα 4.7: Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης για την κατεργασία διέλασης του δοκιμίου #7

Η διαδρομή του εμβόλου ήταν 38.30mm και το μέγιστο φορτίο, το οποίο σημειώθηκε όταν το έμβολο είχε διανύσει περί τα 15mm, ήταν 28.30kN.

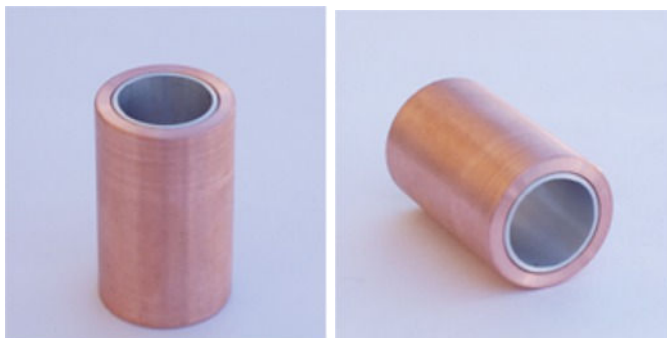
Διακρίνονται η μεταβατική φάση της διέλασης (περίπου ως τα 14mm), η ευσταθής φάση (περίπου ως τα 37mm) και η φάση αστάθειας. (Για τις φάσεις διέλασης, βλ. Κεφάλαιο 1).

Παρόλο που το υλικό του εσωτερικού σωλήνα (χυτό αλουμίνιο) δημιούργησε εν γένει προβλήματα στις υπόλοιπες δοκιμές, στο συγκεκριμένο πείραμα η συμπεριφορά του κρίνεται ως ικανοποιητική.

2.4.8 Δοκίμιο #8

Το εξωτερικό στρώμα (χαλκός) έχει πάχος $t_{out}=3.00\text{mm}$ και το εσωτερικό στρώμα (κράμα αλουμινίου Al 6063 F25) έχει πάχος $t_{in}=1.00\text{mm}$. Συνεπώς, η εσωτερική διάμετρος του διμεταλλικού σωλήνα είναι $D_{in}=17.00\text{ mm}$.

Στις επόμενες φωτογραφίες φαίνεται η μορφή του δοκιμίου Δ8.



Εικόνες 2.24: Απόψεις του δοκιμίου #8 (Δ8) πριν την κατεργασία της διέλασης

Μετά την διέλαση μέσω κωνικής μήτρας, η εικόνα του διμεταλλικού δοκιμίου είναι η ακόλουθη:



Εικόνα 2.25: Άποψη του δοκιμίου #8 (Δ8) μετά την κατεργασία της διέλασης

Δεν παρατηρείται εντονότερη αξονική ροή του εσωτερικού στρώματος του διμεταλλικού σωλήνα σε σχέση με το εξωτερικό στρώμα. Η μορφή του δοκιμίου είναι η προβλεπόμενη και δεν παρατηρούνται ανομοιογένειες στα υλικά.

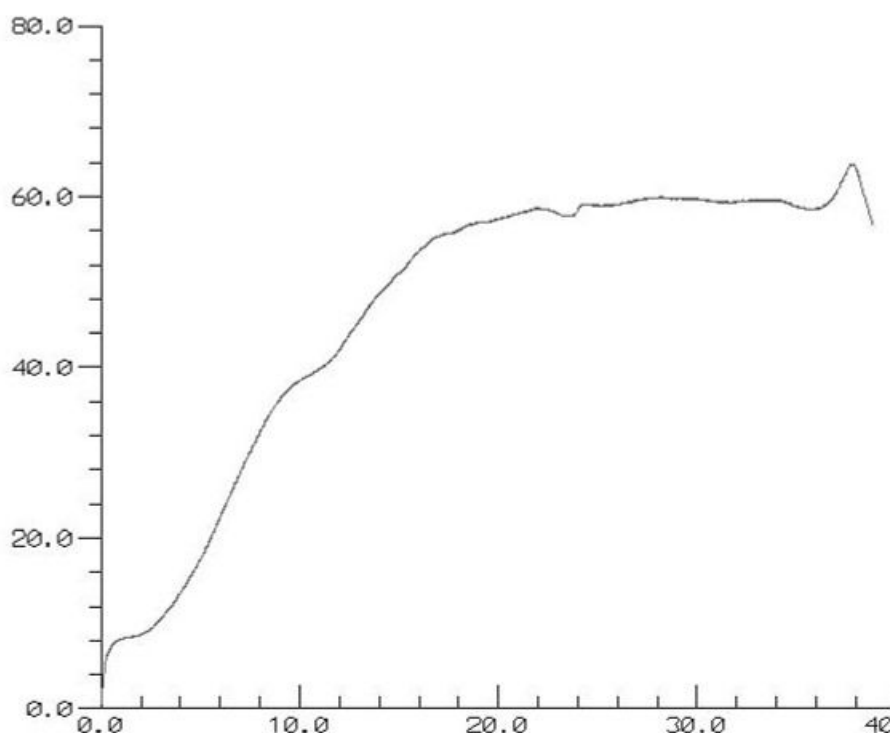
Τελικό Μήκος Εσωτερικού Στρώματος: 43.0mm (+7.5%)

Τελικό Μήκος Εξωτερικού Στρώματος: 42.1mm (+5.3%)

Τελική Διάμετρος: 20.0mm

Διαπιστώνεται ότι ο χαλκός παραμορφώνεται κατά τι λιγότερο κατά το μήκος σε σχέση με το αλουμίνιο.

Στο επόμενο διάγραμμα δίνεται η καμπύλη φορτίου-μετατόπισης για το συγκεκριμένο πείραμα.



Διάγραμμα 2.8: Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης για την κατεργασία διέλασης του δοκιμίου #8

Η διαδρομή του εμβόλου ήταν 38.90mm και το μέγιστο φορτίο, το οποίο σημειώθηκε λίγο πριν το τέλος της διαδρομής του εμβόλου, ήταν 63.80kN.

Διακρίνονται η μεταβατική φάση της διέλασης (περίπου ως τα 17mm), η ευσταθής φάση (περίπου ως τα 35mm) και η φάση αστάθειας. (Για τις φάσεις διέλασης, βλ. Κεφάλαιο 1).

2.4.9 Δοκίμιο #9

Το εξωτερικό στρώμα (χαλκός) έχει πάχος $t_{out}=1.00\text{mm}$ και το εσωτερικό στρώμα (κράμα αλουμινίου Al 6063 F25) έχει πάχος $t_{in}=2.00\text{mm}$. Συνεπώς, η εσωτερική διάμετρος του διμεταλλικού σωλήνα είναι $D_{in}=19.00\text{ mm}$.

Στις επόμενες φωτογραφίες φαίνεται η μορφή του δοκιμίου Δ9.



Εικόνες 2.26: Απόψεις του δοκιμίου #9 (Δ9) πριν την κατεργασία της διέλασης

Μετά την διέλαση μέσω κωνικής μήτρας, η εικόνα του διμεταλλικού δοκιμίου είναι η ακόλουθη:



Εικόνα 2.27: Άποψη του δοκιμίου #9 (Δ9) μετά την κατεργασία της διέλασης

Παρατηρείται εντονότερη ροή του εσωτερικού στρώματος του διμεταλλικού σωλήνα κατά την αξονική διεύθυνση, σε σχέση με την αντίστοιχη ροή του εξωτερικού στρώματος. Κατά τη διάρκεια της διέλασης το εσωτερικό στρώμα είναι σαν να διέρχεται μέσω νέου καλουπιού που αποτελούν η μήτρα και το εξωτερικό στρώμα μαζί. Ο βαθμός παραμόρφωσης των δύο στρωμάτων είναι διαφορετικός και το καθένα διελάσσεται με το δικό του τρόπο. Επίσης παρατηρούνται κάποιες κυματώσεις στην επιφάνεια του αλουμινίου και ωοειδής τελική μορφή

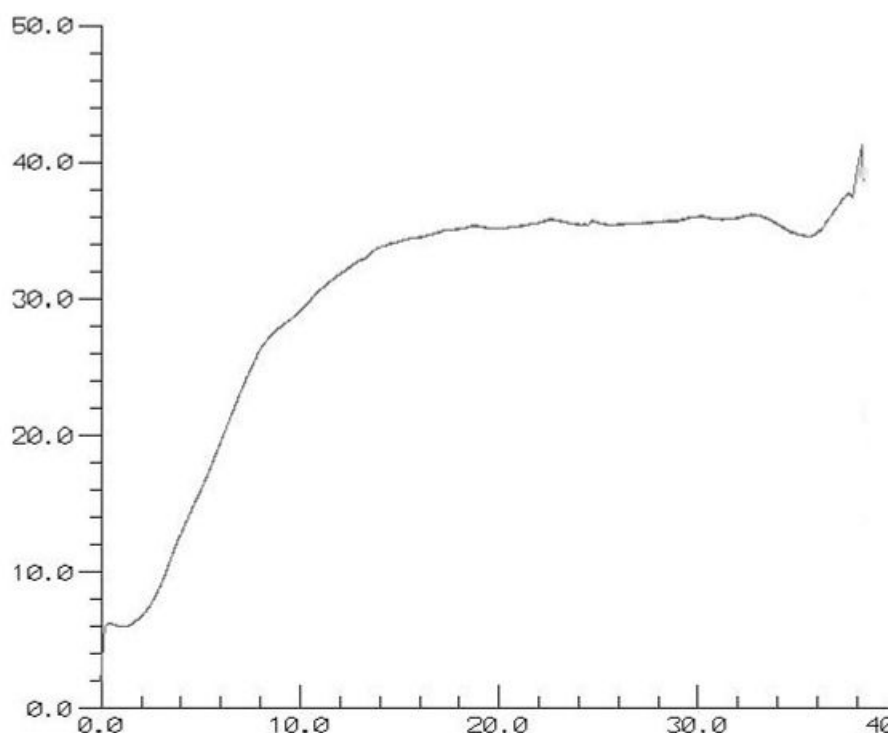
του άνω τμήματος εξαιτίας της ανάπτυξης ισχυρών θλιπτικών φορτίων στην περιοχή αυτή. Βέβαια, αυτό δεν ενδιαφέρει τόσο, καθώς αυτό το τμήμα του δοκιμίου αποκόπτεται, ώστε να προκύψει το τελικό προϊόν.

Τελικό Μήκος Εσωτερικού Στρώματος: 44.5mm (+11.3%)

Τελικό Μήκος Εξωτερικού Στρώματος: 40.4mm (+1.0%)

Τελική Διάμετρος: 20.0mm

Διαπιστώνεται ότι ο χαλκός παραμορφώνεται λιγότερο κατά το μήκος σε σχέση με το αλουμίνιο. Στο επόμενο διάγραμμα δίνεται η καμπύλη φορτίου-μετατόπισης για το συγκεκριμένο πείραμα.



Διάγραμμα 2.9: Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης για την κατεργασία διέλασης του δοκιμίου #9

Η διαδρομή του εμβόλου ήταν 38.30mm και το μέγιστο φορτίο, το οποίο σημειώθηκε στο σημείο της μέγιστης διαδρομής του εμβόλου, ήταν 41.26kN. Ωστόσο, το φορτίο πριν από αυτό το σημείο ήταν σταθερό και περίπου ίσο με 34 kN.

Διακρίνονται η μεταβατική φάση της διέλασης (περίπου ως τα 15mm), η ευσταθής φάση (περίπου ως τα 34mm) και η φάση αστάθειας. (Για τις φάσεις διέλασης, βλ. Κεφάλαιο 1).

2.4.10 Δοκίμιο #10

Το εξωτερικό στρώμα (χαλκός) έχει πάχος $t_{out}=1.50\text{mm}$ και το εσωτερικό στρώμα (κράμα αλουμινίου Al 6063 F25) έχει πάχος $t_{in}=1.50\text{mm}$. Συνεπώς, η εσωτερική διάμετρος του διμεταλλικού σωλήνα είναι $D_{in}=19.00\text{ mm}$.

Στις επόμενες φωτογραφίες φαίνεται η μορφή του δοκιμίου Δ10.



Εικόνες 2.28: Απόψεις του δοκιμίου #10 (Δ10) πριν την κατεργασία της διέλασης

Μετά την διέλαση μέσω κωνικής μήτρας, η εικόνα του διμεταλλικού δοκιμίου είναι η ακόλουθη:



Εικόνα 2.29: Άποψη του δοκιμίου #10 (Δ10) μετά την κατεργασία της διέλασης

Παρατηρείται εντονότερη ροή του εσωτερικού στρώματος του διμεταλλικού σωλήνα κατά την αξονική διεύθυνση, σε σχέση με την αντίστοιχη ροή του εξωτερικού στρώματος, όπως και στην προηγούμενη δοκιμή. Κατά τη διάρκεια της διέλασης το εσωτερικό στρώμα είναι σαν να διέρχεται μέσω νέου καλουπιού που αποτελούν η μήτρα και το εξωτερικό στρώμα μαζί. Ο βαθμός παραμόρφωσης των δύο στρωμάτων είναι διαφορετικός και το καθένα διελάσσεται με το δικό του τρόπο. Επίσης παρατηρούνται κάποιες κυματώσεις στην επιφάνεια του αλουμινίου και ελαφρά ωσειδής τελική μορφή του άνω τμήματος εξαιτίας της ανάπτυξης ισχυρών θλιπτικών φορτίων στην περιοχή αυτή.

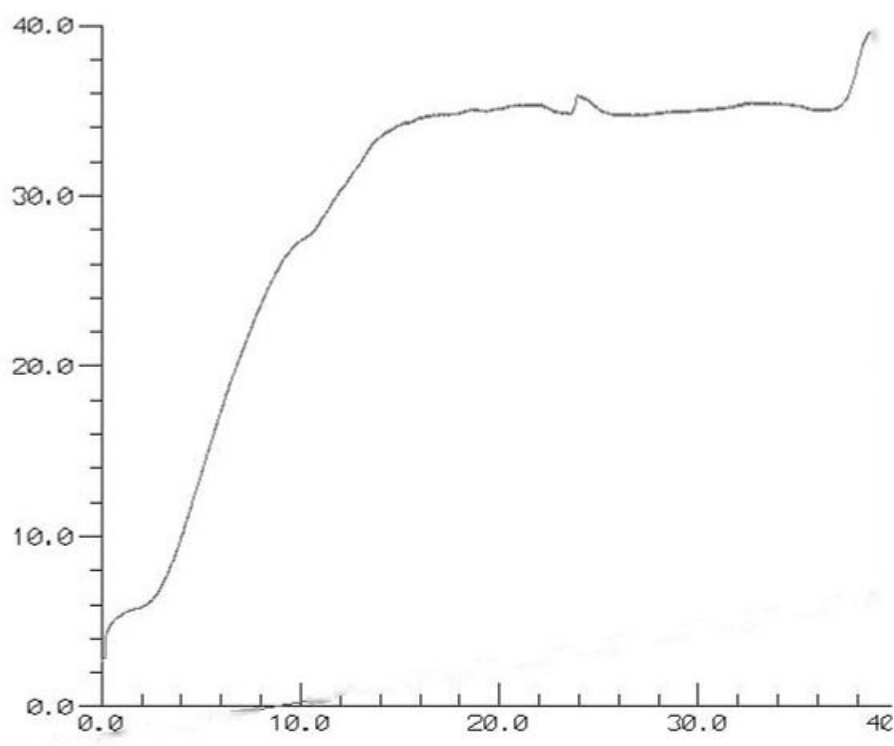
Τελικό Μήκος Εσωτερικού Στρώματος: 44.2mm (+10.5%)

Τελικό Μήκος Εξωτερικού Στρώματος: 41.8mm (+4.5%)

Τελική Διάμετρος: 20.0mm

Διαπιστώνεται και πάλι ότι ο χαλκός παραμορφώνεται λιγότερο κατά το μήκος σε σχέση με το αλουμίνιο.

Στο επόμενο διάγραμμα δίνεται η καμπύλη φορτίου-μετατόπισης για το συγκεκριμένο πείραμα.



Διάγραμμα 2.10: Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης για την κατεργασία διέλασης του δοκιμίου #10

Η διαδρομή του εμβόλου ήταν 38.80mm και το μέγιστο φορτίο, το οποίο σημειώθηκε στο σημείο της μέγιστης διαδρομής του εμβόλου, ήταν 39.60kN. Κατά τα άλλα, πριν από το σημείο του μέγιστου, το φορτίο είναι περί τα 34 kN.

Διακρίνονται η μεταβατική φάση της διέλασης (περίπου ως τα 16mm), η ευσταθής φάση (περίπου ως τα 35mm) και η φάση αστάθειας. (Για τις φάσεις διέλασης, βλ. Κεφάλαιο 1).

2.4.11 Δοκίμιο #11

Το εξωτερικό στρώμα (χαλκός) έχει πάχος $t_{out}=2.00\text{mm}$ και το εσωτερικό στρώμα (κράμα αλουμινίου Al 6063 F25) έχει πάχος $t_{in}=1.00\text{mm}$. Συνεπώς, η εσωτερική διάμετρος του διμεταλλικού σωλήνα είναι $D_{in}=19.00\text{ mm}$.

Στις επόμενες φωτογραφίες φαίνεται η μορφή του δοκιμίου Δ11.



Εικόνες 2.30: Απόψεις του δοκιμίου #11 (Δ11) πριν την κατεργασία της διέλασης

Μετά την διέλαση μέσω κωνικής μήτρας, η εικόνα του διμεταλλικού δοκιμίου είναι η ακόλουθη:



Εικόνα 2.31: Αποψη του δοκιμίου #11 (Δ11) μετά την κατεργασία της διέλασης

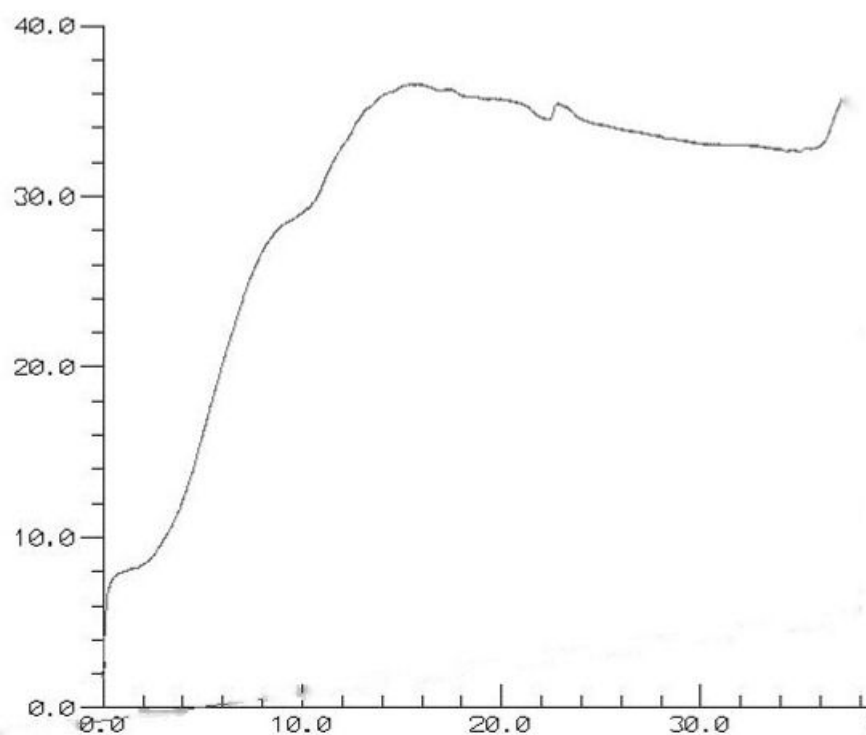
Παρατηρείται εντονότερη ροή του εσωτερικού στρώματος του διμεταλλικού σωλήνα κατά την αξονική διεύθυνση, σε σχέση με την αντίστοιχη ροή του εξωτερικού στρώματος, όπως και στην προηγούμενη δοκιμή. Κατά τη διάρκεια της διέλασης το εσωτερικό στρώμα είναι σαν να διέρχεται μέσω νέου καλουπιού που αποτελούν η μήτρα και το εξωτερικό στρώμα μαζί. Ο βαθμός παραμόρφωσης των δύο στρωμάτων είναι διαφορετικός και το καθένα διελάσσεται με το δικό του τρόπο.

Τελικό Μήκος Εσωτερικού Στρώματος: 44.0mm (+10.0%)

Τελικό Μήκος Εξωτερικού Στρώματος: 42.5mm (+6.3%)

Τελική Διάμετρος: 20.0mm

Διαπιστώνεται ότι ο χαλκός παραμορφώνεται λιγότερο κατά το μήκος σε σχέση με το αλουμίνιο. Στο επόμενο διάγραμμα δίνεται η καμπύλη φορτίου-μετατόπισης για το συγκεκριμένο πείραμα.



Διάγραμμα 2.11: Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης για την κατεργασία διέλασης του δοκιμίου #11

Η διαδρομή του εμβόλου ήταν 37.70mm και το μέγιστο φορτίο, το οποίο σημειώθηκε όταν το έμβολο είχε διανύσει περί τα 15mm, ήταν 36.56kN.

Διακρίνονται η μεταβατική φάση της διέλασης (περίπου ως τα 15mm), η ευσταθής φάση (περίπου ως τα 33mm) και η φάση αστάθειας. (Για τις φάσεις διέλασης, βλ. Κεφάλαιο 1).

2.4.12 Δοκίμιο #12

Το εξωτερικό στρώμα (χαλκός) έχει πάχος $t_{out}=1.00\text{mm}$ και το εσωτερικό στρώμα (κράμα αλουμινίου Al 6063 F25) έχει πάχος $t_{in}=1.00\text{mm}$. Συνεπώς, η εσωτερική διάμετρος του διμεταλλικού σωλήνα είναι $D_{in}=21.00\text{ mm}$.

Στις επόμενες φωτογραφίες φαίνεται η μορφή του δοκιμίου Δ12.



Εικόνες 2.32: Απόψεις του δοκιμίου #12 (Δ12) πριν την κατεργασία της διέλασης

Μετά την διέλαση μέσω κωνικής μήτρας, η εικόνα του διμεταλλικού δοκιμίου είναι η ακόλουθη:



Εικόνα 2.33: Άποψη του δοκιμίου #12 (Δ12) μετά την κατεργασία της διέλασης

Παρατηρείται εντονότερη ροή του εσωτερικού στρώματος του διμεταλλικού σωλήνα κατά την αξονική διεύθυνση, σε σχέση με την αντίστοιχη ροή του εξωτερικού στρώματος, όπως και στην προηγούμενη δοκιμή. Κατά τη διάρκεια της διέλασης το εσωτερικό στρώμα είναι σαν να διέρχεται μέσω νέου καλουπιού που αποτελούν η μήτρα και το εξωτερικό στρώμα μαζί. Ο βαθμός παραμόρφωσης των δύο στρωμάτων είναι διαφορετικός και το καθένα διελάσσεται με το δικό του τρόπο.

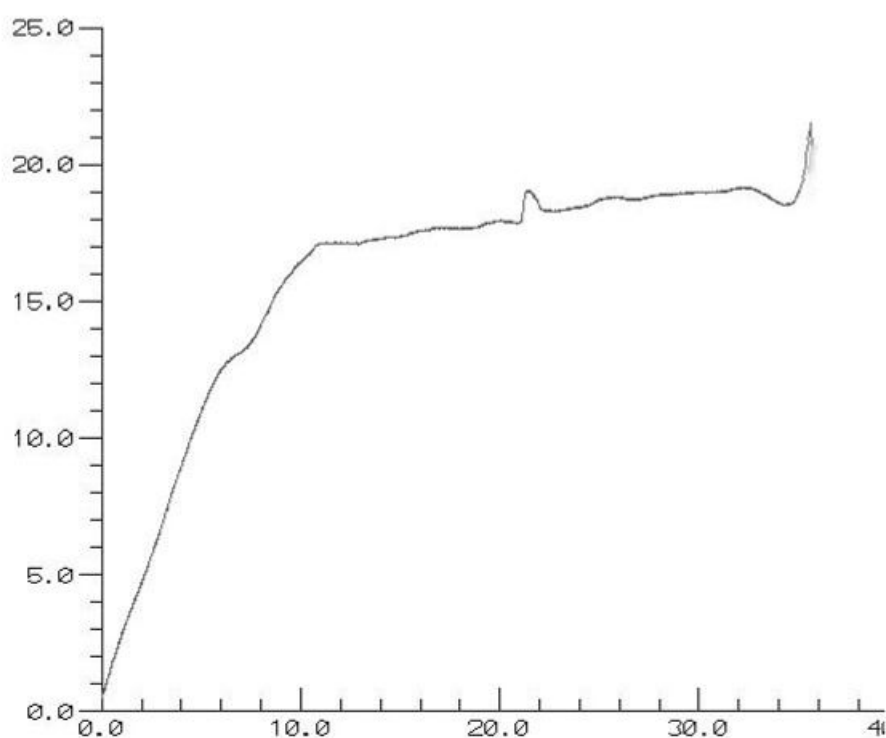
Τελικό Μήκος Εσωτερικού Στρώματος: 43.4mm (+8.5%)

Τελικό Μήκος Εξωτερικού Στρώματος: 41.0mm (+2.5%)

Τελική Διάμετρος: 20.0mm

Διαπιστώνεται ότι ο χαλκός παραμορφώνεται κατά τι λιγότερο κατά το μήκος σε σχέση με το αλουμίνιο.

Στο επόμενο διάγραμμα δίνεται η καμπύλη φορτίου-μετατόπισης για το συγκεκριμένο πείραμα.



Διάγραμμα 2.12: Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης για την κατεργασία διέλασης του δοκιμίου #12

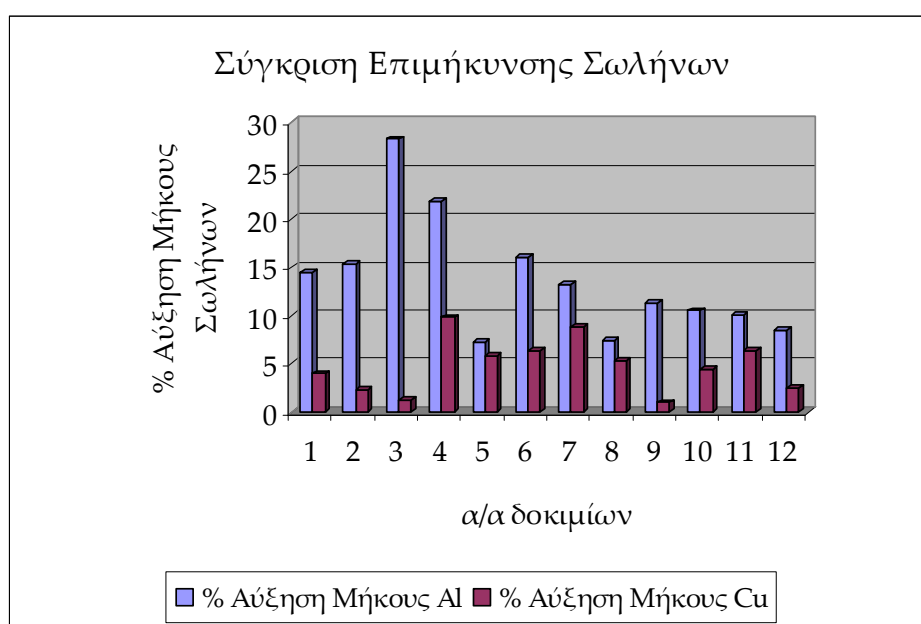
Η διαδρομή του εμβόλου ήταν 35.67mm και το μέγιστο φορτίο, το οποίο σημειώθηκε στο σημείο της μέγιστης διαδρομής του εμβόλου, ήταν 21.52kN.

Διακρίνονται η μεταβατική φάση της διέλασης (περίπου ως τα 11mm), η ευσταθής φάση (περίπου ως τα 32mm) και η φάση αστάθειας. (Για τις φάσεις διέλασης, βλ. Κεφάλαιο 1).

Στον πίνακα 2.2 δίνονται συγκεντρωτικά όλα τα παραπάνω στοιχεία, και ακολουθεί αναπαράστασή τους σε σχετικό διάγραμμα.

α/α Δοκιμίου	Διαδρομή Εμβόλου (mm)	Μέγιστο Φορτίο (kN)	Τελικό Μήκος Al (mm)	% Αύξηση Μήκους Al	Τελικό Μήκος Cu (mm)	% Αύξηση Μήκους Cu
1	38.00	51.50	45.8	+14.5	41.6	+4.0
2	39.70	79.30	46.1	+15.3	40.9	+2.3
3	40.10	108.70	51.3	+28.3	40.5	+1.3
4	39.25	85.70	48.7	+21.8	43.9	+9.8
5	38.80	116.80	42.9	+7.3	42.3	+5.8
6	37.50	21.70	46.4	+16.0	42.5	+6.3
7	38.30	28.30	45.3	+13.3	43.5	+8.8
8	38.90	63.80	43.0	+7.5	42.1	+5.3
9	38.30	41.26	44.5	+11.3	40.4	+1.0
10	38.80	39.60	44.2	+10.5	41.8	+4.5
11	37.70	36.56	44.0	+10.0	42.5	+6.3
12	35.67	21.52	43.4	+8.5	41.0	+2.5

Πίνακας 2.2: Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα Πειραματικής Διαδικασίας.



Διάγραμμα 2.13: Αναπαράσταση συγκριτικών αποτελεσμάτων πειραματικής διαδικασίας

Σημειώνεται ότι το ανωτέρω διάγραμμα προσφέρει απλά οπτικοποίηση των μετρήσεων που διεξήχθησαν μετά την εκτέλεση των πειραματικών δοκιμών.

Κεφάλαιο 3

*Δημιουργία Μοντέλων με
Χρήση του LS-DYNA*

3.0 Εισαγωγή

Επειδή όπως προαναφέρθηκε στον πρόλογο στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση των παραμέτρων μοντελοποίησης της κατεργασίας διέλασης διμεταλλικών σωλήνων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, θεωρήθηκε σημαντικό σε πρώτο στάδιο να δοθούν ορισμένα βασικά στοιχεία σχετικά με τη μέθοδο αυτή, καθώς και τα βασικά βήματα που ακολουθεί προκειμένου να αναλύσει και να μοντελοποιήσει μηχανικά προβλήματα, τα οποία –όπως θα φανεί στη συνέχεια- δεν είναι εύκολα ή / και καθόλου επιλύσιμα με τις κλασικές αναλυτικές μηχανικές μεθόδους. Επίσης, δίνεται με την βοήθεια φωτογραφιών η κατασκευή της γεωμετρίας των μοντέλων. Στη συνέχεια αναλύονται οι παράμετροι της μοντελοποίησης, όπως είναι η ταχύτητα μοντελοποίησης, τα υλικά των δοκιμίων, οι συνθήκες επαφής και άλλα στοιχεία. Οι παράμετροι αυτές εισήχθησαν στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ώστε να προκύψει λύση του προβλήματος της συνδιέλασης διμεταλλικών σωλήνων.

3.1 Βασικά Στοιχεία της Μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων

Όλα τα φυσικά φαινόμενα που αντιμετωπίζονται στη μηχανολογία μοντελοποιούνται από διαφορικές εξισώσεις, [12]. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μια αριθμητική διαδικασία με την οποία γενικές διαφορικές εξισώσεις μπορούν να λυθούν με έναν προσεγγιστικό τρόπο. Παρ' ότι η μέθοδος είναι προσεγγιστική, μπορεί να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα και έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα τα προβλήματα. Το μειονέκτημά της είναι οι αυξημένες απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ, ιδίως όταν εφαρμόζεται σε σύνθετα μοντέλα. Αυτό όμως το μειονέκτημα ξεπεράστηκε τα τελευταία χρόνια χάρη στη ραγδαία ανάπτυξη των υπολογιστών. Η επιτυχία αυτής της μεθόδου ήταν τόσο μεγάλη, που ακόμα και σήμερα χρησιμοποιείται στην έρευνα και στην βιομηχανία για τον υπολογισμό και τη μελέτη διάφορων κατασκευών.

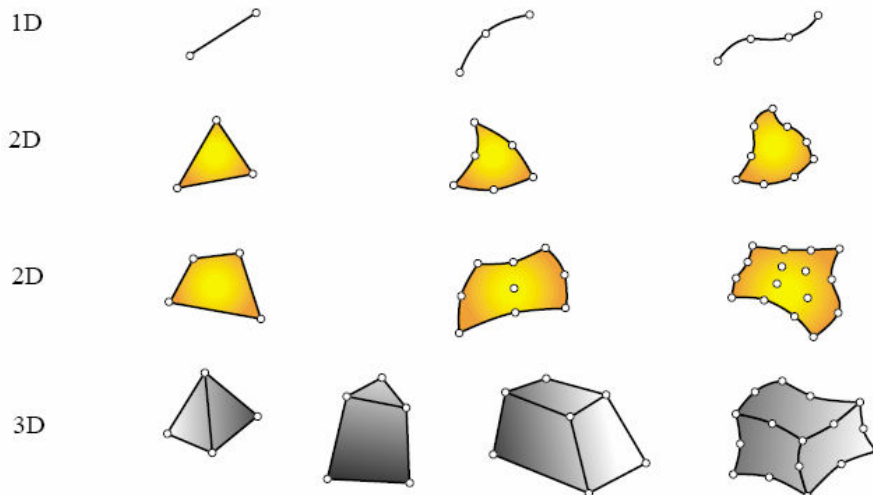
Συνοπτικά, λοιπόν, ένα πεπερασμένο στοιχείο είναι μια υποπεριοχή ενός μέσου (συνεχούς ή διακριτού), με πεπερασμένο μέγεθος και συνήθως πιο απλής γεωμετρίας από το μέσο το οποίο προσομοιάζει.

Κάθε στοιχείο έχει ένα σύνολο από διακεκριμένα σημεία τα οποία αποκαλούνται κομβικά σημεία ή απλά κόμβοι. Οι κόμβοι χρησιμεύουν για δύο λόγους:

1. Ορισμός γεωμετρίας και
2. Ορισμός βαθμών ελευθερίας

Είναι συνήθως τοποθετημένοι στις γωνίες ή στα ακραία σημεία των στοιχείων.

Τα πεπερασμένα στοιχεία διακρίνονται σε μονοδιάστατα, διδιάστατα και τρισδιάστατα στοιχεία. Τα διδιάστατα στοιχεία διακρίνονται σε τριγωνικά (τρικομβικά, 6-κομβικά, κυβικά) στοιχεία και τετραπλευρικά (τετραγωνικά, κυβικά) στοιχεία, ενώ τα τρισδιάστατα στοιχεία διακρίνονται σε τετραγωνικά τετραεδρικά στοιχεία και κυβικά τετραεδρικά στοιχεία, βλ. Σχήμα 3.1.



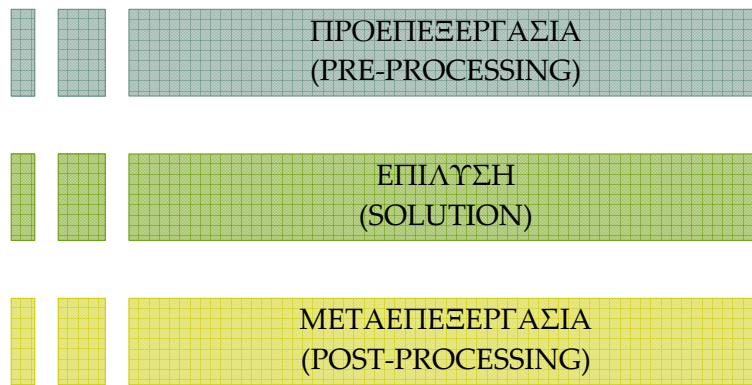
Σχήμα 3.1: Τυπικές γεωμετρίες πεπερασμένων στοιχείων σε μία έως τρεις διαστάσεις

Η υποδιαίρεση μιας ολόσωμης κατασκευής σε πεπερασμένα στοιχεία είναι αρκετά σύνθετη διαδικασία. Όπως προαναφέρθηκε, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μια προσεγγιστική μέθοδος. Άρα τα αποτελέσματα που παίρνουμε από τη χρήση της μεθόδου σε μια κατασκευή περιέχουν ένα σφάλμα. Το σφάλμα αυτό γίνεται μικρότερο όσο ο αριθμός των στοιχείων που χρησιμοποιούμε στην κατασκευή αυξάνεται. Όμως η αύξηση του αριθμού των στοιχείων προκαλεί και αύξηση του αριθμού των προσδιοριστέων κομβικών παραμέτρων. Στο σημείο αυτό, συνεπώς, πρέπει να βρεθεί μια συμβιβαστική λύση. Συνήθως πραγματοποιείται μια συμπύκνωση των στοιχείων στις περιοχές όπου υπολογίζεται ότι θα υπάρχουν ραγδαίες μεταβολές τάσεων.

Συνοψίζοντας, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων σκοπό έχει να ξεπεράσει το εμπόδιο της μονοδιάστατης ανάλυσης και να διευρύνει τους ορίζοντες της και στις τρεις διαστάσεις γενικεύοντας έτσι τη χρήση της. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων περιλαμβάνει γραμμικά και μη-γραμμικά πακέτα, η ανάλυση των οποίων γίνεται εξολοκλήρου με τη βοήθεια ηλεκτρονικών υπολογιστών. Η χρήση τους έχει ξεκινήσει εδώ και πολλά χρόνια με σκοπό την προσομοίωση της συμπεριφοράς σε θλίψη διαφόρων κατασκευών και τη μελέτη ολοκλήρων συστημάτων αλλά και μεμονωμένων συνιστωσών τους.

3.2 Στάδια Επίλυσης Προβλήματος με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων

Γενικά η διαδικασία κατάστρωσης και επίλυσης ενός προβλήματος με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων με την βοήθεια Η/Υ σε σύστημα CAE (Computer Aided Engineering), όπως είναι το LS-DYNA, στο οποίο μοντελοποιήθηκε η υπό μελέτη κατεργασία διέλασης διμεταλλικών σωλήνων, περιέχει 3 στάδια, τα οποία περιγράφονται στο διάγραμμα 3.1.



Διάγραμμα 3.1: Αλληλουχία Σταδίων Επίλυσης Προβλήματος με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων

Πιο συγκεκριμένα για καθένα από τα 3 προηγούμενα στάδια ισχύουν τα εξής:

■ Προεπεξεργασία

Η προεπεξεργασία αναλαμβάνει να ετοιμάσει τα δεδομένα για την επίλυση. Δηλαδή, θα ετοιμάσει κάποια μητρωικά μεγέθη τα οποία η διαδικασία της επίλυσης θα τα χρησιμοποιήσει για να επιλύσει το πρόβλημα. Ο προεπεξεργαστής μπορεί να αντλήσει δεδομένα από ένα αρχείο δεδομένων ή μπορεί να καταστρώσει το πρόβλημα κατά την εκτέλεση, συνήθως με την βοήθεια κάποιου γραφικού περιβάλλοντος ή με την βοήθεια γραμμών εντολών. Ο προεπεξεργαστής, δηλαδή, ετοιμάζει τις δομές των δεδομένων όπως τις χρειάζεται ο επεξεργαστής για να κάνει την επίλυση.

■ Επίλυση

Η επίλυση αναφέρεται στη μεθοδολογία/διαδικασία που περιγράφει η θεωρία των πεπερασμένων στοιχείων για την επίλυση των προβλημάτων. Αν για παράδειγμα πρόκειται για προβλήματα γραμμικής συμπεριφοράς, τότε η επίλυση είναι η κατάστρωση των πινάκων $[K]$, $[u]$ και $[F]$ από τα δεδομένα κόμβων-στοιχείων-φορτίσεων-δεσμεύσεων, και η επίλυση του συστήματος εξισώσεων. Η διαδικασία του υπολογισμού των παραγώγων μεγεθών (π.χ. τάσεις), μπορεί να ανήκει στην διαδικασία της επίλυσης αλλά και της μεταεπεξεργασίας, για την οποία θα γίνει αναφορά στη συνέχεια. Οι ρουτίνες που περιέχονται στο στάδιο της επίλυσης κάνουν γενικά απλές πράξεις πινάκων, όπως πολλαπλασιασμούς, αντιστροφές, κλπ. Το μεγαλύτερο ενδιαφέρον στην διαδικασία της επίλυσης παρουσιάζεται στην κατάστρωση του πίνακα $[K]$ καθώς και στην επίλυση του συστήματος εξισώσεων.

■ Μεταεπεξεργασία

Αφού γίνει η επίλυση, ακολουθεί η μεταεπεξεργασία που στην ουσία είναι η αξιοποίηση των αποτελεσμάτων της επίλυσης. Αρχικά γίνονται υπολογισμοί παραγώγων μεγεθών. Έπειτα το πρόγραμμα μπορεί να εξαγάγει τα αποτελέσματα είτε στην οθόνη, είτε σε αρχείο, είτε να αναλάβει την γραφική έξοδο των αποτελεσμάτων.

Περισσότερα, όμως, σχετικά με την εφαρμογή των πεπερασμένων στοιχείων σε επίπεδο ηλεκτρονικού υπολογιστή και πιο συγκεκριμένα με χρήση του λογισμικού LS-DYNA, δίνονται στην ενότητα που ακολουθεί.

3.3 Πρόγραμμα Πεπερασμένων Στοιχείων LS-DYNA

Το αρχαιότερο εν ενεργεία εμπορικό πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων, είναι το NASTRAN, ενώ η συστηματική παράθεση των σημερινών υπαρχόντων προγραμμάτων και των δυνατοτήτων τους, θα μπορούσε να αποτελέσει ένα ογκώδες εγχειρίδιο. Άλλα γενικής χρήσης παρόμοια προγράμματα είναι τα εξής: ABAQUS, ALGOR, ANSYS, 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.α. Εξειδικευμένα προγράμματα για συνδυασμένη κινηματική και ελαστική ανάλυση μηχανισμών είναι: ADAMS, DADS.

Για την προσομοίωση των πειραματικών δοκιμών χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα LS DYNA, το οποίο διαθέτει το εργαστήριο του τομέα τεχνολογίας των κατεργασιών. Πρόκειται για ένα λογισμικό που χρησιμοποιεί EXPLICIT κώδικα και ειδικεύεται στην ανάλυση μη γραμμικών δυναμικών τριδιάστατων προβλημάτων (προβλήματα πλαστικής παραμόρφωσης). Η Εταιρεία κατασκευής είναι η LIVERMORE SOFTWARE TECHNOLOGY CORPORATION. Η τρέχουσα έκδοση, η οποία και χρησιμοποιήθηκε, ήταν η 970.

Αρχικά χρησιμοποιείται ο pre-processor, του οποίου η ονομασία εν προκειμένω είναι Finite Element Model Builder (FEMB), προέρχεται από την εταιρεία ETA, η τρέχουσα έκδοσή του είναι η 28, και με αυτό το εργαλείο κατασκευάζεται το μοντέλο. Για να είναι πλήρες το μοντέλο θα πρέπει να ακολουθηθούν τα εξής βήματα:

- A. Ορίζεται πλήρως η γεωμετρία, δίνοντας τις ακριβείς διαστάσεις,
- B. Δηλώνεται το υλικό, ή τα υλικά από τα οποία αποτελείται το μοντέλο, καθώς και οι φυσικές και μηχανικές τους ιδιότητες,
- C. Διακρίτοποιείται η κατασκευή με πεπερασμένα στοιχεία και δηλώνονται οι ιδιότητες των πεπερασμένων στοιχείων,
- D. Ορίζονται οι 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 του άλλου,
- E. Προσδιορίζονται τα εξωτερικά του φορτία καθώς και οι αρχικές οριακές συνθήκες (αρχική ταχύτητα, αρχική επιτάχυνση κ.τ.λ.).

Τα δεδομένα σώζονται από τον preprocessor σε μορφή ψηφιακού αρχείου τύπου *.fmb στο οποίο περιέχεται όλο το μοντέλο το οποίο θα επιλυθεί με πεπερασμένα στοιχεία από το LSDYNA, και ανά πάσα στιγμή μπορούμε να επέμβουμε και να το τροποποιήσουμε. Επίσης εκτός από το αρχείο *.fmb μπορεί να τα εξάγει και σαν αρχείο κειμένου τύπου *.dyn. Το αρχείο αυτό μπορεί να αναγνωσθεί από οποιονδήποτε editor (πχ Notepad), και ως εκ τούτου να τροποποιηθεί από τον χρήστη, και περιέχει σε μορφή ASCII όσα στοιχεία χρειάζεται ο κώδικας του LSDYNA για να προσομοιώσει την κατεργασία. Αυτή η δυνατότητα είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στον χρήστη όταν οι αλλαγές που επιθυμεί να πραγματοποιήσει είναι σχετικά απλές και μπορούν να πραγματοποιηθούν μέσα από τον editor, δίχως να χρειαστεί να επανέλθει στο περιβάλλον του pre-processor μέσα από το αντίστοιχο αρχείο *.fmb. 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. Στο στάδιο αυτό εκτελείται μη γραμμική δυναμική ανάλυση. Όταν η επίλυση ολοκληρωθεί, το πρόγραμμα παρουσιάζει τα απαραίτητα αρχεία στα οποία έχουν καταγραφεί τα αποτελέσματα της επεξεργασίας.

Τα αρχεία αυτά είναι τύπου *.d3plot και *.graph και χρησιμοποιούνται από τον post-processor και graph-processor (POST-GL εταιρείας ETA) αντίστοιχα, για να γίνει η παρουσίαση των αποτελεσμάτων στον χρήστη με μορφή γραφημάτων για τις δυνάμεις και τάσεις, αλλά και τα ίδια τα animation, για την ακριβή προσομοίωση της κατεργασίας. Με τα αποτελέσματα που εξάγονται φτιάχνεται το διάγραμμα φορτίου P-μετατόπισης s, στον Graph Processor.

Γεωμετρικές ατέλειες, ασυνέχειες του υλικού, ανακρίβειες διαστάσεων κ.ά. που εισήχθησαν στο δοκίμιο κατά την κατεργασία δεν λαμβάνονται υπόψη, οπότε η όλη μοντελοποίηση βασίζεται σε ονομαστικές διαστάσεις και ιδανική γεωμετρία [8].

Σημείωση:

Οι εξισώσεις ισορροπίας που διέπουν την δυναμική απόκριση ενός συστήματος πεπερασμένων στοιχείων είναι της μορφής:

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + KU = R \quad (3.1)$$

Όπου \mathbf{M} , \mathbf{C} , \mathbf{K} τα μητρώα μάζας, ελαστικότητας και δυσκαμψίας αντίστοιχα, \mathbf{R} το εξωτερικά επιβαλλόμενο διάνυσμα φορτίου, U, \dot{U}, \ddot{U} τα διανύσματα μετατόπισης, ταχύτητας και επιτάχυνσης.

$F_I(t) = M\ddot{U}$, $F_D(t) = C\dot{U}$, $F_E(t) = KU$, $R(t)$ είναι οι δυνάμεις αδράνειας, απόσβεσης, ελαστικότητας και τα εξωτερικά επιβαλλόμενα φορτία αντίστοιχα.

Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί ότι ο κώδικας πεπερασμένων στοιχείων LS-DYNA είναι explicit κώδικας, δηλαδή χρησιμοποιεί την μέθοδο της «Κεντρικής Διαφοράς», η οποία για τον υπολογισμό της μετατόπισης, της ταχύτητας και της επιτάχυνσης απαιτεί να ικανοποιούνται οι εξισώσεις:

$$\ddot{U}_t = \frac{1}{\Delta t^2} (U_{t-\Delta t} - 2U_t + U_{t+\Delta t}) \quad (3.2)$$

$$\dot{U}_t = \frac{1}{2\Delta t} (-U_{t-\Delta t} + U_{t+\Delta t}) \quad (3.3)$$

όπου το Δt είναι το κατάλληλο μέγεθος Time Step που απαιτείται για την αριθμητική ολοκλήρωση.

Η επίλυση της εξίσωσης μετατόπισης για τον χρόνο t δίνεται από την εξίσωση (3.1) για τον χρόνο t :

$$M\ddot{U}_t + C\dot{U}_t + KU_t = R_t \quad (3.4)$$

Αντικαθιστώντας στην (3.4) τις εκφράσεις της ταχύτητας και της επιτάχυνσης (3.2), (3.3) προκύπτει:

$$\left(\frac{1}{\Delta t^2} M + \frac{1}{2\Delta t} C \right) U_{t+\Delta t} = R_t - \left(K - \frac{2}{\Delta t^2} M \right) U_t - \left(\frac{1}{\Delta t^2} M - \frac{1}{2\Delta t} C \right) U_{t-\Delta t} \quad (3.5)$$

Η (3.5) δίνει την λύση για $U_{t+\Delta t}$.

Η ως άνω αναφερόμενη μέθοδος ολοκλήρωσης αποκαλείται “explicit” μέθοδος ολοκλήρωσης διότι η λύση για $U_{t+\Delta t}$ υπολογίζεται με χρήση των συνθηκών ισορροπίας για χρόνο t (εξίσωση 3.4). Γι’ αυτόν ακριβώς το λόγο, ένας τέτοιος τρόπος ολοκλήρωσης δεν απαιτεί αποσύνθεση

(παραγοντοποίηση ή τριγωνοποίηση) του ενεργού μητρώου δυσκαμψίας: $\hat{K} = K + a_0 M + a_1 C$ σε μία βήμα προς βήμα επίλυση, από τη στιγμή που το μητρώο δυσκαμψίας δεν εμφανίζεται ως παράγοντας των μετατοπίσεων $U_{t+\Delta t}$ στο αριστερό μέλος της εξίσωσης (3.5). Αντ’ αυτού, το ενεργό μητρώο μάζας: $\hat{M} = a_0 M + a_1 C$, όπου $a_0 = \frac{1}{\Delta t^2}$ και $a_1 = \frac{1}{2\Delta t}$ οι κατάλληλες σταθερές ολοκλήρωσης, πρέπει να αποσυντεθεί ώστε να προκύψει λύση για $U_{t+\Delta t}$ μετά τον απαιτούμενο υπολογισμό του ενεργού παράγοντα φορτίου $\hat{R}_t = R_t - \left[K - \left(\frac{2}{\Delta t^2} \right) M \right] U_t - \left[\left(\frac{1}{\Delta t^2} \right) M - \left(\frac{1}{2\Delta t} \right) C \right] U_{t-\Delta t}$, που απαιτεί μόνον πολλαπλασιασμούς μεταξύ μητρώων ώστε να προκύψει (βλ. εξίσωση 3.5)

Με την “explicit” μέθοδο της κεντρικής διαφοράς, ο υπολογισμός της $U_{t+\Delta t}$ περιλαμβάνει τις U_t και $U_{t-\Delta t}$. Συνεπώς, προκειμένου να υπάρξει υπολογισμός για χρόνο ίσο με Δt (δηλαδή στο τέλος του πρώτου Time Step), έχουμε την ακόλουθη εκκίνηση της διαδικασίας:

Οι εξισώσεις (3.2) και (3.3) για χρόνο $t=0$ (οπότε: $t-\Delta t=-\Delta t$ & $t+\Delta t=\Delta t$) δίνουν:

$$U_{-\Delta t} = U_0 - \Delta t \dot{U}_0 + \frac{\Delta t^2}{2} \ddot{U}_0 \quad (3.6)$$

Όπου οι $U_0, \dot{U}_0, \ddot{U}_0$ είναι γνωστές, εφόσον οι U_0, \dot{U}_0 δίνονται από τις αρχικές συνθήκες και η \ddot{U}_0 υπολογίζεται εύκολα από την εξίσωση (3.1) για χρόνο $t=0$ [9].

3.4 Παρουσίαση των Μοντέλων

Για την μοντελοποίηση της κατεργασίας διέλασης διμεταλλικών σωλήνων μέσω κωνικής μήτρας χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας πεπερασμένων στοιχείων LS-DYNA, version 970. Αρχικά ορίστηκε η γεωμετρία των μοντέλων, η οποία περιελάμβανε την μοντελοποίηση τόσο του εργαλείου (μήτρα και έμβολο) όσο και των 12 δοκιμίων.

Έγινε προσπάθεια ώστε η γεωμετρία των μοντέλων να είναι όσο το δυνατόν πιο πιστή σε σχέση με την πειραματική διαδικασία.

Οι εντολές που εισήχθησαν στο πρόγραμμα Pre-Processor παρατίθενται στο **Παράρτημα 2**.

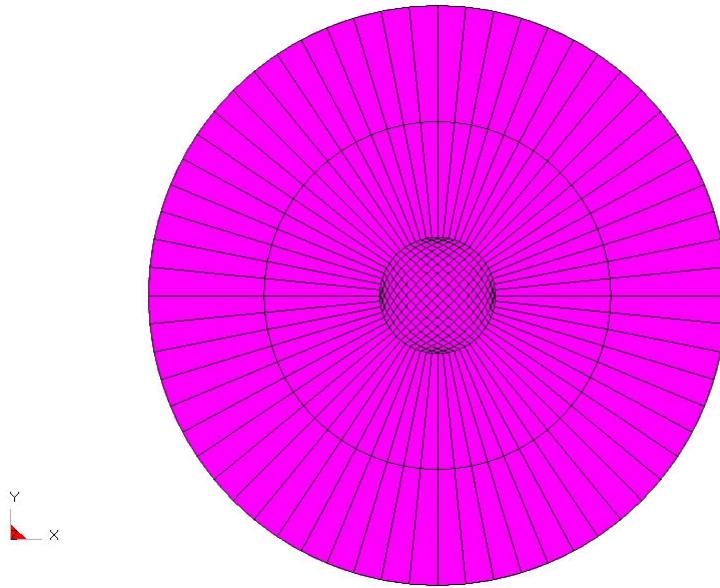
Για την μοντελοποίηση τόσο του εργαλείου όσο και των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκαν πεπερασμένα στοιχεία “plate/solid mesh 12-line”, ευρύτερα γνωστά ως “brick elements”.

3.4.1 Μοντελοποίηση Εμβόλου

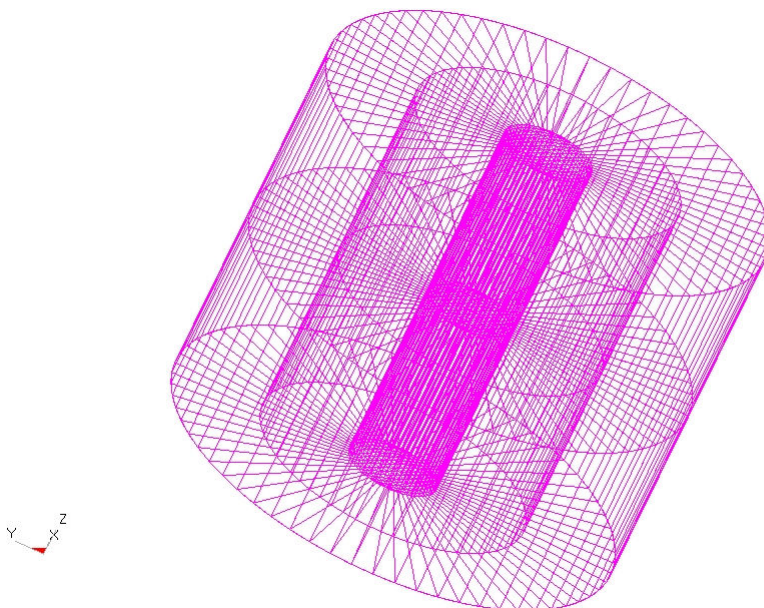
Στην πειραματική διαδικασία το έμβολο ήταν ένας συμπαγής κύλινδρος διαμέτρου $D=25.00\text{mm}$ και ύψους $H=80.00\text{mm}$. Για λόγους απλοποίησης του μοντέλου, ο κύλινδρος ο οποίος δημιουργήθηκε είχε φυσικά διάμετρο $D=25.00\text{mm}$, αλλά ύψος $H'=20.00\text{mm}$. Αρχικά δημιουργήθηκε ένας κυλινδρικός δακτύλιος με πάχος τοιχωμάτων $t=10.00\text{mm}$ και κατόπιν

διακριτοποιήθηκε τόσο ο κυλινδρικός δακτύλιος όσο και η κυλινδρική οπή που προέκυψε. Το πλέγμα (mesh) του κυλινδρικού δακτυλίου ανά τεταρτημόριο κατασκευάστηκε έτσι ώστε να έχει 16 στοιχεία κατά την περιφέρεια, 2 ή 4 στοιχεία κατά το πάχος και 2 στοιχεία κατά το ύψος. Το πλέγμα της κυλινδρικής οπής κατασκευάστηκε έτσι ώστε να έχει 16x16 στοιχεία στη διατομή και 2 στοιχεία κατά το ύψος.

Σε γενικές γραμμές επελέγη αδρή μοντελοποίηση του εμβόλου, λόγω του ότι δεν ενδιαφέρει η μηχανική συμπεριφορά του, καθώς πρόκειται για άκαμπτο και απαραμόρφωτο σώμα. Στις επόμενες εικόνες φαίνεται η μοντελοποίηση και διακριτοποίηση του εμβόλου.



Εικόνα 3.1: Κάτοψη του εμβόλου



Εικόνα 3.2: Ισομετρική άποψη του εμβόλου

3.4.2 Μοντελοποίηση Μήτρας

Στην πειραματική διαδικασία η μήτρα αποτελείται από τα τμήματα, των οποίων περιγραφή και εικόνες παρατίθεται στο 2ο Κεφάλαιο της παρούσης. Για λόγους απλοποίησης του μοντέλου, η μήτρα απλοποιήθηκε ως μονομπλοκ αποτελούμενο από 3 τμήματα:

α. Τμήμα εισόδου

Πρόκειται για κυλινδρικό δακτύλιο εξωτερικής διαμέτρου $D_{out}=90.00\text{mm}$, εσωτερικής διαμέτρου $D_{in}=25.00\text{mm}$ και ύψους $H=67.00\text{mm}$.

Το πλέγμα (mesh) του κυλινδρικού δακτυλίου ανά τεταρτημόριο κατασκευάστηκε έτσι ώστε να έχει 16 στοιχεία κατά την περιφέρεια, 4 στοιχεία κατά το πάχος και 14 στοιχεία κατά το ύψος.

β. Κωνικό τμήμα

Πρόκειται για κώνο κωνικό δακτύλιο με ημιγωνία κωνικότητας 15° . Εξωτερική διάμετρος $D_{out}=90.00\text{mm}$, αρχική εσωτερική διάμετρος $D_{in1}=25.00\text{mm}$, τελική εσωτερική διάμετρος $D_{in2}=20.00\text{mm}$ και ύψος $H=9.26\text{mm}$

Το πλέγμα (mesh) του τμήματος αυτού ανά τεταρτημόριο κατασκευάστηκε έτσι ώστε να έχει 16 στοιχεία κατά την περιφέρεια, 4 στοιχεία κατά το πάχος και 2 στοιχεία κατά το ύψος.

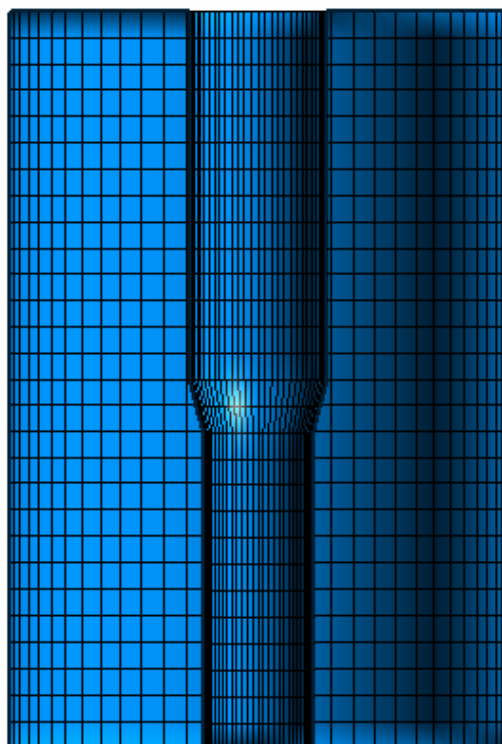
γ. Τμήμα εξόδου

Πρόκειται για κυλινδρικό δακτύλιο εξωτερικής διαμέτρου $D_{out}=90.00\text{mm}$, εσωτερικής διαμέτρου $D_{in}=20.00\text{mm}$ και ύψους $H=57.74\text{mm}$.

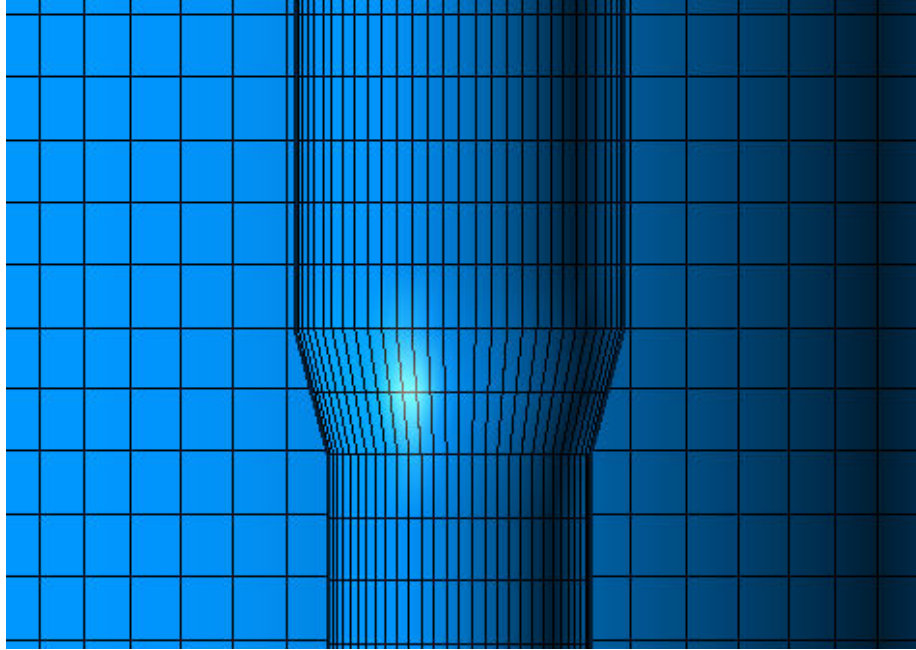
Το πλέγμα (mesh) του κυλινδρικού δακτυλίου ανά τεταρτημόριο κατασκευάστηκε έτσι ώστε να έχει 16 στοιχεία κατά την περιφέρεια, 4 στοιχεία κατά το πάχος και 12 στοιχεία κατά το ύψος.

Σε γενικές γραμμές επελέγη αδρή μοντελοποίηση της μήτρας, λόγω του ότι δεν ενδιαφέρει η μηχανική συμπεριφορά της, καθώς πρόκειται για άκαμπτο και απαραμόρφωτο σώμα.

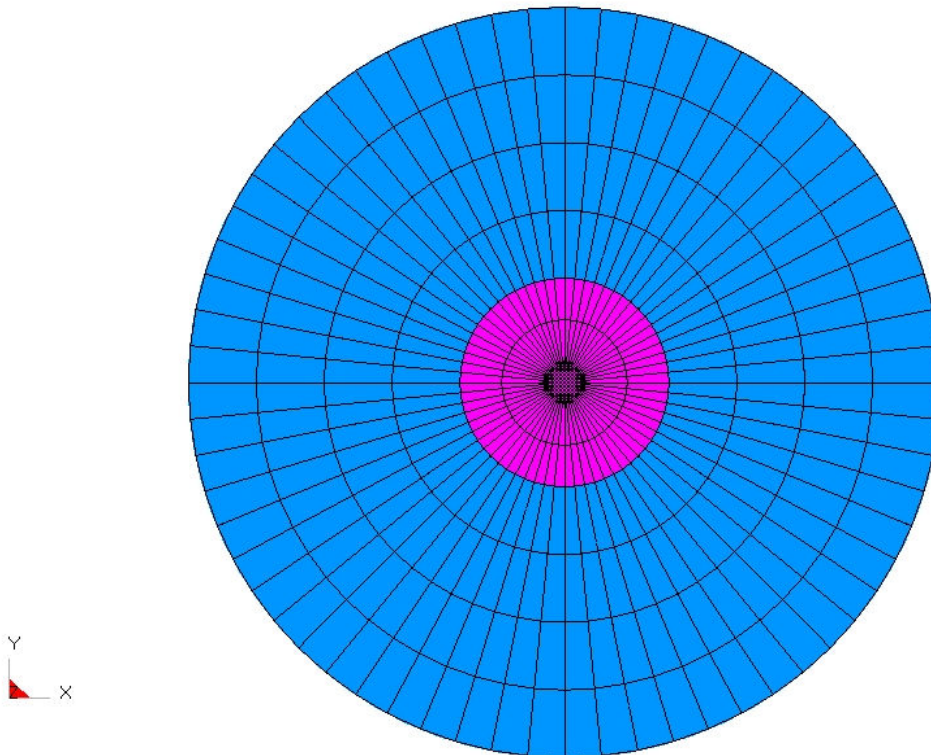
Στις επόμενες εικόνες φαίνεται η μοντελοποίηση και διακριτοποίηση της μήτρας.



Εικόνα 3.3: Τομή της μήτρας



Εικόνα 3.4: Λεπτομέρεια του κωνικού τμήματος της μήτρας (σε τομή)



Εικόνα 3.5: Κάτοψη του εργαλείου (μήτρα – έμβολο)

3.4.3 Μοντελοποίηση Δοκιμίων

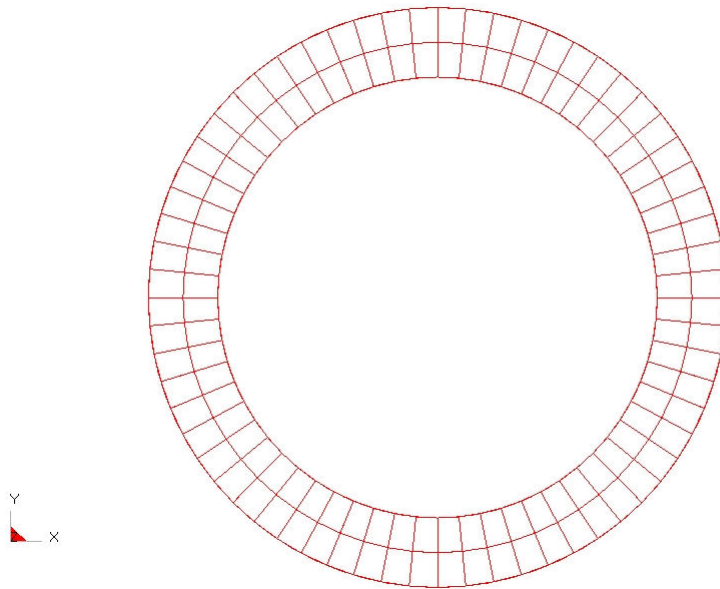
Μοντελοποιήθηκαν χωριστά το εσωτερικό στρώμα του σωλήνα από το εξωτερικό. Οι διαστάσεις των δοκιμίων είναι αυτές που φαίνονται στον πίνακα 2.1.

α) Μοντελοποίηση Εξωτερικού Στρώματος Διμεταλλικού Σωλήνα

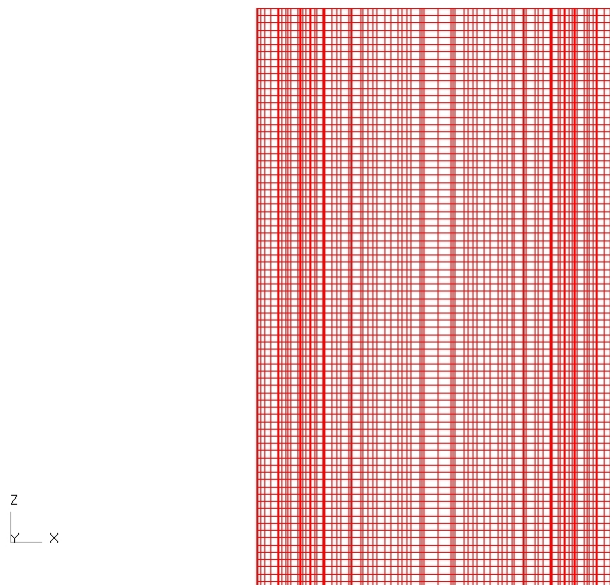
Στην πειραματική διαδικασία οι σωλήνες είχαν εξωτερική διάμετρο $D_{out}=25.00\text{mm}$ και εσωτερική σύμφωνα με τον πίνακα 2.1. Το ύψος ήταν $H=40.00\text{mm}$.

Το πλέγμα (mesh) του κυλινδρικού δακτυλίου ανά τεταρτημόριο κατασκευάστηκε έτσι ώστε να έχει 16 στοιχεία κατά την περιφέρεια, 2 στοιχεία κατά το πάχος και 80 στοιχεία κατά το ύψος. Γεγονός είναι ότι επελέγη αρκετά λεπτομερής μοντελοποίηση του σωλήνα (ανά 0.50mm) διότι ενδιαφέρει ιδιαίτερα η μηχανική συμπεριφορά του δοκιμίου.

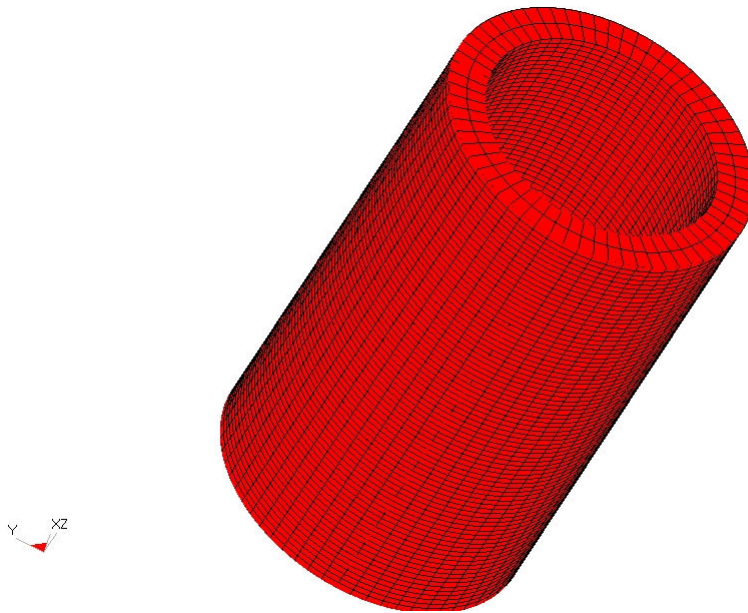
Στις επόμενες εικόνες φαίνεται η μοντελοποίηση και διακριτοποίηση του εξωτερικού στρώματος διμεταλλικού σωλήνα.



Εικόνα 3.6: Κάτοψη του εξωτερικού στρώματος διμεταλλικού σωλήνα.



Εικόνα 3.7: Πλάγια όψη του εξωτερικού στρώματος διμεταλλικού σωλήνα

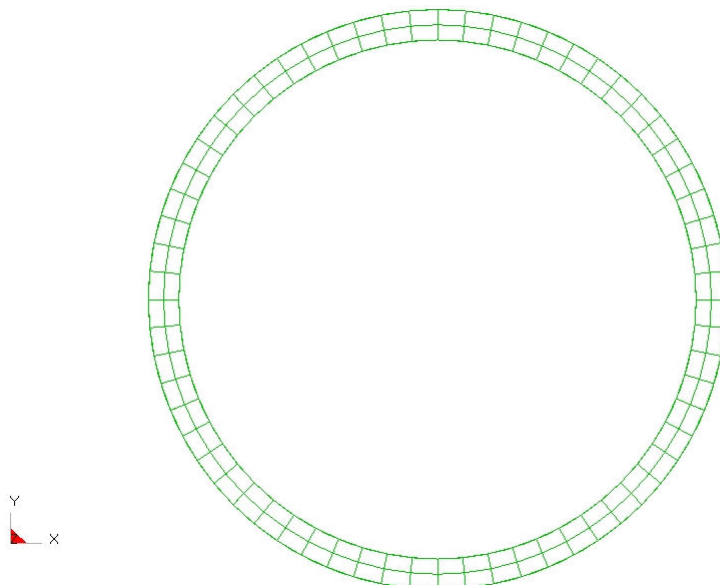


Εικόνα 3.8: Ισομετρική άποψη του εξωτερικού στρώματος διμεταλλικού σωλήνα.

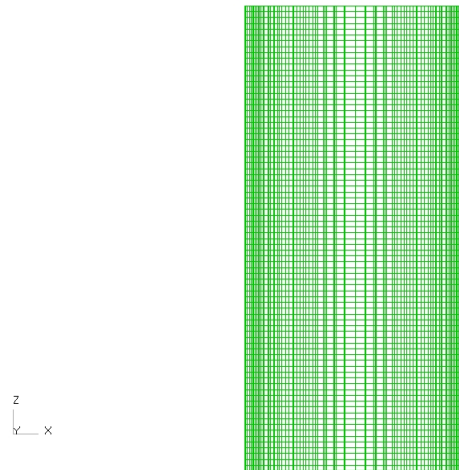
β) Μοντελοποίηση Εσωτερικού Στρώματος Διμεταλλικού Σωλήνα

Στην πειραματική διαδικασία οι σωλήνες είχαν εξωτερική και εσωτερική διάμετρο ανάλογα με το πάχος των τοιχωμάτων και σύμφωνα με τον πίνακα 2.1. Το ύψος ήταν $H=40.00\text{mm}$. Το πλέγμα (mesh) του κυλινδρικού δακτυλίου ανά τεταρτημόριο κατασκευάστηκε έτσι ώστε να έχει 16 στοιχεία κατά την περιφέρεια, 2 στοιχεία κατά το πάχος και 80 στοιχεία κατά το ύψος. Γεγονός είναι ότι επελέγη αρκετά λεπτομερής μοντελοποίηση του σωλήνα (ανά 0.50mm) διότι ενδιαφέρει ιδιαίτερα η μηχανική συμπεριφορά του δοκιμίου.

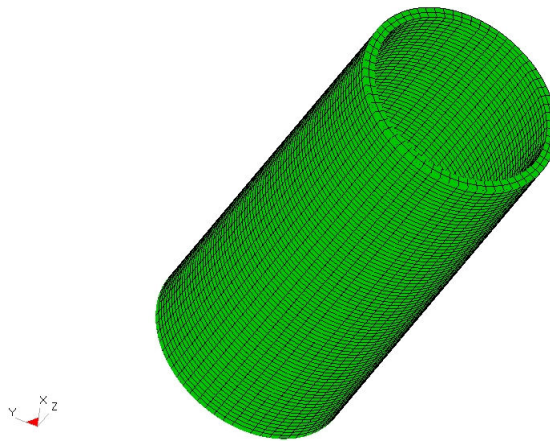
Στις επόμενες εικόνες φαίνεται η μοντελοποίηση και διακριτοποίηση του εσωτερικού στρώματος διμεταλλικού σωλήνα.



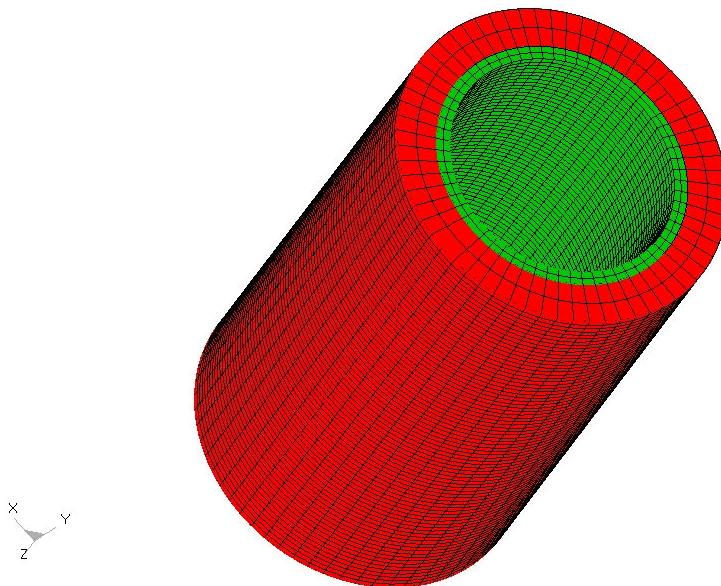
Εικόνα 3.9: Κάτοψη του εσωτερικού στρώματος διμεταλλικού σωλήνα.



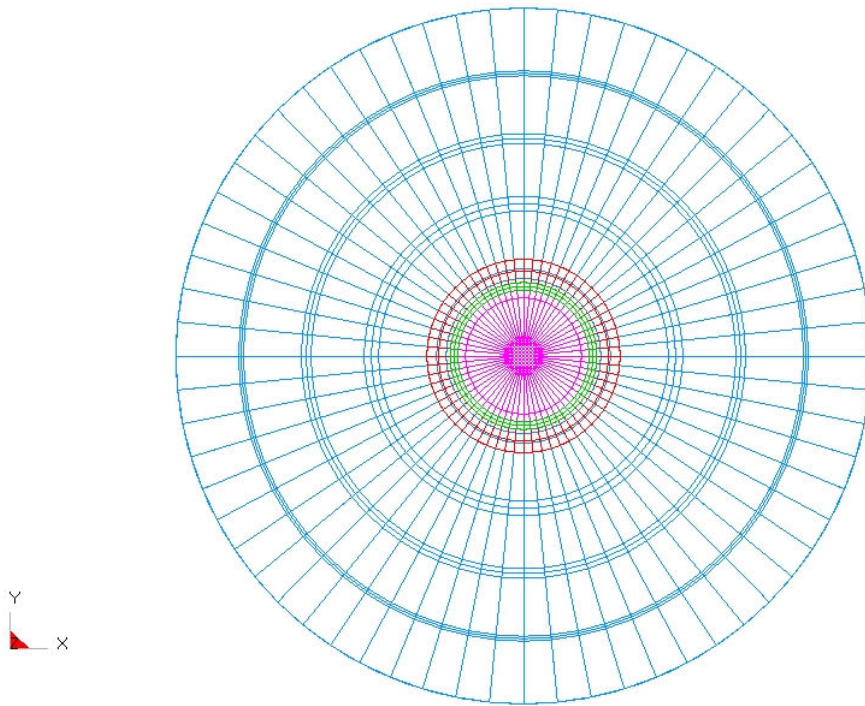
Εικόνα 3.10: Πλάγια όψη του εσωτερικού στρώματος διμεταλλικού σωλήνα



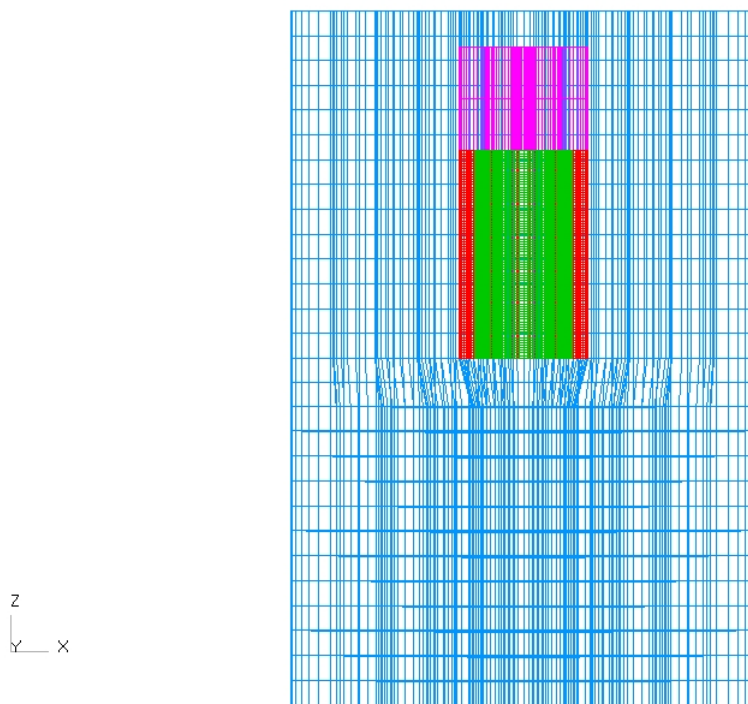
Εικόνα 3.11: Ισομετρική άποψη του εσωτερικού στρώματος διμεταλλικού σωλήνα



Εικόνα 3.12: Ισομετρική άποψη του διμεταλλικού σωλήνα



Εικόνα 3.13: Κάτοψη του μοντέλου



Εικόνα 3.14: Πλάγια όψη του μοντέλου

3.5 Επιλογή Συστήματος Μονάδων

Στην παρούσα μοντελοποίηση χρησιμοποιήθηκε το ακόλουθο σύστημα μονάδων:

Μονάδα μέτρησης μάζας:	gr
Μονάδα μέτρησης μήκους:	mm
Μονάδα μέτρησης χρόνου:	msec
Μονάδα μέτρησης ταχύτητας:	mm/msec
Μονάδα μέτρησης δύναμης:	Nt
Μονάδα μέτρησης πίεσης:	MPa
Μονάδα μέτρησης πυκνότητας:	gr/mm ³

Πίνακας 3.1: Σύστημα μονάδων μοντελοποίησης

3.6 Επιλογή Ιδιοτήτων Υλικών των Δοκιμίων & του Εργαλείου

Ως μοντέλο συμπεριφοράς των υλικών των δοκιμίων κατά την διάρκεια της κατεργασίας επελέγη το ελαστο-πλαστικό μοντέλο. Αυτό το μοντέλο ροής του υλικού συμφωνεί και με την βιβλιογραφία [37], όπως ήδη αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 1. Από τη βάση δεδομένων του FEMB επελέγη το υλικό Material model 24.1: “mat_piecewise_linear_plasticity”. Παρακάτω δίνονται οι ιδιότητες για τους εξωτερικούς και τους εσωτερικούς σωλήνες των δοκιμίων, που ήταν απαραίτητο να εισαχθούν στο πρόγραμμα.

α) Εξωτερικοί Σωλήνες (Καθαρός Χαλκός)

Ήδη έχουν παρατεθεί στο Κεφάλαιο 2 οι μηχανικές και φυσικές ιδιότητες του υλικού:

Πυκνότητα: $\rho = 0.008913 \text{ gr/mm}^3$

Μέτρο Ελαστικότητας: $E = 119,000 \text{ MPa}$

Λόγος Poisson: $\nu = 0.35$

Τάση Διαρροής: $\text{Sigy} = 266 \text{ MPa}$ [23]

Από τις 2 καμπύλες τάσεων – παραμορφώσεων, που προκύπτουν με τη βοήθεια των διαγραμμάτων φορτίου-μετατόπισης όπως αυτά αποτυπώθηκαν από τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών και παρατίθενται στο Κεφάλαιο 2, θα χρησιμοποιηθεί ο μέσος όρος των ζευγών τιμών που αντιστοιχούν στην ελαστοπλαστική περιοχή. Τα ζεύγη αυτά είναι τα ακόλουθα (Πίνακας 3.2):

Χαλκός (Cu)	
Τάση σ (Μpa)	Παραμόρφωση ϵ (mm/mm)
266.00	0.0000
288.63	0.0078
309.94	0.0539
336.66	0.0986
376.74	0.1408
410.42	0.1842
420.00	0.1956
438.06	0.2287

Πίνακας 3.2: Ζεύγη Τάσεων – Παραμορφώσεων που Αντιστοιχούν στην Ελαστο-πλαστική περιοχή για τον Εξωτερικό Σωλήνα από Χαλκό

β) Εσωτερικοί Σωλήνες (Al-6063 F25)

Οι εσωτερικοί σωλήνες των δοκιμών # 3-5 και # 8-12 ήταν κατασκευασμένοι από τυποποιημένο αλουμίνιο, το Al-6063 F25. Ήδη έχουν παρατεθεί στο Κεφάλαιο 2 οι μηχανικές και φυσικές ιδιότητες του υλικού:

Πυκνότητα: $\rho = 0.0027 \text{ gr/mm}^3$

Μέτρο Ελαστικότητας: $E=70,000 \text{ MPa}$

Λόγος Poisson: $\nu=0.34$

Τάση Διαρροής: $\text{Sigy}=192,2 \text{ MPa}^2$

Από την καμπύλη τάσεων – παραμορφώσεων, που προκύπτει με τη βοήθεια του διαγράμματος φορτίου-μετατόπισης όπως αυτό αποτυπώθηκε από τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών και παρατίθεται στο Κεφάλαιο 2, θα χρησιμοποιηθούν τα ζεύγη τιμών που αντιστοιχούν στην ελαστοπλαστική περιοχή. Τα ζεύγη αυτά είναι τα ακόλουθα (Πίνακας 3.3):

² Η τάση διαρροής για το συγκεκριμένο υλικό, όπως φαίνεται στο Παράρτημα 1 είναι $\text{Sigy}=195 \text{ MPa}$ [e4]. Ωστόσο κατά την δοκιμή εφελκυσμού στο εργαστήριο προέκυψε η τιμή $\text{Sigy}=192.2 \text{ MPa}$, η οποία είναι παρόμοια με την τυποποιημένη.

Αλουμίνιο #1 (Al 6063-F25)	
Τάση σ (Mpa)	Παραμόρφωση ϵ (mm/mm)
192.2	0.0000
195.0	0.0160
202.5	0.0209
208.0	0.0278
210.0	0.0318
213.0	0.0368
217.0	0.0427
222.0	0.0727

Πίνακας 3.3: Ζεύγη Τάσεων – Παραμορφώσεων που Αντιστοιχούν στην Ελαστο-πλαστική περιοχή για τον Εσωτερικό Σωλήνα από Al-6063 F25

γ) Εσωτερικοί Σωλήνες (Χυτό Αλουμίνιο Al-6063 F25)

Οι εσωτερικοί σωλήνες των δοκιμών # 1-2 και # 6-7 ήταν κατασκευασμένοι από χυτό αλουμίνιο, για το οποίο δεν υπάρχουν πρότυπες ιδιότητες. Ήδη έχουν παρατεθεί στο Κεφάλαιο 2 οι μηχανικές και φυσικές ιδιότητες του υλικού:

Πυκνότητα: $\rho = 0.0027 \text{ gr/mm}^3$

Μέτρο Ελαστικότητας: $E=70,000 \text{ MPa}$

Λόγος Poisson: $\nu=0.34$

Τάση Διαρροής: $\text{Sigy}=63.7 \text{ MPa}$

Από την καμπύλη τάσεων – παραμορφώσεων, που προκύπτει με τη βοήθεια του διαγράμματος φορτίου-μετατόπισης όπως αυτό αποτυπώθηκε από τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών και παρατίθεται στο Κεφάλαιο 2, θα χρησιμοποιηθούν τα ζεύγη τιμών που αντιστοιχούν στην ελαστοπλαστική περιοχή. Τα ζεύγη αυτά είναι τα ακόλουθα (Πίνακας 3.4):

Αλουμίνιο #2 (Al 6063 F25 χυτό)	
Τάση σ (Mpa)	Παραμόρφωση ϵ (mm/mm)
63.70	0.0000
89.13	0.0075
108.23	0.0288
146.42	0.0713
175.71	0.1155
217.72	0.2073
277.57	0.2955
375.60	0.4313

Πίνακας 3.4: Ζεύγη Τάσεων – Παραμορφώσεων που Αντιστοιχούν στην Ελαστο-πλαστική περιοχή για τον Εσωτερικό Σωλήνα από Χυτό Αλουμίνιο Al 6063 F25.

δ) Μήτρα & Έμβολο

Ως μοντέλο συμπεριφοράς των υλικών της μήτρας και του εμβόλου κατά την διάρκεια της κατεργασίας επελέγη από τη βάση δεδομένων του FEMB το υλικό Material model 20.1: "mat_rigid", διότι η μήτρα και το έμβολο είναι απαραμόρφωτα σώματα. Παρακάτω δίνονται οι ιδιότητες για το υλικό, που αντιστοιχούν στο χάλυβα και που ήταν απαραίτητο να εισαχθούν στο πρόγραμμα.

Πυκνότητα: $\rho = 0.00783\text{gr/mm}^3$

Μέτρο Ελαστικότητας: $E=207,000\text{MPa}$

Λόγος Poisson: $\nu=0.28$

3.7 Επιλογή Συνθηκών Τριβής

Η ορθή μοντελοποίηση της κατεργασίας περιλαμβάνει την εισαγωγή δυνάμεων τριβής στο μοντέλο. Τα όσα παρατίθενται εδώ συμφωνούν με τη βιβλιογραφία [e1], [e2], [e3].

Οι δυνάμεις τριβής που αναπτύσσονται κατά την διέλαση διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην πορεία της κατεργασίας. Επομένως κρίνεται σκόπιμο να αναλυθεί η επίδραση της δύναμης τριβής, προκειμένου να ανταποκρίνονται τα μοντέλα στις πραγματικές συνθήκες.

Γενικά

Μηχανική τριβή υφίσταται όταν και τα δύο σώματα είναι στερεά.

Στην περίπτωση που το ένα σώμα ολισθαίνει πάνω στο άλλο υπάρχει τριβή ολίσθησης.

Όταν έχουμε τριβή μεταξύ στερεών σωμάτων, οι επιφάνειες επαφής μπορεί:

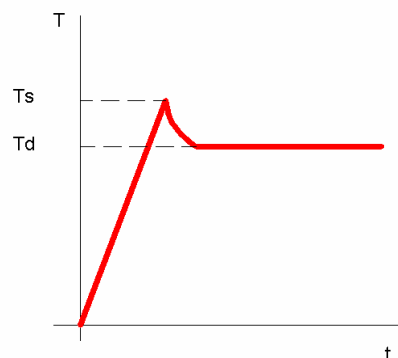
- Να έρχονται σε άμεση επαφή μεταξύ τους και τότε έχουμε ξηρά τριβή
- Να διαχωρίζονται από ένα στρώμα λιπαντικού και τότε έχουμε υγρή τριβή
- Να υπάρχουν σημεία άμεσης επαφής και σημεία διαχωρισμού από στρώμα λιπαντικού, οπότε έχουμε την ενδιάμεση κατάσταση της ημιυγρής τριβής.

$$T = F_s N \quad (3.7)$$

Ο συντελεστής F_s ονομάζεται συντελεστής στατικής τριβής και είναι η μέγιστη δυνατή δύναμη τριβής που εμφανίζεται. Αφού αρχίσει η ολίσθηση, η δύναμη τριβής που αναπτύσσεται είναι πάντοτε μικρότερη από τη δύναμη στατικής τριβής, ομοίως και ο συντελεστής F_D .

$$T = F_D N < F_s N \quad (3.8)$$

Τα παραπάνω απεικονίζονται στο ακόλουθο σχηματικό διάγραμμα.



Διάγραμμα 3.2: Δύναμη στατικής τριβής – τριβής ολίσθησης

Από τις εξισώσεις καθώς και από μελέτες και σχετικά πειράματα προκύπτει ότι

Οι συντελεστές F_s και F_D εξαρτώνται:

-από το είδος του υλικού των τριβόμενων επιφανειών

-από την ταχύτητα των επιφανειών

-από την ύπαρξη ή όχι λιπαντικού και το είδος αυτού

Στην πειραματική διαδικασία διέλασης διμεταλλικών σωλήνων που ακολουθήθηκε δεν ήταν δυνατή η μέτρηση των συντελεστών στατικής και δυναμικής τριβής με κάποιον τρόπο, οπότε κατόπιν έρευνας στην βιβλιογραφία, έντυπη και ηλεκτρονική, και μελέτης επί των παραμέτρων κατεργασίας προκύπτουν τα ακόλουθα, σύμφωνα και με τον πίνακα 3.5:

Material	Approx friction coefficient
Clean metals in air	0.8-2
Clean metals in wet air	0.5-1.5
Steel on soft metal (lead, bronze, etc)	0.1-0.5
Steel on ceramics (sapphire, diamond, ice)	0.1-0.5
Ceramics on ceramics (eg carbides on carbides)	0.05-0.5
Polymers on polymers	0.05-1.0
Metals and ceramics on polymers (PE, PTFE, PVC)	0.04-0.5
Boundary lubricated metals (thin layer of grease)	0.05-0.2
High temperature lubricants (eg graphite)	0.05-0.2
Hydrodynamically lubricated surfaces (full oil film)	0.0001-0.0005

Πίνακας 3.5: Πίνακας προσεγγιστικών τιμών συντελεστών τριβής για διάφορους συνδυασμούς υλικών

■ Η σύνδεση των δύο στρωμάτων του σωλήνα επετεύχθη με την βοήθεια μέγγενης με σύσφιξη, οπότε πρόκειται για περίπτωση σφικτής συναρμογής. Έγινε προσπάθεια ώστε η συναρμογή να είναι σφικτή σε όλες τις περιπτώσεις, αλλά είναι αμφίβολο το αν αυτό συνέβη και στα 12 δοκίμια.

Για την ξηρά τριβή μεταξύ Αλουμινίου και Χαλκού επελέγη τιμή του συντελεστή στατικής τριβής $F_s=0.5$ και τιμή του συντελεστή δυναμικής τριβής $F_D=0.4$ (Οι τιμές αυτή βρίσκονται στο κατώτερο όριο των προτεινόμενων τιμών για ξηρά τριβή καθαρών μεταλλικών επιφανειών σε υγρό αέρα).

■ Για την ομαλή διεξαγωγή της κατεργασίας διέλασης εντός της μεταλλικής μήτρας επελέγη λίπανση της εξωτερικής επιφάνειας των διμεταλλικών σωλήνων με ένα λεπτό φιλμ λιπαντικού. Για αυτήν την περίπτωση, αγνοώντας το είδος του λιπαντικού καθώς και το πάχος του φιλμ αυτού, οι θεωρητικές τιμές του συντελεστή στατικής τριβής F_s κυμαίνονται μεταξύ 0.05 και 0.2. Πρακτικά, το συγκεκριμένο εύρος τιμών μειώθηκε στο [0.05, 0.11]. Αντίστοιχα, για τον συντελεστή δυναμικής τριβής F_D , του οποίου οι θεωρητικές τιμές κυμαίνονται μεταξύ 0.03 και 0.18, το εύρος τιμών του πρακτικά ήταν [0.03, 0.09].

Είναι προφανές ότι οι τιμές των συντελεστών αυτών κινούνται μέσα σε ένα εύρος τιμών διότι οι συνθήκες λίπανσης (φιλμ λιπαντικού) μόνο θεωρητικά μπορούν να είναι ίδιες και για τα 12 δοκίμια.

■ Για την τριβή μεταξύ εμβόλου και διμεταλλικού σωλήνα επελέγησαν τυπικές τιμές συντελεστών τριβής χάλυβα-αλουμινίου/χαλκού, δηλαδή $F_s=0.3$ και $F_D=0.2$

Από την μελέτη των παραμέτρων της μοντελοποίησης για κάθε ένα εκ των δοκιμίων χωριστά, έγινε φανερό ότι ο συντελεστής τριβής μεταξύ μεταλλικής μήτρας και διμεταλλικού σωλήνα επηρεάζει την καμπύλη φορτίου – μετατόπισης και ειδικά τις τιμές του φορτίου που αναπτύσσεται στο δοκίμιο. Αύξηση του συντελεστή αυτού οδηγεί σε αύξηση του φορτίου (ακόμα και κατά τάξη μεγέθους). Σε περιπτώσεις που για λόγους διερεύνησης επελέγησαν ιδιαίτερα υψηλές τιμές του εν λόγω συντελεστή (π.χ. $F_s=0.5$) επήλθε αστοχία και το τελικό δοκίμιο χαρακτηρίστηκε ως μη αποδεκτό.

Αξίζει να σημειωθεί, όπως ήδη αναφέρθηκε, ότι ο συντελεστής τριβής μεταξύ δύο υλικών ευρισκόμενα σε σχετική κίνηση, πιθανόν να εξαρτάται από την πίεση επαφής, την τραχύτητα της επιφάνειας του σκληρότερου εκ των δύο τριβόμενων υλικών, την θερμοκρασία, τον τύπο του λιπαντικού και άλλους παράγοντες. Συνεπώς, είναι λογικό οι συντελεστές να παρουσιάζουν διακυμάνσεις στις τιμές τους στους διάφορους πίνακες αναφοράς.

3.8 Επιλογή Τύπου Επαφής των Στρωμάτων του Διμεταλλικού Σωλήνα

Για την μοντελοποίηση του τύπου επαφής μεταξύ των 2 μεταλλικών στρωμάτων, υπήρχαν οι εξής 3 δυνατότητες:

α) Επαφή TIED-SURFACE-TO-SURFACE

Αυτός ο τύπος επαφής μεταξύ των 2 στρωμάτων επιτρέπει την μοντελοποίηση της σύνδεσης των επιφανειών των 2 στρωμάτων, αλλά δεν επιτρέπει την σχετική τους κίνηση. Επομένως, κατά την ροή τους υλικού διαμέσου της μήτρας και καθώς η εσωτερική επιφάνεια του εξωτερικού σωλήνα είναι συνδεδεμένη με την εξωτερική επιφάνεια του εσωτερικού σωλήνα, το υλικό ρέει σχηματίζοντας λοβούς. Κάτι τέτοιο όμως δεν ανταποκρίνεται στην πειραματική διαδικασία, συνεπώς αυτός ο τύπος επαφής απορρίπτεται.

β) Επαφή SURFACE-TO-SURFACE

Αυτός ο τύπος επαφής μεταξύ των 2 στρωμάτων επιτρέπει την μοντελοποίηση της σύνδεσης των επιφανειών των 2 στρωμάτων, καθώς και την σχετική τους κίνηση. Ωστόσο, η ολίσθηση μεταξύ των 2 στρωμάτων είναι ανεξέλεγκτη και παρατηρείται έντονη ροή του υλικού που έχει την τάση να παραμορφώνεται κατά μήκος, εν προκειμένω του εσωτερικού στρώματος κατασκευασμένου από αλουμίνιο. Και πάλι κάτι τέτοιο δεν ανταποκρίνεται στην πειραματική διαδικασία, συνεπώς και αυτός ο τύπος επαφής απορρίπτεται.

γ) Επαφή TIEBREAK-SURFACE-TO-SURFACE

Αυτός ο τύπος επαφής μεταξύ των 2 στρωμάτων επιτρέπει την μοντελοποίηση της σύνδεσης των επιφανειών των 2 στρωμάτων, καθώς και την σχετική τους κίνηση, όταν η τάση υπερβεί μία καθορισμένη από τον χρήστη τιμή. Έτσι, οι δύο επιφάνειες είναι συνδεδεμένες και παραμορφώνονται μαζί έως ότου η τάση υπερβεί την καθορισμένη τιμή, οπότε και ξεκινά η ολίσθηση του στρώματος που τείνει να παραμορφώνεται περισσότερο κατά μήκος, σύμφωνα με το μοντέλο της επαφής τύπου Surface-to-Surface. Αυτό το είδος επαφής ανταποκρίνεται στην πειραματική διαδικασία, οπότε και επελέγη για την μοντελοποίηση της επαφής των 2 μεταλλικών στρωμάτων.

Η τιμή της τάσης καθορίζεται ως εξής:

Για το κριτήριο αποκόλλησης ισχύει ότι :

$$\left(\frac{|\sigma_n|}{NFLS}\right)^2 + \left(\frac{|\sigma_s|}{SFLS}\right)^2 \geq 1 \quad (3.9)$$

όπου:

σ_n : η υπολογιζόμενη από τον επιλυτή ορθή τάση

σ_s : η υπολογιζόμενη από τον επιλυτή διατμητική τάση

NFLS: η καθοριζόμενη από τον χρήστη τιμή της ορθής τάσης έπειτα από την οποία συμβαίνει η αποκόλληση

SFLS: η καθοριζόμενη από τον χρήστη τιμή της διατμητικής τάσης έπειτα από την οποία συμβαίνει η αποκόλληση

Απαιτείται να οριστούν από τον χρήστη και τα δύο μεγέθη, NFLS και SFLS, ανεξάρτητα του αν η μία μόνο εκ των δύο τάσεων είναι σημαντική. Επειδή εδώ ενδιαφέρει η διατμητική τάση, εξαιτίας της οποίας συμβαίνει η αποκόλληση, τίθεται η τιμή NFLS=1E+10MPa, καθώς το μέγεθος αυτό βρίσκεται στον παρονομαστή και ο παράγοντας γίνεται πολύ μικρός. Αντίθετα, για την τιμή της SFLS τίθεται η τιμή 1.0 MPa.

■ Για όλες τις υπόλοιπες περιπτώσεις επαφής (εμβόλου-δοκιμίου & μήτρας δοκιμίου) επελέγη ο τύπος επαφής Surface-to-Surface.

3.9 Επιλογή Ταχύτητας Μοντελοποίησης

Η πρέσσα του εργαστηρίου Τεχνολογίας των Κατεργασιών, στην οποία εκτελέστηκε η κατεργασία διέλασης διμεταλλικών σωλήνων, περιγράφηκε νωρίτερα. Το έμβολο κινούνταν με σταθερή ταχύτητα πρόωσης 10 mm/min ή 0,167 mm/sec.

Συνεπώς, για κάθε δοκίμιο η κατεργασία διήρκεσε περί τα 4min, δεδομένου του ύψους των δοκιμίων.

Κατά την διάρκεια επίλυσης του μοντέλου με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων εκτελείται ανά Time Step ένας βρόγχος σε όλη την έκταση των στοιχείων προκειμένου να ενημερώνονται οι τιμές των τάσεων και τα διανύσματα των δυνάμεων.

Λόγω explicit κώδικα, τα Time Steps προκύπτουν πολύ μικρά (7E-05), οπότε ο χρόνος υπολογισμών και επίλυσης γίνεται τεράστιος (βλ. ενότητα 3.3 για περαιτέρω ανάλυση).

Επιλέγεται μικρή αύξηση του Time Step, ως την τιμή 7E-03 μέσω mass scaling, με ταυτόχρονη αύξηση της ταχύτητας κατεργασίας σε σχέση με την ταχύτητα εκτέλεσης των πειραματικών δοκιμών ώστε να προκύψουν αποτελέσματα σε μικρότερο υπολογιστικό χρόνο. Με τον τρόπο αυτό η μέθοδος καθίσταται συμφέρουσα από άποψη υπολογιστικού κόστους και αποφεύγεται η εισαγωγή ανεπιθύμητων φαινομένων (βλέπε αδρανειακά φαινόμενα) κατά την επίλυση. Επίσης τα αποτελέσματα προσεγγίζουν περισσότερο τα αντίστοιχα πειραματικά.

■ Όλα τα παραπάνω εισήχθησαν προς επίλυση με την βοήθεια του αρχείου *.dyn, αντιπροσωπευτικό δείγμα του οποίου δίνεται στο Παράρτημα 3.

Κεφάλαιο 4

*Διέλαση Διμεταλλικών Σωλήνων
Αποτελέσματα Αριθμητικής Προσομοίωσης*

4.0 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για καθένα εκ των 12 δοκιμίων. Τα αποτελέσματα αυτά ελήφθησαν με την βοήθεια του Post-Processor (ETA POST-GL) του LS-DYNA και αφορούν τις φάσεις της κατεργασίας, την παραμόρφωση του πλέγματος των υπό εξέταση δοκιμίων – για καθένα σωλήνα ξεχωριστά, αλλά και συνολικά για το διμεταλλικό δοκίμιο – κατά την διάρκεια της διέλασης, το διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης, καθώς και την ανάλυση του τασικού πεδίου. Όλα τα αποτελέσματα συνοδεύονται από μετρήσεις, διαγράμματα και κατατοπιστικές εικόνες.

Για όλα τα δοκίμια ισχύει ότι:

■ Αναφορικά με την παραμόρφωση του πλέγματος, λόγω της παρουσίας τριβών η παραμόρφωση δεν είναι ομοιόμορφη σε όλο το δοκίμιο. Ωστόσο, οι μετρούμενες τιμές είναι ενδεικτικές της παραμόρφωσης την οποία υπέστησαν τα δυο υλικά κατά την κατεργασία και παρέχουν μία αδρή εικόνα της.

■ Η μεταβολή του πάχους των δύο σωλήνων καθώς και του διμεταλλικού σωλήνα κατά την διάρκεια της κατεργασίας, η οποία καταγράφεται μέσω μέτρησης της απόστασης του εσωτερικού από τον εξωτερικό κόμβο σε μία ακτίνα, στο μέσο του ύψους του δοκιμίου, παριστάνεται στα σχετικά διαγράμματα. Σε κάθε περίπτωση σημειώνονται οι κόμβοι οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν στις μετρήσεις.

■ Αναφορικά με το τασικό πεδίο, μέσω του Post-Processor δίνεται η δυνατότητα να ληφθούν απεικονίσεις των τάσεων που καταπονούν τα δοκίμια. Με βάση χρωματικό κώδικα παριστάνονται οι τάσεις τις οποίες υφίστανται τόσο ο εσωτερικός όσο και ο εξωτερικός σωλήνας. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι μέγιστες ισοδύναμες τάσεις κατά von Mises, που προκύπτουν από τον τύπο: $\sigma_{eq} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}$. Δίνεται μία σειρά αναπαραστάσεων των μέγιστων τάσεων κατά von Mises σε διάφορες φάσεις της κατεργασίας και σύντομος σχολιασμός τους.

4.1 Αποτελέσματα Προσομοίωσης - Δοκίμιο #1

Το διμεταλλικό δοκίμιο #1 είναι κατασκευασμένο από καθαρό χαλκό (εξωτερικό στρώμα) και χυτό αλουμίνιο (εσωτερικό στρώμα). Ο λόγος διαρροής των 2 υλικών είναι:

$$\lambda = \frac{\text{Sigy}(Cu)}{\text{Sigy}(\text{χυτοAl} - 6063 - F25)} = \frac{266}{63.7} = 4.176 > 3.5$$

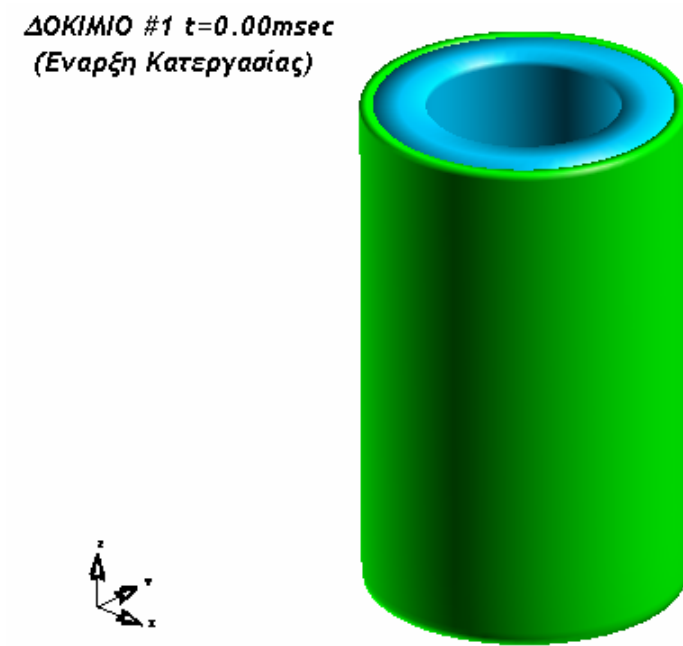
Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [17], ο παραπάνω λόγος των ορίων διαρροής δεν εξασφαλίζει ομαλή διεξαγωγή της κατεργασίας και πιθανόν να εμφανιστούν ιδιαίτερα αυξημένες τιμές τάσεων και φορτίων.

- Αρχικό μήκος εσωτερικού και εξωτερικού στρώματος: 40.00mm
- Αρχικό πάχος εσωτερικού σωλήνα: 4.00mm
- Αρχικό πάχος εξωτερικού σωλήνα: 1.00mm

Μετά την επίλυση του μοντέλου του δοκιμίου #1 από τον solver του LS-DYNA, προκύπτουν τα ακόλουθα αποτελέσματα μέσω των ETA Post-Processor και ETA Graph-Processor.

Φάσεις της Κατεργασίας

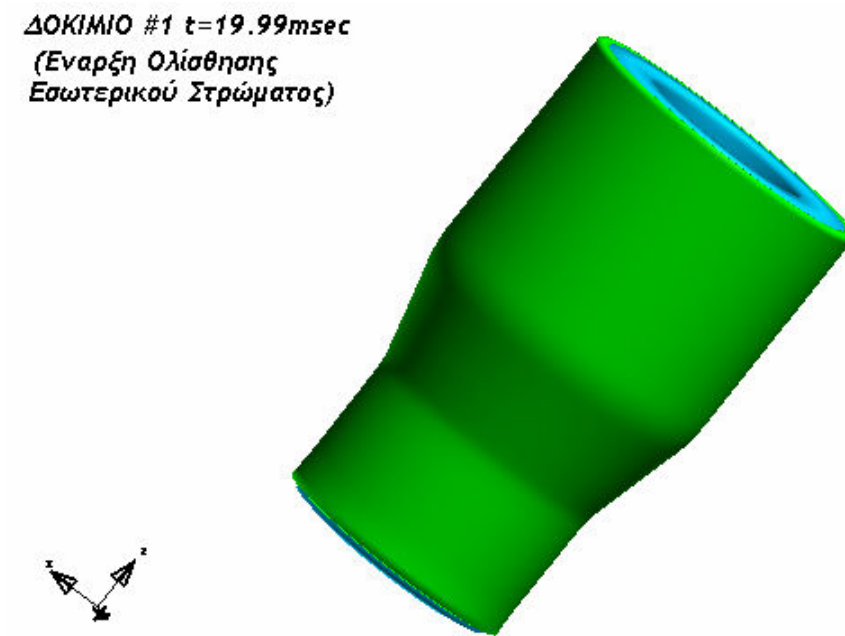
ΔΟΚΙΜΙΟ #1 $t=0.00msec$
(Έναρξη Κατεργασίας)



Εικόνα 4.1.1: Αναπαράσταση δοκιμίου #1 κατά την έναρξη της κατεργασίας διέλασης

Τη χρονική στιγμή $t=19.99msec$ αρχίζει η ροή του εσωτερικού στρώματος προς το κάτω μέρος του δοκιμίου.

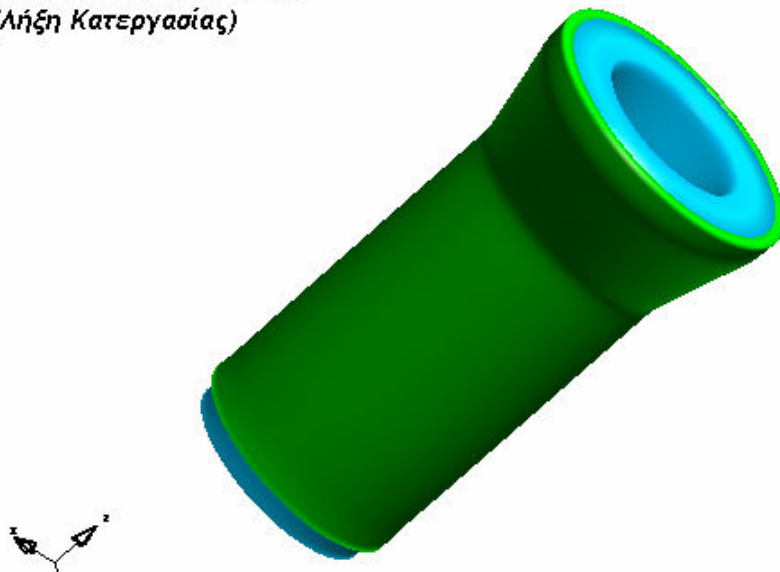
ΔΟΚΙΜΙΟ #1 $t=19.99msec$
(Έναρξη Ολίσθησης
Εσωτερικού Στρώματος)



Εικόνα 4.1.2: Αναπαράσταση δοκιμίου #1 κατά την χρονική στιγμή $t=19.99msec$

Η επίλυση συνεχίστηκε απρόσκοπτα μέχρι την χρονική στιγμή $t=37.99msec$, οπότε και έληξε η κατεργασία. Η τελική εικόνα του δοκιμίου ήταν η εξής:

ΔΟΚΙΜΙΟ #1 $t=37.99\text{msec}$
(Λήξη Κατεργασίας)



Εικόνα 4.1.3: Αναπαράσταση δοκιμίου #1 κατά τη λήξη της κατεργασίας διέλασης

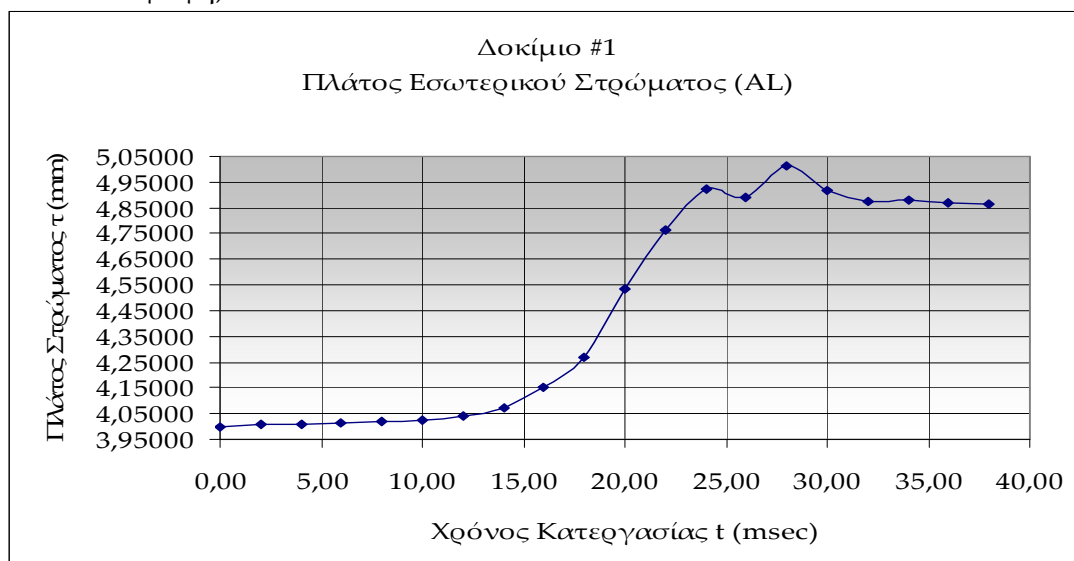
Η τελική εικόνα του δοκιμίου είναι παρόμοια με την αντίστοιχη πειραματική, βλ. εικόνα 2.11 στο Κεφάλαιο 2.

Παραμόρφωση Πλέγματος

- Τελικό μήκος εσωτερικού στρώματος: 46.15mm (Αύξηση μήκους κατά 15.38%)
- Τελικό μήκος εξωτερικού στρώματος: 43.64mm (Αύξηση μήκους κατά 9.10%)
- Τελικό πάχος εσωτερικού σωλήνα: 4.86mm (Αύξηση πάχους κατά 21.58%)
- Τελικό πάχος εξωτερικού σωλήνα: 1.13mm (Αύξηση πάχους κατά 12.57%)
- Τελικό πάχος διμεταλλικού σωλήνα: 5.99mm (Αύξηση πάχους κατά 19.78%)

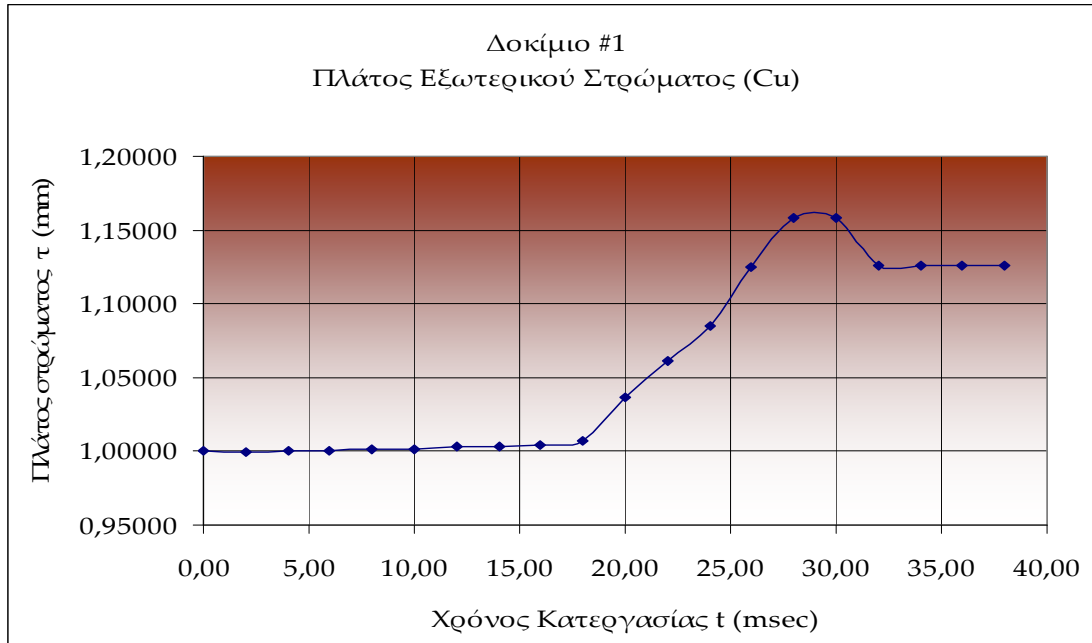
Όπως παρατηρείται, αναφορικά με το μήκος των σωλήνων, για το οποίο υπάρχουν μετρήσεις από τις πειραματικές δοκιμές, η επιμήκυνση που προκύπτει από την αριθμητική προσομοίωση είναι κατά τι μεγαλύτερη για το αλουμίνιο (15.38% έναντι 14.50%) και ελαφρώς μεγαλύτερη για το χαλκό (9.10% έναντι 4.00%)

Η μέτρηση έγινε σε κόμβους που βρίσκονται στο μέσο του πάχους του πλέγματος (#86305 & #69781, βλέπε εισαγωγή).



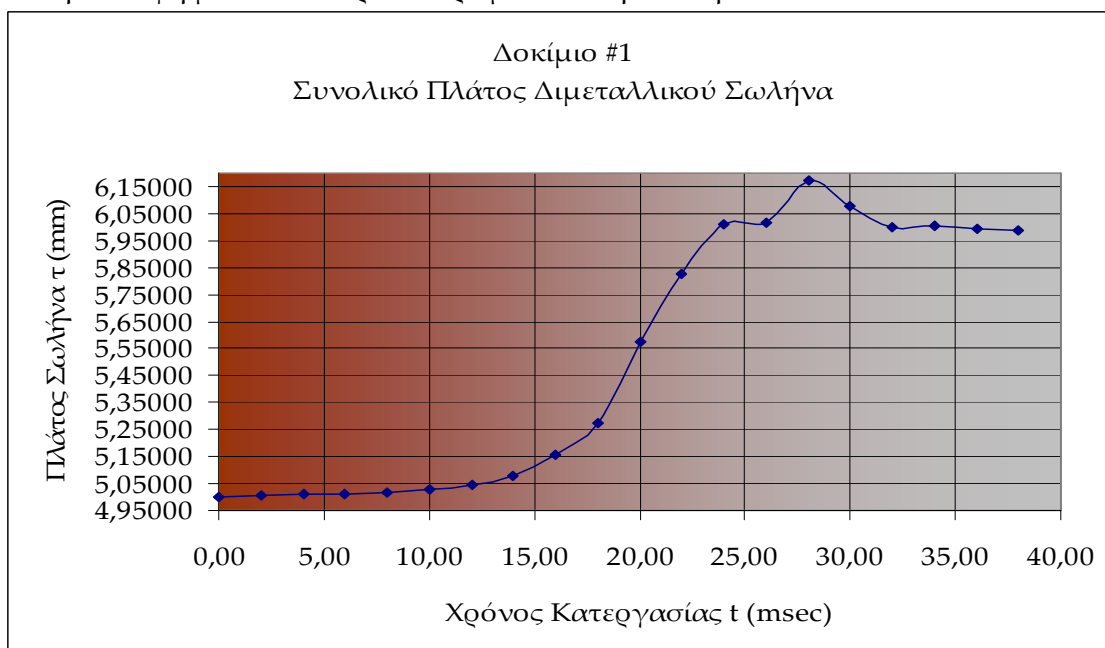
Διάγραμμα 4.1.1: Μεταβολή του πάχους του εσωτερικού σωλήνα του δοκιμίου #1

Στο διάγραμμα 4.1.1 παρατηρείται βαθμιαία αύξηση του πάχους του εσωτερικού σωλήνα από την χρονική στιγμή $t=12.00\text{msec}$ έως την χρονική στιγμή $t=28.00\text{msec}$ και κατόπιν σταθεροποίηση του περί την τελική τιμή ως το πέρας της κατεργασίας. Η αύξηση του πάχους του εσωτερικού σωλήνα είναι σχετικά μεγάλη (21.58%). Κάτι τέτοιο δικαιολογείται εν μέρει από το γεγονός ότι στην εσωτερική επιφάνεια του σωλήνα δεν υπάρχει υλικό το οποίο να περιορίζει την αύξηση του πάχους (π.χ. mandrel, δηλ. βύσμα) και έτσι παραμορφώνεται ελεύθερα.



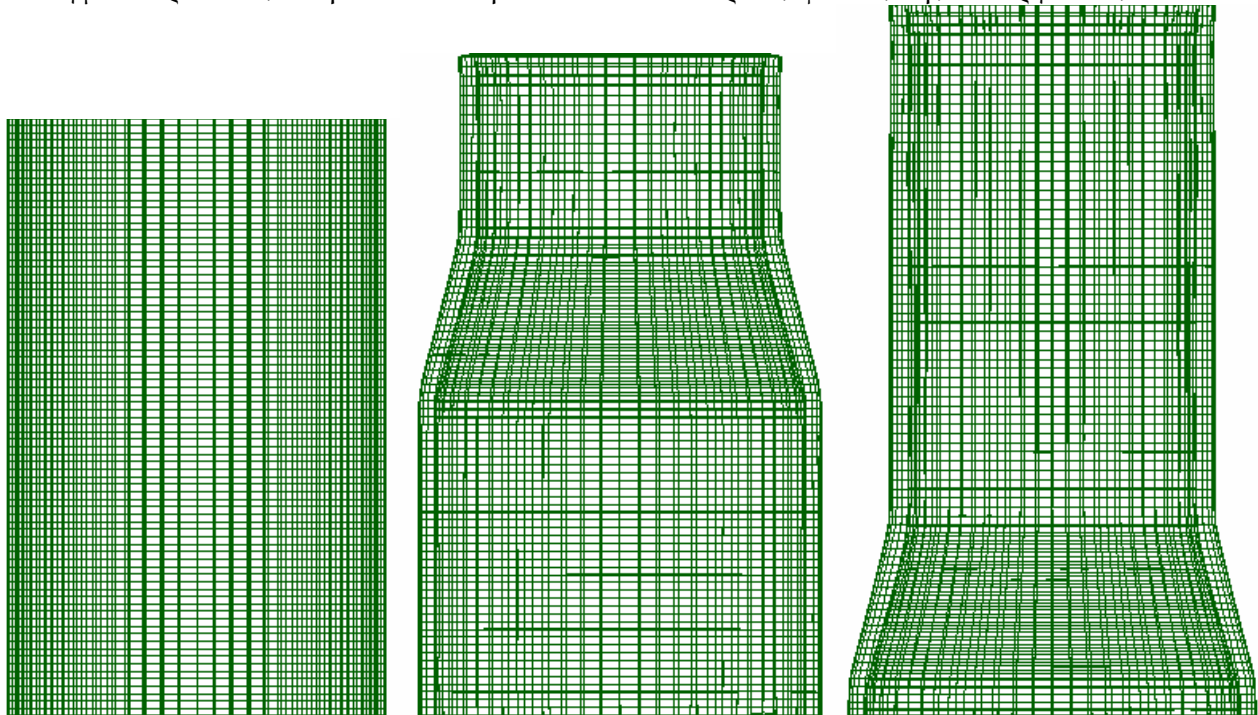
Διάγραμμα 4.1.2: Μεταβολή του πάχους του εξωτερικού σωλήνα του δοκιμίου #1

Στο διάγραμμα 4.1.2 παρατηρείται βαθμιαία αύξηση του πάχους του εσωτερικού σωλήνα από την χρονική στιγμή $t=18.00\text{msec}$ έως την χρονική στιγμή $t=28.00\text{msec}$ και κατόπιν μείωση και σταθεροποίηση του περί την τελική τιμή ως το πέρας της κατεργασίας. Η σταθερότητα αυτή οφείλεται στην επαφή του εξωτερικού στρώματος με τα τοιχώματα της μήτρας από την μια μεριά και την επαφή με το εσωτερικό στρώμα από την άλλη.



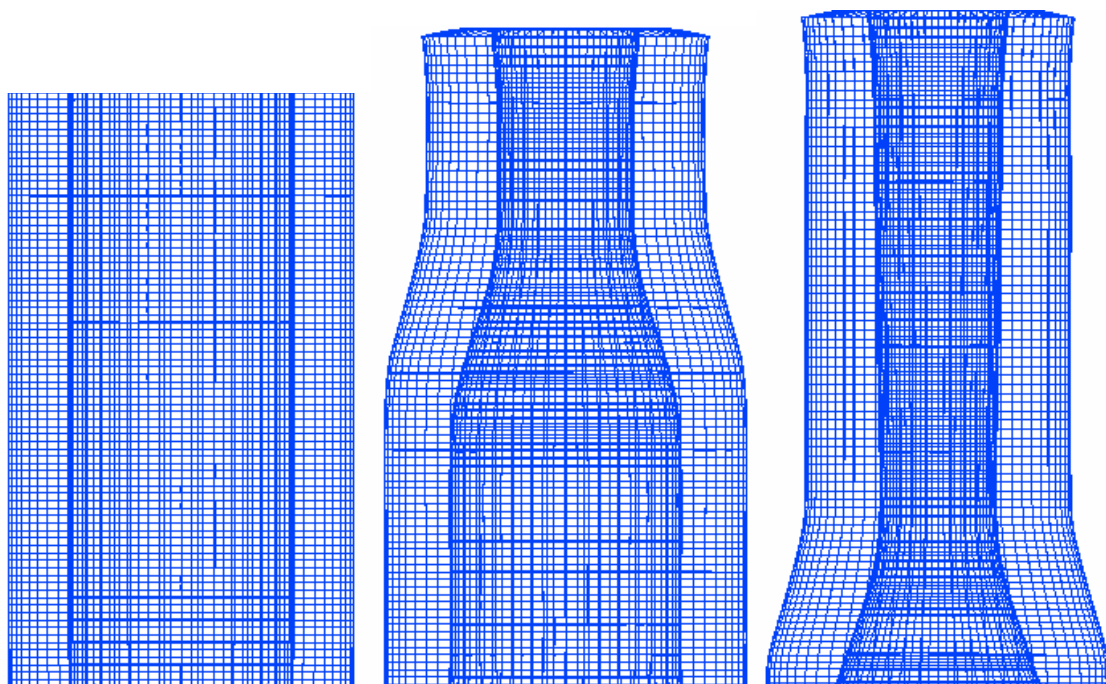
Διάγραμμα 4.1.3: Μεταβολή του συνολικού πάχους του διμεταλλικού δοκιμίου #1

Στο διάγραμμα 4.1.3 παρατηρείται βαθμιαία αύξηση του πάχους του εσωτερικού σωλήνα από την χρονική στιγμή $t=12.00\text{msec}$ έως την χρονική στιγμή $t=28.00\text{msec}$ και κατόπιν ομαλή μείωση και σταθεροποίηση του περί την τελική τιμή ως το πέρας της κατεργασίας. Το πλέγμα παρουσιάζει την ακόλουθη εικόνα σε 3 διακριτές φάσεις της κατεργασίας:



Εικόνα 4.1.4: Πλέγμα εξωτερικού σωλήνα (α) $t=0.00\text{msec}$ (β) $t=20.00\text{msec}$ (γ) $t=37.99\text{msec}$

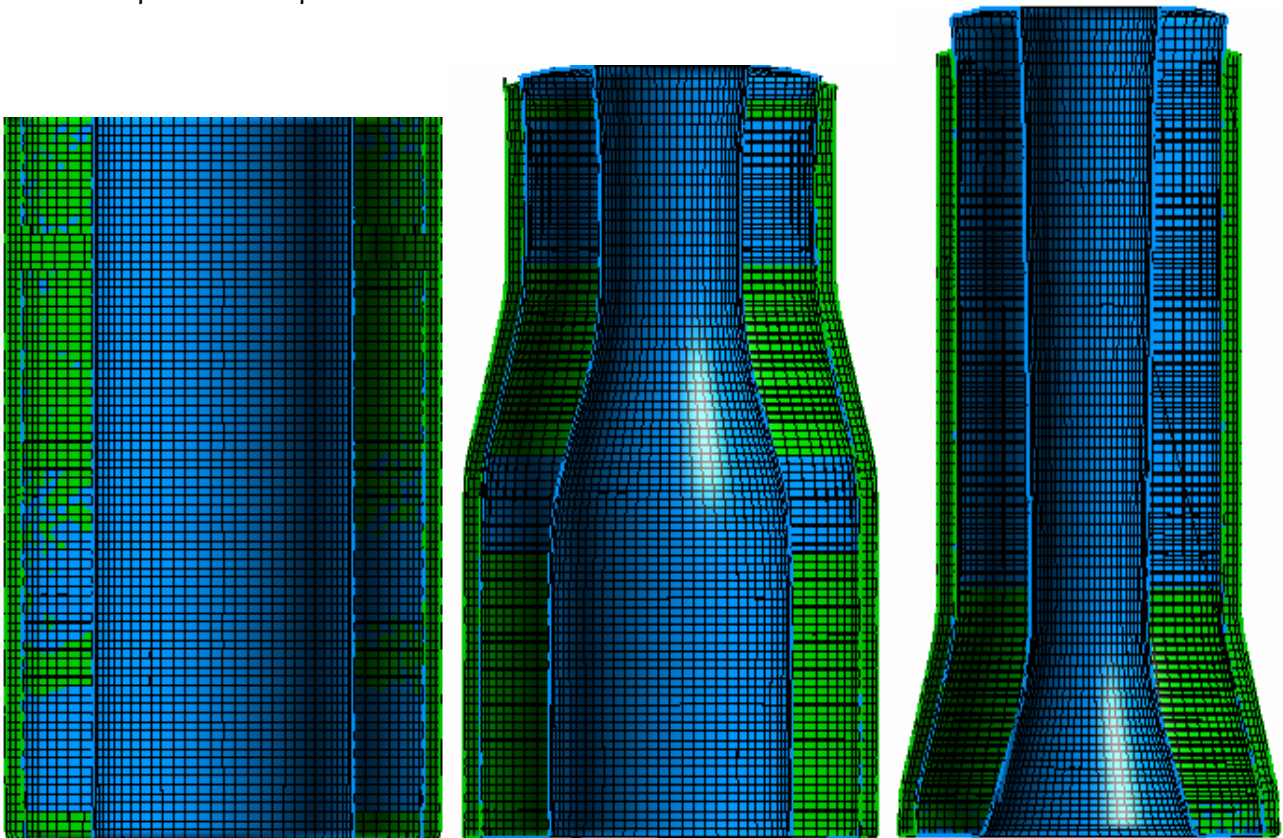
Από την εικόνα 4.1.4, όπου παρουσιάζεται στραμμένο κατά 180° το πλέγμα του εξωτερικού σωλήνα σε 3 χρονικές στιγμές, είναι φανερό ότι υπάρχει έντονη παραμόρφωση (συμπίεση) των πεπερασμένων στοιχείων στις περιοχές που έχουν ήδη υποστεί την κατεργασία διέλασης (β,γ) καθώς και στην υπό διέλαση περιοχή (β). Συμπίεση του πλέγματος παρατηρείται επίσης στο πέρας της κατεργασίας στην περιοχή που βρίσκεται στο μέτωπο του εμβόλου.



Εικόνα 4.1.5: Πλέγμα εσωτερικού σωλήνα (α) $t=0.00\text{msec}$ (β) $t=20.00\text{msec}$ (γ) $t=31.99\text{msec}$

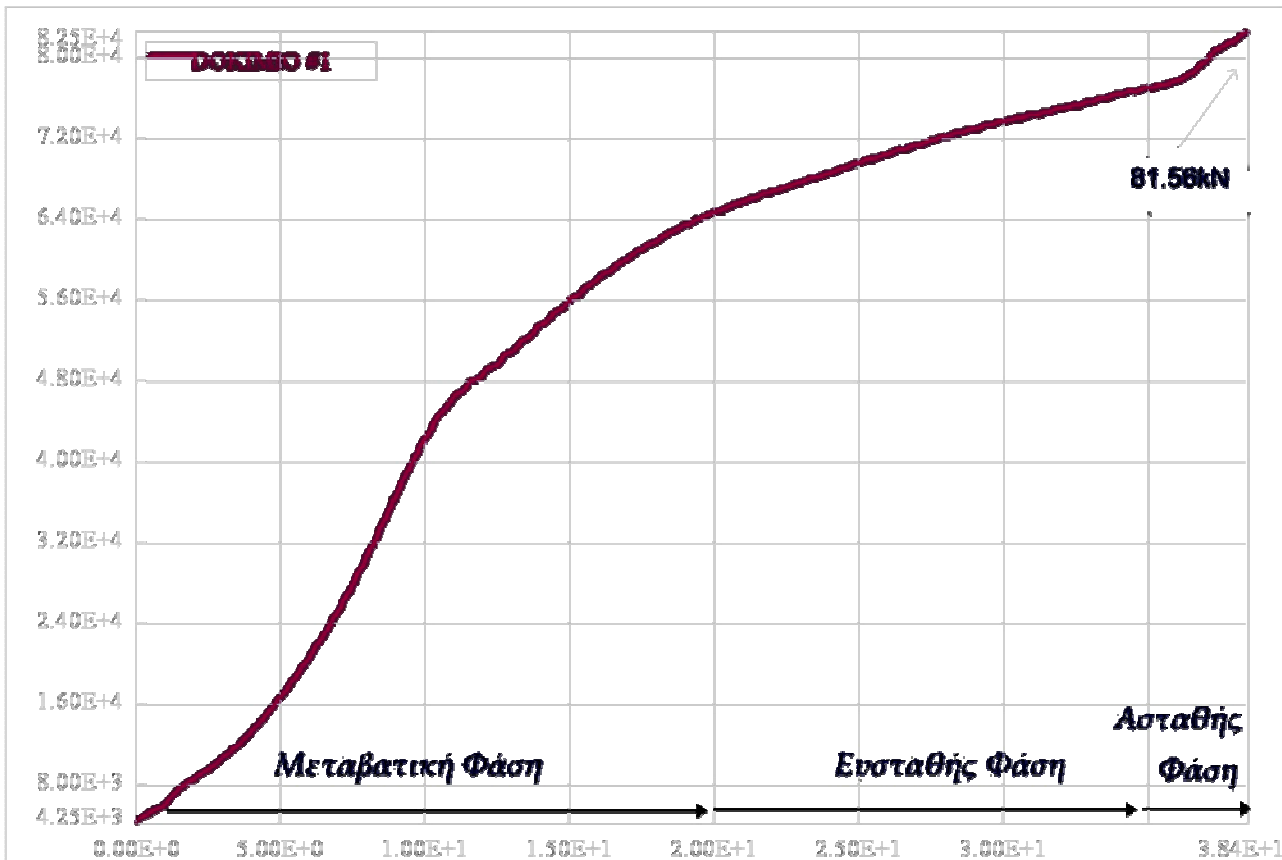
Ομοίως, από την εικόνα 4.1.5, όπου παρουσιάζεται στραμμένο κατά 180° το πλέγμα του εσωτερικού σωλήνα σε 3 χρονικές στιγμές, είναι φανερό ότι υπάρχει έντονη παραμόρφωση (συμπίεση) των πεπερασμένων στοιχείων στις περιοχές που έχουν ήδη υποστεί στην κατεργασία διέλασης (β, γ) καθώς και στην υπό διέλαση περιοχή (β). Τέλος, συμπίεση του πλέγματος παρατηρείται επίσης στο πέρας της κατεργασίας στην περιοχή που βρίσκεται στο μέτωπο του εμβόλου.

Η συνολική παραμόρφωση του πλέγματος στο πέρας της κατεργασίας και για τους 2 σωλήνες δίνεται στην ακόλουθη εικόνα.



Εικόνα 7.1.6: Παραμόρφωση πλέγματος διμεταλλικού σωλήνα
(α) $t=0.00msec$ (β) $t=20.00msec$ (γ) $t=37.99msec$

Διάγραμμα Φορτίου – Μετατόπισης



Διάγραμμα 4.1.4: Καμπύλη Φορτίου-Μετατόπισης για το Δοκίμιο #1

Στο διάγραμμα που προέκυψε από την επίλυση του μοντέλου διακρίνονται οι 3 φάσεις της κατεργασίας (Μεταβατική Φάση, Φάση Ευστάθειας, Ασταθής Φάση). Η μορφή της καμπύλης προσεγγίζει κατά πολύ την αντίστοιχη καμπύλη που προέκυψε από την πειραματική διαδικασία, βλ. διάγραμμα 2.1.

Επίσης σημειώνεται το μέγιστο φορτίο διέλασης, δηλαδή 81.56kN, τιμή που δεν προσεγγίζει την αντίστοιχη πειραματική τιμή, δηλαδή τα 51.50kN, διότι η απόκλιση είναι 58.37%. Ολόκληρη η καμπύλη είναι μετατοπισμένη σε σχέση με την καμπύλη που προέκυψε από την πειραματική διαδικασία. Η απόκλιση αυτή πιθανώς παρατηρείται επειδή για το υλικό του εσωτερικού σωλήνα (χυτό αλουμίνιο) δεν υπάρχουν πρότυπες ιδιότητες και ορισμένες τιμές μηχανικών ιδιοτήτων που δόθηκαν πιθανόν να διαφέρουν από τις πραγματικές. Συνεπώς, γίνεται η υπόθεση ότι με την εισαγωγή των κατάλληλων τιμών των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού, η μοντελοποίηση θα ήταν ακριβέστερη. Θα μπορούσε επίσης η διαφορά αυτή να αποδοθεί στην επιλογή των συντελεστών τριβής μεταξύ της μήτρας και του δοκιμίου, μολονότι δόθηκαν οι ελάχιστες προτεινόμενες τιμές για τον συγκεκριμένο τύπο επαφής (δηλαδή επιφάνειες με λεπτό φιλμ λιπαντικού).

Τασικό Πεδίο

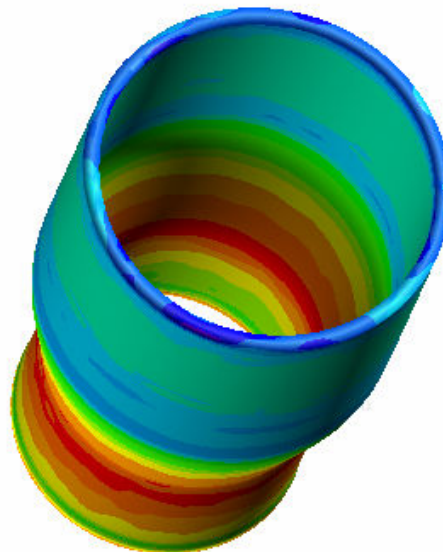
ΔΟΚΙΜΙΟ #1 - ΕΞΩΤ. ΣΤΡΩΜΑ
t=0.49msec



Εικόνα 4.1.7: Ισοδύναμες τάσεις κατά von Mises για τον εξωτερικό σωλήνα κατά τη χρονική στιγμή t=0.49msec

Από την αναπαράσταση αυτή παρατηρείται, όπως είναι αναμενόμενο, ότι η μέγιστη τάση εμφανίζεται στην περιοχή όπου ο σωλήνας εισέρχεται στο κωνικό τμήμα της μήτρας. Η τάση αυτή υπολογίστηκε στα 321-344MPa περίπου. Επίσης, το τμήμα του δοκιμίου που βρίσκεται σε επαφή με το μέτωπο του εμβόλου καταπονείται και αυτό από τάση, αλλά μικρότερη, περίπου 68-91MPa.

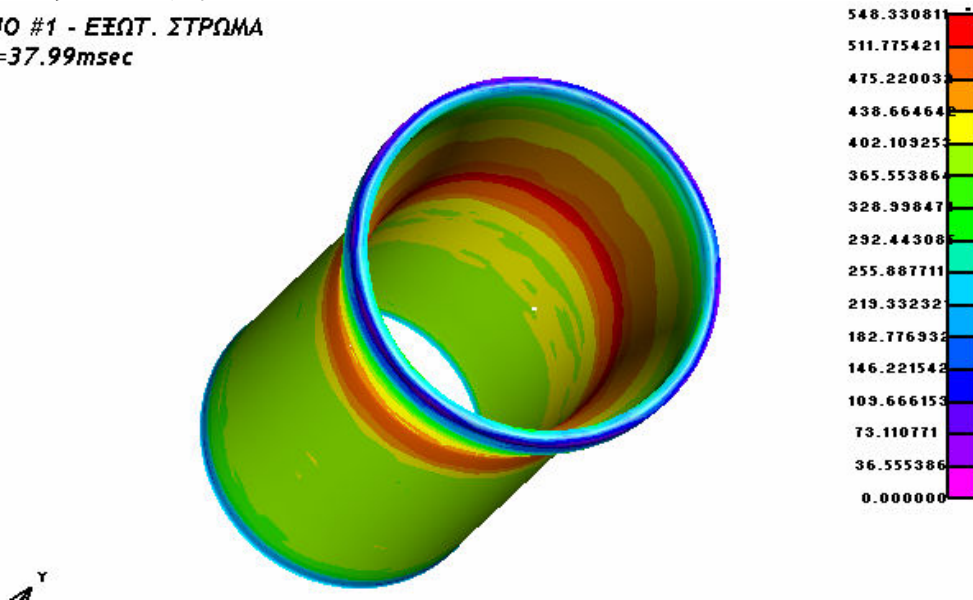
ΔΟΚΙΜΙΟ #1 - ΕΞΩΤ. ΣΤΡΩΜΑ
t=19.99msec



Εικόνα 4.1.8: Ισοδύναμες τάσεις κατά von Mises για τον εξωτερικό σωλήνα κατά τη χρονική στιγμή t=19.99msec

Στην εικόνα αυτή παρατηρείται ότι η μέγιστη τάση που καταπονεί τον εξωτερικό σωλήνα είναι στην περιοχή των 455-488MPa και παρουσιάζεται στην περιοχή του δοκιμίου που βρίσκεται στο κωνικό τμήμα της μήτρας και δη στην εσωτερική επιφάνεια του σωλήνα, καθώς αυτό το τμήμα βρίσκεται υπό τάση τόσο από τα τοιχώματα της μήτρας όσο και από τον εσωτερικό σωλήνα. Επίσης, περιοχές οι οποίες έχουν ήδη υποστεί την κατεργασία της διέλασης καταπονούνται από αρκετά υψηλές τάσεις καθώς πιέζονται από τα τοιχώματα της εξόδου της μήτρας. Γενικά, οι τάσεις που καταπονούν το δοκίμιο σε αυτήν τη φάση της διέλασης κυμαίνονται μεταξύ των τιμών 162-488 MPa (βλέπε χρωματικό κώδικα).

ΔΟΚΙΜΙΟ #1 - ΕΞΩΤ. ΣΤΡΩΜΑ
t=37.99msec



Εικόνα 4.1.9: Ισοδύναμες τάσεις κατά von Mises για τον εξωτερικό σωλήνα κατά τη χρονική στιγμή t=37.99msec

Η εικόνα 4.1.9 παρουσιάζει την τελική εντατική κατάσταση του εξωτερικού σωλήνα, στην οποία παρατηρείται σχετικά ομοιόμορφη κατανομή των τάσεων. Στην περιοχή που περισσότερο καταπονείται απαντώνται τάσεις περί τα 511-548MPa. Στο κυρίως σώμα του δοκιμίου παρατηρούνται τάσεις που κυμαίνονται μεταξύ των 255 και 402 MPa.

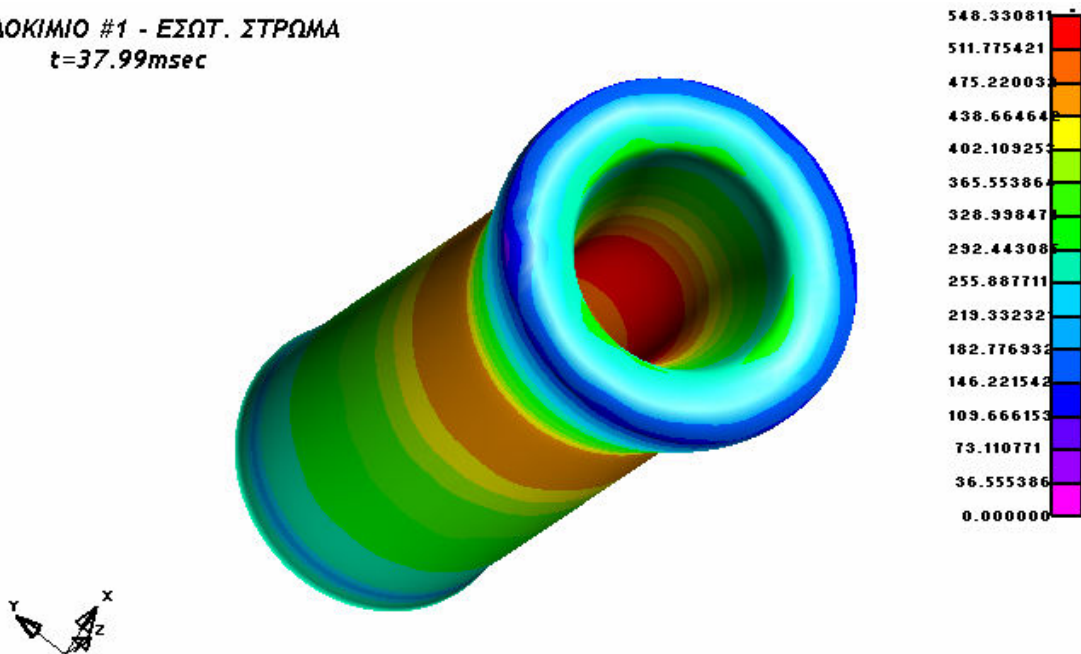
ΔΟΚΙΜΙΟ #1 - ΕΣΩΤ. ΣΤΡΩΜΑ
t=0.49msec



Εικόνα 4.1.10: Ισοδύναμες τάσεις κατά von Mises για τον εσωτερικό σωλήνα κατά τη χρονική στιγμή t=0.49msec

Από την αναπαράσταση αυτή παρατηρείται, όπως είναι αναμενόμενο, ότι η μέγιστη τάση εμφανίζεται στην περιοχή όπου ο σωλήνας εισέρχεται στο κωνικό τμήμα της μήτρας. Η τάση αυτή υπολογίστηκε στα 68-91MPa περίπου. Επίσης, το τμήμα του δοκιμίου που βρίσκεται σε επαφή με το μέτωπο του εμβόλου καταπονείται και αυτό από τάση κατά περιοχές, αλλά πολύ μικρή, περίπου 22MPa.

ΔΟΚΙΜΙΟ #1 - ΕΣΩΤ. ΣΤΡΩΜΑ
t=37.99msec



Εικόνα 4.1.11: Ισοδύναμες τάσεις κατά von Mises για τον εσωτερικό σωλήνα κατά τη χρονική στιγμή t=37.99msec

Η εικόνα 4.1.11 παρουσιάζει την τελική εντατική κατάσταση του εσωτερικού σωλήνα, στην οποία δεν παρατηρείται ομοιόμορφη κατανομή των τάσεων. Στην περιοχή που περισσότερο καταπονείται απαντώνται τάσεις 511-548MPa. Γενικά, οι τάσεις που καταπονούν το δοκίμιο σε αυτήν τη φάση της διέλασης κυμαίνονται μεταξύ των τιμών 219-548 MPa (βλέπε χρωματικό κώδικα).

■ Η κατεργασία του δοκιμίου και η μορφή του πλέγματος καθ'όλη την διάρκεια της διαδικασίας έχει καταγραφεί σε video με τη βοήθεια του post-processor. Το video αυτό, καθώς και άλλα αρχεία που αφορούν στην μοντελοποίηση, στην επίλυση και στην εξαγωγή αποτελεσμάτων βρίσκονται στο dvd που συνοδεύει την εργασία στον αντίστοιχο φάκελο για το συγκεκριμένο δοκίμιο.

4.2 Αποτελέσματα Προσομοίωσης - Δοκίμιο #2

Το διμεταλλικό δοκίμιο #2 είναι κατασκευασμένο από καθαρό χαλκό (εξωτερικό στρώμα) και χυτό αλουμίνιο (εσωτερικό στρώμα). Ο λόγος διαρροής των 2 υλικών είναι:

$$\lambda = \frac{\text{Sigy}(Cu)}{\text{Sigy}(\chi\upsilon\tau\omicron Al - 6063 - F25)} = \frac{266}{63.7} = 4.176 > 3.5$$

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [17], ο παραπάνω λόγος των ορίων διαρροής δεν εξασφαλίζει ομαλή διεξαγωγή της κατεργασίας και πιθανόν να εμφανιστούν ιδιαίτερα αυξημένες τιμές τάσεων και φορτίων.

- Αρχικό μήκος εσωτερικού και εξωτερικού στρώματος: 40.00mm
- Αρχικό πάχος εσωτερικού σωλήνα: 3.00mm
- Αρχικό πάχος εξωτερικού σωλήνα: 2.00mm

Μετά την επίλυση του μοντέλου του δοκιμίου #2 από τον solver του LS-DYNA, προκύπτουν τα ακόλουθα αποτελέσματα μέσω των ETA Post-Processor και ETA Graph-Processor.

Φάσεις της Κατεργασίας

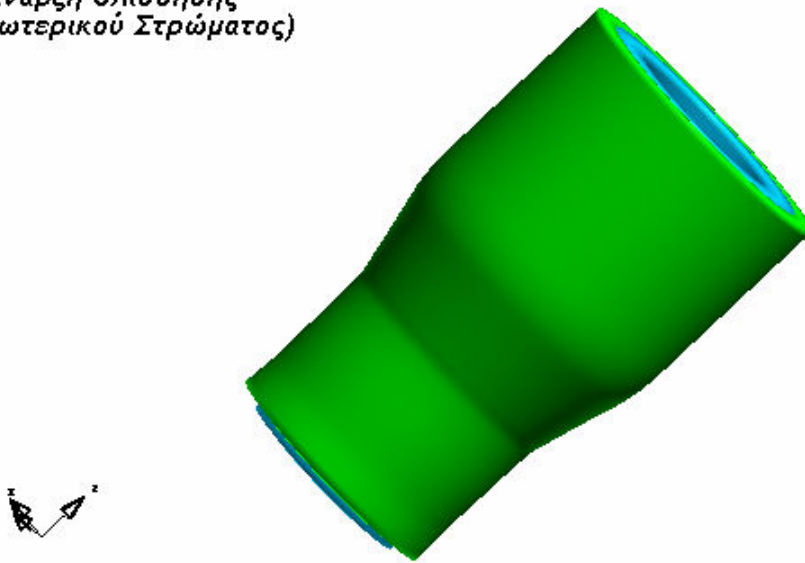
ΔΟΚΙΜΙΟ #2 t=0.00msec
(Έναρξη Κατεργασίας)



Εικόνα 4.2.1: Αναπαράσταση δοκιμίου #2 κατά την έναρξη της κατεργασίας διέλασης

Τη χρονική στιγμή t=20.99msec αρχίζει η ροή του εσωτερικού στρώματος προς το κάτω μέρος του δοκιμίου.

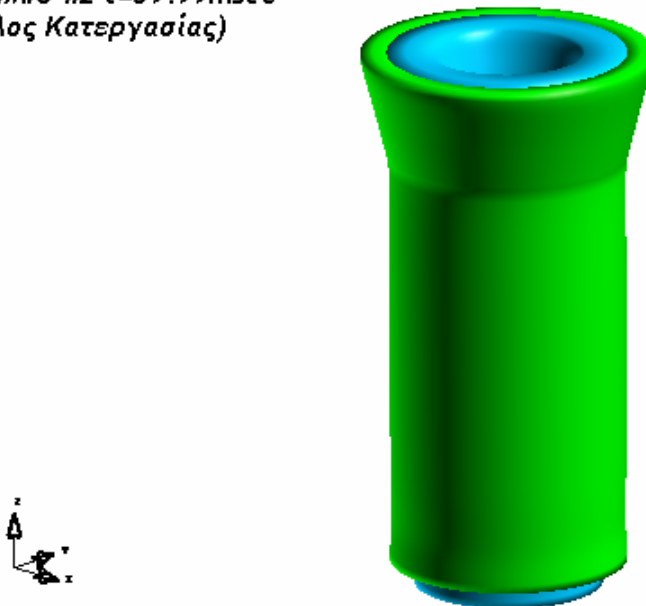
ΔΟΚΙΜΙΟ #2 $t=20.99msec$
(Έναρξη Ολίσθησης
Εσωτερικού Στρώματος)



Εικόνα 4.2.2: Αναπαράσταση δοκιμίου #2 κατά την χρονική στιγμή $t=20.99msec$

Η επίλυση συνεχίστηκε απρόσκοπτα μέχρι την χρονική στιγμή $t=39.99msec$, οπότε και έληξε η κατεργασία. Η τελική εικόνα του δοκιμίου ήταν η εξής:

ΔΟΚΙΜΙΟ #2 $t=39.99msec$
(Τέλος Κατεργασίας)



Εικόνα 4.2.3: Αναπαράσταση δοκιμίου #2 κατά τη λήξη της κατεργασίας διέλασης

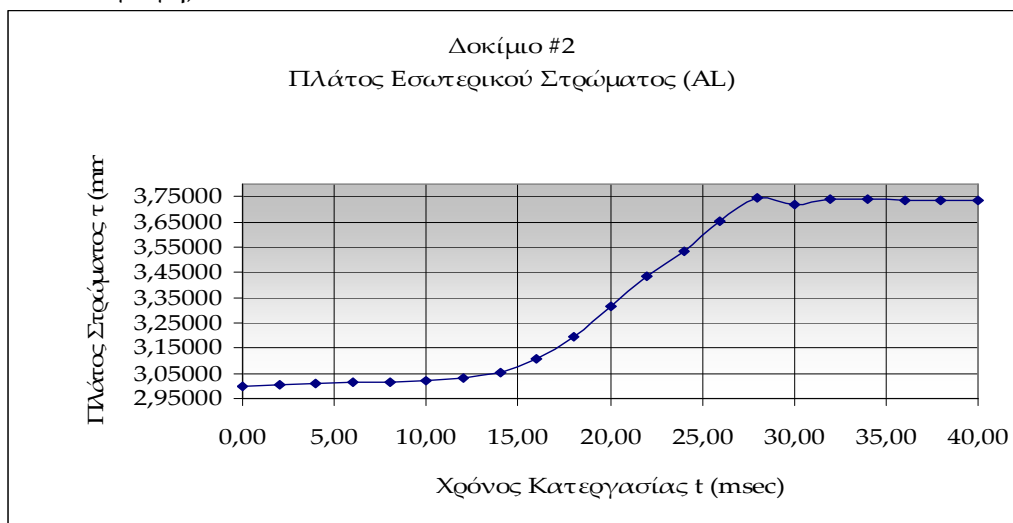
Η τελική εικόνα του δοκιμίου είναι παρόμοια με την αντίστοιχη πειραματική, βλ. εικόνα 2.13 στο Κεφάλαιο 2.

Παραμόρφωση Πλέγματος

■ Τελικό μήκος εσωτερικού στρώματος: 47.39mm	(Αύξηση μήκους κατά 18.48%)
■ Τελικό μήκος εξωτερικού στρώματος: 45.28mm	(Αύξηση μήκους κατά 13.20%)
■ Τελικό πάχος εσωτερικού σωλήνα: 3.73mm	(Αύξηση πάχους κατά 24.44%)
■ Τελικό πάχος εξωτερικού σωλήνα: 2.23mm	(Αύξηση πάχους κατά 11.29%)
■ Τελικό πάχος διμεταλλικού σωλήνα: 5.96mm	(Αύξηση πάχους κατά 19.18%)

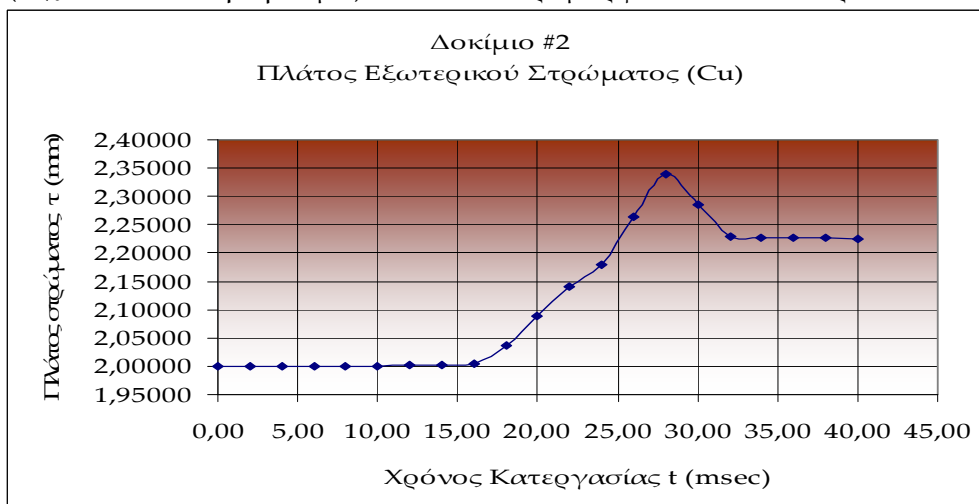
Όπως παρατηρείται, αναφορικά με το μήκος των σωλήνων, για το οποίο υπάρχουν μετρήσεις από τις πειραματικές δοκιμές, η επιμήκυνση που προκύπτει από την αριθμητική προσομοίωση είναι κατά τι μεγαλύτερη για το αλουμίνιο (18.48% έναντι 15.30%) και αρκετά μεγαλύτερη για το χαλκό (13.20% έναντι 2.3%).

Η μέτρηση έγινε σε κόμβους που βρίσκονται στο μέσο του πάχους του πλέγματος (#65650 & #82173, βλέπε εισαγωγή).



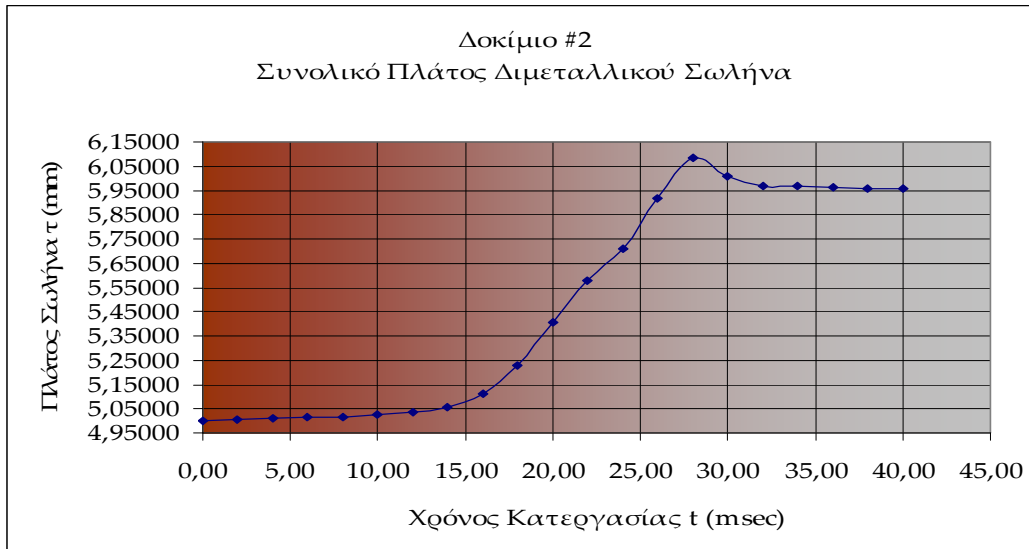
Διάγραμμα 4.2.1: Μεταβολή του πάχους του εσωτερικού σωλήνα του δοκιμίου #2

Στο διάγραμμα 4.2.1 παρατηρείται βαθμιαία αύξηση του πάχους του εσωτερικού σωλήνα από την χρονική στιγμή $t=14.00$ msec έως την χρονική στιγμή $t=28.00$ msec και κατόπιν σταθεροποίηση του περί την τελική τιμή ως το πέρας της κατεργασίας. Η αύξηση του πάχους του εσωτερικού σωλήνα είναι σχετικά μεγάλη (24.44%). Κάτι τέτοιο δικαιολογείται εν μέρει από το γεγονός ότι στην εσωτερική επιφάνεια του σωλήνα δεν υπάρχει υλικό το οποίο να περιορίζει την αύξηση του πάχους (π.χ. mandrel, δηλ. βύσμα) και έτσι παραμορφώνεται ελεύθερα.



Διάγραμμα 4.2.2: Μεταβολή του πάχους του εξωτερικού σωλήνα του δοκιμίου #2

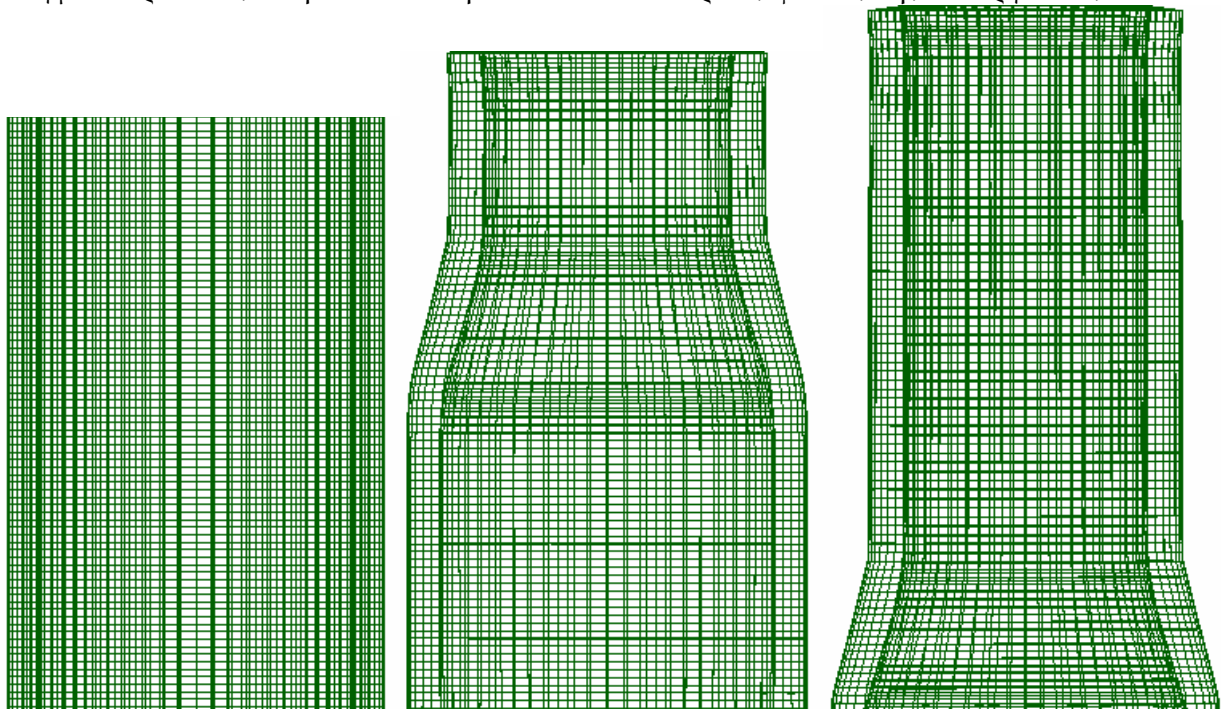
Στο διάγραμμα 4.2.2 παρατηρείται βαθμιαία αύξηση του πάχους του εσωτερικού σωλήνα από την χρονική στιγμή $t=16.00\text{msec}$ έως την χρονική στιγμή $t=28.00\text{msec}$ και κατόπιν απότομη μείωση και σταθεροποίηση του περί την τελική τιμή ως το πέρας της κατεργασίας. Η σταθερότητα αυτή οφείλεται στην επαφή του εξωτερικού στρώματος με τα τοιχώματα της μήτρας από την μια μεριά και την επαφή με το εσωτερικό στρώμα από την άλλη.



Διάγραμμα 4.2.3: Μεταβολή του συνολικού πάχους του διμεταλλικού δοκιμίου #2

Στο διάγραμμα 4.2.3 παρατηρείται βαθμιαία αύξηση του πάχους του εσωτερικού σωλήνα από την χρονική στιγμή $t=14.00\text{msec}$ έως την χρονική στιγμή $t=28.00\text{msec}$ και κατόπιν ομαλή μείωση και σταθεροποίηση του περί την τελική τιμή ως το πέρας της κατεργασίας

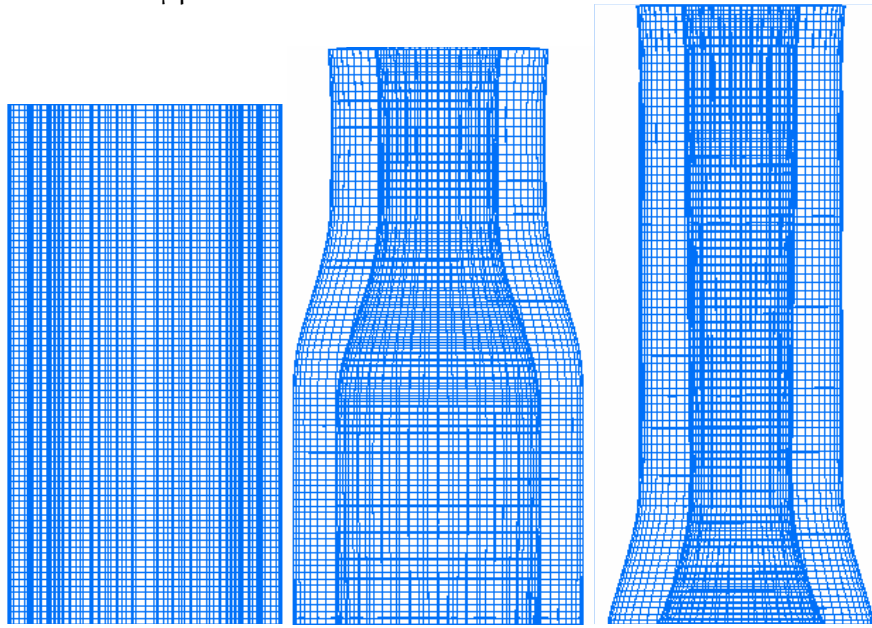
Το πλέγμα παρουσιάζει την ακόλουθη εικόνα σε 3 διακριτές φάσεις της κατεργασίας:



Εικόνα 4.2.4: Πλέγμα εξωτερικού σωλήνα (α) $t=0.00\text{msec}$ (β) $t=20.00\text{msec}$ (γ) $t=39.99\text{msec}$

Από την εικόνα 4.2.4, όπου παρουσιάζεται στραμμένο κατά 180° το πλέγμα του εξωτερικού σωλήνα σε 3 χρονικές στιγμές, είναι φανερό ότι υπάρχει έντονη παραμόρφωση (συμπίεση) των πεπερασμένων στοιχείων στις περιοχές που έχουν ήδη υποστεί την κατεργασία διέλασης (β, γ) καθώς και στην υπό διέλαση περιοχή (β). Επίσης, παρατηρείται ότι τα πεπερασμένα στοιχεία που βρίσκονται στο κάτω μέρος του δοκιμίου παρουσιάζουν τάση ροής προς τα κάτω (γ). Τέλος,

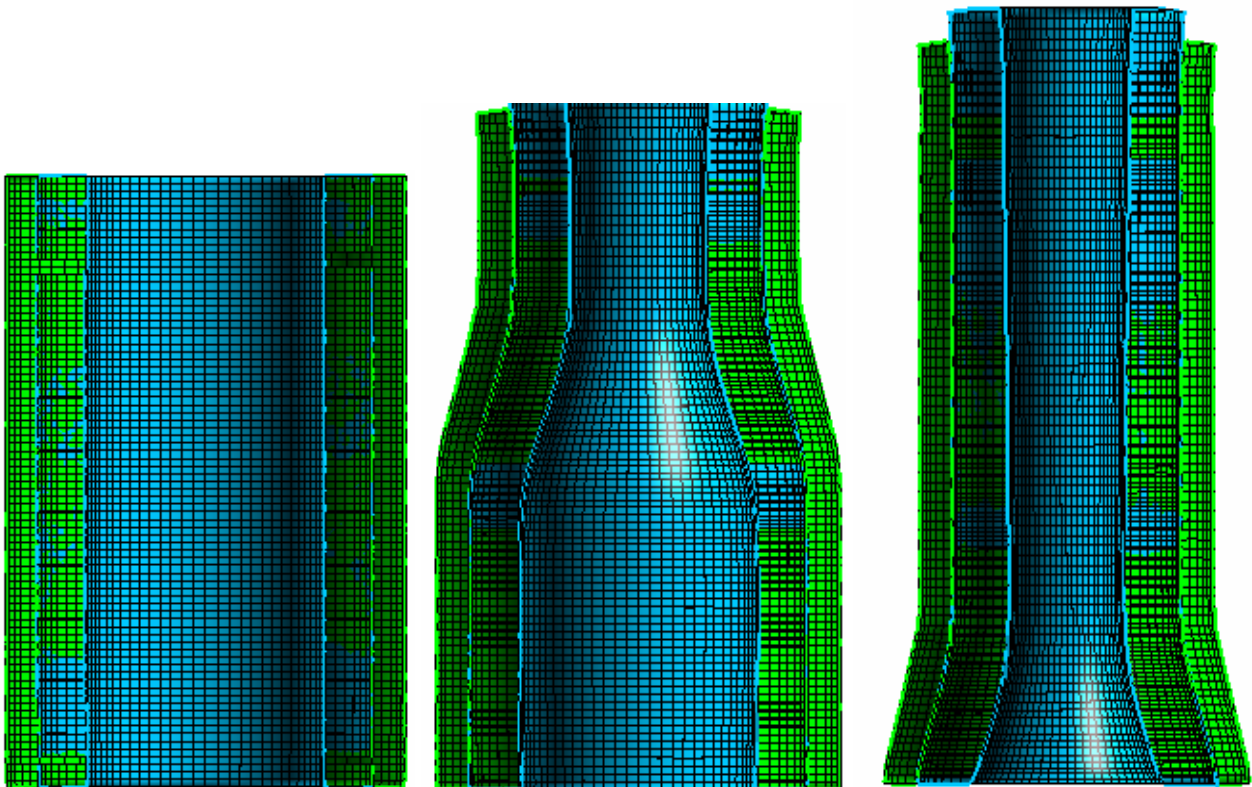
συμπίεση του πλέγματος παρατηρείται επίσης στο πέρας της κατεργασίας στην περιοχή που βρίσκεται στο μέτωπο του εμβόλου.



Εικόνα 4.2.5: Πλέγμα εσωτερικού σωλήνα (α) $t=0.00msec$ (β) $t=20.00msec$ (γ) $t=39.99msec$

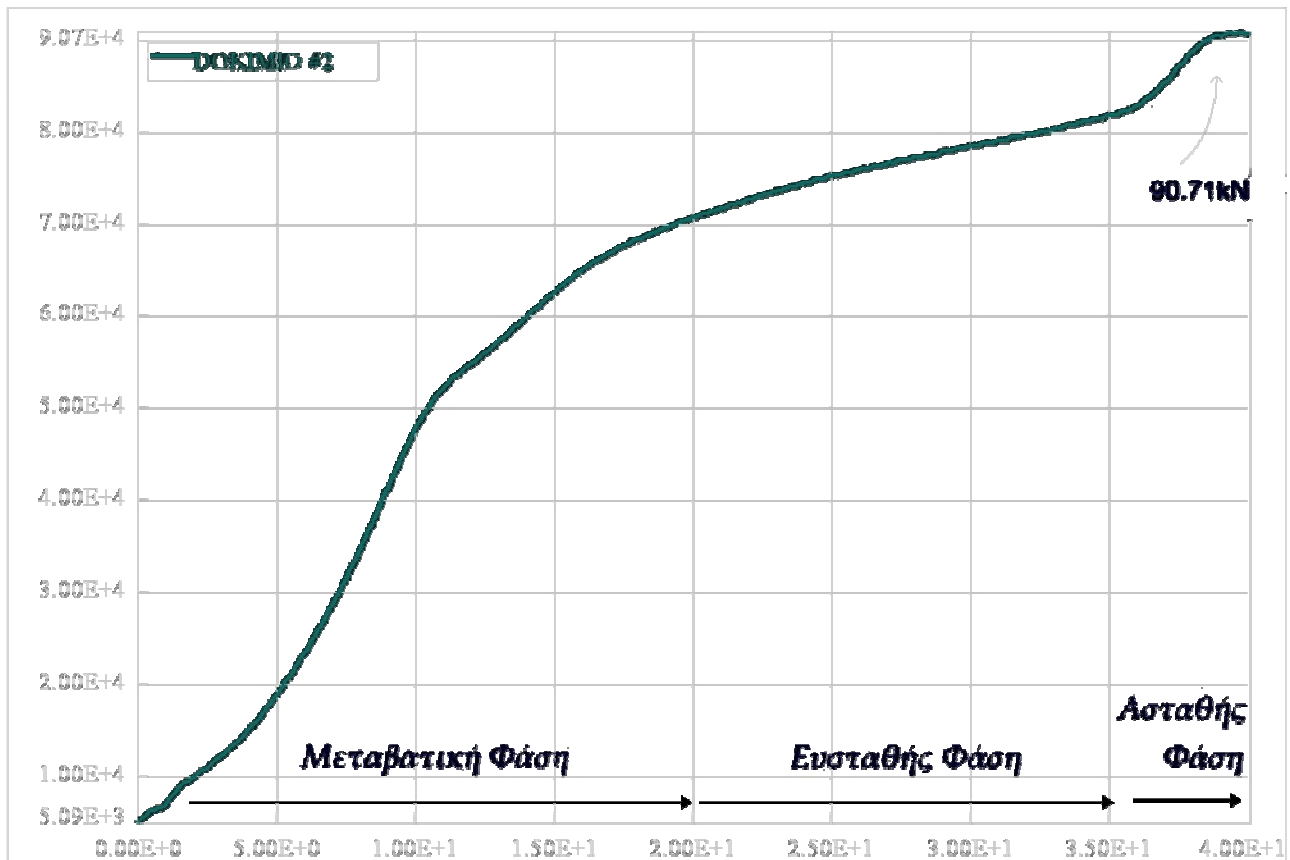
Ομοίως, από την εικόνα 4.2.5, όπου παρουσιάζεται στραμμένο κατά 180° το πλέγμα του εσωτερικού σωλήνα σε 3 χρονικές στιγμές, είναι φανερό ότι υπάρχει έντονη παραμόρφωση (συμπίεση) των πεπερασμένων στοιχείων στις περιοχές που έχουν ήδη υποστεί στην κατεργασία διέλασης (β,γ) καθώς και στην υπό διέλαση περιοχή (β). Τέλος, συμπίεση του πλέγματος παρατηρείται επίσης στο πέρας της κατεργασίας στην περιοχή που βρίσκεται στο μέτωπο του εμβόλου.

Η συνολική παραμόρφωση του πλέγματος στο πέρας της κατεργασίας και για τους 2 σωλήνες δίνεται στην ακόλουθη εικόνα.



Εικόνα 4.2.6: Παραμόρφωση πλέγματος διμεταλλικού σωλήνα (α) $t=0.00msec$ (β) $t=20.00msec$ (γ) $t=39.99msec$

Διάγραμμα Φορτίου – Μετατόπισης



Διάγραμμα 4.2.4: Καμπύλη Φορτίου-Μετατόπισης για το Δοκίμιο #2

Στο διάγραμμα που προέκυψε από την επίλυση του μοντέλου διακρίνονται οι 3 φάσεις της κατεργασίας (Μεταβατική Φάση, Φάση Ευστάθειας, Ασταθής Φάση). Η μορφή της καμπύλης προσεγγίζει κατά πολύ την αντίστοιχη καμπύλη που προέκυψε από την πειραματική διαδικασία, βλ. διάγραμμα 2.2. (Εξαιτίας διαφορετικής κλίμακας που χρησιμοποιείται στα δύο διαγράμματα, φαινομενικά εντοπίζονται μικροδιαφορές στην εμφάνιση της καμπύλης). Ολόκληρη η καμπύλη είναι ελαφρά μετατοπισμένη σε σχέση με την καμπύλη που προέκυψε από την πειραματική διαδικασία, όπως και στην περίπτωση του δοκιμίου #1.

Επίσης σημειώνεται το μέγιστο φορτίο διέλασης, δηλαδή 90.71kN, τιμή που προσεγγίζει την αντίστοιχη πειραματική τιμή, δηλαδή τα 79.80kN, με απόκλιση 13.67%. Η απόκλιση αυτή πιθανώς παρατηρείται επειδή για το υλικό του εσωτερικού σωλήνα (χυτό αλουμίνιο) δεν υπάρχουν πρότυπες ιδιότητες και ορισμένες τιμές μηχανικών ιδιοτήτων που δόθηκαν πιθανόν να διαφέρουν από τις πραγματικές. Συνεπώς, γίνεται η υπόθεση ότι με την εισαγωγή των κατάλληλων τιμών των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού, η μοντελοποίηση θα ήταν ακριβέστερη. Θα μπορούσε επίσης η διαφορά αυτή να αποδοθεί στην επιλογή των συντελεστών τριβής μεταξύ της μήτρας και του δοκιμίου, μολοντί δόθηκαν οι ελάχιστες προτεινόμενες τιμές για τον συγκεκριμένο τύπο επαφής (δηλαδή επιφάνειες με λεπτό φιλμ λιπαντικού).

Τασικό Πεδίο

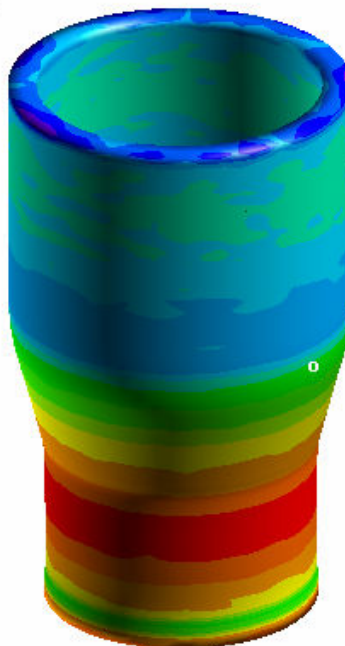
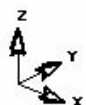
ΔΟΚΙΜΙΟ #2 - ΕΞΩΤ. ΣΤΡΩΜΑ
 $t=0.49msec$



Εικόνα 4.2.7: Ισοδύναμες τάσεις κατά von Mises για τον εξωτερικό σωλήνα κατά τη χρονική στιγμή $t=0.49msec$

Από την αναπαράσταση αυτή παρατηρείται, όπως είναι αναμενόμενο, ότι η μέγιστη τάση εμφανίζεται στην περιοχή όπου ο σωλήνας εισέρχεται στο κωνικό τμήμα της μήτρας. Η τάση αυτή υπολογίστηκε στα 304-326MPa περίπου. Επίσης, το τμήμα του δοκιμίου που βρίσκεται σε επαφή με το μέτωπο του εμβόλου καταπονείται και αυτό από τάση, αλλά μικρότερη, περίπου 108-130MPa.

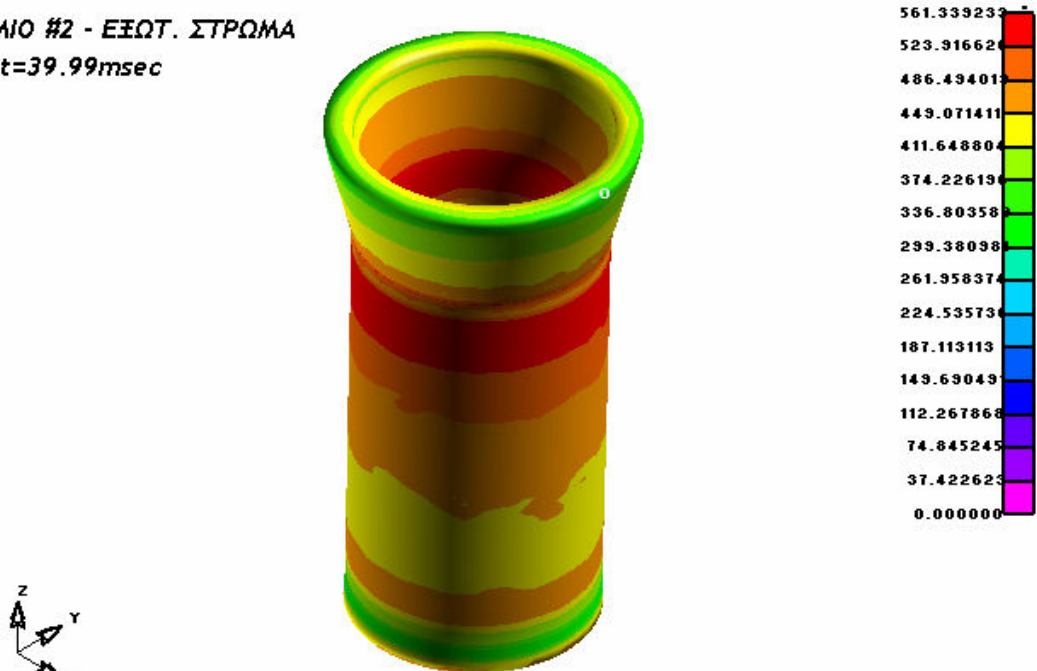
ΔΟΚΙΜΙΟ #2 - ΕΞΩΤ. ΣΤΡΩΜΑ
 $t=19.99msec$



Εικόνα 4.2.8: Ισοδύναμες τάσεις κατά von Mises για τον εξωτερικό σωλήνα κατά τη χρονική στιγμή $t=19.99msec$

Στην εικόνα αυτή παρατηρείται ότι η μέγιστη τάση που καταπονεί τον εξωτερικό σωλήνα είναι περί τα 488-523MPa και παρουσιάζεται στην περιοχή του δοκιμίου που βρίσκεται στο κωνικό τμήμα της μήτρας και δη στην εσωτερική επιφάνεια του σωλήνα, καθώς αυτό το τμήμα βρίσκεται υπό τάση τόσο από τα τοιχώματα της μήτρας όσο και από τον εσωτερικό σωλήνα. Επίσης, περιοχές οι οποίες έχουν ήδη υποστεί την κατεργασία της διέλασης καταπονούνται από αρκετά υψηλές τάσεις καθώς πιέζονται από τα τοιχώματα της εξόδου της μήτρας.

ΔΟΚΙΜΙΟ #2 - ΕΞΩΤ. ΣΤΡΩΜΑ
 $t=39.99msec$



Εικόνα 4.2.9: Ισοδύναμες τάσεις κατά von Mises για τον εξωτερικό σωλήνα κατά τη χρονική στιγμή $t=39.99msec$

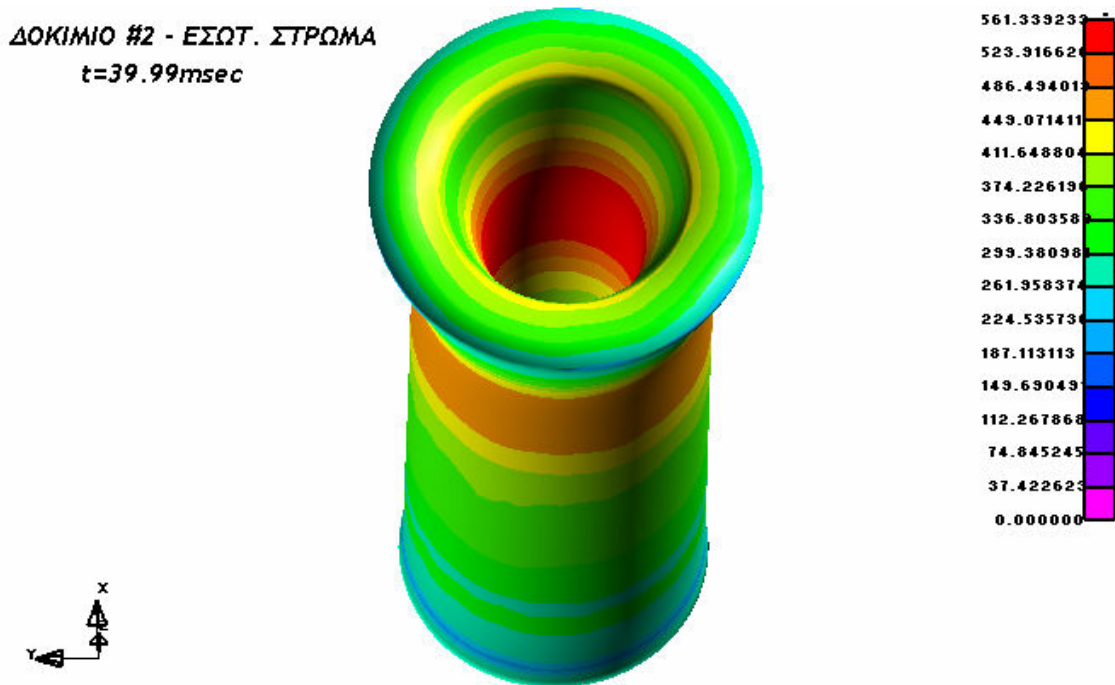
Η εικόνα 4.2.9 παρουσιάζει την τελική εντατική κατάσταση του εξωτερικού σωλήνα, στην οποία παρατηρείται αρκετά ομοιόμορφη κατανομή των τάσεων. Στην περιοχή που περισσότερο καταπονείται απαντώνται τάσεις περί τα 523-560MPa.

ΔΟΚΙΜΙΟ #2 - ΕΣΩΤ. ΣΤΡΩΜΑ
 $t=0.49msec$



Εικόνα 4.2.10: Ισοδύναμες τάσεις κατά von Mises για τον εσωτερικό σωλήνα κατά τη χρονική στιγμή $t=0.49msec$

Από την αναπαράσταση αυτή παρατηρείται, όπως είναι αναμενόμενο, ότι η μέγιστη τάση εμφανίζεται στην περιοχή όπου ο σωλήνας εισέρχεται στο κωνικό τμήμα της μήτρας. Η τάση αυτή υπολογίστηκε στα 65-87MPa περίπου. Επίσης, το τμήμα του δοκιμίου που βρίσκεται σε επαφή με το μέτωπο του εμβόλου καταπονείται και αυτό από τάση, αλλά πολύ μικρή, περίπου 21MPa.



Εικόνα 4.2.11: Ισοδύναμες τάσεις κατά von Mises για τον εσωτερικό σωλήνα κατά τη χρονική στιγμή t=39.99msec

Η εικόνα 4.2.11 παρουσιάζει την τελική εντατική κατάσταση του εσωτερικού σωλήνα, στην οποία παρατηρείται αρκετά ομοιόμορφη κατανομή των τάσεων. Στην περιοχή που περισσότερο καταπονείται απαντώνται τάσεις περί τα 523-560MPa.

■ Η κατεργασία του δοκιμίου και η μορφή του πλέγματος καθ'όλη την διάρκεια της διαδικασίας έχει καταγραφεί σε video με τη βοήθεια του post-processor. Το video αυτό, καθώς και άλλα αρχεία που αφορούν στην μοντελοποίηση, στην επίλυση και στην εξαγωγή αποτελεσμάτων βρίσκονται στο dvd που συνοδεύει την εργασία στον αντίστοιχο φάκελο για το συγκεκριμένο δοκίμιο.

4.3 Αποτελέσματα Προσομοίωσης - Δοκίμιο #3

Το διμεταλλικό δοκίμιο #3 είναι κατασκευασμένο από καθαρό χαλκό (εξωτερικό στρώμα) και κράμα αλουμινίου Al 6063 F25 (εσωτερικό στρώμα). Ο λόγος διαρροής των 2 υλικών είναι:

$$\lambda = \frac{\text{Sigy}(Cu)}{\text{Sigy}(Al - 6063 - F25)} = \frac{266}{192.2} = 1.384 < 3.5$$

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [17], ο παραπάνω λόγος των ορίων διαρροής εξασφαλίζει ομαλή διεξαγωγή της κατεργασίας και όχι ιδιαίτερα αυξημένες τιμές τάσεων.

- Αρχικό μήκος εσωτερικού και εξωτερικού στρώματος: 40.00mm
- Αρχικό πάχος εσωτερικού σωλήνα: 2.5mm
- Αρχικό πάχος εξωτερικού σωλήνα: 2.5mm

Μετά την επίλυση του μοντέλου του δοκιμίου #3 από τον solver του LS-DYNA, προκύπτουν τα ακόλουθα αποτελέσματα μέσω των ETA Post-Processor και ETA Graph-Processor.

Φάσεις της Κατεργασίας

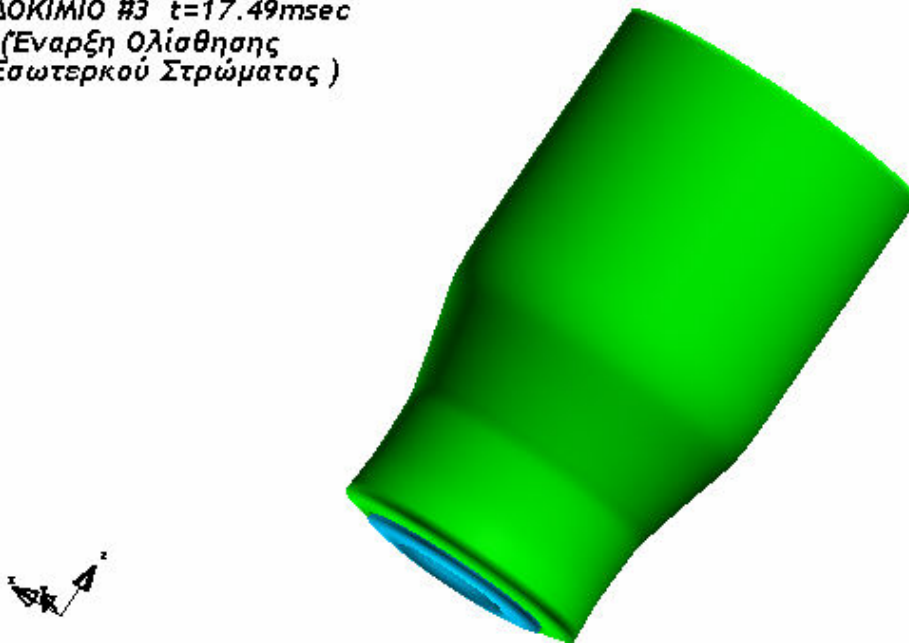
ΔΟΚΙΜΙΟ #3 - t=0.00msec
(Έναρξη Κατεργασίας)



Εικόνα 4.3.1: Αναπαράσταση δοκιμίου #3 κατά την έναρξη της κατεργασίας διέλασης

Τη χρονική στιγμή t=17.49msec αρχίζει η ροή του εσωτερικού στρώματος προς το κάτω μέρος του δοκιμίου.

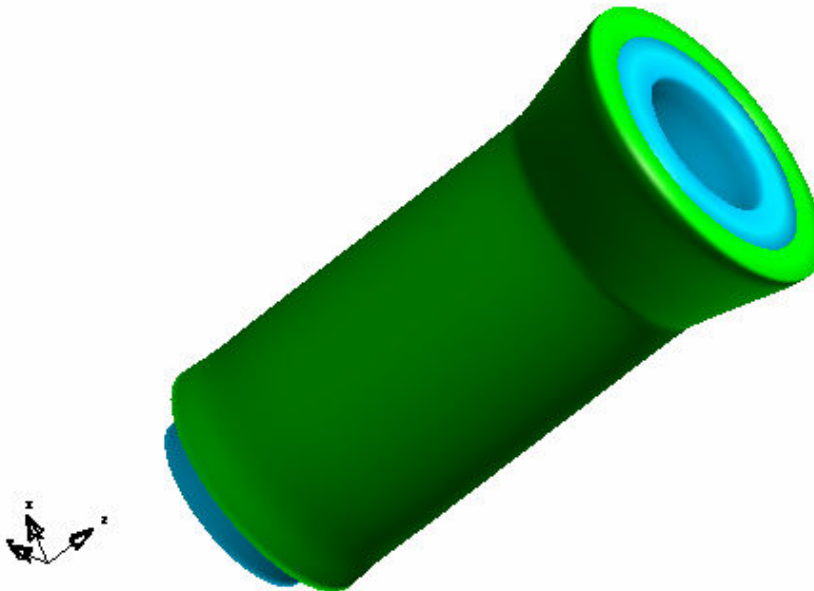
ΔΟΚΙΜΙΟ #3 $t=17.49msec$
(Έναρξη Ολίσθησης
Εσωτερικού Στρώματος)



Εικόνα 4.3.2: Αναπαράσταση δοκιμίου #3 κατά την χρονική στιγμή $t=17.49msec$

Η επίλυση συνεχίστηκε απρόσκοπτα μέχρι την χρονική στιγμή $t=40.00msec$, οπότε και έληξε η κατεργασία. Η τελική εικόνα του δοκιμίου ήταν η εξής:

ΔΟΚΙΜΙΟ #3 $t=40.00msec$



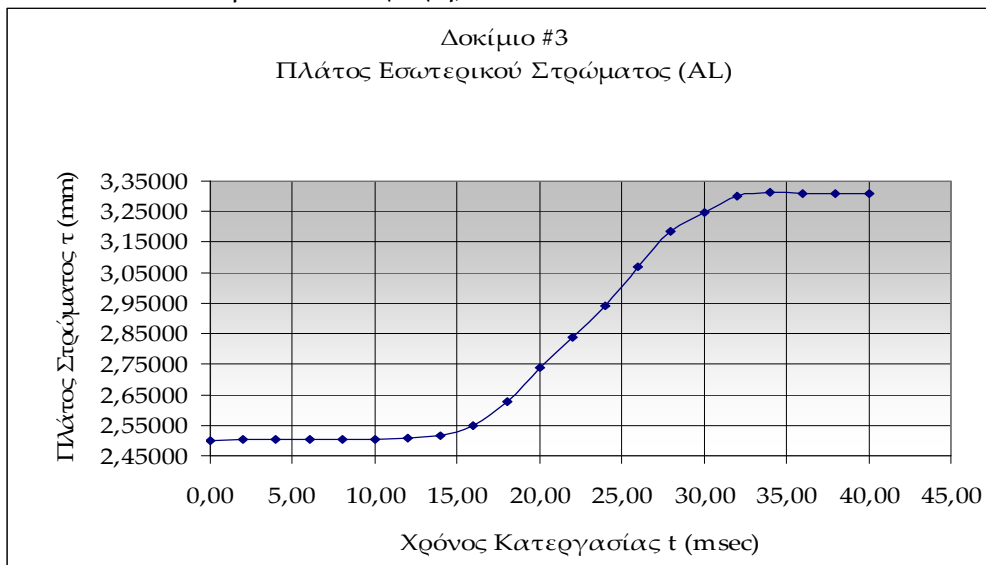
Εικόνα 4.3.3: Αναπαράσταση δοκιμίου #3 κατά τη λήξη της κατεργασίας διέλασης

Η τελική εικόνα του δοκιμίου είναι παρόμοια με την αντίστοιχη πειραματική, βλ. εικόνα 2.15 στο Κεφάλαιο 2.

Παραμόρφωση Πλέγματος

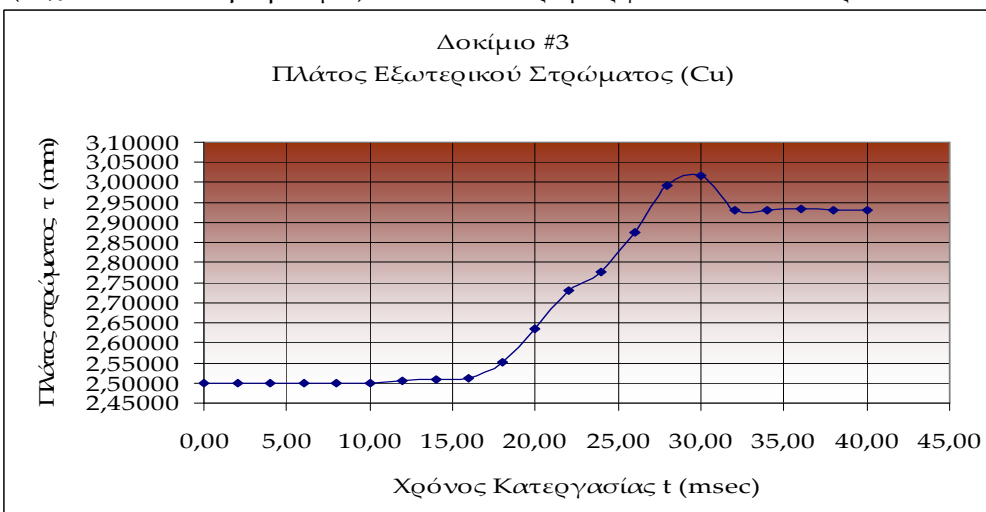
- Τελικό μήκος εσωτερικού στρώματος: 47.39mm (Αύξηση μήκους κατά 18.48%)
- Τελικό μήκος εξωτερικού στρώματος: 44.49mm (Αύξηση μήκους κατά 11.23%)
- Τελικό πάχος εσωτερικού σωλήνα: 3.31mm (Αύξηση πάχους κατά 32.32%)
- Τελικό πάχος εξωτερικού σωλήνα: 2.93mm (Αύξηση πάχους κατά 17.26%)
- Τελικό πάχος διμεταλλικού σωλήνα: 6.24mm (Αύξηση πάχους κατά 24.79%)

Όπως παρατηρείται, αναφορικά με το μήκος των σωλήνων, για το οποίο υπάρχουν μετρήσεις από τις πειραματικές δοκιμές, η επιμήκυνση που προκύπτει από την αριθμητική προσομοίωση είναι μικρότερη για το αλουμίνιο (18.48% έναντι 28.30%) και αρκετά μεγαλύτερη για το χαλκό (11.23% έναντι 1.30%). Η μέτρηση έγινε σε κόμβους που βρίσκονται στο μέσο του πάχους του πλέγματος #82173 & #65650, βλέπε εισαγωγή).



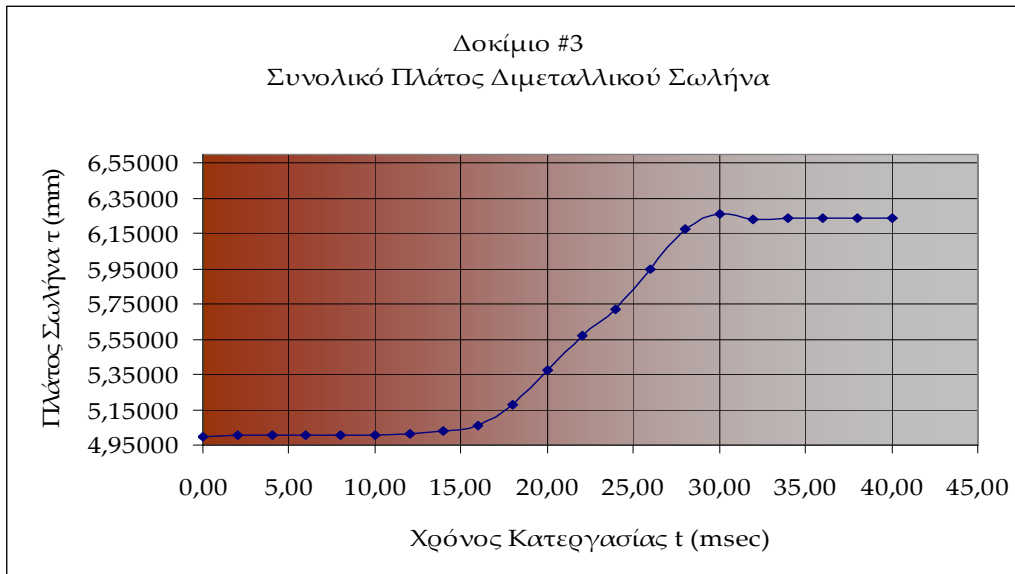
Διάγραμμα 4.3.1: Μεταβολή του πάχους του εσωτερικού σωλήνα του δοκιμίου #3

Στο διάγραμμα 4.3.1 παρατηρείται βαθμιαία αύξηση του πάχους του εσωτερικού σωλήνα από την χρονική στιγμή $t=14.00\text{msec}$ έως την χρονική στιγμή $t=32.00\text{msec}$ και κατόπιν σταθεροποίηση του περί την τελική τιμή ως το πέρας της κατεργασίας. Η αύξηση του πάχους του εσωτερικού σωλήνα είναι εξαιρετικά μεγάλη (32.32%). Κάτι τέτοιο δικαιολογείται εν μέρει από το γεγονός ότι στην εσωτερική επιφάνεια του σωλήνα δεν υπάρχει υλικό το οποίο να περιορίζει την αύξηση του πάχους (π.χ. mandrel, δηλ. βύσμα) και έτσι παραμορφώνεται ελεύθερα.



Διάγραμμα 4.3.2: Μεταβολή του πάχους του εξωτερικού σωλήνα του δοκιμίου #3

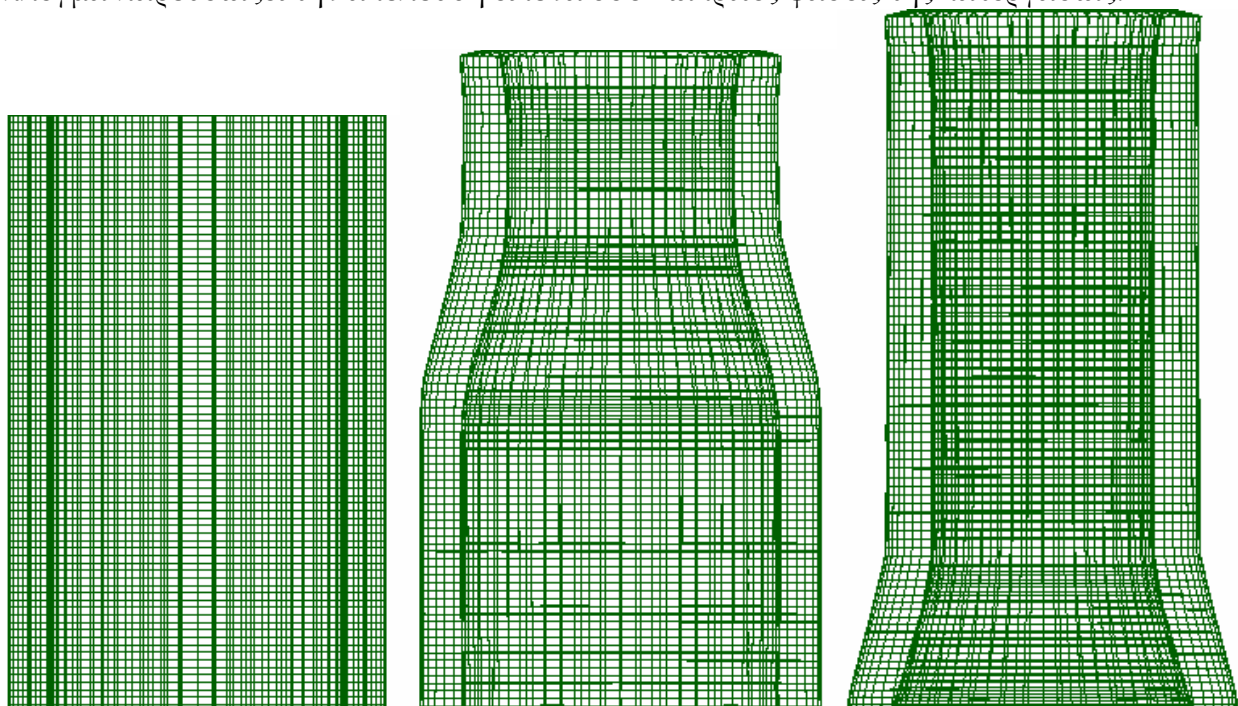
Στο διάγραμμα 4.3.2 παρατηρείται βαθμιαία αύξηση του πάχους του εσωτερικού σωλήνα από την χρονική στιγμή $t=14.00\text{msec}$ έως την χρονική στιγμή $t=28.00\text{msec}$ και κατόπιν απότομη μείωση και σταθεροποίηση του περί την τελική τιμή ως το πέρας της κατεργασίας. Η σταθερότητα αυτή οφείλεται στην επαφή του εξωτερικού στρώματος με τα τοιχώματα της μήτρας από την μια μεριά και την επαφή με το εσωτερικό στρώμα από την άλλη.



Διάγραμμα 4.3.3: Μεταβολή του συνολικού πάχους του διμεταλλικού δοκιμίου #3

Στο διάγραμμα 4.3.3 παρατηρείται βαθμιαία αύξηση του πάχους του εσωτερικού σωλήνα από την χρονική στιγμή $t=14.00\text{msec}$ έως την χρονική στιγμή $t=30.00\text{msec}$ και κατόπιν σταθεροποίηση του περί την τελική τιμή ως το πέρας της κατεργασίας

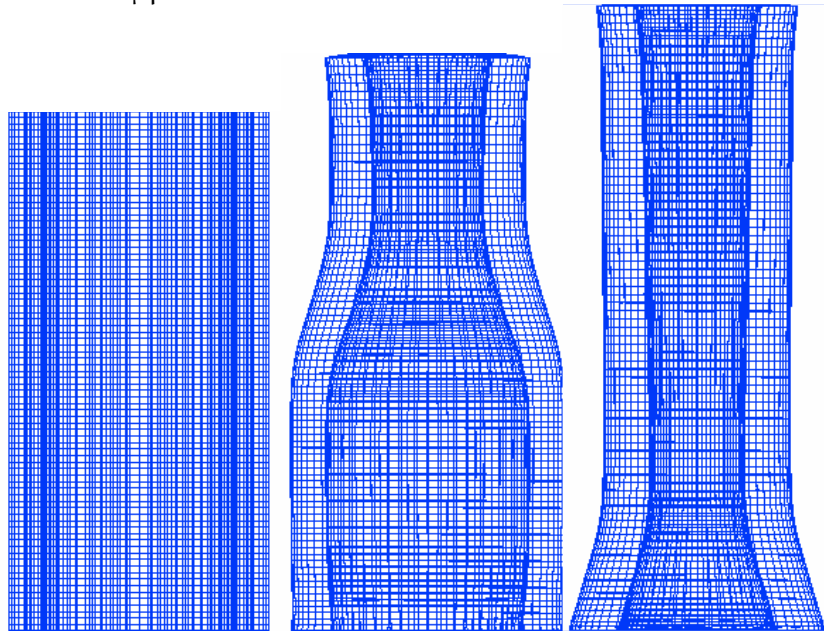
Το πλέγμα παρουσιάζει την ακόλουθη εικόνα σε 3 διακριτές φάσεις της κατεργασίας:



Εικόνα 4.3.4: Πλέγμα εξωτερικού σωλήνα (α) $t=0.00\text{msec}$ (β) $t=20.00\text{msec}$ (γ) $t=40.00\text{msec}$

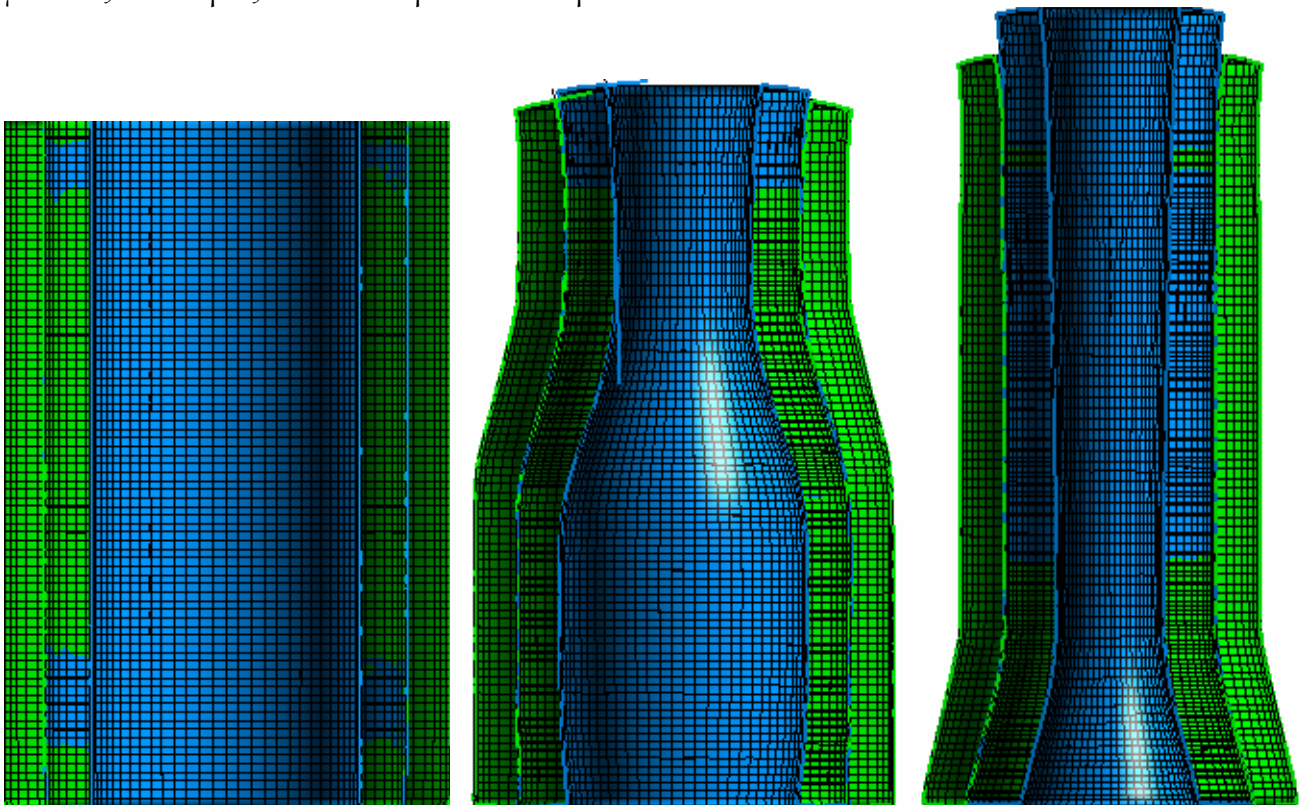
Από την εικόνα 4.3.4, όπου παρουσιάζεται στραμμένο κατά 180° το πλέγμα του εξωτερικού σωλήνα σε 3 χρονικές στιγμές, είναι φανερό ότι υπάρχει έντονη παραμόρφωση (συμπίεση) των πεπερασμένων στοιχείων στις περιοχές που έχουν ήδη υποστεί την κατεργασία διέλασης (β,γ) καθώς και στην υπό διέλαση περιοχή (β). Επίσης, παρατηρείται ότι τα πεπερασμένα στοιχεία που βρίσκονται στο κάτω μέρος του δοκιμίου παρουσιάζουν τάση ροής προς τα κάτω (γ). Τέλος,

συμπίεση του πλέγματος παρατηρείται επίσης στο πέρας της κατεργασίας στην περιοχή που βρίσκεται στο μέτωπο του εμβόλου.



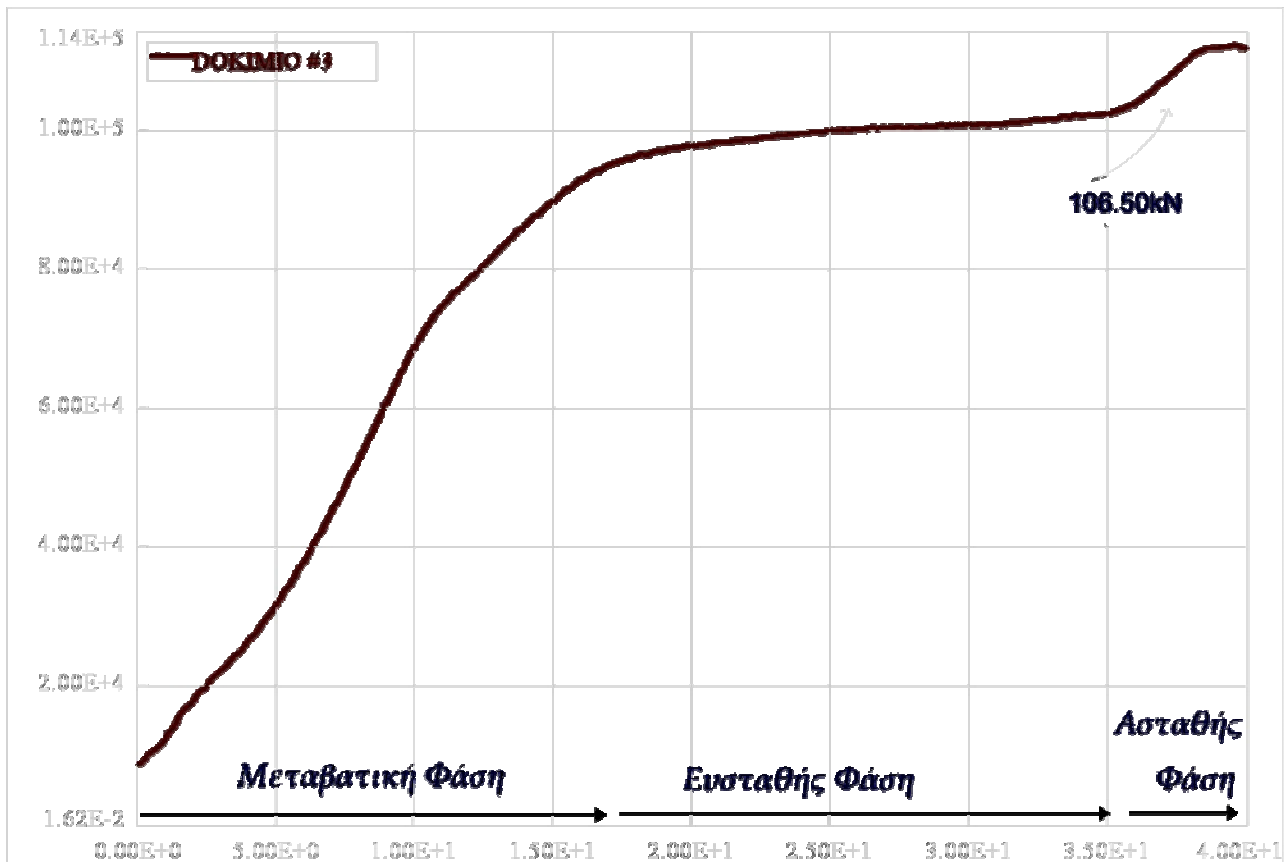
Εικόνα 4.3.5: Πλέγμα εσωτερικού σωλήνα (α) $t=0.00msec$ (β) $t=20.00msec$ (γ) $t=40.00msec$

Ομοίως, από την εικόνα 4.3.5, όπου παρουσιάζεται στραμμένο κατά 180° το πλέγμα του εσωτερικού σωλήνα σε 3 χρονικές στιγμές, είναι φανερό ότι υπάρχει έντονη παραμόρφωση (συμπίεση) των πεπερασμένων στοιχείων στις περιοχές που έχουν ήδη υποστεί στην κατεργασία διέλασης (β,γ) καθώς και στην υπό διέλαση περιοχή (β). Τέλος, συμπίεση του πλέγματος παρατηρείται επίσης στο πέρας της κατεργασίας στην περιοχή που βρίσκεται στο μέτωπο του εμβόλου. Η συνολική παραμόρφωση του πλέγματος στο πέρας της κατεργασίας και για τους 2 σωλήνες δίνεται στην ακόλουθη εικόνα.



Εικόνα 4.3.6: Παραμόρφωση πλέγματος διμεταλλικού σωλήνα (α) $t=0.00msec$ (β) $t=20.00msec$ (γ) $t=40.00msec$

Διάγραμμα Φορτίου – Μετατόπισης



Διάγραμμα 4.3.4: Καμπύλη Φορτίου-Μετατόπισης για το Δοκίμιο #3

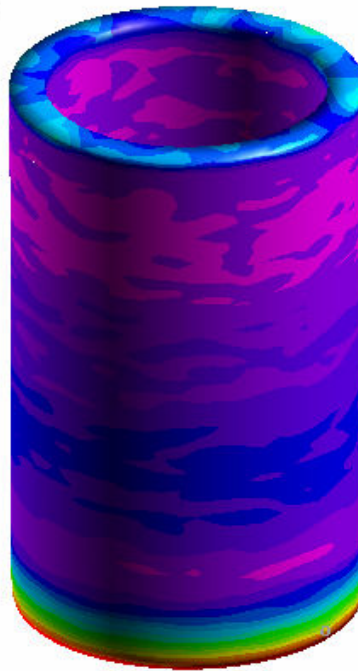
Στο διάγραμμα που προέκυψε από την επίλυση του μοντέλου διακρίνονται οι 3 φάσεις της κατεργασίας (Μεταβατική Φάση, Φάση Ευστάθειας, Ασταθής Φάση). Η μορφή της καμπύλης προσεγγίζει κατά πολύ την αντίστοιχη καμπύλη που προέκυψε από την πειραματική διαδικασία, βλ. διάγραμμα 2.3. (Εξαιτίας διαφορετικής κλίμακας που χρησιμοποιείται στα δύο διαγράμματα, φαινομενικά εντοπίζονται μικροδιαφορές στην εμφάνιση της καμπύλης, ωστόσο με μια προσεκτικότερη εξέταση γίνεται φανερό ότι οι τιμές βρίσκονται σε αξιοσημείωτη αντιστοιχία).

Επίσης σημειώνεται το μέγιστο φορτίο διέλασης, δηλαδή 106.50kN, τιμή που προσεγγίζει κατά πολύ την αντίστοιχη πειραματική τιμή, δηλαδή τα 108.70kN, με απόκλιση μόλις 2.1% .

Συνεπώς, από άποψη ακρίβειας υπολογισμού του φορτίου, η μέθοδος κρίνεται ιδιαίτερα αξιόπιστη και η μοντελοποίηση ως ιδανική.

Τασικό Πεδίο

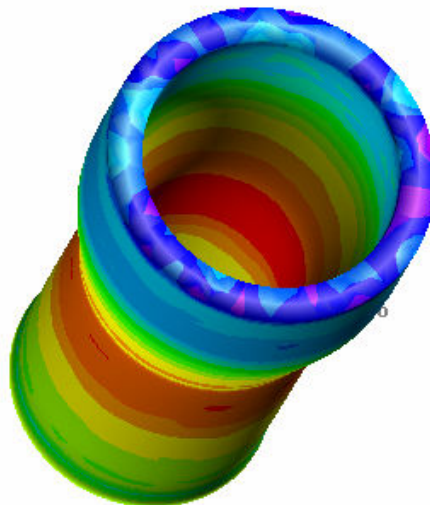
ΔΟΚΙΜΙΟ #3 - ΕΞΩΤ. ΣΤΡΩΜΑ
 $t=0.49msec$



Εικόνα 4.3.7: Ισοδύναμες τάσεις κατά von Mises για τον εξωτερικό σωλήνα κατά τη χρονική στιγμή $t=0.49msec$

Από την αναπαράσταση αυτή παρατηρείται, όπως είναι αναμενόμενο, ότι η μέγιστη τάση εμφανίζεται στην περιοχή όπου ο σωλήνας εισέρχεται στο κωνικό τμήμα της μήτρας. Η τάση αυτή υπολογίστηκε στα 302-324MPa περίπου. Επίσης, το τμήμα του δοκιμίου που βρίσκεται σε επαφή με το μέτωπο του εμβόλου καταπονείται και αυτό από τάση, αλλά μικρότερη, από 64 έως 129MPa.

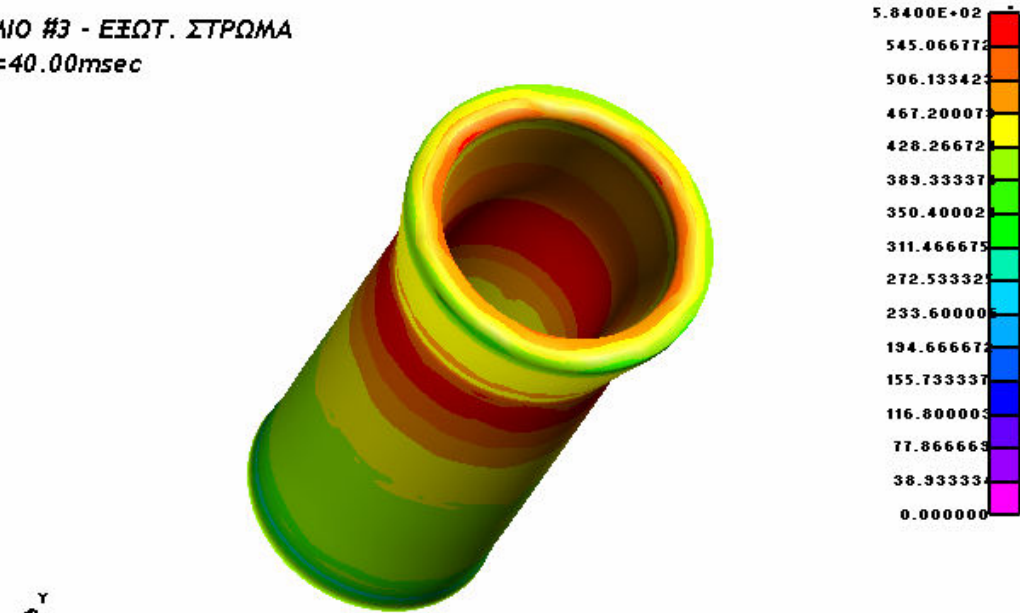
ΔΟΚΙΜΙΟ #3 - ΕΞΩΤ. ΣΤΡΩΜΑ
 $t=29.99msec$



Εικόνα 4.3.8: Ισοδύναμες τάσεις κατά von Mises για τον εξωτερικό σωλήνα κατά τη χρονική στιγμή $t=29.99msec$

Στην εικόνα αυτή παρατηρείται ότι η μέγιστη τάση που καταπονεί τον εξωτερικό σωλήνα είναι περί τα 530-568MPa και παρουσιάζεται στην περιοχή του δοκιμίου που βρίσκεται στο κωνικό τμήμα της μήτρας και δη στην εσωτερική επιφάνεια του σωλήνα, καθώς αυτό το τμήμα βρίσκεται υπό τάση τόσο από τα τοιχώματα της μήτρας όσο και από τον εσωτερικό σωλήνα. Επίσης, περιοχές οι οποίες έχουν ήδη υποστεί την κατεργασία της διέλασης καταπονούνται από αρκετά υψηλές τάσεις καθώς πιέζονται από τα τοιχώματα της εξόδου της μήτρας.

ΔΟΚΙΜΙΟ #3 - ΕΞΩΤ. ΣΤΡΩΜΑ
t=40.00msec



Εικόνα 4.3.9: Ισοδύναμες τάσεις κατά von Mises για τον εξωτερικό σωλήνα κατά τη χρονική στιγμή t=40.00msec

Η εικόνα 4.3.9 παρουσιάζει την τελική εντατική κατάσταση του εξωτερικού σωλήνα, στην οποία παρατηρείται σχετικά ομοιόμορφη κατανομή των τάσεων. Στην περιοχή που περισσότερο καταπονείται απαντώνται τάσεις περί τα 545-584MPa. Το κύριο σώμα του δοκιμίου καταπονείται από τάσεις που κυμαίνονται μεταξύ 272-506MPa.

ΔΟΚΙΜΙΟ #3 - ΕΣΩΤ. ΣΤΡΩΜΑ
t=0.49msec



Εικόνα 4.3.10: Ισοδύναμες τάσεις κατά von Mises για τον εσωτερικό σωλήνα κατά τη χρονική στιγμή t=0.49msec

Από την αναπαράσταση αυτή παρατηρείται, όπως είναι αναμενόμενο, ότι η μέγιστη τάση εμφανίζεται στην περιοχή όπου ο σωλήνας εισέρχεται στο κωνικό τμήμα της μήτρας. Η τάση αυτή υπολογίστηκε στα 194-216MPa περίπου. Επίσης, το τμήμα του δοκιμίου που βρίσκεται σε επαφή με το μέτωπο του εμβόλου καταπονείται και αυτό από τάση, αλλά πολύ μικρή, περίπου 21-64MPa.



Εικόνα 4.3.11: Ισοδύναμες τάσεις κατά von Mises για τον εσωτερικό σωλήνα κατά τη χρονική στιγμή t=40.00msec

Η εικόνα 4.3.11 παρουσιάζει την τελική εντατική κατάσταση του εσωτερικού σωλήνα, στην οποία παρατηρείται αρκετά ομοιόμορφη κατανομή των τάσεων. Στην περιοχή που περισσότερο καταπονείται απαντώνται τάσεις περί τα 389-428MPa. Το κύριο σώμα του σωλήνα καταπονείται από τάσεις που κυμαίνονται μεταξύ 134 και 350 MPa.

■ Η κατεργασία του δοκιμίου και η μορφή του πλέγματος καθ'όλη την διάρκεια της διαδικασίας έχει καταγραφεί σε video με τη βοήθεια του post-processor. Το video αυτό, καθώς και άλλα αρχεία που αφορούν στην μοντελοποίηση, στην επίλυση και στην εξαγωγή αποτελεσμάτων βρίσκονται στο dvd που συνοδεύει την εργασία στον αντίστοιχο φάκελο για το συγκεκριμένο δοκίμιο.

4.4 Αποτελέσματα Προσομοίωσης - Δοκίμιο #4

Το διμεταλλικό δοκίμιο #4 είναι κατασκευασμένο από καθαρό χαλκό (εξωτερικό στρώμα) και κράμα αλουμινίου Al 6063 F25 (εσωτερικό στρώμα). Ο λόγος διαρροής των 2 υλικών είναι:

$$\lambda = \frac{\text{Sigy}(Cu)}{\text{Sigy}(Al - 6063 - F25)} = \frac{266}{192.2} = 1.384 < 3.5$$

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [17], ο παραπάνω λόγος των ορίων διαρροής εξασφαλίζει ομαλή διεξαγωγή της κατεργασίας και όχι ιδιαίτερα αυξημένες τιμές τάσεων.

- Αρχικό μήκος εσωτερικού και εξωτερικού στρώματος: 40.00mm
- Αρχικό πάχος εσωτερικού σωλήνα: 2.00mm
- Αρχικό πάχος εξωτερικού σωλήνα: 3.00mm

Μετά την επίλυση του μοντέλου του δοκιμίου #4 από τον solver του LS-DYNA, προκύπτουν τα ακόλουθα αποτελέσματα μέσω των ETA Post-Processor και ETA Graph-Processor.

Φάσεις της Κατεργασίας

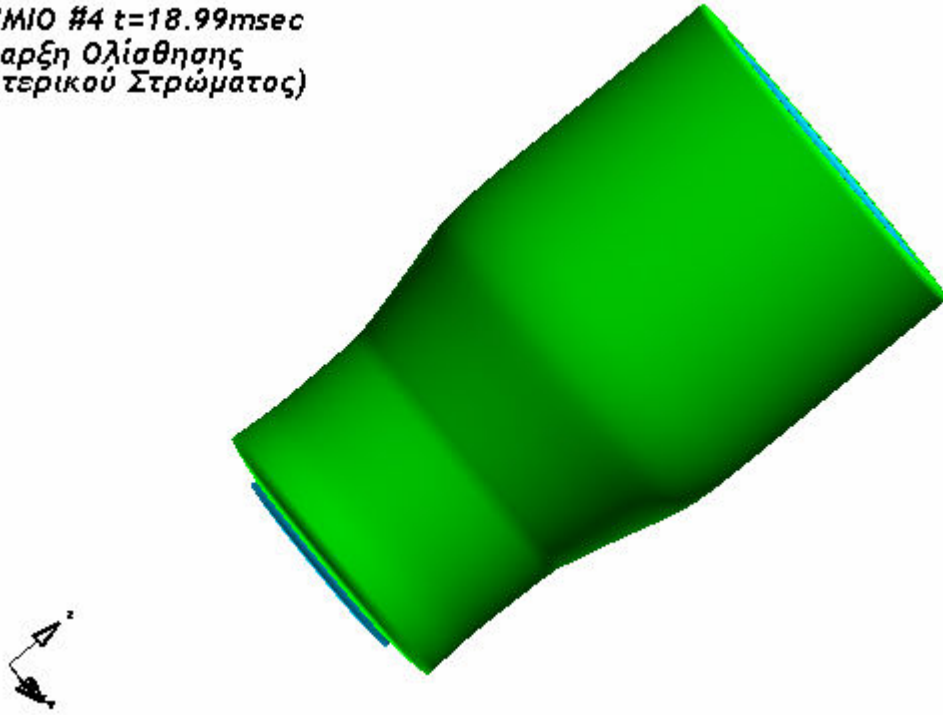
ΔΟΚΙΜΙΟ #4 t=0.00msec
(έναρξη κατεργασίας)



Εικόνα 4.4.1: Αναπαράσταση δοκιμίου #4 κατά την έναρξη της κατεργασίας διέλασης

Τη χρονική στιγμή t=18.99msec αρχίζει η ροή του εσωτερικού στρώματος προς το κάτω μέρος του δοκιμίου.

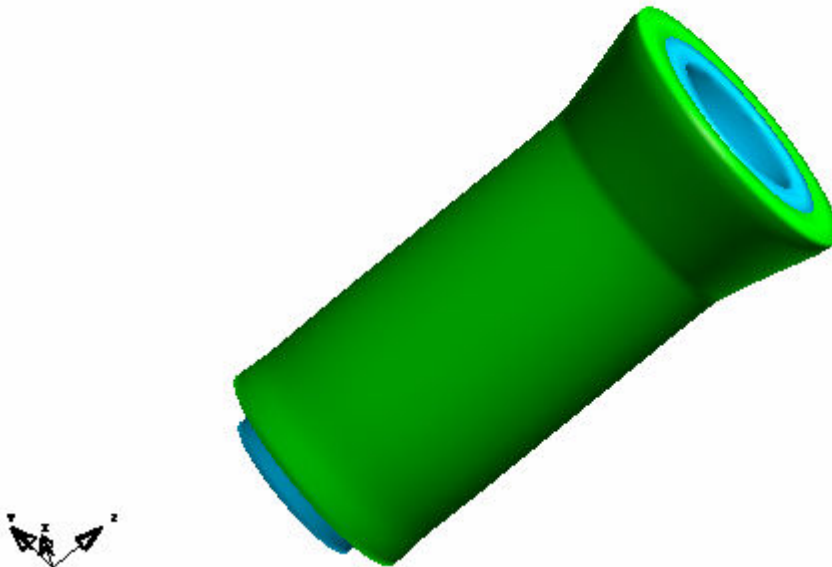
ΔΟΚΙΜΙΟ #4 $t=18.99msec$
(Έναρξη Ολίσθησης
Εσωτερικού Στρώματος)



Εικόνα 4.4.2: Αναπαράσταση δοκιμίου #4 κατά την χρονική στιγμή $t=18.99msec$

Η επίλυση συνεχίστηκε απρόσκοπτα μέχρι την χρονική στιγμή $t=39.49msec$, οπότε και έληξε η κατεργασία. Η τελική εικόνα του δοκιμίου ήταν η εξής:

ΔΟΚΙΜΙΟ #4 $t=39.49msec$
(τέλος κατεργασίας)



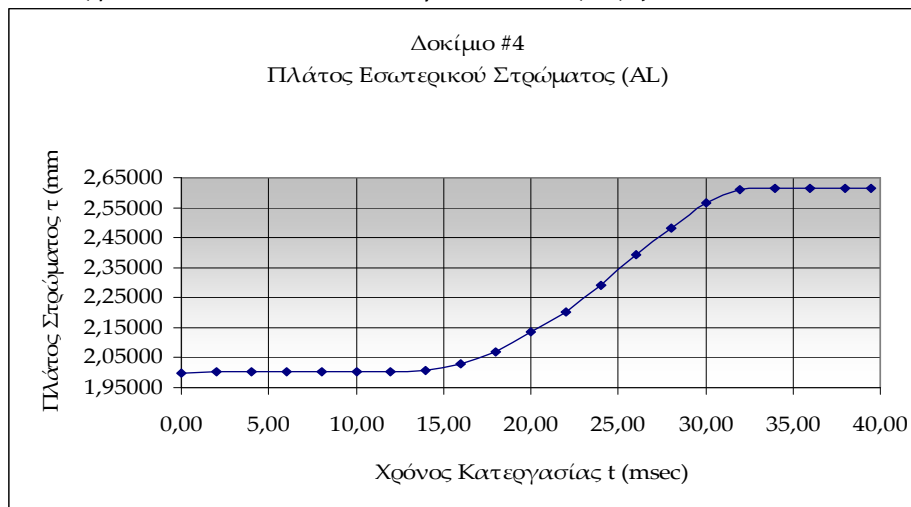
Εικόνα 4.4.3: Αναπαράσταση δοκιμίου #4 κατά τη λήξη της κατεργασίας διέλασης

Η τελική εικόνα του δοκιμίου είναι παρόμοια με την αντίστοιχη πειραματική, βλ. εικόνα 2.17 στο Κεφάλαιο 2. Η μόνη διαφορά τους έγκειται στο ότι στο πείραμα υπήρξε του υλικού του εσωτερικού σωλήνα προς τα πάνω κατά την εξόλκευση από τη μήτρα, κάτι το οποίο στα αποτελέσματα του LS-DYNA φυσικά δεν εμφανίζεται.

Παραμόρφωση Πλέγματος

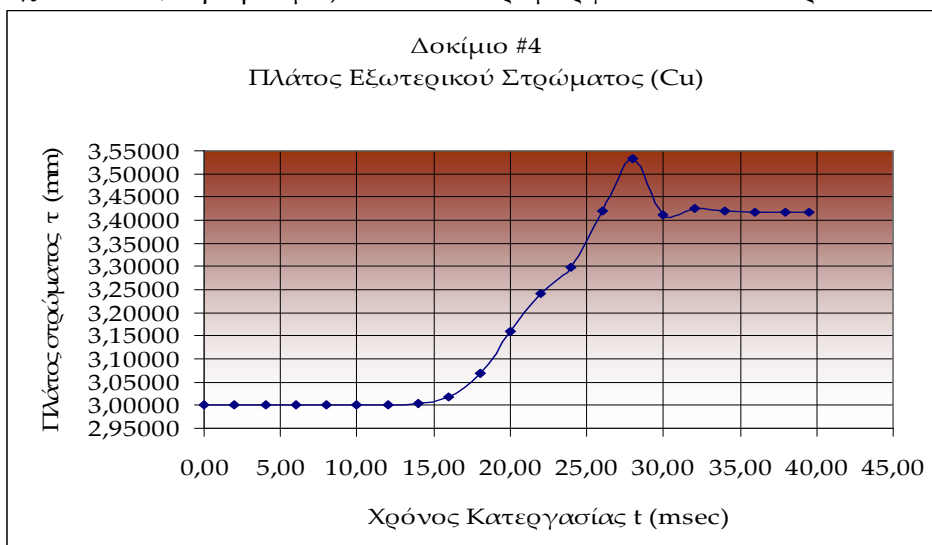
- Τελικό μήκος εσωτερικού στρώματος: 47.88mm (Αύξηση μήκους κατά 19.70%)
- Τελικό μήκος εξωτερικού στρώματος: 45.79mm (Αύξηση μήκους κατά 14.48%)
- Τελικό πάχος εσωτερικού σωλήνα: 2.62mm (Αύξηση πάχους κατά 30.78%)
- Τελικό πάχος εξωτερικού σωλήνα: 3.42mm (Αύξηση πάχους κατά 13.91%)
- Τελικό πάχος διμεταλλικού σωλήνα: 6.03mm (Αύξηση πάχους κατά 20.66%)

Όπως παρατηρείται, αναφορικά με το μήκος των σωλήνων, για το οποίο υπάρχουν μετρήσεις από τις πειραματικές δοκιμές, η επιμήκυνση που προκύπτει από την αριθμητική προσομοίωση είναι παρόμοια για το στρώμα αλουμινίου (19.70% έναντι 21.80%) και σχετικά μεγαλύτερη για το στρώμα χαλκού (14.48% έναντι 9.80%). Η μέτρηση έγινε σε κόμβους που βρίσκονται στο μέσο του πάχους του πλέγματος (#82173 & #65650, βλέπε εισαγωγή).



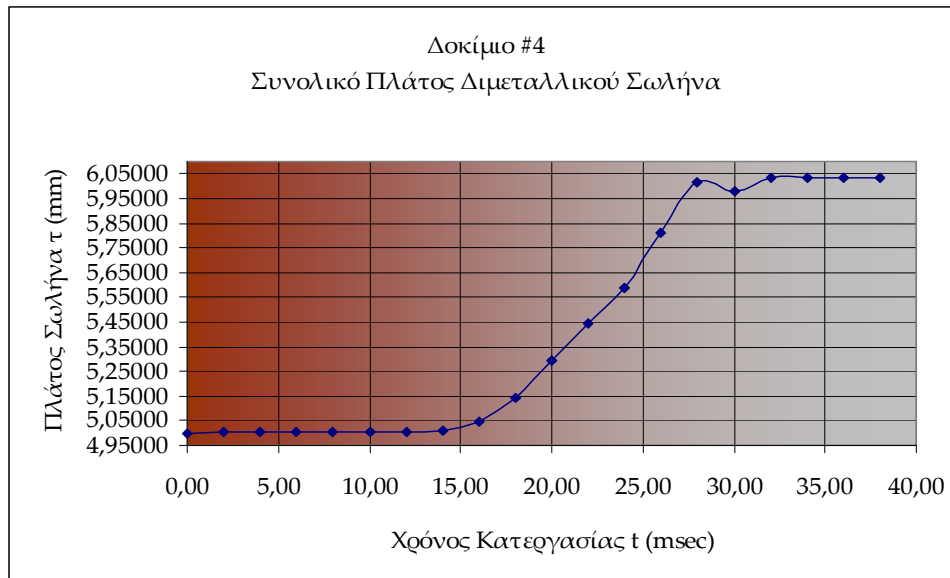
Διάγραμμα 4.4.1: Μεταβολή του πάχους του εσωτερικού σωλήνα του δοκιμίου #4

Στο διάγραμμα 4.4.1 παρατηρείται βαθμιαία αύξηση του πάχους του εσωτερικού σωλήνα από την χρονική στιγμή $t=14.00\text{msec}$ έως την χρονική στιγμή $t=32.00\text{msec}$ και κατόπιν σταθεροποίηση του περί την τελική τιμή ως το πέρας της κατεργασίας. Η αύξηση του πάχους του εσωτερικού σωλήνα είναι εξαιρετικά μεγάλη (30.78%). Κάτι τέτοιο δικαιολογείται εν μέρει από το γεγονός ότι στην εσωτερική επιφάνεια του σωλήνα δεν υπάρχει υλικό το οποίο να περιορίζει την αύξηση του πάχους (π.χ. mandrel, δηλ. βύσμα) και έτσι παραμορφώνεται ελεύθερα.



Διάγραμμα 4.4.2: Μεταβολή του πάχους του εξωτερικού σωλήνα του δοκιμίου #4

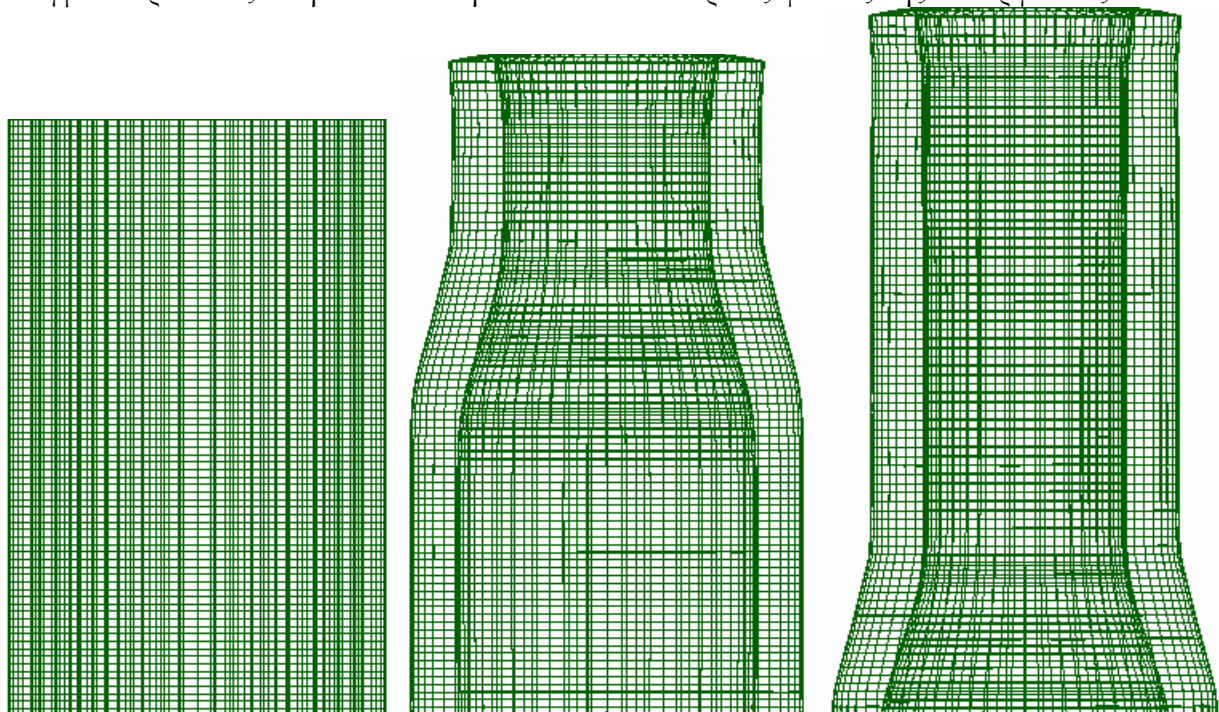
Στο διάγραμμα 4.4.2 παρατηρείται βαθμιαία αύξηση του πάχους του εσωτερικού σωλήνα από την χρονική στιγμή $t=16.00\text{msec}$ έως την χρονική στιγμή $t=28.00\text{msec}$ και κατόπιν απότομη μείωση και σταθεροποίηση του περί την τελική τιμή ως το πέρας της κατεργασίας. Η σταθερότητα αυτή οφείλεται στην επαφή του εξωτερικού στρώματος με τα τοιχώματα της μήτρας από την μια μεριά και την επαφή με το εσωτερικό στρώμα από την άλλη.



Διάγραμμα 4.4.3: Μεταβολή του συνολικού πάχους του διμεταλλικού δοκιμίου #4

Στο διάγραμμα 4.4.3 παρατηρείται βαθμιαία αύξηση του πάχους του εσωτερικού σωλήνα από την χρονική στιγμή $t=16.00\text{msec}$ έως την χρονική στιγμή $t=28.00\text{msec}$ και κατόπιν ομαλή μείωση και σταθεροποίηση του περί την τελική τιμή ως το πέρας της κατεργασίας.

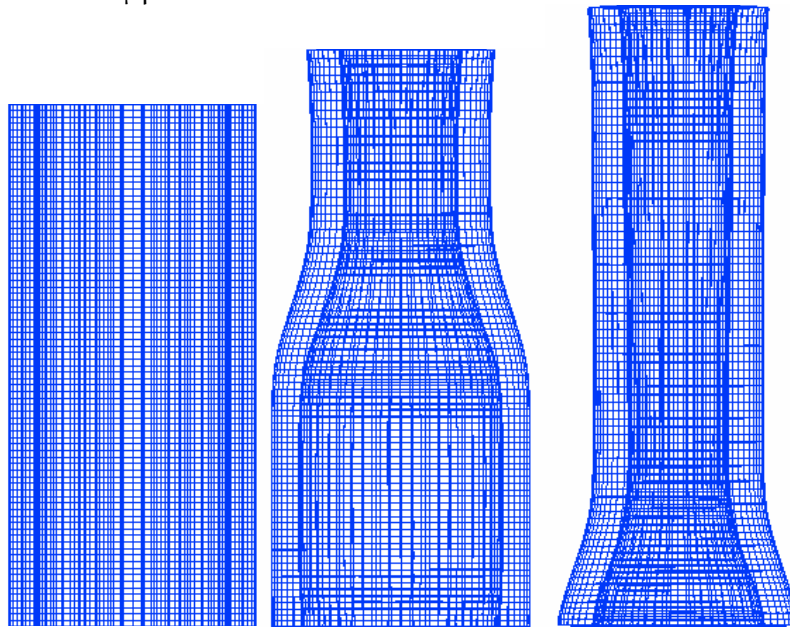
Το πλέγμα παρουσιάζει την ακόλουθη εικόνα σε 3 διακριτές φάσεις της κατεργασίας:



Εικόνα 4.4.4: Πλέγμα εξωτερικού σωλήνα (α) $t=0.00\text{msec}$ (β) $t=20.00\text{msec}$ (γ) $t=39.49\text{msec}$

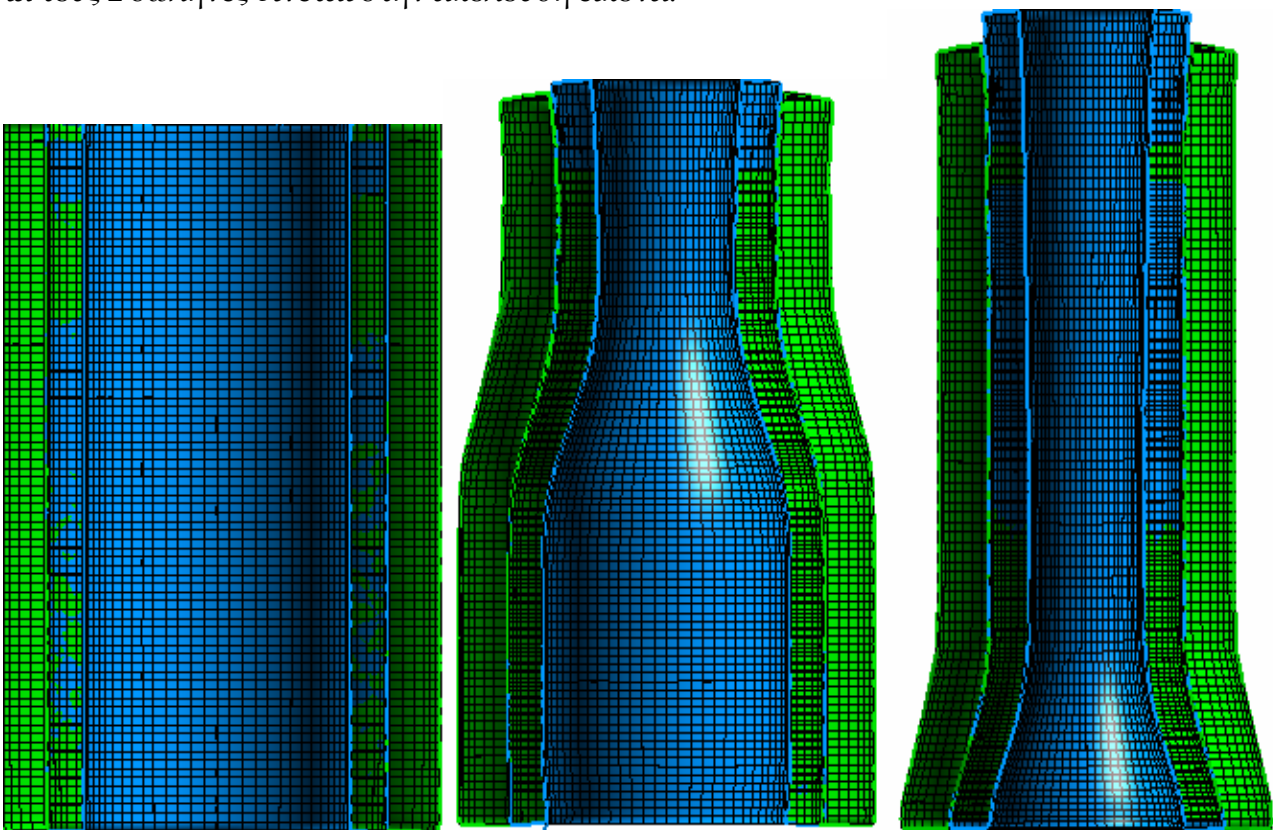
Από την εικόνα 4.4.4, όπου παρουσιάζεται στραμμένο κατά 180° το πλέγμα του εξωτερικού σωλήνα σε 3 χρονικές στιγμές, είναι φανερό ότι υπάρχει έντονη παραμόρφωση (συμπίεση) των πεπερασμένων στοιχείων στις περιοχές που έχουν ήδη υποστεί την κατεργασία διέλασης (β, γ) καθώς και στην υπό διέλαση περιοχή (β). Επίσης, παρατηρείται ότι τα πεπερασμένα στοιχεία που βρίσκονται στο κάτω μέρος του δοκιμίου παρουσιάζουν τάση ροής προς τα κάτω (γ). Τέλος,

συμπίεση του πλέγματος παρατηρείται επίσης στο πέρας της κατεργασίας στην περιοχή που βρίσκεται στο μέτωπο του εμβόλου.



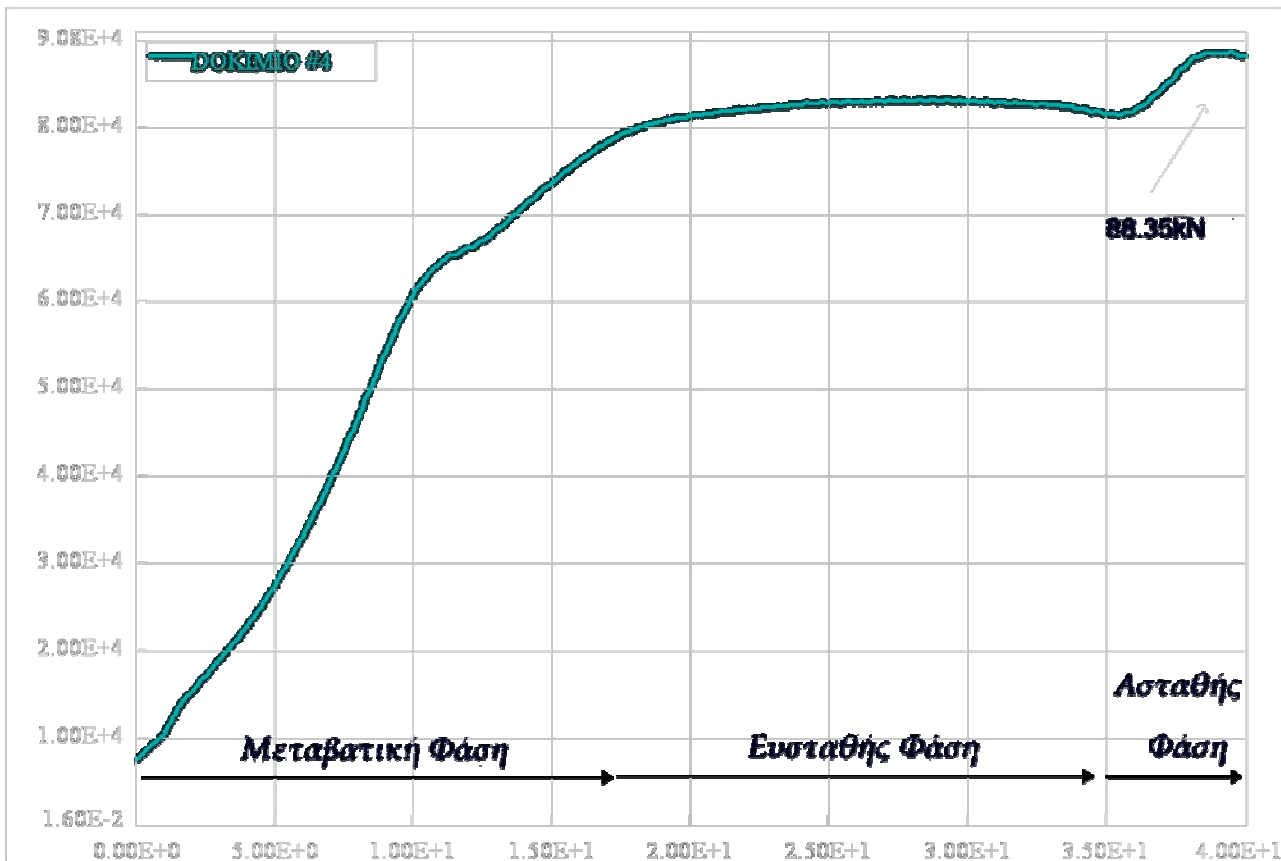
Εικόνα 4.4.5: Πλέγμα εσωτερικού σωλήνα (α) $t=0.00msec$ (β) $t=20.00msec$ (γ) $t=39.49msec$

Ομοίως, από την εικόνα 4.4.5, όπου παρουσιάζεται στραμμένο κατά 180° το πλέγμα του εσωτερικού σωλήνα σε 3 χρονικές στιγμές, είναι φανερό ότι υπάρχει έντονη παραμόρφωση (συμπίεση) των πεπερασμένων στοιχείων στις περιοχές που έχουν ήδη υποστεί στην κατεργασία διέλασης (β,γ) καθώς και στην υπό διέλαση περιοχή (β). Τέλος, συμπίεση του πλέγματος παρατηρείται επίσης στο πέρας της κατεργασίας στην περιοχή που βρίσκεται στο μέτωπο του εμβόλου. Η συνολική παραμόρφωση του πλέγματος στο πέρας της κατεργασίας και για τους 2 σωλήνες δίνεται στην ακόλουθη εικόνα.



Εικόνα 4.4.6: Παραμόρφωση πλέγματος διμεταλλικού σωλήνα
(α) $t=0.00msec$ (β) $t=20.00msec$ (γ) $t=39.49msec$

Διάγραμμα Φορτίου – Μετατόπισης



Διάγραμμα 4.4.4: Καμπύλη Φορτίου-Μετατόπισης για το Δοκίμιο #4

Στο διάγραμμα που προέκυψε από την επίλυση του μοντέλου διακρίνονται οι 3 φάσεις της κατεργασίας (Μεταβατική Φάση, Φάση Ευστάθειας, Ασταθής Φάση). Η μορφή της καμπύλης προσεγγίζει κατά πολύ την αντίστοιχη καμπύλη που προέκυψε από την πειραματική διαδικασία, βλ. διάγραμμα 2.4. (Εξαιτίας διαφορετικής κλίμακας που χρησιμοποιείται στα δύο διαγράμματα, φαινομενικά εντοπίζονται μικροδιαφορές στην εμφάνιση της καμπύλης, ωστόσο με μια προσεκτικότερη εξέταση γίνεται φανερό ότι οι τιμές βρίσκονται σε αξιοσημείωτη αντιστοιχία).

Επίσης σημειώνεται το μέγιστο φορτίο διέλασης, δηλαδή $88.35kN$, τιμή που προσεγγίζει κατά πολύ την αντίστοιχη πειραματική τιμή, δηλαδή τα $85.70kN$, με απόκλιση μόλις 3.1% .

Συνεπώς, από άποψη ακρίβειας υπολογισμού του φορτίου, η μέθοδος κρίνεται ιδιαίτερα αξιόπιστη και η μοντελοποίηση ως ιδανική.

Τασικό Πεδίο

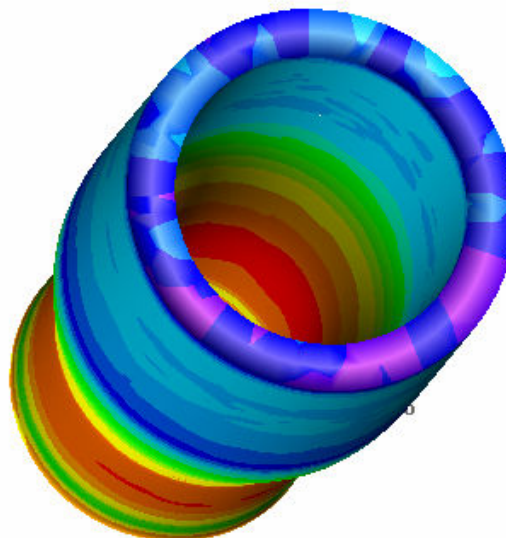
ΔΟΚΙΜΙΟ #4 - ΕΞΩΤ. ΣΤΡΩΜΑ
 $t=0.49msec$



Εικόνα 4.4.7: Ισοδύναμες τάσεις κατά von Mises για τον εξωτερικό σωλήνα κατά τη χρονική στιγμή $t=0.49msec$

Από την αναπαράσταση αυτή παρατηρείται, όπως είναι αναμενόμενο, ότι η μέγιστη τάση εμφανίζεται στην περιοχή όπου ο σωλήνας εισέρχεται στο κωνικό τμήμα της μήτρας. Η τάση αυτή υπολογίστηκε στα 298-320MPa περίπου. Επίσης, το τμήμα του δοκιμίου που βρίσκεται σε επαφή με το μέτωπο του εμβόλου καταπονείται και αυτό από τάση, αλλά μικρότερη, περίπου 64-128MPa.

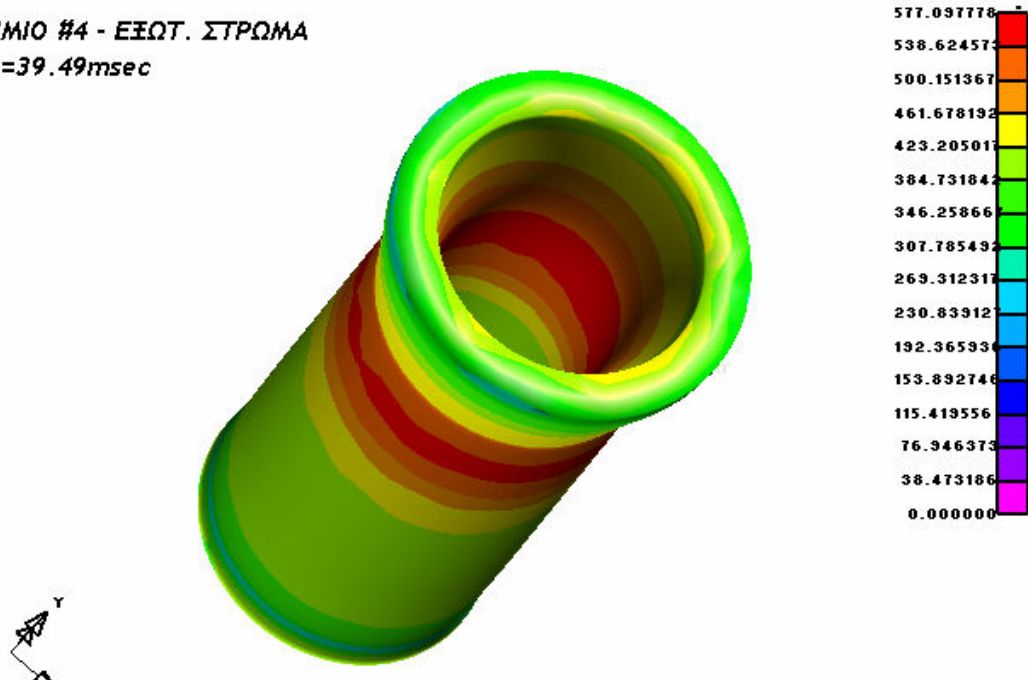
ΔΟΚΙΜΙΟ #4 - ΕΞΩΤ. ΣΤΡΩΜΑ
 $t=19.99msec$



Εικόνα 4.4.8: Ισοδύναμες τάσεις κατά von Mises για τον εξωτερικό σωλήνα κατά τη χρονική στιγμή $t=19.99msec$

Στην εικόνα αυτή παρατηρείται ότι η μέγιστη τάση που καταπονεί τον εξωτερικό σωλήνα είναι περί τα 510-546MPa και παρουσιάζεται στην περιοχή του δοκιμίου που βρίσκεται στο κωνικό τμήμα της μήτρας και δη στην εσωτερική επιφάνεια του σωλήνα, καθώς αυτό το τμήμα βρίσκεται υπό τάση τόσο από τα τοιχώματα της μήτρας όσο και από τον εσωτερικό σωλήνα. Επίσης, περιοχές οι οποίες έχουν ήδη υποστεί την κατεργασία της διέλασης καταπονούνται από αρκετά υψηλές τάσεις καθώς πιέζονται από τα τοιχώματα της εξόδου της μήτρας.

ΔΟΚΙΜΙΟ #4 - ΕΞΩΤ. ΣΤΡΩΜΑ
t=39.49msec



Εικόνα 4.4.9: Ισοδύναμες τάσεις κατά von Mises για τον εξωτερικό σωλήνα κατά τη χρονική στιγμή t=39.49msec

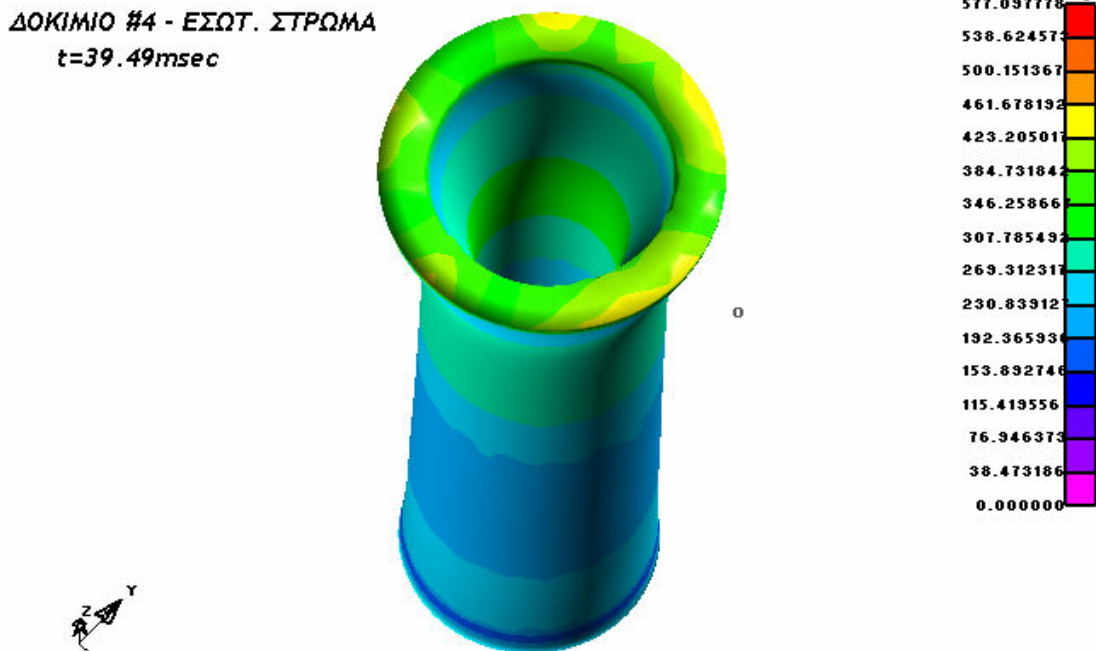
Η εικόνα 4.4.9 παρουσιάζει την τελική εντατική κατάσταση του εξωτερικού σωλήνα, στην οποία παρατηρείται αρκετά ομοιόμορφη κατανομή των τάσεων. Στην περιοχή που περισσότερο καταπονείται απαντώνται τάσεις περί τα 538-577MPa. Το κύριο σώμα του δοκιμίου καταπονείται από τάσεις που κυμαίνονται μεταξύ 269 και 461MPa.

ΔΟΚΙΜΙΟ #4 - ΕΣΩΤ. ΣΤΡΩΜΑ
t=0.49msec



Εικόνα 4.4.10: Ισοδύναμες τάσεις κατά von Mises για τον εσωτερικό σωλήνα κατά τη χρονική στιγμή t=0.49msec

Από την αναπαράσταση αυτή παρατηρείται, όπως είναι αναμενόμενο, ότι η μέγιστη τάση εμφανίζεται στην περιοχή όπου ο σωλήνας εισέρχεται στο κωνικό τμήμα της μήτρας. Η τάση αυτή υπολογίστηκε στα 192-213MPa περίπου. Επίσης, το τμήμα του δοκιμίου που βρίσκεται σε επαφή με το μέτωπο του εμβόλου καταπονείται και αυτό από τάση, αλλά μικρότερη, περίπου 21-85MPa.



Εικόνα 4.4.11: Ισοδύναμες τάσεις κατά von Mises για τον εσωτερικό σωλήνα κατά τη χρονική στιγμή t=39.49msec

Η εικόνα 4.4.11 παρουσιάζει την τελική εντατική κατάσταση του εσωτερικού σωλήνα, στην οποία παρατηρείται αρκετά ομοιόμορφη κατανομή των τάσεων. Στην περιοχή που περισσότερο καταπονείται απαντώνται τάσεις περί τα 384-423MPa. Το κύριο σώμα του σωλήνα καταπονείται από τάσεις που κυμαίνονται μεταξύ 115 και 269MPa.

■ Η κατεργασία του δοκιμίου και η μορφή του πλέγματος καθ'όλη την διάρκεια της διαδικασίας έχει καταγραφεί σε video με τη βοήθεια του post-processor. Το video αυτό, καθώς και άλλα αρχεία που αφορούν στην μοντελοποίηση, στην επίλυση και στην εξαγωγή αποτελεσμάτων βρίσκονται στο dvd που συνοδεύει την εργασία στον αντίστοιχο φάκελο για το συγκεκριμένο δοκίμιο.

4.5 Αποτελέσματα Προσομοίωσης - Δοκίμιο #5

Το διμεταλλικό δοκίμιο #5 είναι κατασκευασμένο από καθαρό χαλκό (εξωτερικό στρώμα) και κράμα αλουμινίου Al 6063 F25 (εσωτερικό στρώμα). Ο λόγος διαρροής των 2 υλικών είναι:

$$\lambda = \frac{\text{Sigy}(Cu)}{\text{Sigy}(Al - 6063 - F25)} = \frac{266}{192.2} = 1.384 < 3.5$$

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [17], ο παραπάνω λόγος των ορίων διαρροής εξασφαλίζει ομαλή διεξαγωγή της κατεργασίας και όχι ιδιαίτερα αυξημένες τιμές τάσεων.

- Αρχικό μήκος εσωτερικού και εξωτερικού στρώματος: 40.00mm
- Αρχικό πάχος εσωτερικού σωλήνα: 1.00mm
- Αρχικό πάχος εξωτερικού σωλήνα: 4.00mm

Μετά την επίλυση του μοντέλου του δοκιμίου #5 από τον solver του LS-DYNA, προκύπτουν τα ακόλουθα αποτελέσματα μέσω των ETA Post-Processor και ETA Graph-Processor.

Φάσεις της Κατεργασίας

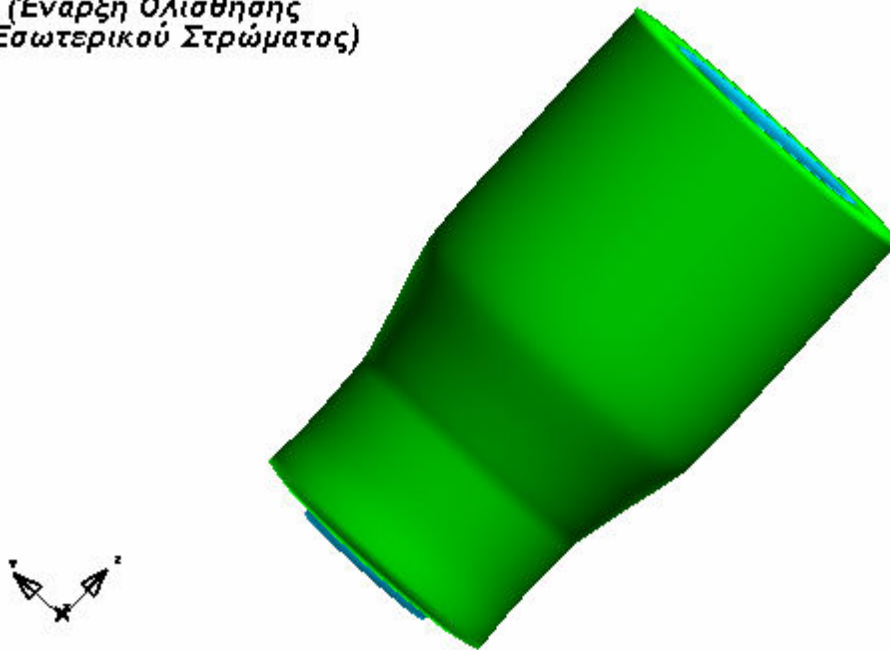
ΔΟΚΙΜΙΟ #5 t=0.00msec
(έναρξη κατεργασίας)



Εικόνα 4.5.1: Αναπαράσταση δοκιμίου #5 κατά την έναρξη της κατεργασίας διέλασης

Τη χρονική στιγμή t=18.49msec αρχίζει η ροή του εσωτερικού στρώματος προς το κάτω μέρος του δοκιμίου.

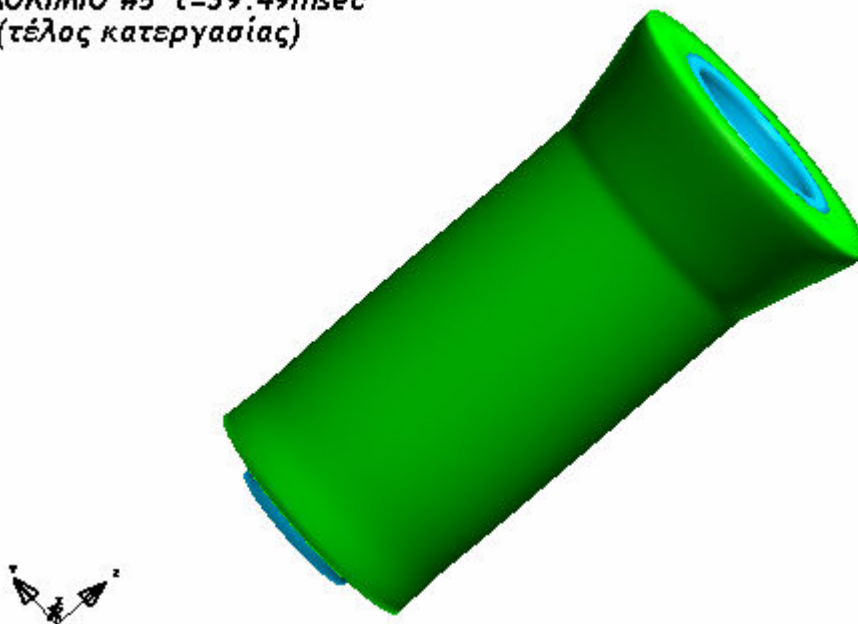
ΔΟΚΙΜΙΟ #5 $t=18.49msec$
(Έναρξη Ολίσθησης
Εσωτερικού Στρώματος)



Εικόνα 4.5.2: Αναπαράσταση δοκιμίου #5 κατά την χρονική στιγμή $t=18.49msec$

Η επίλυση συνεχίστηκε απρόσκοπτα μέχρι την χρονική στιγμή $t=39.49msec$, οπότε και έληξε η κατεργασία. Η τελική εικόνα του δοκιμίου ήταν η εξής:

ΔΟΚΙΜΙΟ #5 $t=39.49msec$
(τέλος κατεργασίας)



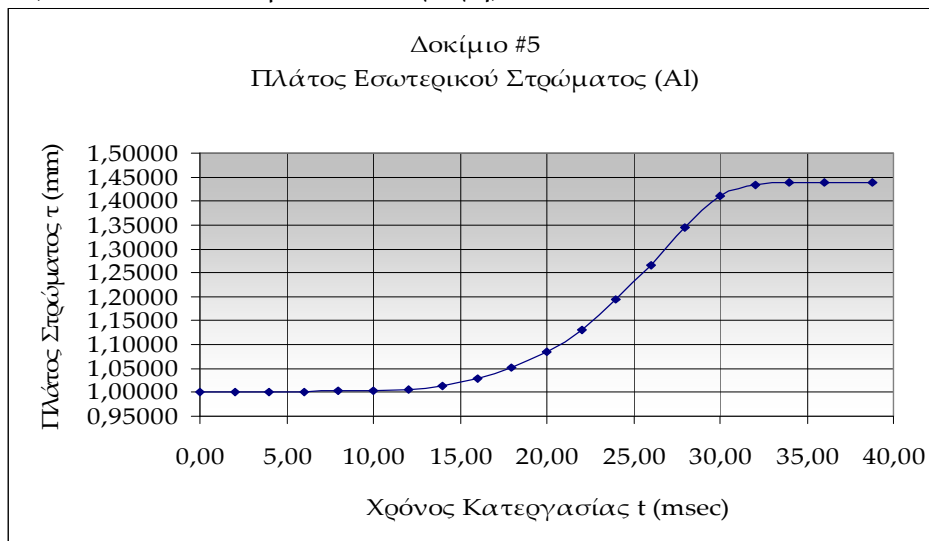
Εικόνα 4.5.3: Αναπαράσταση δοκιμίου #5 κατά τη λήξη της κατεργασίας διέλασης

Η τελική εικόνα του δοκιμίου είναι παρόμοια με την αντίστοιχη πειραματική, βλ. εικόνα 2.19 στο Κεφάλαιο 2.

Παραμόρφωση Πλέγματος

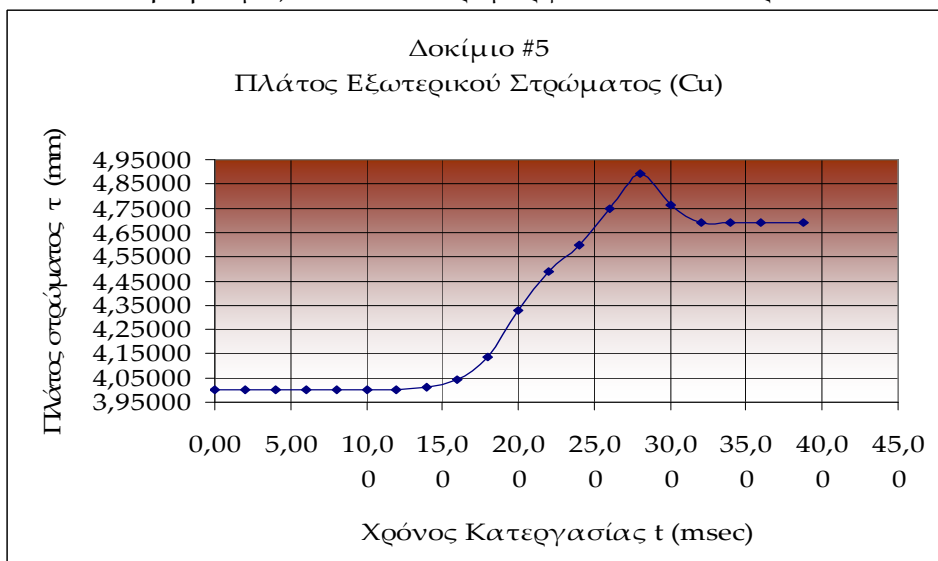
- Τελικό μήκος εσωτερικού στρώματος: 46.81mm (Αύξηση μήκους κατά 17.03%)
- Τελικό μήκος εξωτερικού στρώματος: 45.49mm (Αύξηση μήκους κατά 13.73%)
- Τελικό πάχος εσωτερικού σωλήνα: 1.43754mm (Αύξηση πάχους κατά 43.75%)
- Τελικό πάχος εξωτερικού σωλήνα: 4.69158mm (Αύξηση πάχους κατά 17.29%)
- Τελικό πάχος διμεταλλικού σωλήνα: 6.12912mm (Αύξηση πάχους κατά 22.58%)

Όπως παρατηρείται, αναφορικά με το μήκος των σωλήνων, για το οποίο υπάρχουν μετρήσεις από τις πειραματικές δοκιμές, η επιμήκυνση που προκύπτει από την αριθμητική προσομοίωση είναι μεγαλύτερη και για τα δύο στρώματα (17.03% έναντι 7.30% για το αλουμίνιο και 13.73% έναντι 5.30% για το χαλκό). Η μέτρηση έγινε σε κόμβους που βρίσκονται στο μέσο του πάχους του πλέγματος (#82174 & #65650, βλέπε εισαγωγή).



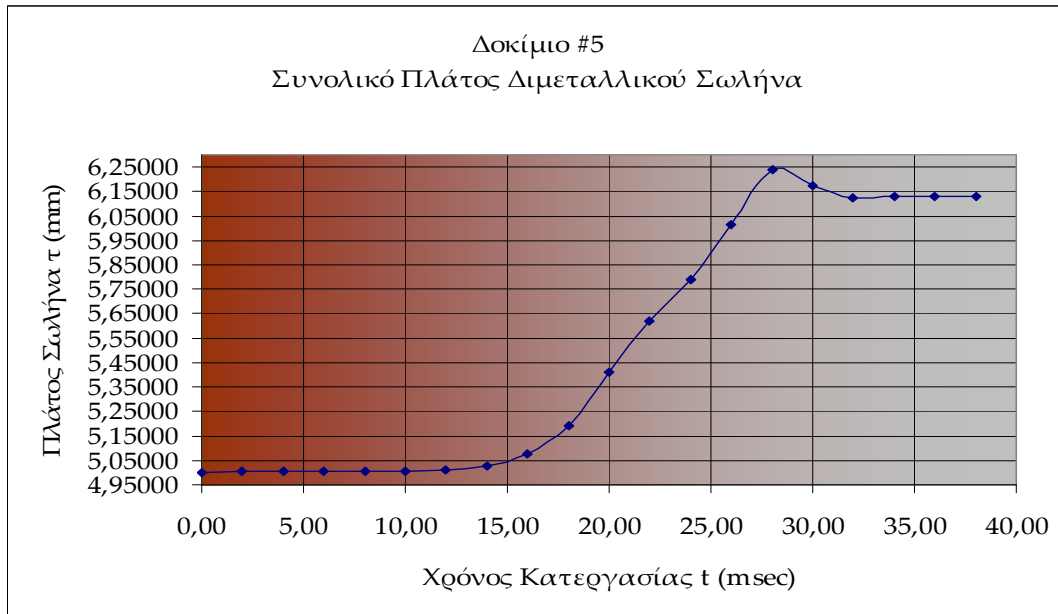
Διάγραμμα 4.5.1: Μεταβολή του πάχους του εσωτερικού σωλήνα του δοκιμίου #5

Στο διάγραμμα 4.5.1 παρατηρείται βαθμιαία αύξηση του πάχους του εσωτερικού σωλήνα από την χρονική στιγμή $t=12.00\text{msec}$ έως την χρονική στιγμή $t=32.00\text{msec}$ και κατόπιν σταθεροποίηση του περί την τελική τιμή ως το πέρας της κατεργασίας. Η αύξηση του πάχους του εσωτερικού σωλήνα είναι εξαιρετικά μεγάλη. Κάτι τέτοιο δικαιολογείται εν μέρει από το γεγονός ότι στην εσωτερική επιφάνεια του σωλήνα δεν υπάρχει υλικό το οποίο να περιορίζει την αύξηση του πάχους (π.χ. mandrel, δηλ. βύσμα) και έτσι παραμορφώνεται ελεύθερα.



Διάγραμμα 4.5.2: Μεταβολή του πάχους του εξωτερικού σωλήνα του δοκιμίου #5

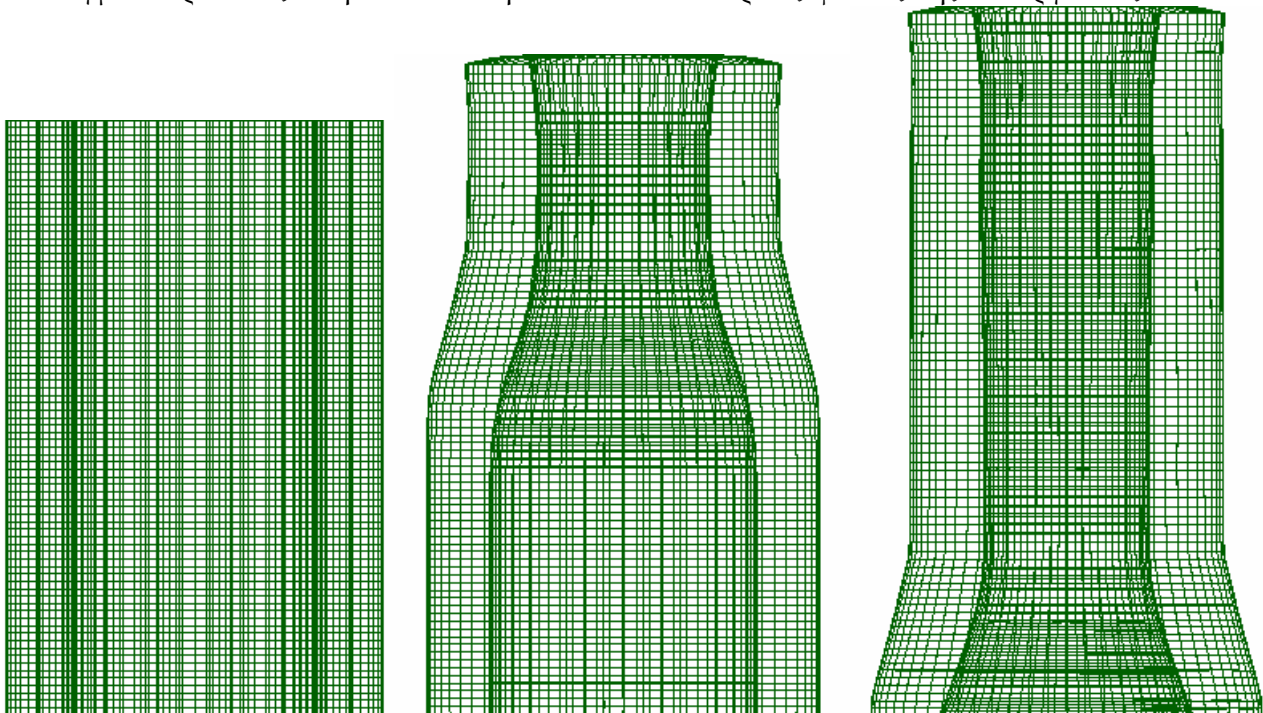
Στο διάγραμμα 4.5.2 παρατηρείται βαθμιαία αύξηση του πάχους του εσωτερικού σωλήνα από την χρονική στιγμή $t=14.00\text{msec}$ έως την χρονική στιγμή $t=28.00\text{msec}$ και κατόπιν απότομη μείωση και σταθεροποίηση του περί την τελική τιμή ως το πέρας της κατεργασίας. Η σταθερότητα αυτή οφείλεται στην επαφή του εξωτερικού στρώματος με τα τοιχώματα της μήτρας από την μια μεριά και την επαφή με το εσωτερικό στρώμα από την άλλη.



Διάγραμμα 4.5.3: Μεταβολή του συνολικού πάχους του διμεταλλικού δοκιμίου #5

Στο διάγραμμα 4.5.3 παρατηρείται βαθμιαία αύξηση του πάχους του εσωτερικού σωλήνα από την χρονική στιγμή $t=12.00\text{msec}$ έως την χρονική στιγμή $t=28.00\text{msec}$ και κατόπιν ομαλή μείωση και σταθεροποίηση του περί την τελική τιμή ως το πέρας της κατεργασίας.

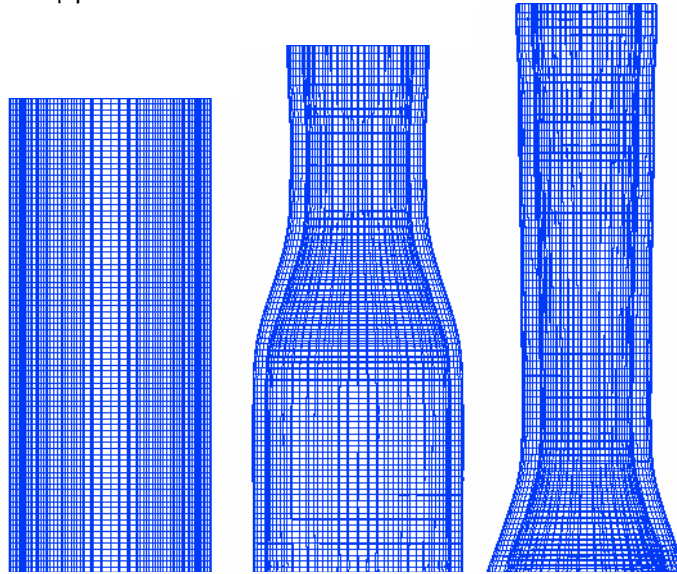
Το πλέγμα παρουσιάζει την ακόλουθη εικόνα σε 3 διακριτές φάσεις της κατεργασίας:



Εικόνα 4.5.4: Πλέγμα εξωτερικού σωλήνα (α) $t=0.00\text{msec}$ (β) $t=20.00\text{msec}$ (γ) $t=39.49\text{msec}$

Από την εικόνα 4.5.4, όπου παρουσιάζεται στραμμένο κατά 180° το πλέγμα του εξωτερικού σωλήνα σε 3 χρονικές στιγμές, είναι φανερό ότι υπάρχει έντονη παραμόρφωση (συμπίεση) των πεπερασμένων στοιχείων στις περιοχές που έχουν ήδη υποστεί την κατεργασία διέλασης (β, γ) καθώς και στην υπό διέλαση περιοχή (β). Επίσης, παρατηρείται ότι τα πεπερασμένα στοιχεία

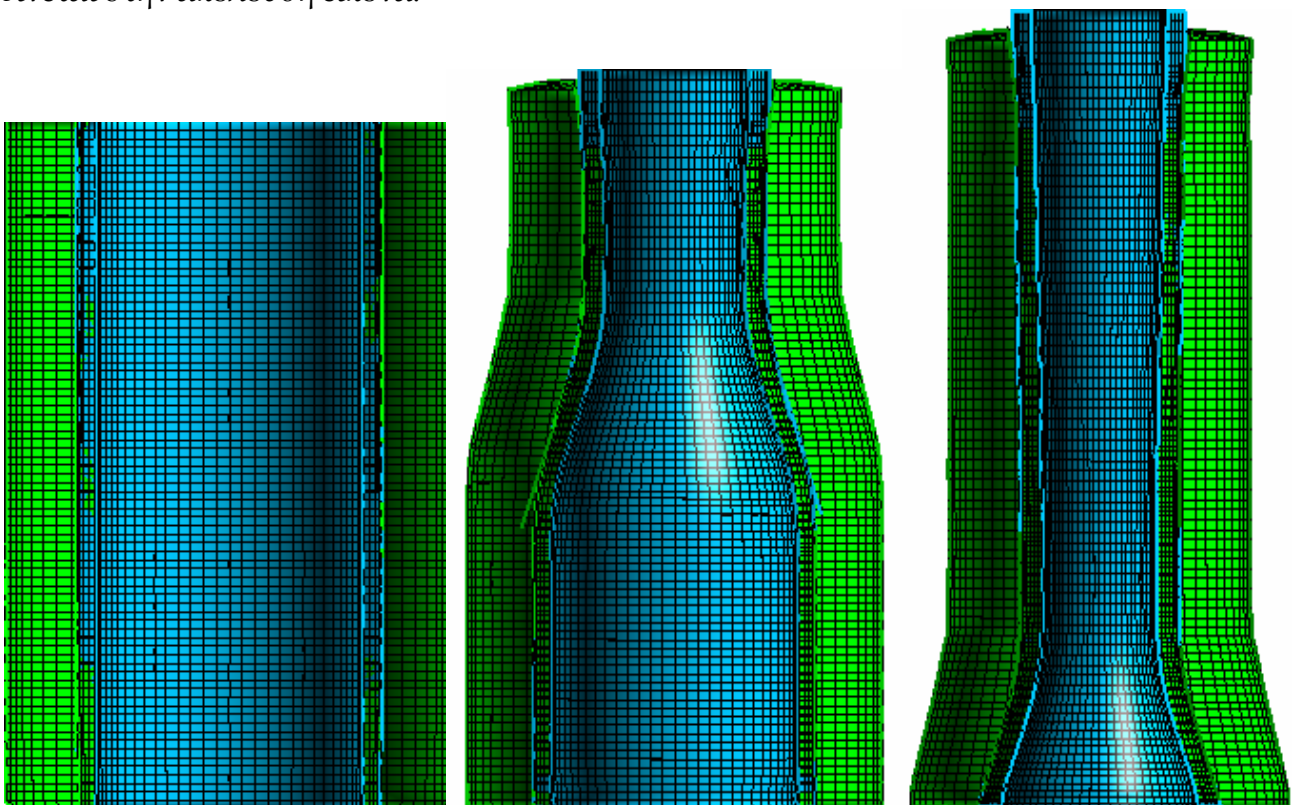
που βρίσκονται στο κάτω μέρος του δοκιμίου παρουσιάζουν τάση ροής προς τα κάτω. Τέλος, συμπίεση του πλέγματος παρατηρείται επίσης στο πέρας της κατεργασίας στην περιοχή που βρίσκεται στο μέτωπο του εμβόλου.



Εικόνα 4.5.5: Πλέγμα εσωτερικού σωλήνα (α) $t=0.00msec$ (β) $t=20.00msec$ (γ) $t=39.49msec$

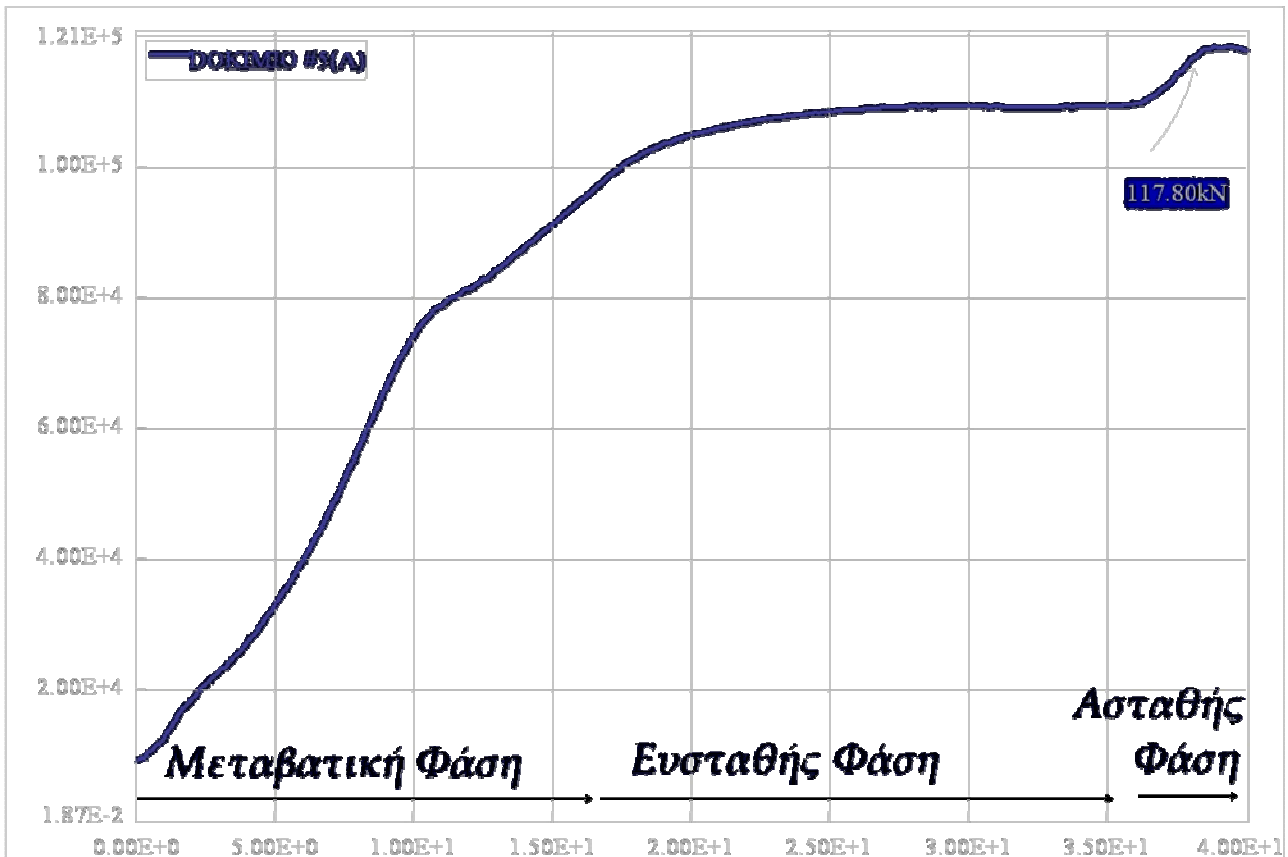
Ομοίως, από την εικόνα 4.5.5, όπου παρουσιάζεται στραμμένο κατά 180° το πλέγμα του εσωτερικού σωλήνα σε 3 χρονικές στιγμές, είναι φανερό ότι υπάρχει έντονη παραμόρφωση (συμπίεση) των πεπερασμένων στοιχείων στις περιοχές που έχουν ήδη υποστεί στην κατεργασία διέλασης (β,γ) καθώς και στην υπό διέλαση περιοχή (β). Τέλος, συμπίεση του πλέγματος παρατηρείται επίσης στο πέρας της κατεργασίας στην περιοχή που βρίσκεται στο μέτωπο του εμβόλου.

Η συνολική παραμόρφωση του πλέγματος στο πέρας της κατεργασίας και για τους 2 σωλήνες δίνεται στην ακόλουθη εικόνα.



Εικόνα 4.5.6: Παραμόρφωση πλέγματος διμεταλλικού σωλήνα
(α) $t=0.00msec$ (β) $t=20.00msec$ (γ) $t=39.49msec$

Διάγραμμα Φορτίου – Μετατόπισης



Διάγραμμα 4.5.4: Καμπύλη Φορτίου-Μετατόπισης για το Δοκίμιο #5

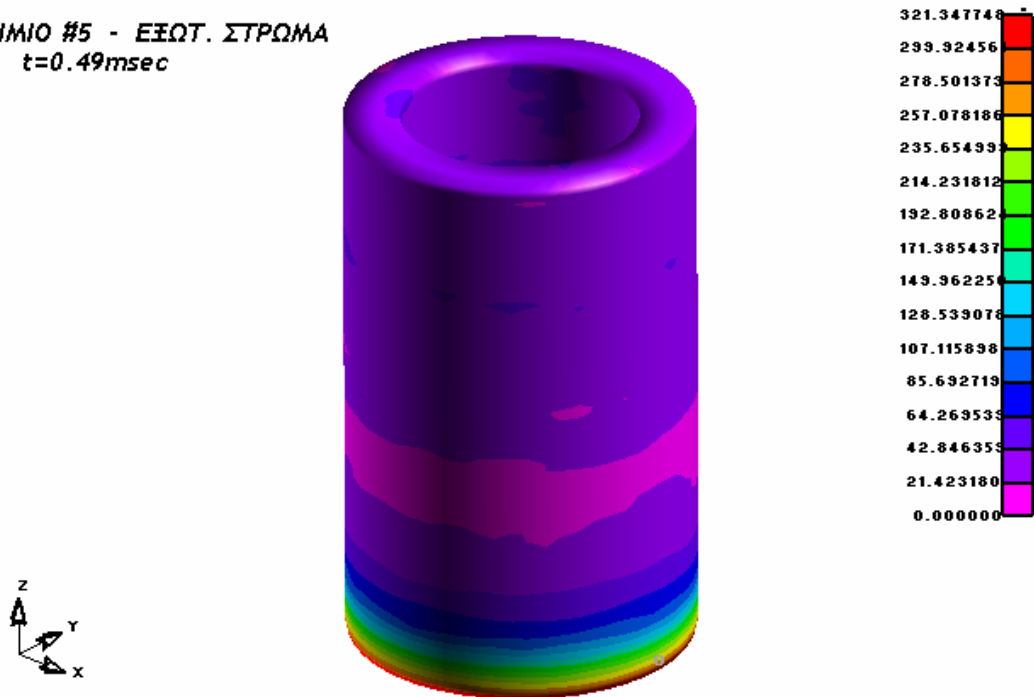
Στο διάγραμμα που προέκυψε από την επίλυση του μοντέλου διακρίνονται οι 3 φάσεις της κατεργασίας (Μεταβατική Φάση, Φάση Ευστάθειας, Ασταθής Φάση). Η μορφή της καμπύλης προσεγγίζει κατά πολύ την αντίστοιχη καμπύλη που προέκυψε από την πειραματική διαδικασία, βλ. διάγραμμα 2.5. (Εξαιτίας διαφορετικής κλίμακας που χρησιμοποιείται στα δύο διαγράμματα, φαινομενικά εντοπίζονται μικροδιαφορές στην εμφάνιση της καμπύλης, ωστόσο με μια προσεκτικότερη εξέταση γίνεται φανερό ότι οι τιμές βρίσκονται σε αξιοσημείωτη αντιστοιχία).

Επίσης σημειώνεται το μέγιστο φορτίο διέλασης, δηλαδή 117.80kN , τιμή που προσεγγίζει κατά πολύ την αντίστοιχη πειραματική τιμή, δηλαδή τα 116.80kN , με απόκλιση μόλις 0.8% .

Συνεπώς, από άποψη ακρίβειας υπολογισμού του φορτίου, η μέθοδος κρίνεται ιδιαίτερα αξιόπιστη και η μοντελοποίηση ως ιδανική.

Τασικό Πεδίο

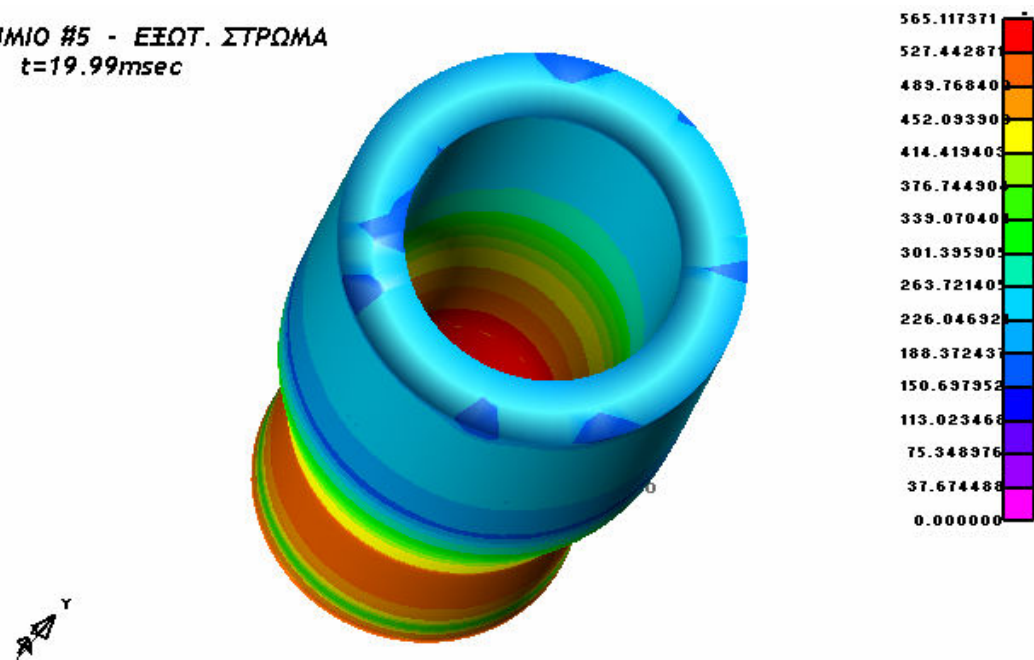
ΔΟΚΙΜΙΟ #5 - ΕΞΩΤ. ΣΤΡΩΜΑ
 $t=0.49msec$



Εικόνα 4.5.7: Ισοδύναμες τάσεις κατά τον Mises για τον εξωτερικό σωλήνα κατά τη χρονική στιγμή $t=0.49msec$

Από την αναπαράσταση αυτή παρατηρείται, όπως είναι αναμενόμενο, ότι η μέγιστη τάση εμφανίζεται στην περιοχή όπου ο σωλήνας εισέρχεται στο κωνικό τμήμα της μήτρας. Η τάση αυτή υπολογίστηκε στα 299-321MPa περίπου. Επίσης, το τμήμα του δοκιμίου που βρίσκεται σε επαφή με το μέτωπο του εμβόλου καταπονείται και αυτό από τάση, αλλά πολύ μικρή, περίπου 21MPa.

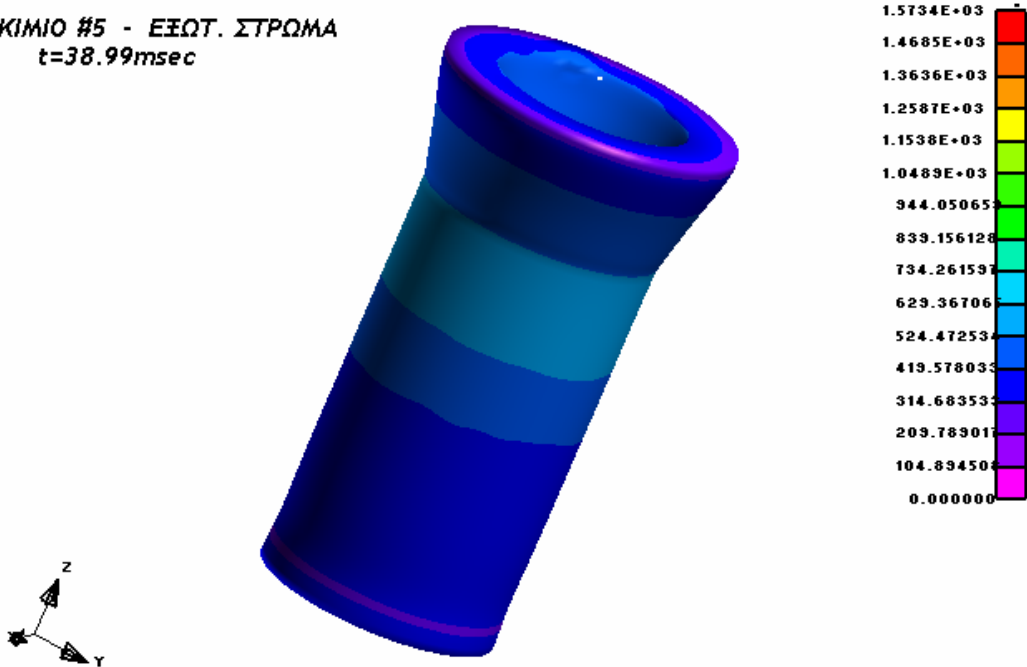
ΔΟΚΙΜΙΟ #5 - ΕΞΩΤ. ΣΤΡΩΜΑ
 $t=19.99msec$



Εικόνα 4.5.8: Ισοδύναμες τάσεις κατά τον Mises για τον εξωτερικό σωλήνα κατά τη χρονική στιγμή $t=19.99msec$

Στην εικόνα αυτή παρατηρείται ότι η μέγιστη τάση που καταπονεί τον εξωτερικό σωλήνα είναι περί τα 527-565MPa και παρουσιάζεται στην περιοχή του δοκιμίου που βρίσκεται στο κωνικό τμήμα της μήτρας και δη στην εσωτερική επιφάνεια του σωλήνα, καθώς αυτό το τμήμα βρίσκεται υπό τάση τόσο από τα τοιχώματα της μήτρας όσο και από τον εσωτερικό σωλήνα. Επίσης, περιοχές οι οποίες έχουν ήδη υποστεί την κατεργασία της διέλασης καταπονούνται από αρκετά υψηλές τάσεις καθώς πιέζονται από τα τοιχώματα της εξόδου της μήτρας.

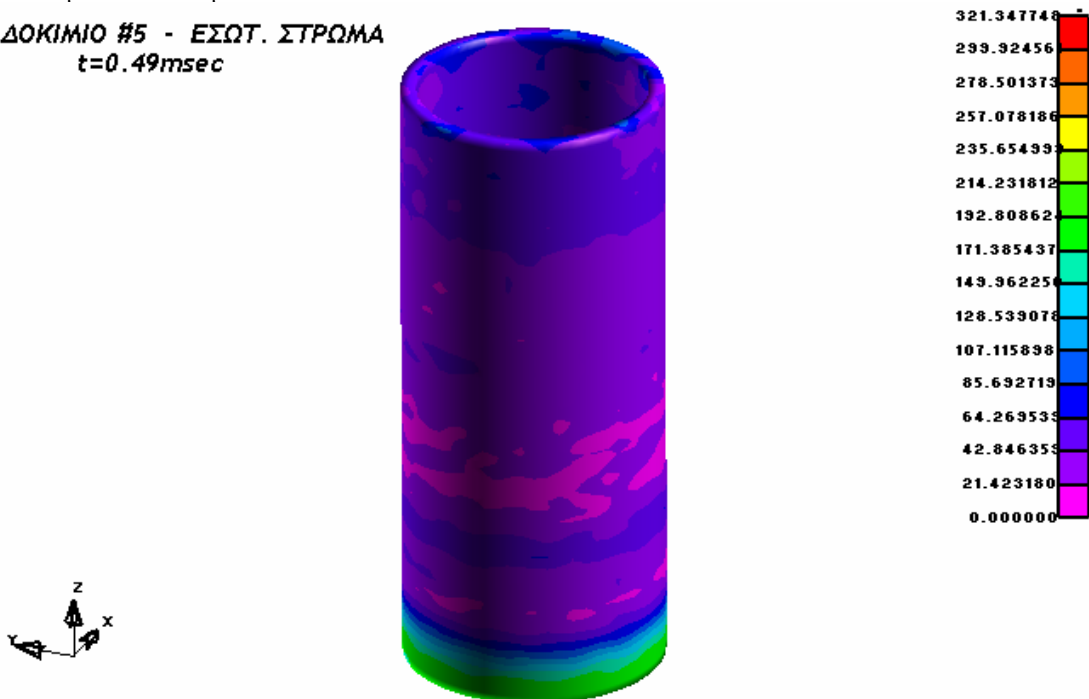
ΔΟΚΙΜΙΟ #5 - ΕΞΩΤ. ΣΤΡΩΜΑ
t=38.99msec



Εικόνα 4.5.9: Ισοδύναμες τάσεις κατά von Mises για τον εξωτερικό σωλήνα κατά τη χρονική στιγμή t=38.99msec

Η εικόνα 4.5.9 παρουσιάζει την τελική εντατική κατάσταση του εξωτερικού σωλήνα, στην οποία παρατηρείται αρκετά ομοιόμορφη κατανομή των τάσεων. Στην περιοχή που περισσότερο καταπονείται απαντώνται τάσεις περί τα 524-629MPa. Το κύριο σώμα του δοκιμίου καταπονούν τάσεις που κυμαίνονται μεταξύ 314 και 629MPa.

ΔΟΚΙΜΙΟ #5 - ΕΣΩΤ. ΣΤΡΩΜΑ
t=0.49msec



Εικόνα 4.5.10: Ισοδύναμες τάσεις κατά von Mises για τον εσωτερικό σωλήνα

κατά τη χρονική στιγμή $t=0.49msec$

Από την αναπαράσταση αυτή παρατηρείται, όπως είναι αναμενόμενο, ότι η μέγιστη τάση εμφανίζεται στην περιοχή όπου ο σωλήνας εισέρχεται στο κωνικό τμήμα της μήτρας. Η τάση αυτή υπολογίστηκε στα 192-214MPa περίπου. Επίσης, το τμήμα του δοκιμίου που βρίσκεται σε επαφή με το μέτωπο του εμβόλου καταπονείται και αυτό από τάση, αλλά πολύ μικρή, περίπου 21MPa.

ΔΟΚΙΜΙΟ #5 - ΕΣΩΤ. ΣΤΡΩΜΑ
 $t=38.99msec$



Εικόνα 4.5.11: Ισοδύναμες τάσεις κατά von Mises για τον εσωτερικό σωλήνα κατά τη χρονική στιγμή $t=38.99msec$

Η εικόνα 4.5.11 παρουσιάζει την τελική εντατική κατάσταση του εσωτερικού σωλήνα, στην οποία παρατηρείται εξαιρετικά ομοιόμορφη κατανομή των τάσεων. Στην περιοχή που περισσότερο καταπονείται απαντώνται τάσεις περί τα 419MPa.

■ Η κατεργασία του δοκιμίου και η μορφή του πλέγματος καθ'όλη την διάρκεια της διαδικασίας έχει καταγραφεί σε video με τη βοήθεια του post-processor. Το video αυτό, καθώς και άλλα αρχεία που αφορούν στην μοντελοποίηση, στην επίλυση και στην εξαγωγή αποτελεσμάτων βρίσκονται στο dvd που συνοδεύει την εργασία στον αντίστοιχο φάκελο για το συγκεκριμένο δοκίμιο.

4.6 Αποτελέσματα Προσομοίωσης - Δοκίμιο #6

Το διμεταλλικό δοκίμιο #6 είναι κατασκευασμένο από καθαρό χαλκό (εξωτερικό στρώμα) και χυτό αλουμίνιο (εσωτερικό στρώμα). Ο λόγος διαρροής των 2 υλικών είναι:

$$\lambda = \frac{\text{Sigy}(Cu)}{\text{Sigy}(\text{χυτοAl} - 6063 - F25)} = \frac{266}{63.7} = 4.176 > 3.5$$

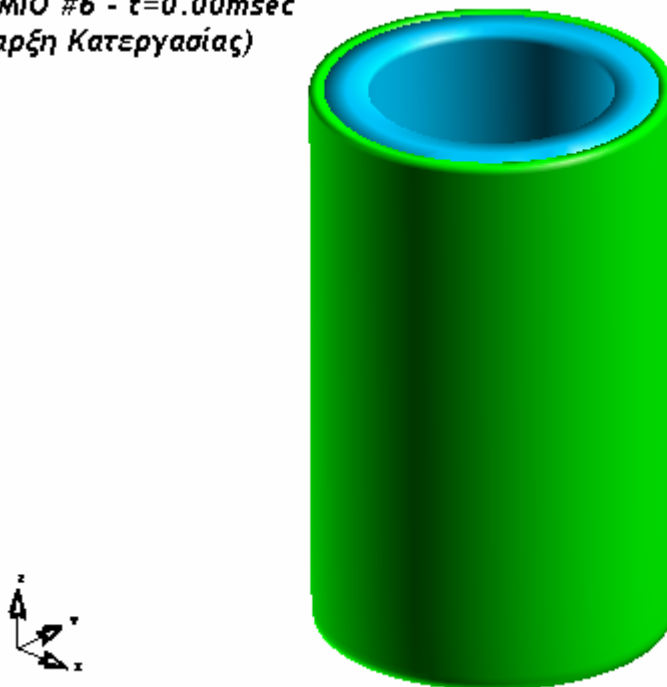
Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [17], ο παραπάνω λόγος των ορίων διαρροής δεν εξασφαλίζει ομαλή διεξαγωγή της κατεργασίας και πιθανόν να εμφανιστούν ιδιαίτερα αυξημένες τιμές τάσεων και φορτίων.

- Αρχικό μήκος εσωτερικού και εξωτερικού στρώματος: 40.00mm
- Αρχικό πάχος εσωτερικού σωλήνα: 3.00mm
- Αρχικό πάχος εξωτερικού σωλήνα: 1.00mm

Μετά την επίλυση του μοντέλου του δοκιμίου #6 από τον solver του LS-DYNA, προκύπτουν τα ακόλουθα αποτελέσματα μέσω των ETA Post-Processor και ETA Graph-Processor.

Φάσεις της Κατεργασίας

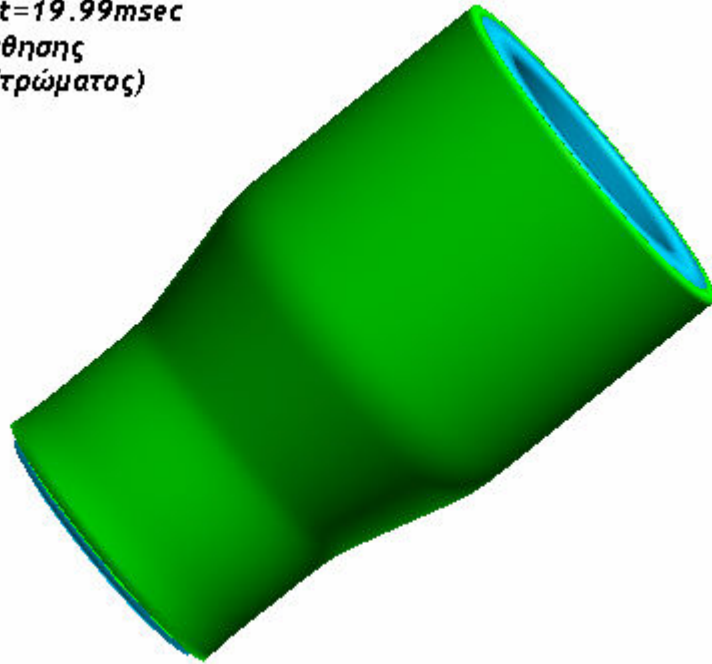
ΔΟΚΙΜΙΟ #6 - t=0.00msec
(Έναρξη Κατεργασίας)



Εικόνα 4.6.1: Αναπαράσταση δοκιμίου #6 κατά την έναρξη της κατεργασίας διέλασης

Τη χρονική στιγμή t=19.99msec αρχίζει η ροή του εσωτερικού στρώματος προς το κάτω μέρος του δοκιμίου.

ΔΟΚΙΜΙΟ #6 - $t=19.99msec$
(Εναρξη Ολίσθησης
Εσωτερικού Στρώματος)



Εικόνα 4.6.2: Αναπαράσταση δοκιμίου #6 κατά την χρονική στιγμή $t=19.99msec$

Η επίλυση συνεχίστηκε απρόσκοπτα μέχρι την χρονική στιγμή $t=37.49msec$, οπότε και έληξε η κατεργασία. Η τελική εικόνα του δοκιμίου ήταν η εξής:

ΔΟΚΙΜΙΟ #6 - $t=37.49msec$
(Λήξη Κατεργασίας)



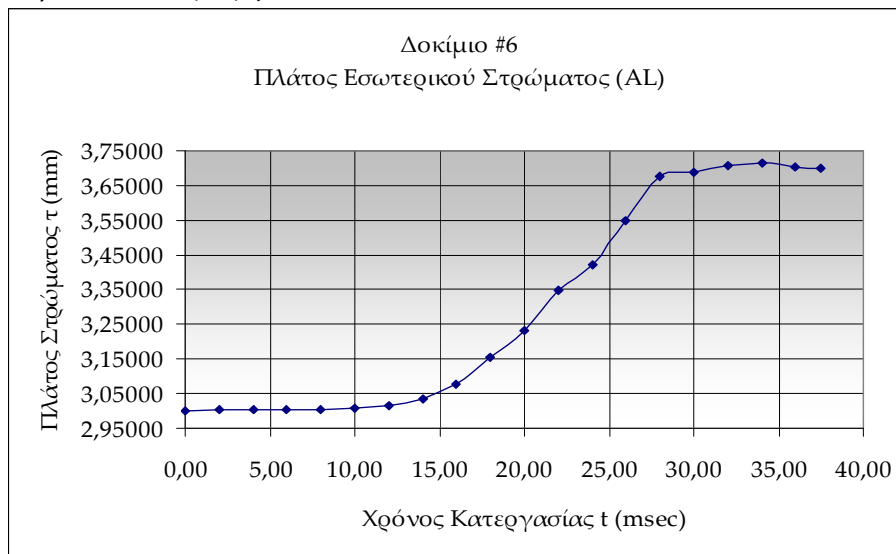
Εικόνα 4.6.3: Αναπαράσταση δοκιμίου #6 κατά τη λήξη της κατεργασίας διέλασης

Η τελική εικόνα του δοκιμίου είναι παρόμοια με την αντίστοιχη πειραματική, βλ. εικόνα 2.21 στο Κεφάλαιο 2, με τη διαφορά ότι δεν παρατηρείται η έντονα ωσειδής μορφή του άνω τμήματος του δοκιμίου.

Παραμόρφωση Πλέγματος

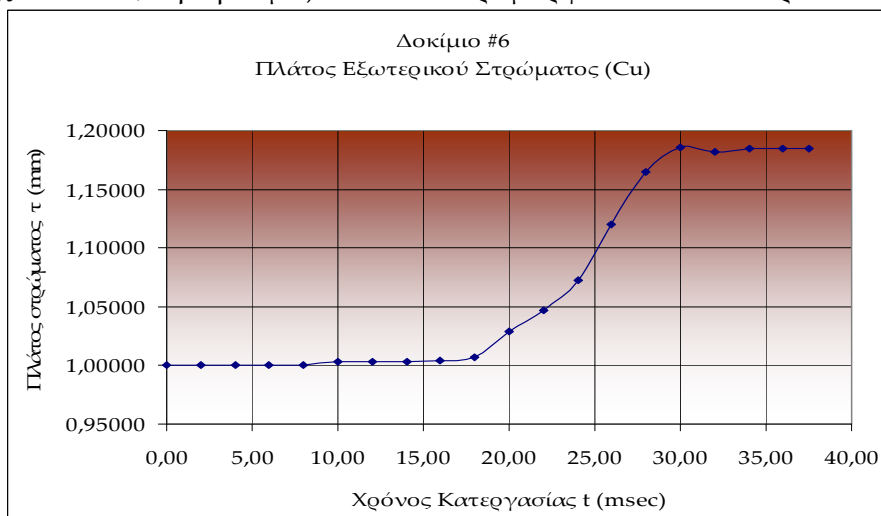
- Τελικό μήκος εσωτερικού στρώματος: 44.87mm (Αύξηση μήκους κατά 12.18%)
- Τελικό μήκος εξωτερικού στρώματος: 42.35mm (Αύξηση μήκους κατά 5.88%)
- Τελικό πάχος εσωτερικού σωλήνα: 3.70mm (Αύξηση πάχους κατά 23.30%)
- Τελικό πάχος εξωτερικού σωλήνα: 1.18mm (Αύξηση πάχους κατά 18.47%)
- Τελικό πάχος διμεταλλικού σωλήνα: 4.88mm (Αύξηση πάχους κατά 22.12%)

Όπως παρατηρείται, αναφορικά με το μήκος των σωλήνων, για το οποίο υπάρχουν μετρήσεις από τις πειραματικές δοκιμές, η επιμήκυνση που προκύπτει από την αριθμητική προσομοίωση είναι κατά τι μικρότερη τόσο για το αλουμίνιο (12.18% έναντι 16.00%) όσο και για το χαλκό (5.88% έναντι 6.30%). Η μέτρηση έγινε σε κόμβους που βρίσκονται στο μέσο του πάχους του πλέγματος (#32604 & #49127, βλέπε εισαγωγή).



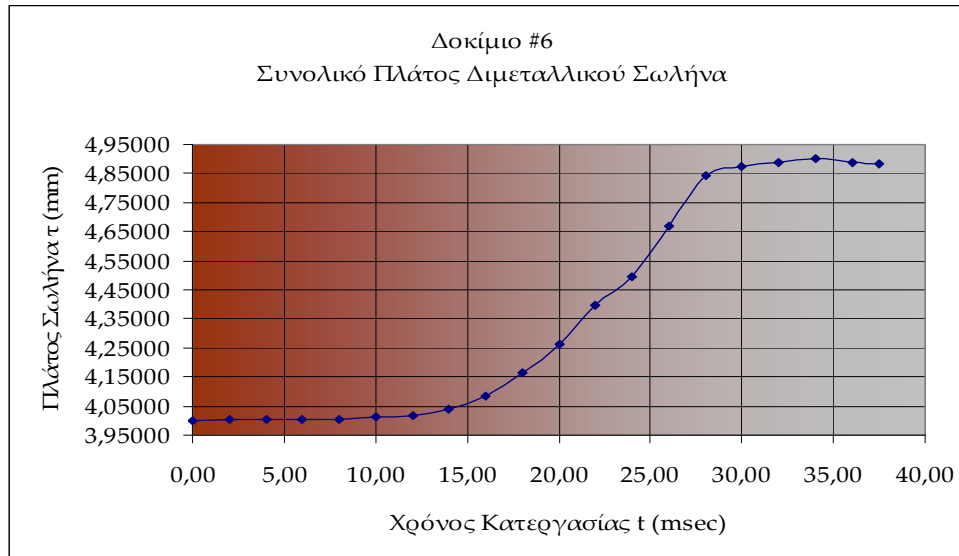
Διάγραμμα 4.6.1: Μεταβολή του πάχους του εσωτερικού σωλήνα του δοκιμίου #6

Στο διάγραμμα 4.6.1 παρατηρείται βαθμιαία αύξηση του πάχους του εσωτερικού σωλήνα από την χρονική στιγμή $t=12.00\text{msec}$ έως την χρονική στιγμή $t=28.00\text{msec}$ και κατόπιν σταθεροποίηση του περί την τελική τιμή ως το πέρας της κατεργασίας. Η αύξηση του πάχους του εσωτερικού σωλήνα είναι σχετικά μεγάλη (23.30%). Κάτι τέτοιο δικαιολογείται εν μέρει από το γεγονός ότι στην εσωτερική επιφάνεια του σωλήνα δεν υπάρχει υλικό το οποίο να περιορίζει την αύξηση του πάχους (π.χ. mandrel, δηλ. βύσμα) και έτσι παραμορφώνεται ελεύθερα.



Διάγραμμα 4.6.2: Μεταβολή του πάχους του εξωτερικού σωλήνα του δοκιμίου #6

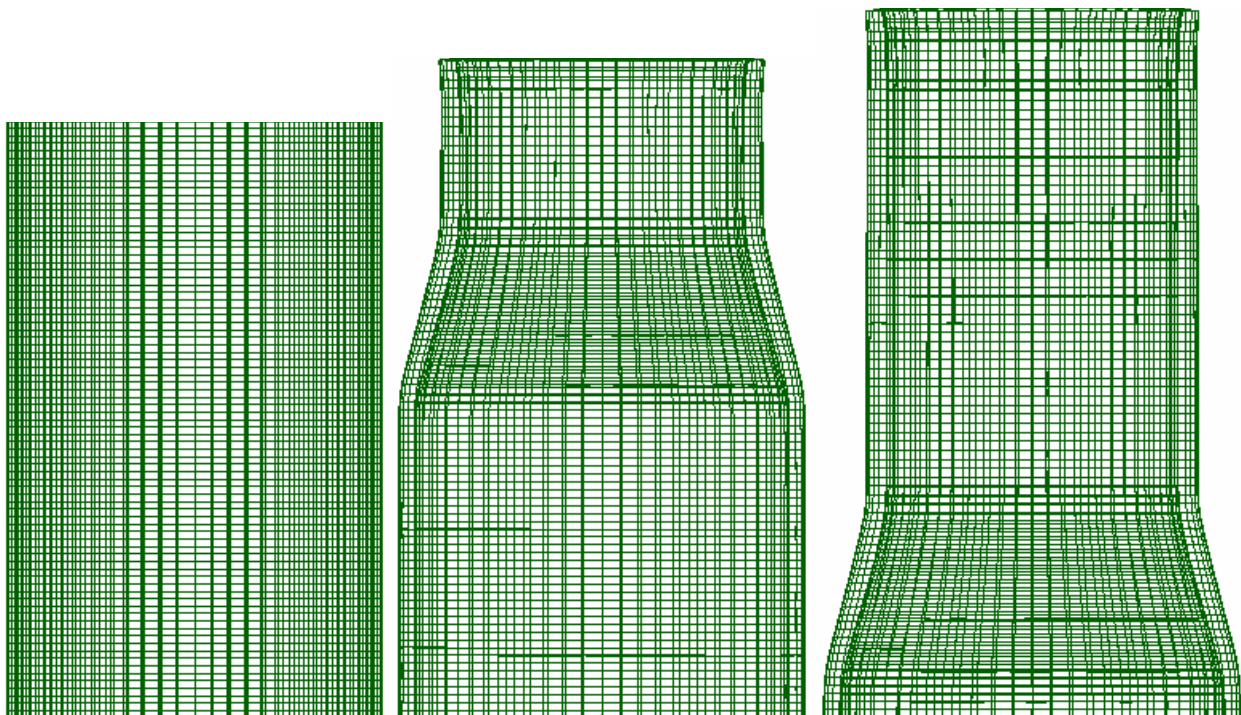
Στο διάγραμμα 4.6.2 παρατηρείται βαθμιαία αύξηση του πάχους του εσωτερικού σωλήνα από την χρονική στιγμή $t=18.00\text{msec}$ έως την χρονική στιγμή $t=32.00\text{msec}$ και κατόπιν σταθεροποίηση του περί την τελική τιμή ως το πέρας της κατεργασίας. Η σταθερότητα αυτή οφείλεται στην επαφή του εξωτερικού στρώματος με τα τοιχώματα της μήτρας από την μια μεριά και την επαφή με το εσωτερικό στρώμα από την άλλη.



Διάγραμμα 4.6.3: Μεταβολή του συνολικού πάχους του διμεταλλικού δοκιμίου #6

Στο διάγραμμα 4.6.3 παρατηρείται βαθμιαία αύξηση του πάχους του εσωτερικού σωλήνα από την χρονική στιγμή $t=12.00\text{msec}$ έως την χρονική στιγμή $t=28.00\text{msec}$ και κατόπιν ομαλή μείωση και σταθεροποίηση του περί την τελική τιμή ως το πέρας της κατεργασίας

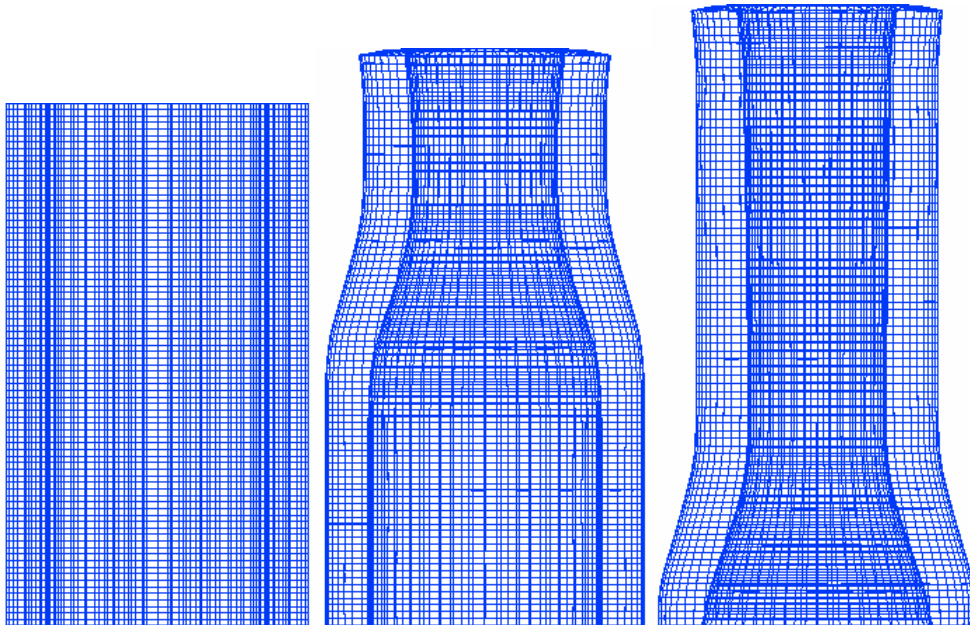
Το πλέγμα παρουσιάζει την ακόλουθη εικόνα σε 3 διακριτές φάσεις της κατεργασίας:



Εικόνα 4.6.4: Πλέγμα εξωτερικού σωλήνα (α) $t=0.00\text{msec}$ (β) $t=20.00\text{msec}$ (γ) $t=37.49\text{msec}$

Από την εικόνα 4.6.4, όπου παρουσιάζεται στραμμένο κατά 180° το πλέγμα του εξωτερικού σωλήνα σε 3 χρονικές στιγμές, είναι φανερό ότι υπάρχει έντονη παραμόρφωση (συμπίεση) των πεπερασμένων στοιχείων στις περιοχές που έχουν ήδη υποστεί την κατεργασία διέλασης (β,γ)

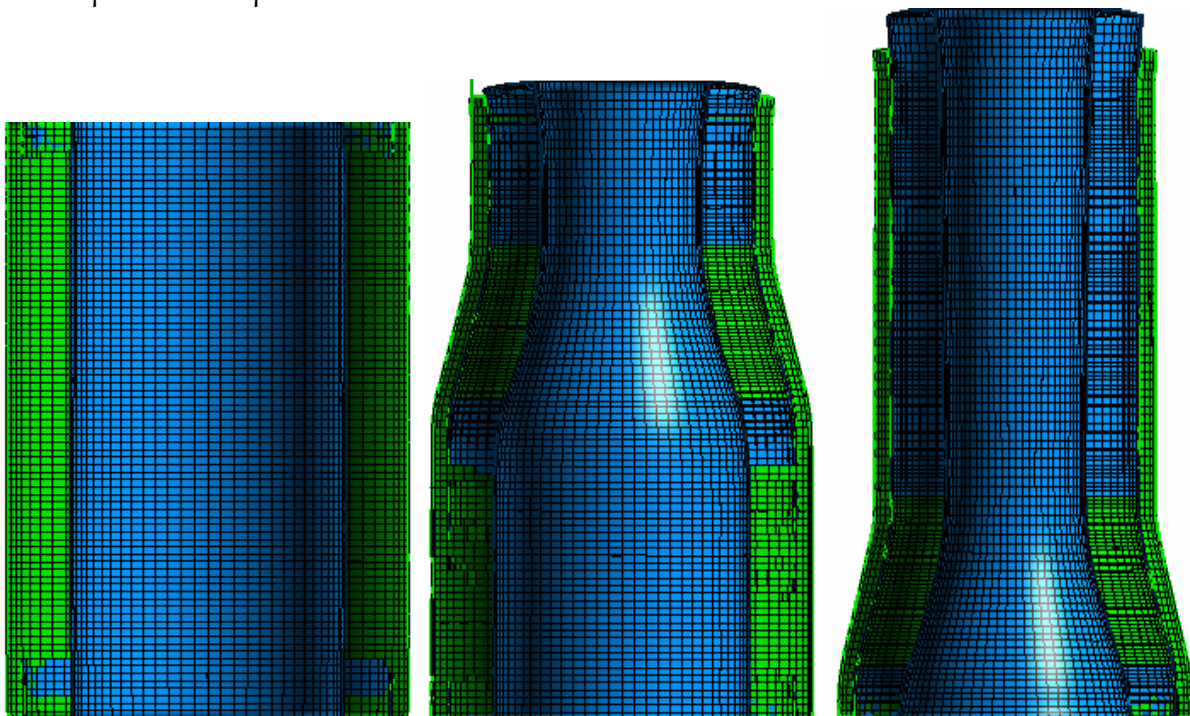
καθώς και στην υπό διέλαση περιοχή (β). Τέλος, συμπίεση του πλέγματος παρατηρείται επίσης στο πέρας της κατεργασίας στην περιοχή που βρίσκεται στο μέτωπο του εμβόλου.



Εικόνα 4.6.5: Πλέγμα εσωτερικού σωλήνα (α) $t=0.00msec$ (β) $t=20.00msec$ (γ) $t=37.49msec$

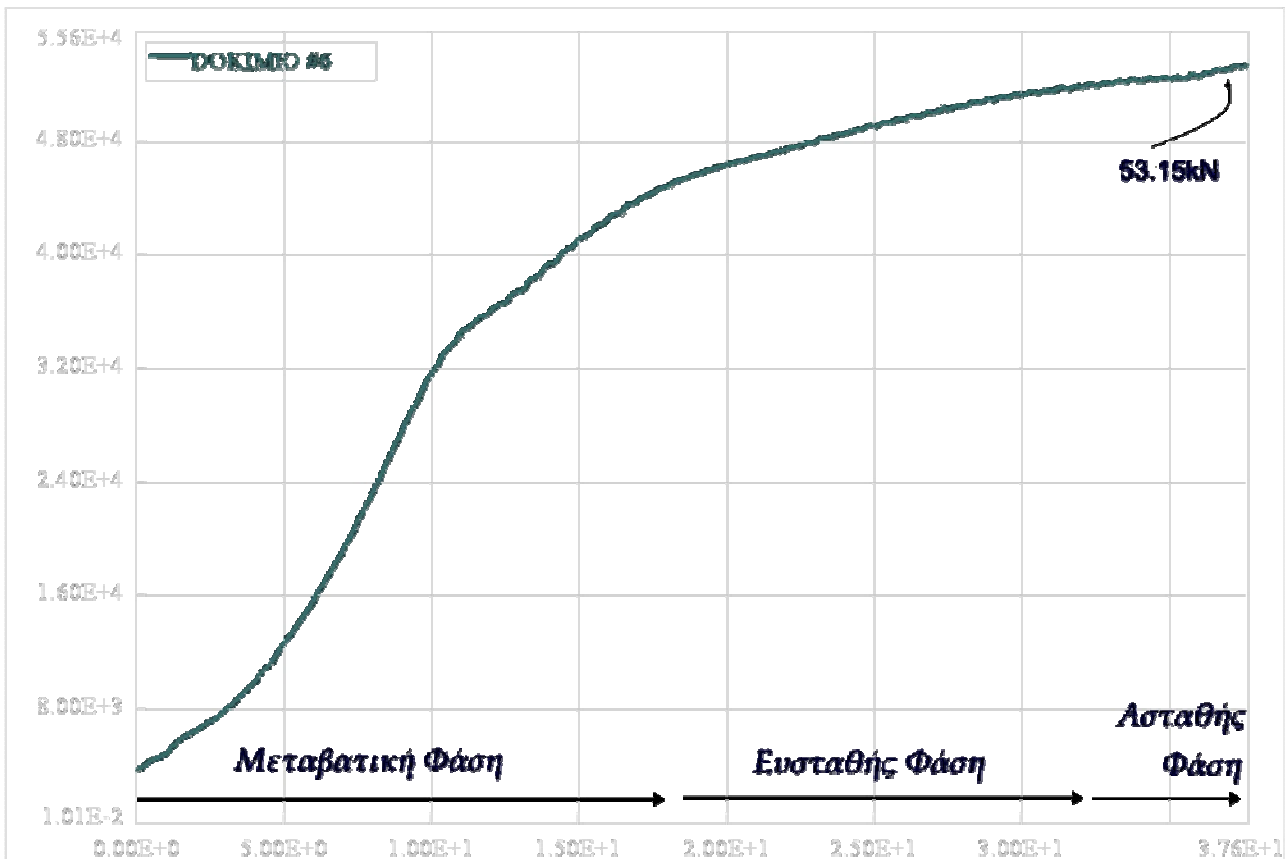
Ομοίως, από την εικόνα 4.6.5, όπου παρουσιάζεται στραμμένο κατά 180° το πλέγμα του εσωτερικού σωλήνα σε 3 χρονικές στιγμές, είναι φανερό ότι υπάρχει έντονη παραμόρφωση (συμπίεση) των πεπερασμένων στοιχείων στις περιοχές που έχουν ήδη υποστεί στην κατεργασία διέλασης (β,γ) καθώς και στην υπό διέλαση περιοχή (β). Επίσης, παρατηρείται ότι τα πεπερασμένα στοιχεία που βρίσκονται στο κάτω μέρος του δοκιμίου παρουσιάζουν τάση ροής προς τα κάτω (γ). Τέλος, συμπίεση του πλέγματος παρατηρείται επίσης στο πέρας της κατεργασίας στην περιοχή που βρίσκεται στο μέτωπο του εμβόλου.

Η συνολική παραμόρφωση του πλέγματος στο πέρας της κατεργασίας και για τους 2 σωλήνες δίνεται στην ακόλουθη εικόνα.



Εικόνα 4.6.6: Παραμόρφωση πλέγματος διμεταλλικού σωλήνα (α) $t=0.00msec$ (β) $t=20.00msec$ (γ) $t=37.49msec$

Διάγραμμα Φορτίου – Μετατόπισης



Διάγραμμα 4.6.4: Καμπύλη Φορτίου-Μετατόπισης για το Δοκίμιο #6

Στο διάγραμμα που προέκυψε από την επίλυση του μοντέλου διακρίνονται οι 3 φάσεις της κατεργασίας (Μεταβατική Φάση, Φάση Ευστάθειας, Ασταθής Φάση). Η μορφή της καμπύλης δεν προσεγγίζει ιδιαίτερα την αντίστοιχη καμπύλη που προέκυψε από την πειραματική διαδικασία, ιδιαίτερα από τα 20.00 mm και μετά, βλ. διάγραμμα 2.6. Επίσης σημειώνεται το μέγιστο φορτίο διέλασης, 53.15kN, τιμή που απέχει από την αντίστοιχη πειραματική τιμή, δηλαδή τα 21.70kN. Ολόκληρη η καμπύλη είναι μετατοπισμένη σε σχέση με την καμπύλη που προέκυψε από την πειραματική διαδικασία.

Η απόκλιση αυτή πιθανώς παρατηρείται επειδή για το υλικό του εσωτερικού σωλήνα (χυτό αλουμίνιο) δεν υπάρχουν πρότυπες ιδιότητες και ορισμένες τιμές μηχανικών ιδιοτήτων που δόθηκαν πιθανόν να διαφέρουν από τις πραγματικές. Συνεπώς, γίνεται η υπόθεση ότι με την εισαγωγή των κατάλληλων τιμών των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού, η μοντελοποίηση θα ήταν ακριβέστερη. Θα μπορούσε επίσης η διαφορά αυτή να αποδοθεί στην επιλογή των συντελεστών τριβής μεταξύ της μήτρας και του δοκιμίου, μολονότι δόθηκαν οι ελάχιστες προτεινόμενες τιμές για τον συγκεκριμένο τύπο επαφής (δηλαδή επιφάνειες με λεπτό φιλμ λιπαντικού).

Τασικό Πεδίο

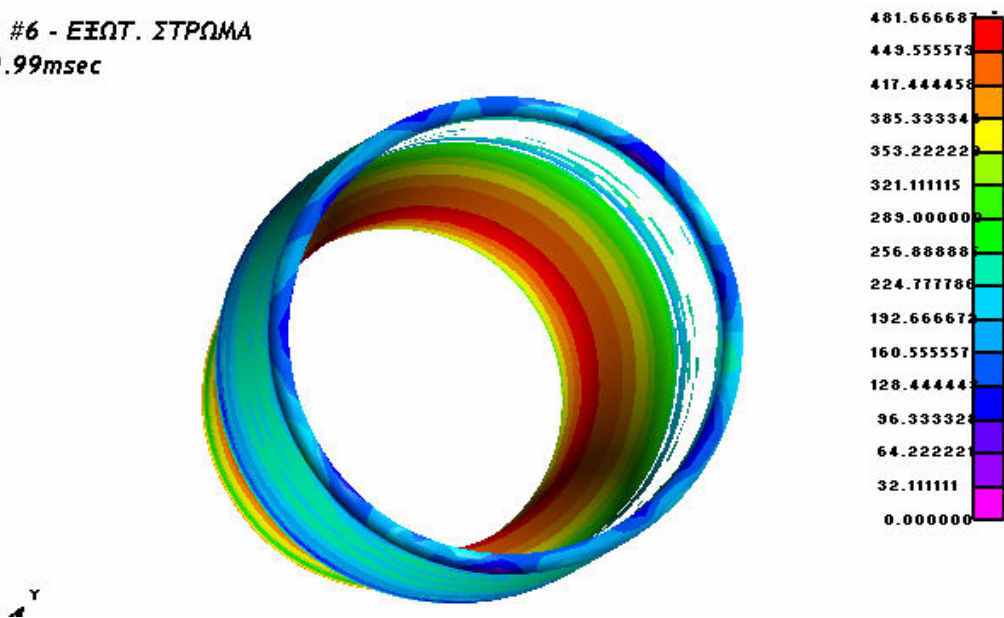
ΔΟΚΙΜΙΟ #6 - ΕΞΩΤ. ΣΤΡΩΜΑ
 $t=0.49msec$



Εικόνα 4.6.7: Ισοδύναμες τάσεις κατά von Mises για τον εξωτερικό σωλήνα κατά τη χρονική στιγμή $t=0.49msec$

Από την αναπαράσταση αυτή παρατηρείται, όπως είναι αναμενόμενο, ότι η μέγιστη τάση εμφανίζεται στην περιοχή όπου ο σωλήνας εισέρχεται στο κωνικό τμήμα της μήτρας. Η τάση αυτή υπολογίστηκε στα 309-332MPa περίπου. Επίσης, το τμήμα του δοκιμίου που βρίσκεται σε επαφή με το μέτωπο του εμβόλου καταπονείται και αυτό από τάση, αλλά μικρότερη, περίπου 44-88MPa.

ΔΟΚΙΜΙΟ #6 - ΕΞΩΤ. ΣΤΡΩΜΑ
 $t=19.99msec$

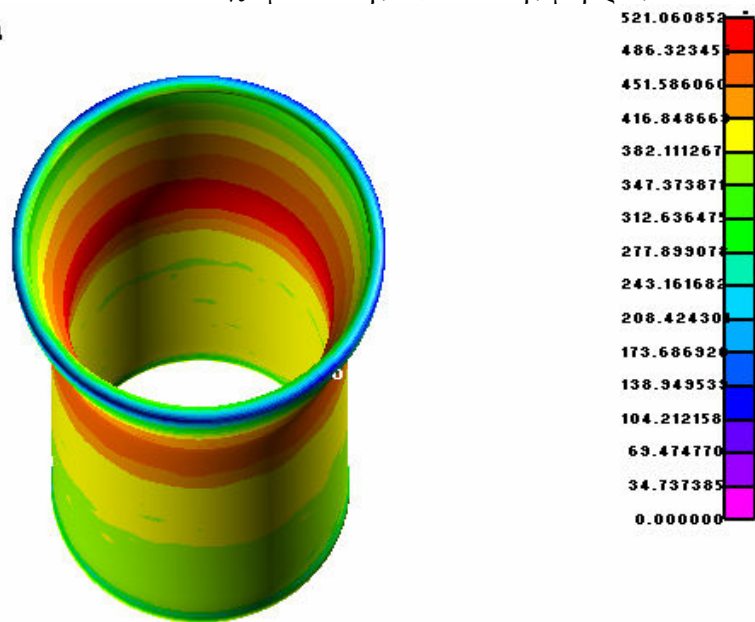


Εικόνα 4.6.8: Ισοδύναμες τάσεις κατά von Mises για τον εξωτερικό σωλήνα κατά τη χρονική στιγμή $t=19.99msec$

Στην εικόνα αυτή παρατηρείται ότι η μέγιστη τάση που καταπονεί τον εξωτερικό σωλήνα είναι περί τα 449-481MPa και παρουσιάζεται στην περιοχή του δοκιμίου που βρίσκεται στο κωνικό τμήμα της μήτρας και δη στην εσωτερική επιφάνεια του σωλήνα, καθώς αυτό το τμήμα βρίσκεται υπό τάση τόσο από τα τοιχώματα της μήτρας όσο και από τον εσωτερικό σωλήνα.

Επίσης, περιοχές οι οποίες έχουν ήδη υποστεί την κατεργασία της διέλασης καταπονούνται από αρκετά υψηλές τάσεις καθώς πιέζονται από τα τοιχώματα της εξόδου της μήτρας.

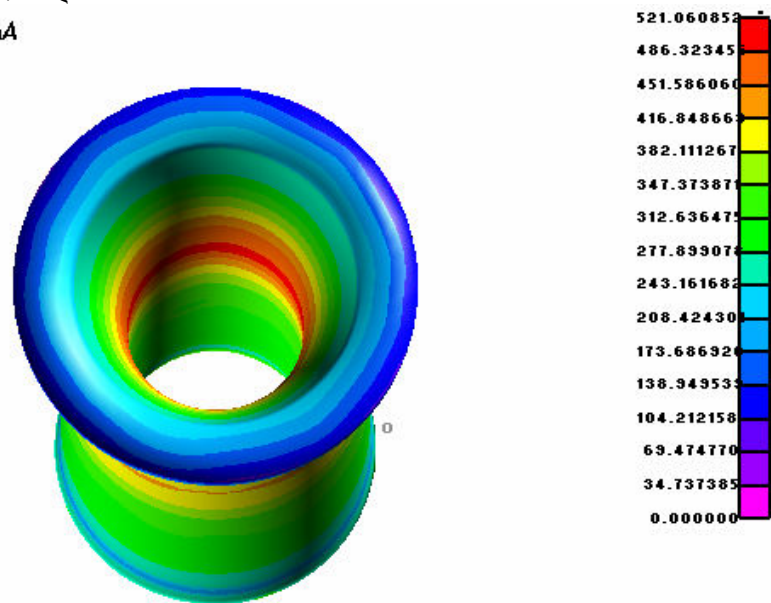
ΔΟΚΙΜΙΟ #6 - ΕΞΩΤ. ΣΤΡΩΜΑ
t=37.49msec



Εικόνα 4.6.9: Ισοδύναμες τάσεις κατά von Mises για τον εξωτερικό σωλήνα κατά τη χρονική στιγμή t=37.49msec

Η εικόνα 4.6.9 παρουσιάζει την τελική εντατική κατάσταση του εξωτερικού σωλήνα, στην οποία παρατηρείται αρκετά ομοιόμορφη κατανομή των τάσεων. Στην περιοχή που περισσότερο καταπονείται απαντώνται τάσεις περί τα 486-521MPa.

ΔΟΚΙΜΙΟ #6 - ΕΣΩΤ. ΣΤΡΩΜΑ
t=37.49msec



Εικόνα 4.6.10: Ισοδύναμες τάσεις κατά von Mises για τον εσωτερικό σωλήνα κατά τη χρονική στιγμή t=37.49msec

Η εικόνα 4.6.10 παρουσιάζει την τελική εντατική κατάσταση του εσωτερικού σωλήνα, στην οποία παρατηρείται ανομοιόμορφη κατανομή των τάσεων. Στην περιοχή που περισσότερο καταπονείται απαντώνται τάσεις περί τα 486-521MPa.

Η κατεργασία του δοκιμίου και η μορφή του πλέγματος καθ'όλη την διάρκεια της διαδικασίας έχει καταγραφεί σε video με τη βοήθεια του post-processor. Το video αυτό, καθώς και άλλα αρχεία που αφορούν στην μοντελοποίηση, στην επίλυση και στην εξαγωγή αποτελεσμάτων βρίσκονται στο dvd που συνοδεύει την εργασία στον αντίστοιχο φάκελο για το συγκεκριμένο δοκίμιο.

4.7 Αποτελέσματα Προσομοίωσης - Δοκίμιο #7

Το διμεταλλικό δοκίμιο #7 είναι κατασκευασμένο από καθαρό χαλκό (εξωτερικό στρώμα) και χυτό αλουμίνιο (εσωτερικό στρώμα). Ο λόγος διαρροής των 2 υλικών είναι:

$$\lambda = \frac{Sigy(Cu)}{Sigy(\chi\upsilon\tau\omicron Al - 6063 - F25)} = \frac{266}{63.7} = 4.176 > 3.5$$

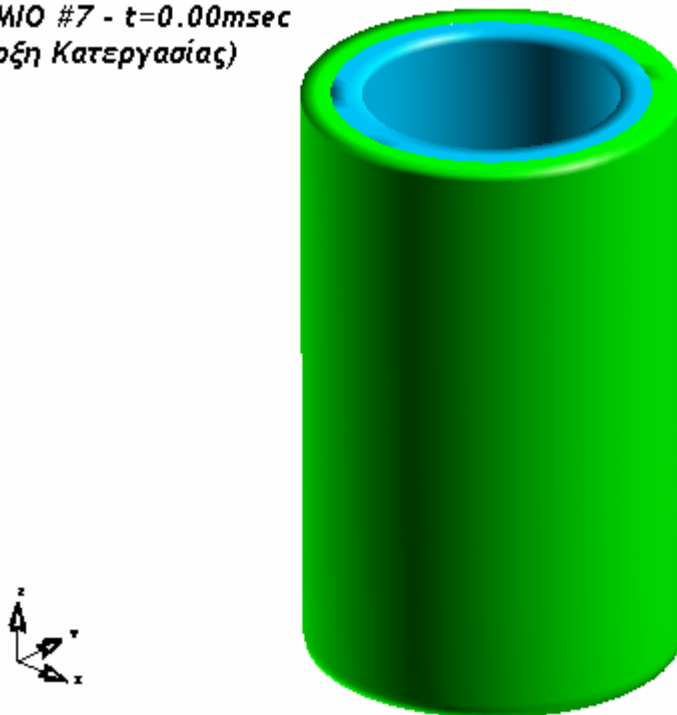
Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [17], ο παραπάνω λόγος των ορίων διαρροής δεν εξασφαλίζει ομαλή διεξαγωγή της κατεργασίας και πιθανόν να εμφανιστούν ιδιαίτερα αυξημένες τιμές τάσεων και φορτίων.

- Αρχικό μήκος εσωτερικού και εξωτερικού στρώματος: 40.00mm
- Αρχικό πάχος εσωτερικού σωλήνα: 2.00mm
- Αρχικό πάχος εξωτερικού σωλήνα: 2.00mm

Μετά την επίλυση του μοντέλου του δοκιμίου #7 από τον solver του LS-DYNA, προκύπτουν τα ακόλουθα αποτελέσματα μέσω των ETA Post-Processor και ETA Graph-Processor.

Φάσεις της Κατεργασίας

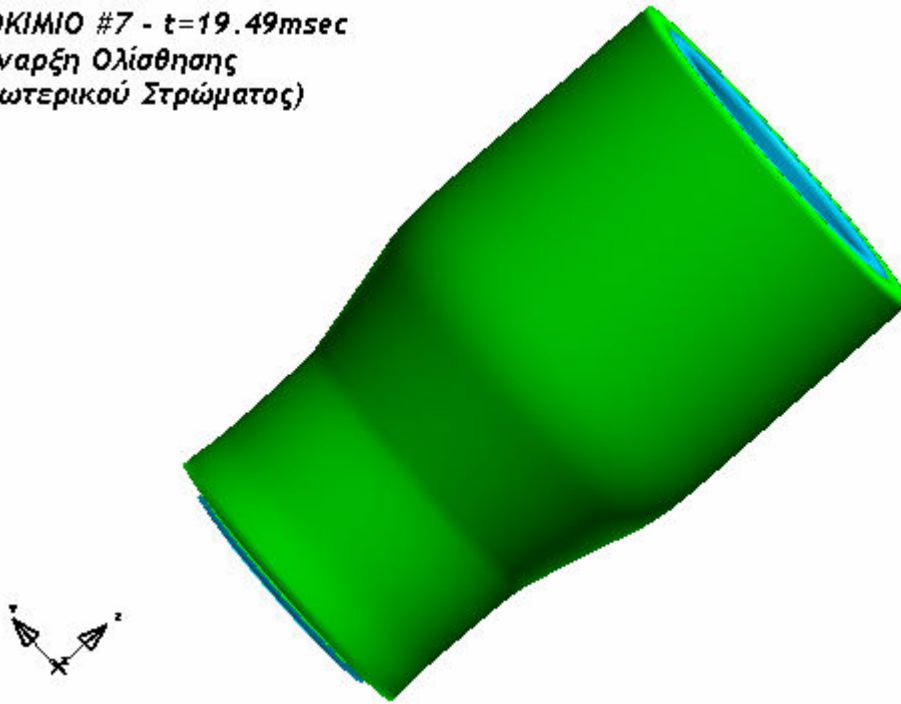
ΔΟΚΙΜΙΟ #7 - t=0.00msec
(Έναρξη Κατεργασίας)



Εικόνα 4.7.1: Αναπαράσταση δοκιμίου #7 κατά την έναρξη της κατεργασίας διέλασης

Τη χρονική στιγμή t=19.49msec αρχίζει η ροή του εσωτερικού στρώματος προς το κάτω μέρος του δοκιμίου.

ΔΟΚΙΜΙΟ #7 - $t=19.49msec$
(Εναρξη Ολίσθησης
Εσωτερικού Στρώματος)



Εικόνα 4.7.2: Αναπαράσταση δοκιμίου #7 κατά την χρονική στιγμή $t=19.49msec$

Η επίλυση συνεχίστηκε απρόσκοπτα μέχρι την χρονική στιγμή $t=38.49msec$, οπότε και έληξε η κατεργασία. Η τελική εικόνα του δοκιμίου ήταν η εξής:

ΔΟΚΙΜΙΟ #7 - $t=38.49msec$
(Λήξη Κατεργασίας)



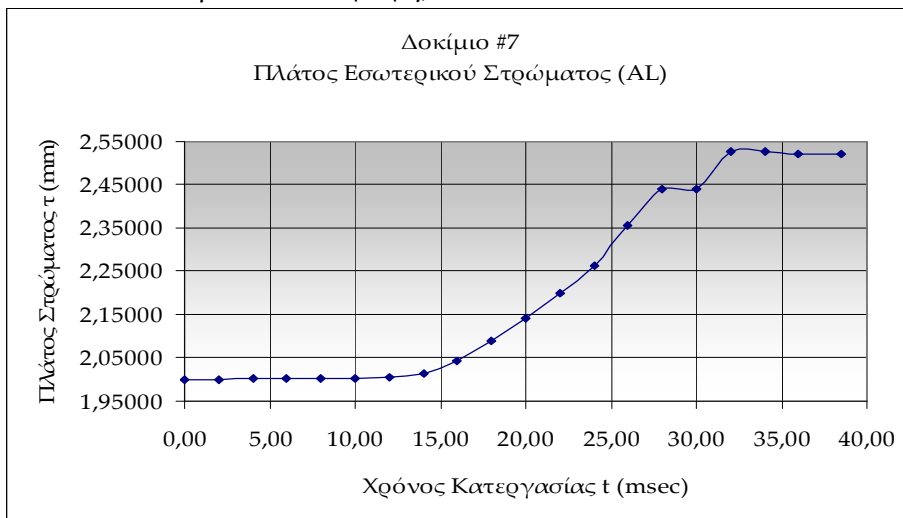
Εικόνα 4.7.3: Αναπαράσταση δοκιμίου #7 κατά τη λήξη της κατεργασίας διέλασης

Η τελική εικόνα του δοκιμίου είναι παρόμοια με την αντίστοιχη πειραματική, βλ. εικόνα 2.23 στο Κεφάλαιο 2.

Παραμόρφωση Πλέγματος

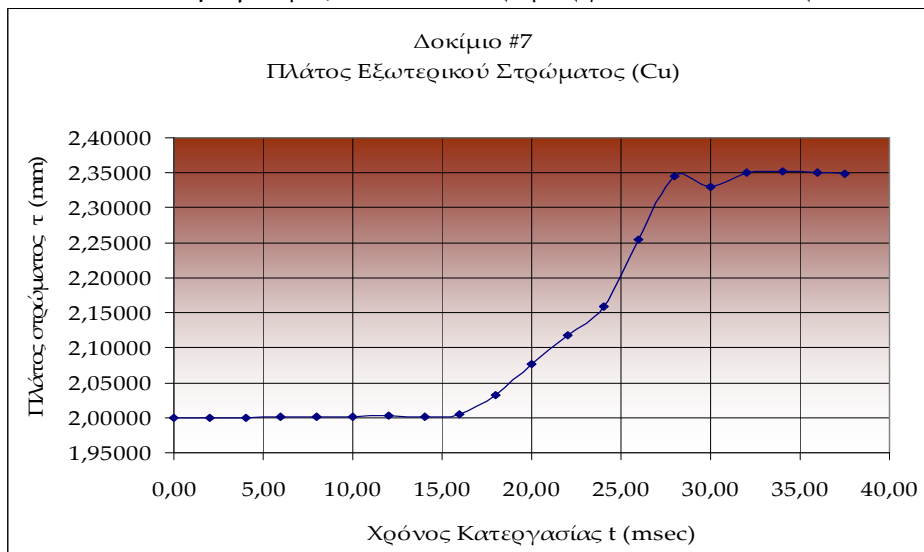
- Τελικό μήκος εσωτερικού στρώματος: 45.85mm (Αύξηση μήκους κατά 14.63%)
- Τελικό μήκος εξωτερικού στρώματος: 43.81mm (Αύξηση μήκους κατά 9.53%)
- Τελικό πάχος εσωτερικού σωλήνα: 2.52mm (Αύξηση πάχους κατά 26.07%)
- Τελικό πάχος εξωτερικού σωλήνα: 2.35mm (Αύξηση πάχους κατά 17.47%)
- Τελικό πάχος διμεταλλικού σωλήνα: 4.87mm (Αύξηση πάχους κατά 21.77%)

Όπως παρατηρείται, αναφορικά με το μήκος των σωλήνων, για το οποίο υπάρχουν μετρήσεις από τις πειραματικές δοκιμές, η επιμήκυνση που προκύπτει από την αριθμητική προσομοίωση είναι ελάχιστα μεγαλύτερη τόσο για το αλουμίνιο (14.63% έναντι 13.30%) όσο και για το χαλκό (9.53% έναντι 8.8%). Η μέτρηση έγινε σε κόμβους που βρίσκονται στο μέσο του πάχους του πλέγματος (#65650 & #82173, βλέπε εισαγωγή).



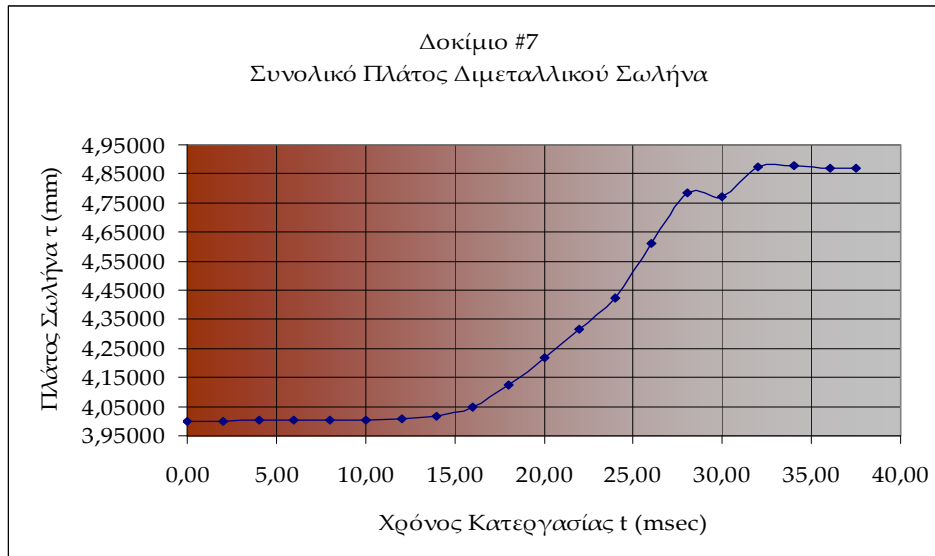
Διάγραμμα 4.7.1: Μεταβολή του πάχους του εσωτερικού σωλήνα του δοκιμίου #7

Στο διάγραμμα 4.7.1 παρατηρείται βαθμιαία αύξηση του πάχους του εσωτερικού σωλήνα από την χρονική στιγμή $t=14.00\text{msec}$ έως την χρονική στιγμή $t=32.00\text{msec}$ και κατόπιν σταθεροποίηση του περί την τελική τιμή ως το πέρας της κατεργασίας. Η αύξηση του πάχους του εσωτερικού σωλήνα είναι σχετικά μεγάλη (26.07%). Κάτι τέτοιο δικαιολογείται εν μέρει από το γεγονός ότι στην εσωτερική επιφάνεια του σωλήνα δεν υπάρχει υλικό το οποίο να περιορίζει την αύξηση του πάχους (π.χ. mandrel, δηλ. βύσμα) και έτσι παραμορφώνεται ελεύθερα.



Διάγραμμα 4.7.2: Μεταβολή του πάχους του εξωτερικού σωλήνα του δοκιμίου #7

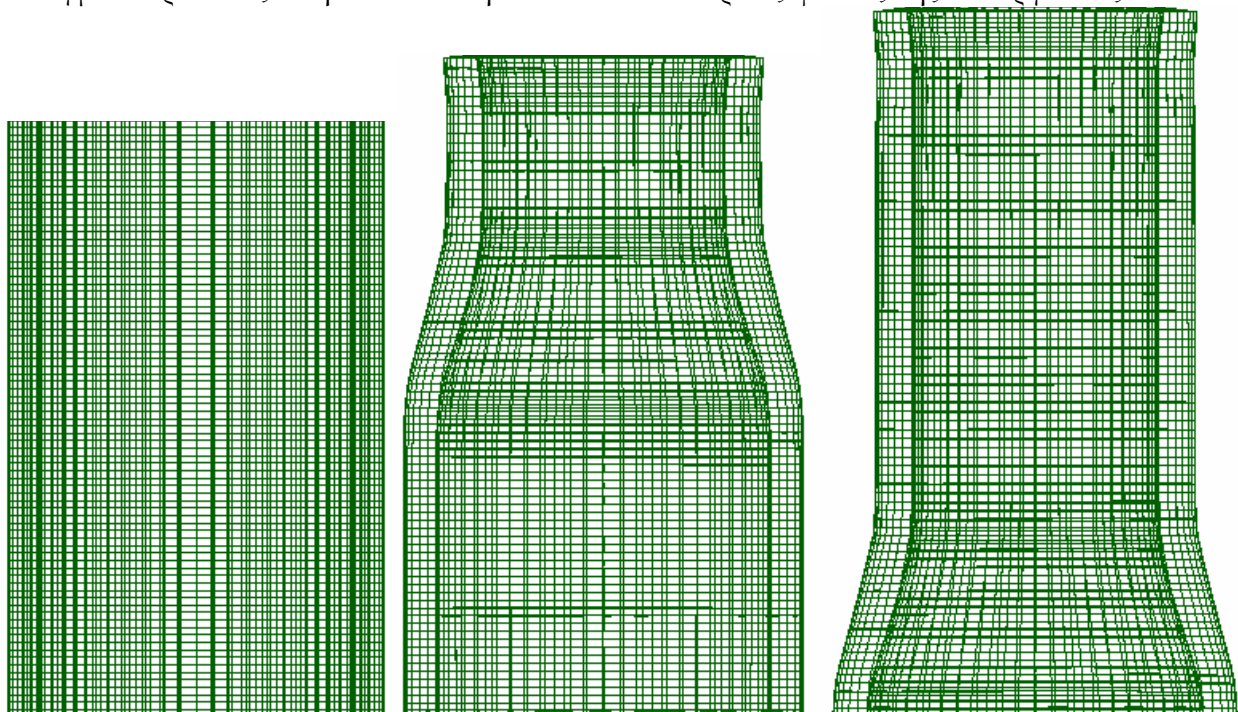
Στο διάγραμμα 4.7.2 παρατηρείται βαθμιαία αύξηση του πάχους του εσωτερικού σωλήνα από την χρονική στιγμή $t=16.00\text{msec}$ έως την χρονική στιγμή $t=28.00\text{msec}$ και κατόπιν σταθεροποίηση του περί την τελική τιμή ως το πέρας της κατεργασίας. Η σταθερότητα αυτή οφείλεται στην επαφή του εξωτερικού στρώματος με τα τοιχώματα της μήτρας από την μια μεριά και την επαφή με το εσωτερικό στρώμα από την άλλη.



Διάγραμμα 4.7.3: Μεταβολή του συνολικού πάχους του διμεταλλικού δοκιμίου #7

Στο διάγραμμα 4.7.3 παρατηρείται βαθμιαία αύξηση του πάχους του εσωτερικού σωλήνα από την χρονική στιγμή $t=14.00\text{msec}$ έως την χρονική στιγμή $t=32.00\text{msec}$ και κατόπιν ομαλή μείωση και σταθεροποίηση του περί την τελική τιμή ως το πέρας της κατεργασίας

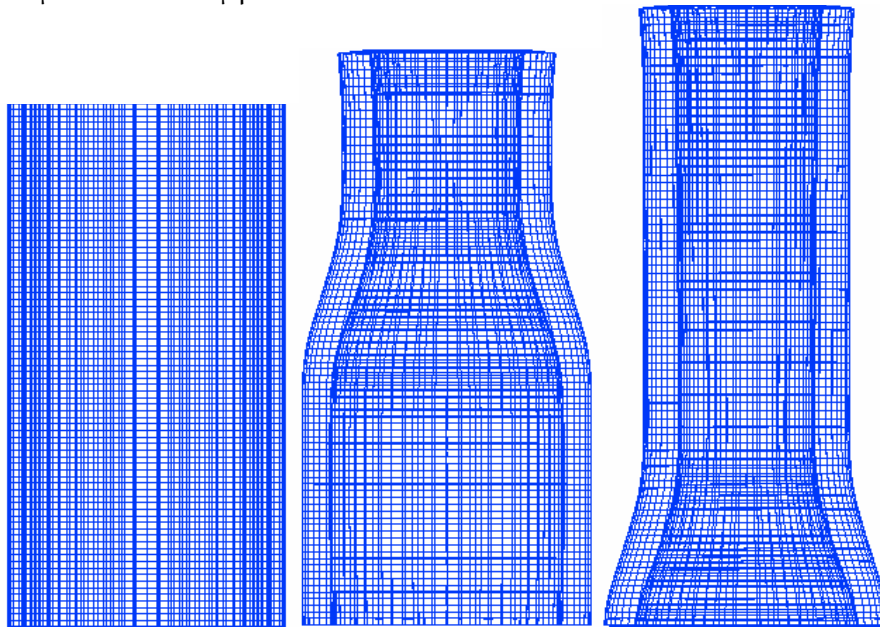
Το πλέγμα παρουσιάζει την ακόλουθη εικόνα σε 3 διακριτές φάσεις της κατεργασίας:



Εικόνα 4.7.4: Πλέγμα εξωτερικού σωλήνα (α) $t=0.00\text{msec}$ (β) $t=20.00\text{msec}$ (γ) $t=38.49\text{msec}$

Από την εικόνα 4.7.4, όπου παρουσιάζεται στραμμένο κατά 180° το πλέγμα του εξωτερικού σωλήνα σε 3 χρονικές στιγμές, είναι φανερό ότι υπάρχει έντονη παραμόρφωση (συμπίεση) των πεπερασμένων στοιχείων στις περιοχές που έχουν ήδη υποστεί την κατεργασία διέλασης (β,γ) καθώς και στην υπό διέλαση περιοχή (β). Επίσης, παρατηρείται ότι τα πεπερασμένα στοιχεία που βρίσκονται στο κάτω μέρος του δοκιμίου παρουσιάζουν μικρή τάση ροής προς τα κάτω (γ).

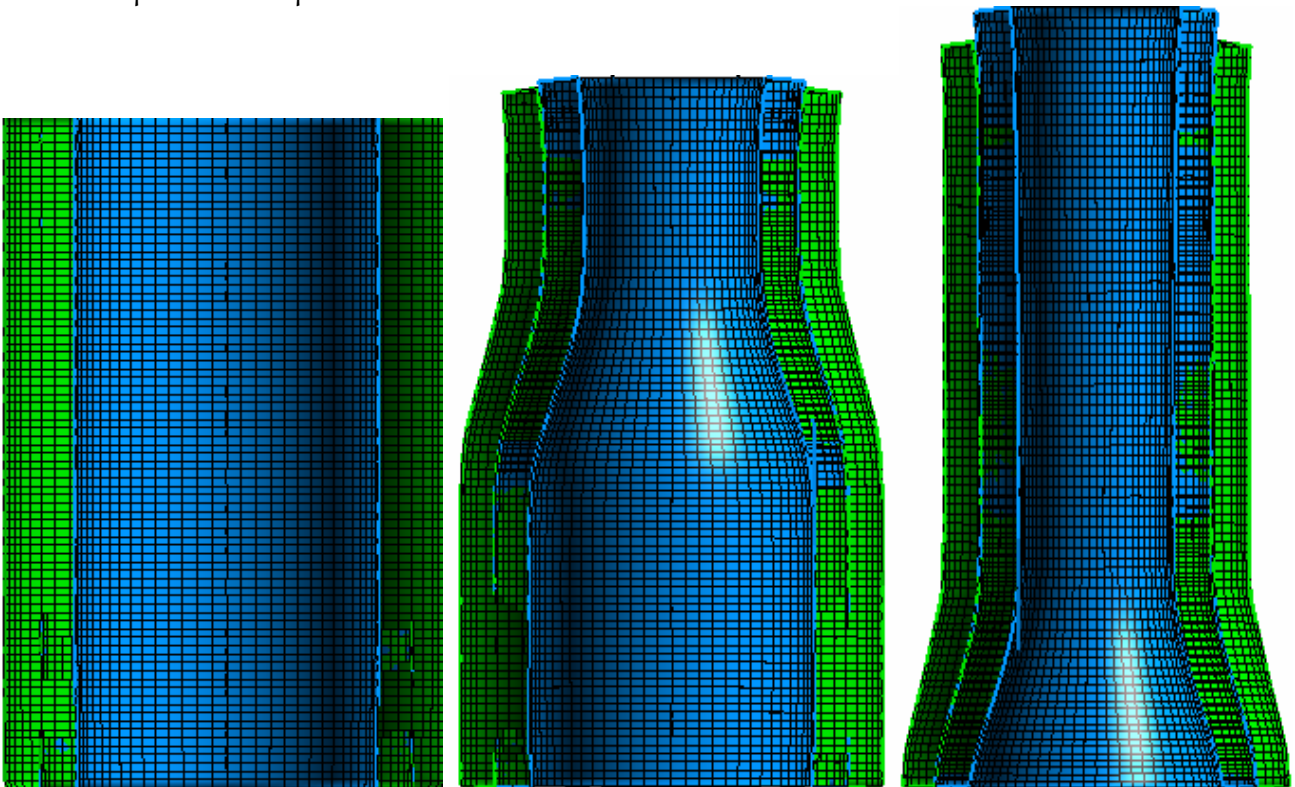
Τέλος, συμπίεση του πλέγματος παρατηρείται επίσης στο πέρας της κατεργασίας στην περιοχή που βρίσκεται στο μέτωπο του εμβόλου.



Εικόνα 4.7.5: Πλέγμα εσωτερικού σωλήνα (α) $t=0.00msec$ (β) $t=20.00msec$ (γ) $t=38.49msec$

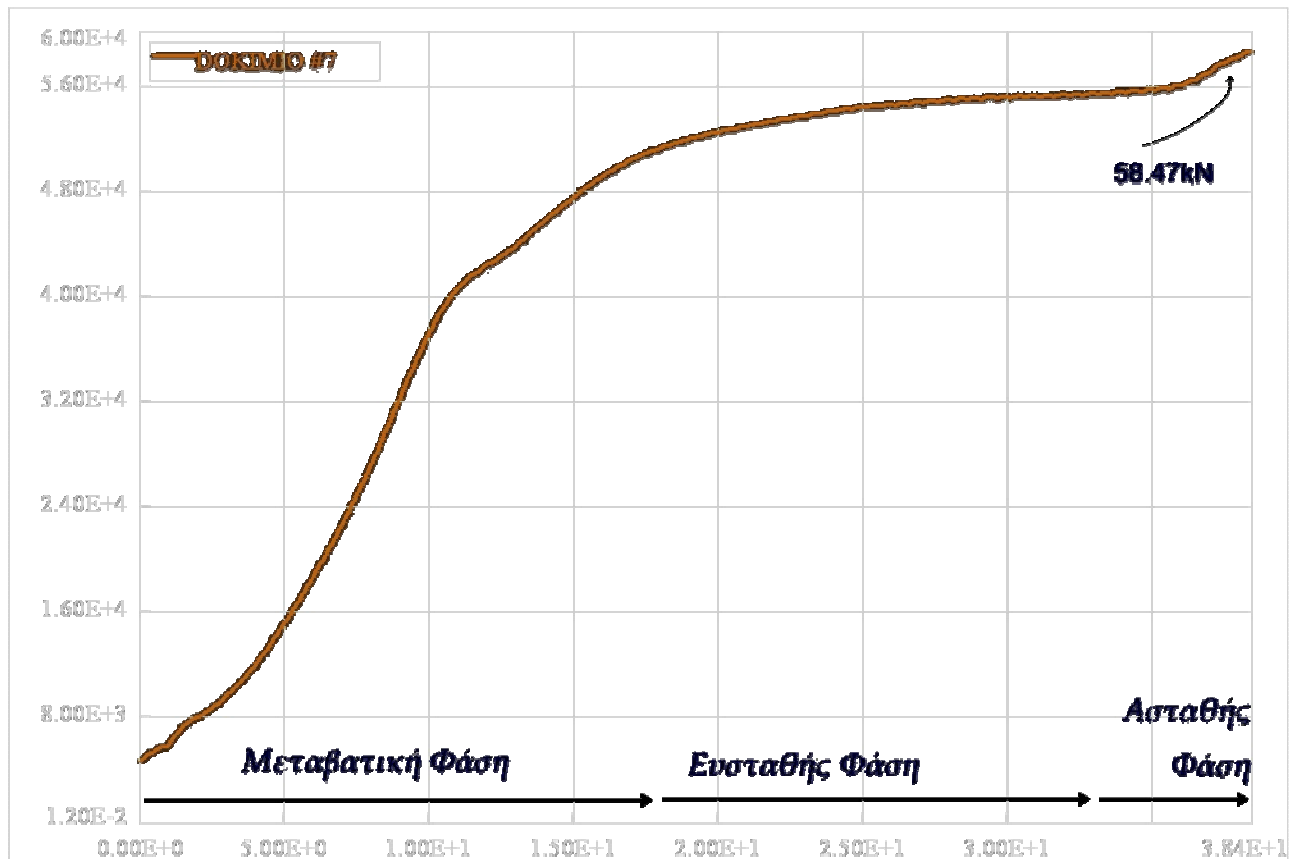
Ομοίως, από την εικόνα 4.7.5, όπου παρουσιάζεται στραμμένο κατά 180° το πλέγμα του εσωτερικού σωλήνα σε 3 χρονικές στιγμές, είναι φανερό ότι υπάρχει έντονη παραμόρφωση (συμπίεση) των πεπερασμένων στοιχείων στις περιοχές που έχουν ήδη υποστεί στην κατεργασία διέλασης (β,γ) καθώς και στην υπό διέλαση περιοχή (β). Τέλος, συμπίεση του πλέγματος παρατηρείται επίσης στο πέρας της κατεργασίας στην περιοχή που βρίσκεται στο μέτωπο του εμβόλου.

Η συνολική παραμόρφωση του πλέγματος στο πέρας της κατεργασίας και για τους 2 σωλήνες δίνεται στην ακόλουθη εικόνα.



Εικόνα 4.7.6: Παραμόρφωση πλέγματος διμεταλλικού σωλήνα (α) $t=0.00msec$ (β) $t=20.00msec$ (γ) $t=38.49msec$

Διάγραμμα Φορτίου – Μετατόπισης



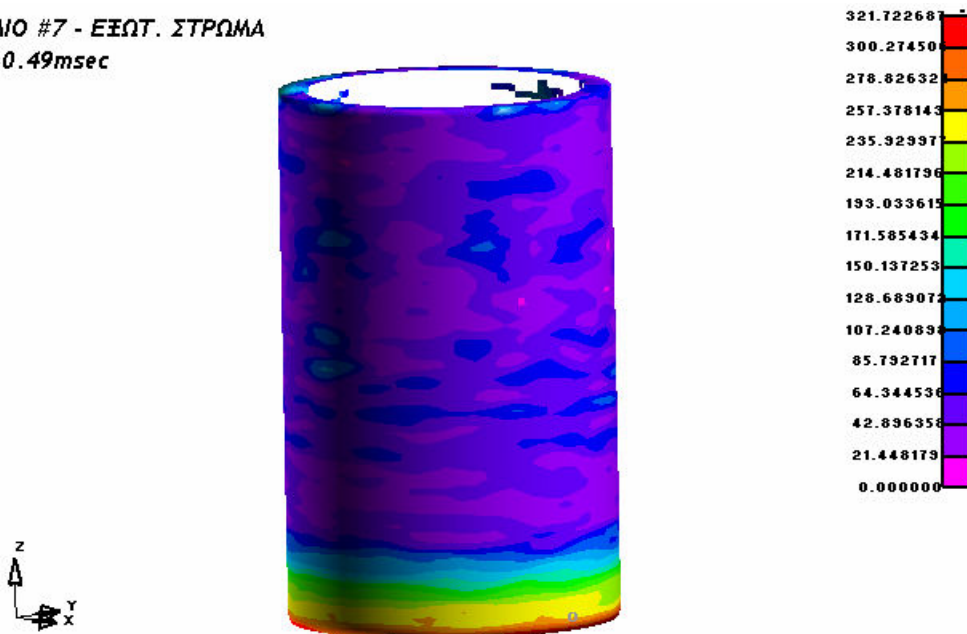
Διάγραμμα 4.7.4: Καμπύλη Φορτίου-Μετατόπισης για το Δοκίμιο #7

Στο διάγραμμα που προέκυψε από την επίλυση του μοντέλου διακρίνονται οι 3 φάσεις της κατεργασίας (Μεταβατική Φάση, Φάση Ευστάθειας, Ασταθής Φάση). Η μορφή της καμπύλης δεν προσεγγίζει ιδιαίτερα την αντίστοιχη καμπύλη που προέκυψε από την πειραματική διαδικασία, ιδιαίτερα από τα 20.00 mm και μετά, βλ. διάγραμμα 2.7. Επίσης σημειώνεται το μέγιστο φορτίο διέλασης, 58.47kN, τιμή που απέχει από την αντίστοιχη πειραματική τιμή, δηλαδή τα 28.30kN. Ολόκληρη η καμπύλη είναι μετατοπισμένη σε σχέση με την καμπύλη που προέκυψε από την πειραματική διαδικασία.

Η απόκλιση αυτή πιθανώς παρατηρείται επειδή για το υλικό του εσωτερικού σωλήνα (χυτό αλουμίνιο) δεν υπάρχουν πρότυπες ιδιότητες και ορισμένες τιμές μηχανικών ιδιοτήτων που δόθηκαν πιθανόν να διαφέρουν από τις πραγματικές. Συνεπώς, γίνεται η υπόθεση ότι με την εισαγωγή των κατάλληλων τιμών των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού, η μοντελοποίηση θα ήταν ακριβέστερη. Θα μπορούσε επίσης η διαφορά αυτή να αποδοθεί στην επιλογή των συντελεστών τριβής μεταξύ της μήτρας και του δοκιμίου, μολονότι δόθηκαν οι ελάχιστες προτεινόμενες τιμές για τον συγκεκριμένο τύπο επαφής (δηλαδή επιφάνειες με λεπτό φιλμ λιπαντικού).

Τασικό Πεδίο

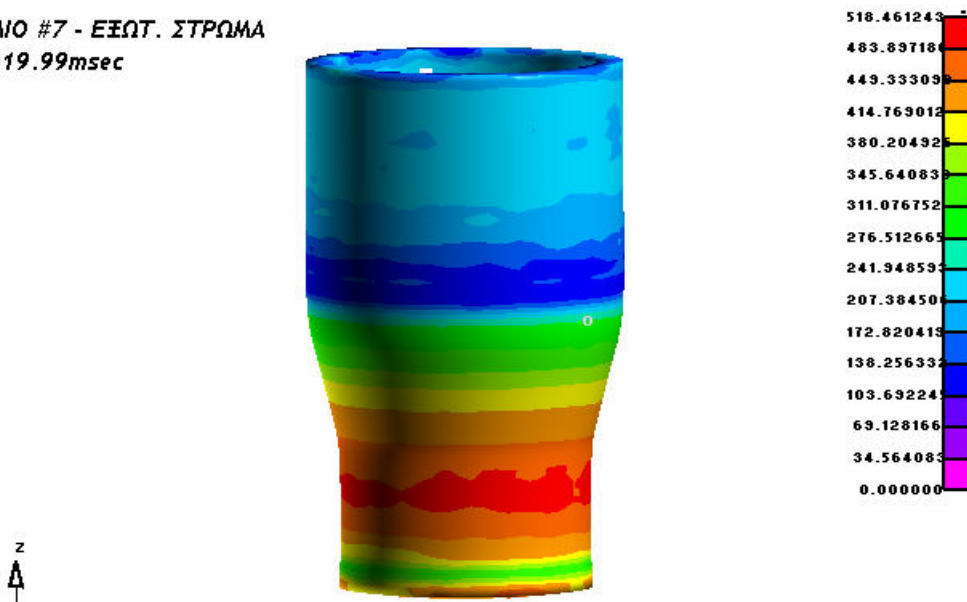
ΔΟΚΙΜΙΟ #7 - ΕΞΩΤ. ΣΤΡΩΜΑ
 $t=0.49msec$



Εικόνα 4.7.7: Ισοδύναμες τάσεις κατά von Mises για τον εξωτερικό σωλήνα κατά τη χρονική στιγμή $t=0.49msec$

Από την αναπαράσταση αυτή παρατηρείται, όπως είναι αναμενόμενο, ότι η μέγιστη τάση εμφανίζεται στην περιοχή όπου ο σωλήνας εισέρχεται στο κωνικό τμήμα της μήτρας. Η τάση αυτή υπολογίστηκε στα 300-321MPa περίπου. Επίσης, το τμήμα του δοκιμίου που βρίσκεται σε επαφή με το μέτωπο του εμβόλου καταπονείται και αυτό από τάση, αλλά μικρότερη, περίπου 107-128MPa.

ΔΟΚΙΜΙΟ #7 - ΕΞΩΤ. ΣΤΡΩΜΑ
 $t=19.99msec$

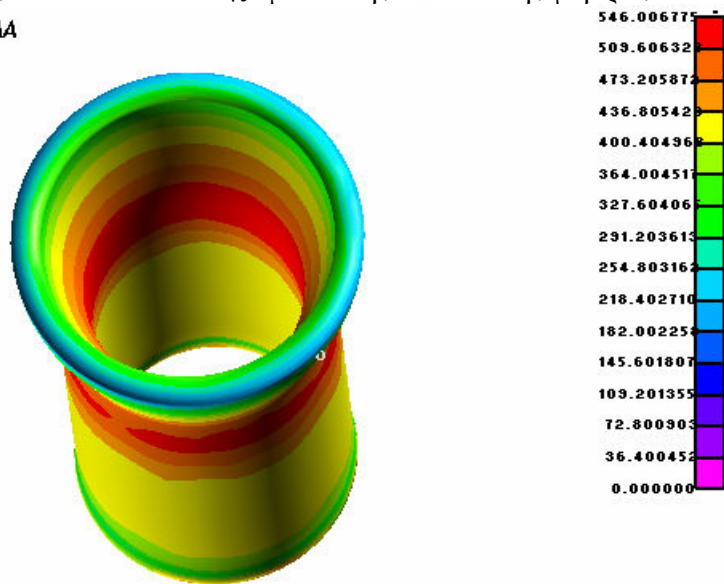


Εικόνα 4.7.8: Ισοδύναμες τάσεις κατά von Mises για τον εξωτερικό σωλήνα κατά τη χρονική στιγμή $t=19.99msec$

Στην εικόνα αυτή παρατηρείται ότι η μέγιστη τάση που καταπονεί τον εξωτερικό σωλήνα είναι περί τα 489-518MPa και παρουσιάζεται στην περιοχή του δοκιμίου που βρίσκεται στο κωνικό τμήμα της μήτρας και δη στην εσωτερική επιφάνεια του σωλήνα, καθώς αυτό το τμήμα βρίσκεται υπό τάση τόσο από τα τοιχώματα της μήτρας όσο και από τον εσωτερικό σωλήνα.

Επίσης, περιοχές οι οποίες έχουν ήδη υποστεί την κατεργασία της διέλασης καταπονούνται από αρκετά υψηλές τάσεις καθώς πιέζονται από τα τοιχώματα της εξόδου της μήτρας.

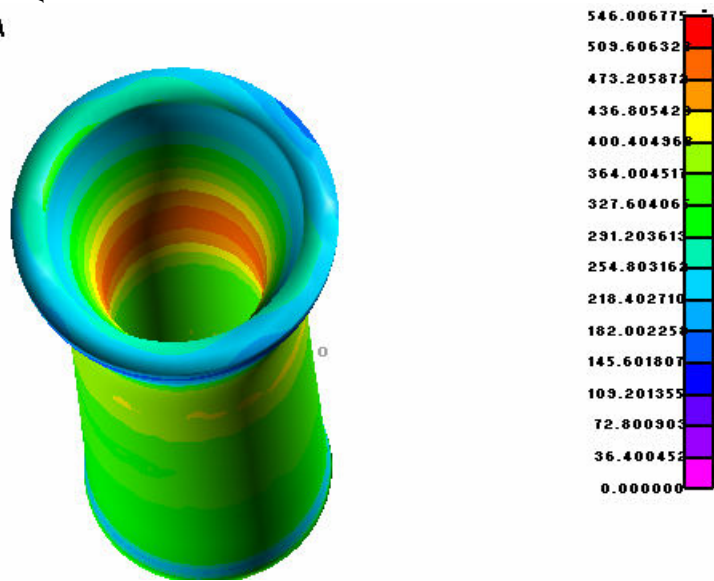
ΔΟΚΙΜΙΟ #7 - ΕΞΩΤ. ΣΤΡΩΜΑ
t=38.49msec



Εικόνα 4.7.9: Ισοδύναμες τάσεις κατά von Mises για τον εξωτερικό σωλήνα κατά τη χρονική στιγμή t=38.49msec

Η εικόνα 4.7.9 παρουσιάζει την τελική εντατική κατάσταση του εξωτερικού σωλήνα, στην οποία παρατηρείται αρκετά ομοιόμορφη κατανομή των τάσεων. Στην περιοχή που περισσότερο καταπονείται απαντώνται τάσεις περί τα 509-546MPa.

ΔΟΚΙΜΙΟ #7 - ΕΣΩΤ. ΣΤΡΩΜΑ
t=38.49msec



Εικόνα 4.7.10: Ισοδύναμες τάσεις κατά von Mises για τον εσωτερικό σωλήνα κατά τη χρονική στιγμή t=38.49msec

Η εικόνα 4.7.10 παρουσιάζει την τελική εντατική κατάσταση του εσωτερικού σωλήνα, στην οποία παρατηρείται αρκετά ομοιόμορφη κατανομή των τάσεων. Στην περιοχή που περισσότερο καταπονείται απαντώνται τάσεις περί τα 473-509MPa.

■ Η κατεργασία του δοκιμίου και η μορφή του πλέγματος καθ'όλη την διάρκεια της διαδικασίας έχει καταγραφεί σε video με τη βοήθεια του post-processor. Το video αυτό, καθώς και άλλα αρχεία που αφορούν στην μοντελοποίηση, στην επίλυση και στην εξαγωγή αποτελεσμάτων βρίσκονται στο dvd που συνοδεύει την εργασία στον αντίστοιχο φάκελο για το συγκεκριμένο δοκίμιο.

4.8 Αποτελέσματα Προσομοίωσης - Δοκίμιο #8

Το διμεταλλικό δοκίμιο #8 είναι κατασκευασμένο από καθαρό χαλκό (εξωτερικό στρώμα) και κράμα αλουμινίου Al 6063 F25 (εσωτερικό στρώμα). Ο λόγος διαρροής των 2 υλικών είναι:

$$\lambda = \frac{\text{Sigy}(Cu)}{\text{Sigy}(Al - 6063 - F25)} = \frac{266}{192.2} = 1.384 < 3.5$$

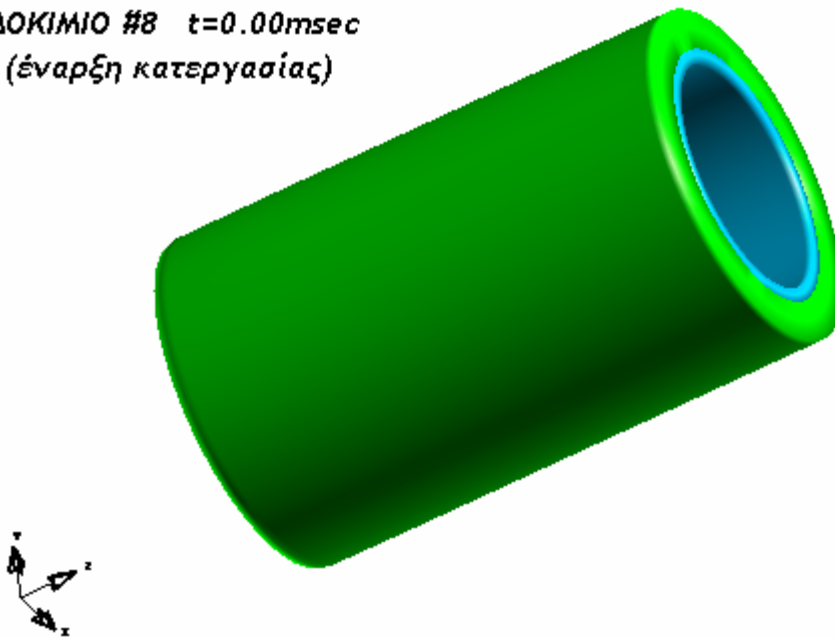
Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [17], ο παραπάνω λόγος των ορίων διαρροής εξασφαλίζει ομαλή διεξαγωγή της κατεργασίας και όχι ιδιαίτερα αυξημένες τιμές τάσεων.

- Αρχικό μήκος εσωτερικού και εξωτερικού στρώματος: 40.00mm
- Αρχικό πάχος εσωτερικού σωλήνα: 1.00mm
- Αρχικό πάχος εξωτερικού σωλήνα: 3.00mm

Μετά την επίλυση του μοντέλου του δοκιμίου #8 από τον solver του LS-DYNA, προκύπτουν τα ακόλουθα αποτελέσματα μέσω των ETA Post-Processor και ETA Graph-Processor.

Φάσεις της Κατεργασίας

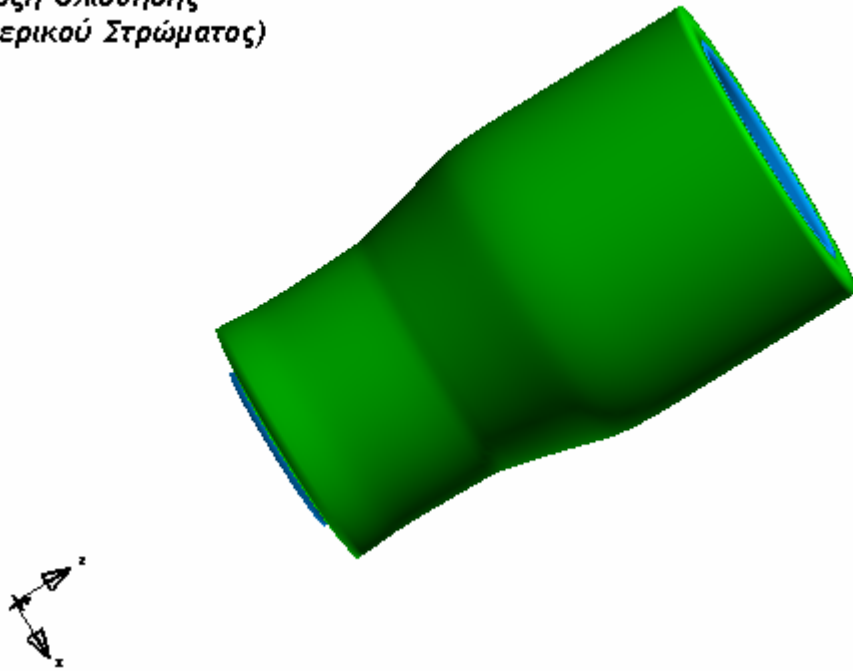
ΔΟΚΙΜΙΟ #8 t=0.00msec
(έναρξη κατεργασίας)



Εικόνα 4.8.1: Αναπαράσταση δοκιμίου #8 κατά την έναρξη της κατεργασίας διέλασης

Τη χρονική στιγμή t=20.49msec αρχίζει η ροή του εσωτερικού στρώματος προς το κάτω μέρος του δοκιμίου.

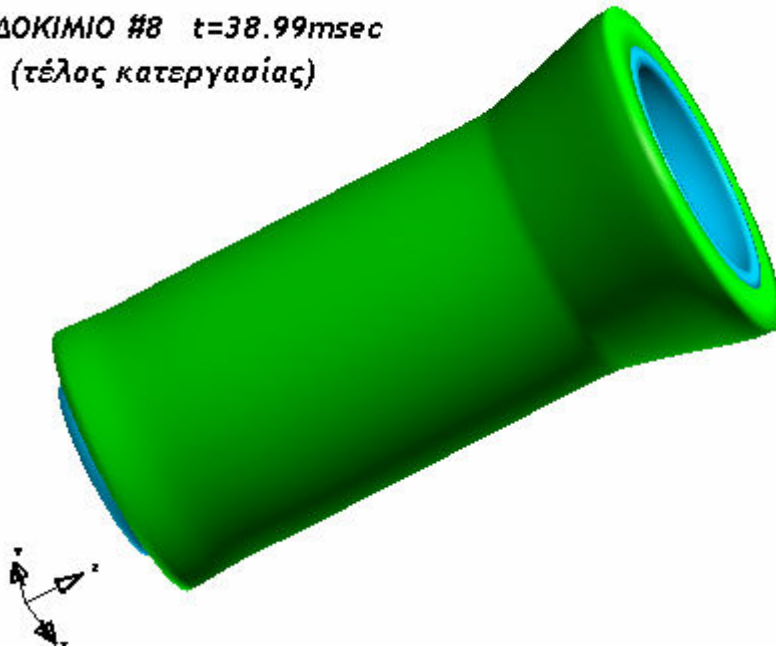
ΔΟΚΙΜΙΟ #8 $t=20.49msec$
(Εναρξη Ολίσθησης
Εσωτερικού Στρώματος)



Εικόνα 4.8.2: Αναπαράσταση δοκιμίου #8 κατά την χρονική στιγμή $t=20.49msec$

Η επίλυση συνεχίστηκε απρόσκοπτα μέχρι την χρονική στιγμή $t=38.99msec$, οπότε και έληξε η κατεργασία. Η τελική εικόνα του δοκιμίου ήταν η εξής:

ΔΟΚΙΜΙΟ #8 $t=38.99msec$
(τέλος κατεργασίας)



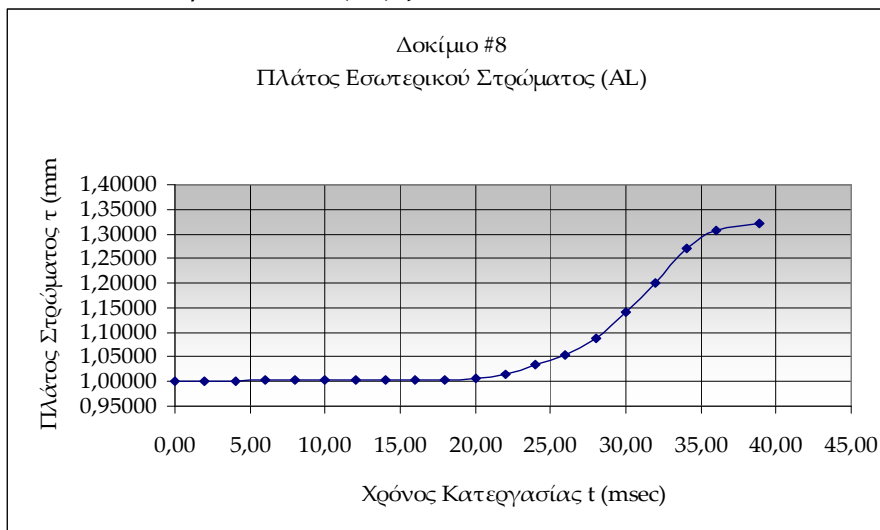
Εικόνα 4.8.3: Αναπαράσταση δοκιμίου #8 κατά τη λήξη της κατεργασίας διέλασης

Η τελική εικόνα του δοκιμίου είναι παρόμοια με την αντίστοιχη πειραματική, βλ. εικόνα 2.25 στο Κεφάλαιο 2.

Παραμόρφωση Πλέγματος

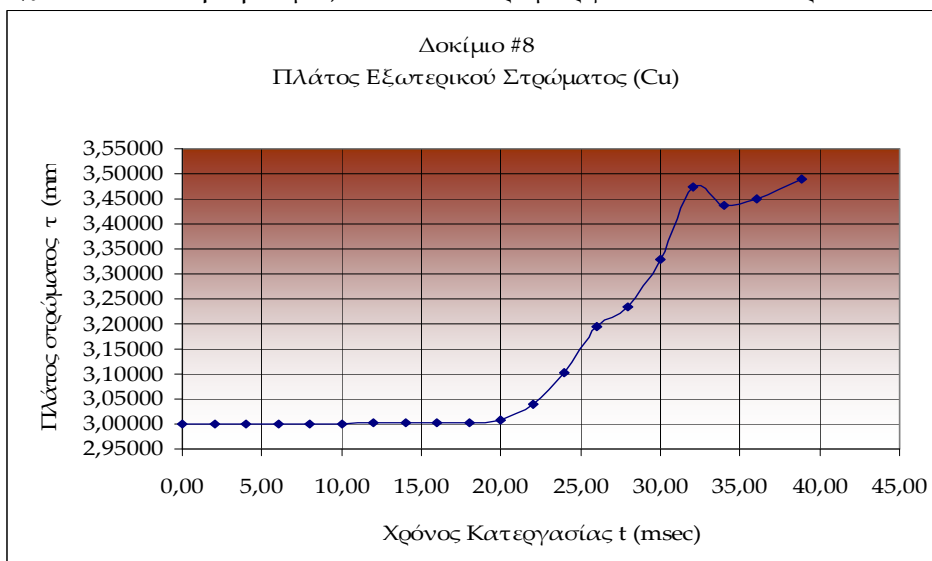
- Τελικό μήκος εσωτερικού στρώματος: 46.26mm (Αύξηση μήκους κατά 15.65%)
- Τελικό μήκος εξωτερικού στρώματος: 45.09mm (Αύξηση μήκους κατά 12.73%)
- Τελικό πάχος εσωτερικού σωλήνα: 1.32mm (Αύξηση πάχους κατά 32.18%)
- Τελικό πάχος εξωτερικού σωλήνα: 3.49mm (Αύξηση πάχους κατά 16.34%)
- Τελικό πάχος διμεταλλικού σωλήνα: 4.81mm (Αύξηση πάχους κατά 20.30%)

Όπως παρατηρείται, αναφορικά με το μήκος των σωλήνων, για το οποίο υπάρχουν μετρήσεις από τις πειραματικές δοκιμές, η επιμήκυνση που προκύπτει από την αριθμητική προσομοίωση είναι μεγαλύτερη και για τα δύο στρώματα (15.65% έναντι 7.50% για το αλουμίνιο και 12.73% έναντι 5.3% για το χαλκό). Η μέτρηση έγινε σε κόμβους που βρίσκονται στο μέσο του πάχους του πλέγματος (#82684 & #66160, βλέπε εισαγωγή).



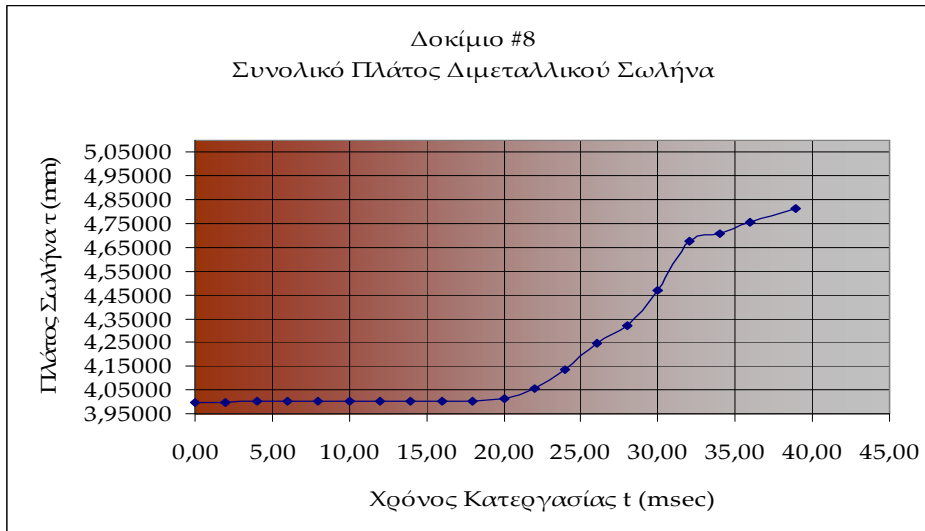
Διάγραμμα 4.8.1: Μεταβολή του πάχους του εσωτερικού σωλήνα του δοκιμίου #8

Στο διάγραμμα 4.8.1 παρατηρείται βαθμιαία αύξηση του πάχους του εσωτερικού σωλήνα από την χρονική στιγμή $t=22.00\text{msec}$ έως την χρονική στιγμή $t=36.00\text{msec}$ και κατόπιν σταθεροποίηση του περί την τελική τιμή ως το πέρας της κατεργασίας. Η αύξηση του πάχους του εσωτερικού σωλήνα είναι εξαιρετικά μεγάλη (32.18%). Κάτι τέτοιο δικαιολογείται εν μέρει από το γεγονός ότι στην εσωτερική επιφάνεια του σωλήνα δεν υπάρχει υλικό το οποίο να περιορίζει την αύξηση του πάχους (π.χ. mandrel, δηλ. βύσμα) και έτσι παραμορφώνεται ελεύθερα.



Διάγραμμα 4.8.2: Μεταβολή του πάχους του εξωτερικού σωλήνα του δοκιμίου #8

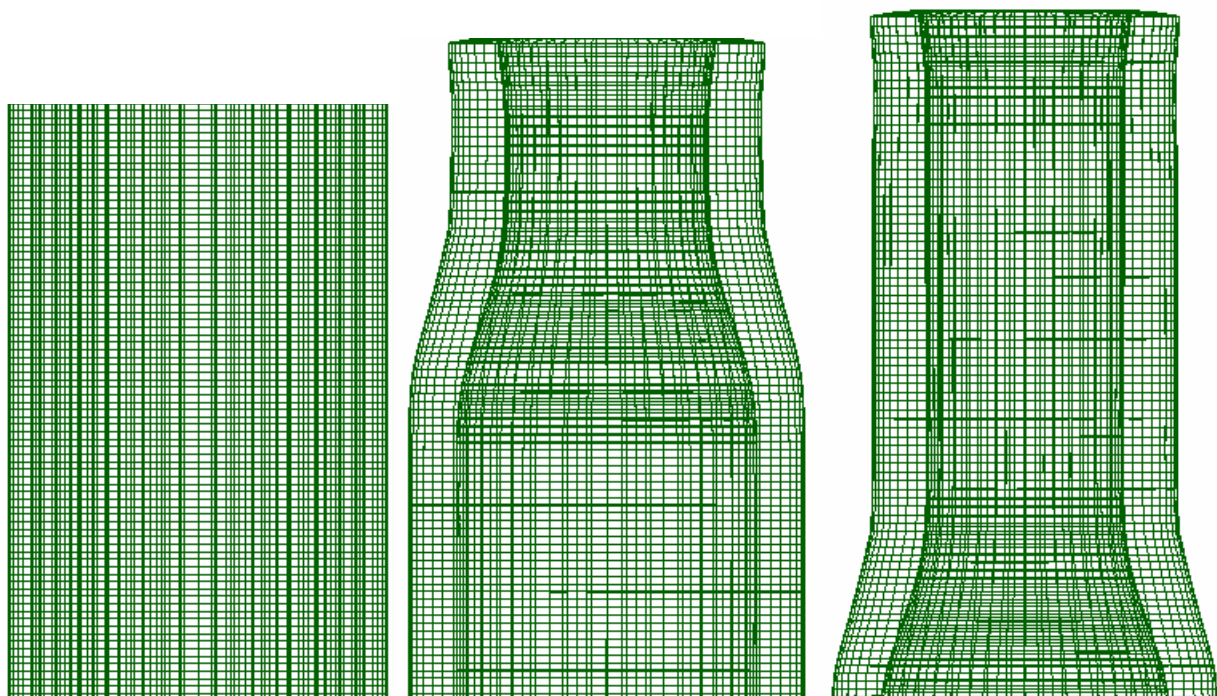
Στο διάγραμμα 4.8.2 παρατηρείται βαθμιαία αύξηση του πάχους του εσωτερικού σωλήνα από την χρονική στιγμή $t=22.00\text{msec}$ έως την χρονική στιγμή $t=32.00\text{msec}$ και κατόπιν μείωση και σταθεροποίηση του περί την τελική τιμή ως το πέρας της κατεργασίας. Η σταθερότητα αυτή οφείλεται στην επαφή του εξωτερικού στρώματος με τα τοιχώματα της μήτρας από την μια μεριά και την επαφή με το εσωτερικό στρώμα από την άλλη.



Διάγραμμα 4.8.3: Μεταβολή του συνολικού πάχους του διμεταλλικού δοκιμίου #5

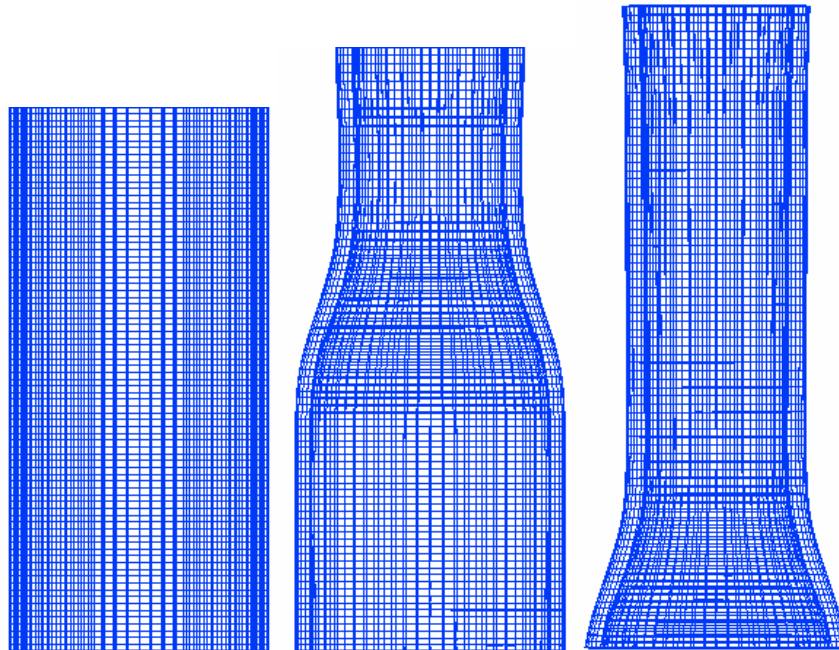
Στο διάγραμμα 4.8.3 παρατηρείται βαθμιαία αύξηση του πάχους του εσωτερικού σωλήνα από την χρονική στιγμή $t=22.00\text{msec}$ έως το πέρας της κατεργασίας.

Το πλέγμα παρουσιάζει την ακόλουθη εικόνα σε 3 διακριτές φάσεις της κατεργασίας:



Εικόνα 4.8.4: Πλέγμα εξωτερικού σωλήνα (α) $t=0.00\text{msec}$ (β) $t=20.00\text{msec}$ (γ) $t=38.99\text{msec}$

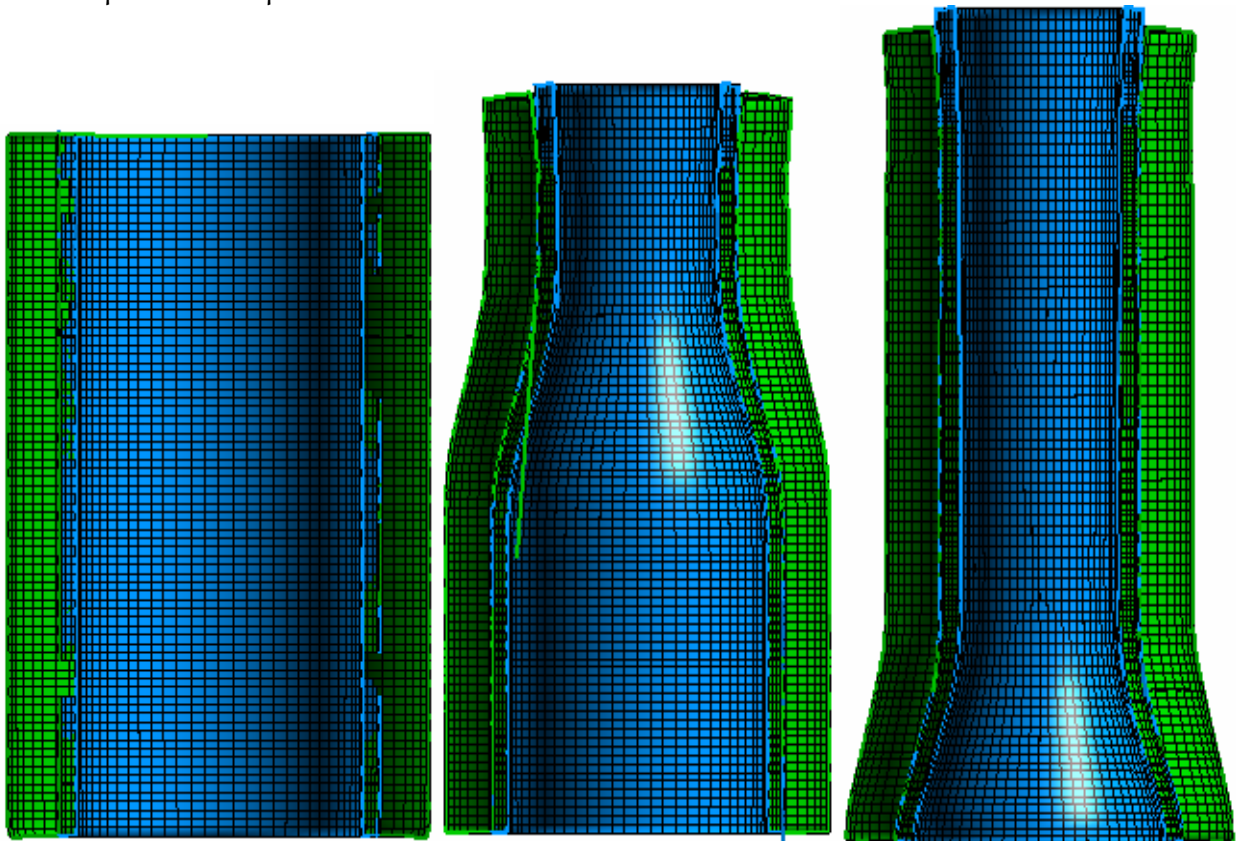
Από την εικόνα 4.8.4, όπου παρουσιάζεται στραμμένο κατά 180° το πλέγμα του εξωτερικού σωλήνα σε 3 χρονικές στιγμές, είναι φανερό ότι υπάρχει έντονη παραμόρφωση (συμπίεση) των πεπερασμένων στοιχείων στις περιοχές που έχουν ήδη υποστεί την κατεργασία διέλασης (β, γ) καθώς και στην υπό διέλαση περιοχή (β). Επίσης, παρατηρείται ότι τα πεπερασμένα στοιχεία που βρίσκονται στο κάτω μέρος του δοκιμίου παρουσιάζουν τάση ροής προς τα κάτω (γ). Τέλος, συμπίεση του πλέγματος παρατηρείται επίσης στο πέρας της κατεργασίας στην περιοχή που βρίσκεται στο μέτωπο του εμβόλου.



Εικόνα 4.8.5: Πλέγμα εσωτερικού σωλήνα (α) $t=0.00msec$ (β) $t=20.00msec$ (γ) $t=38.99msec$

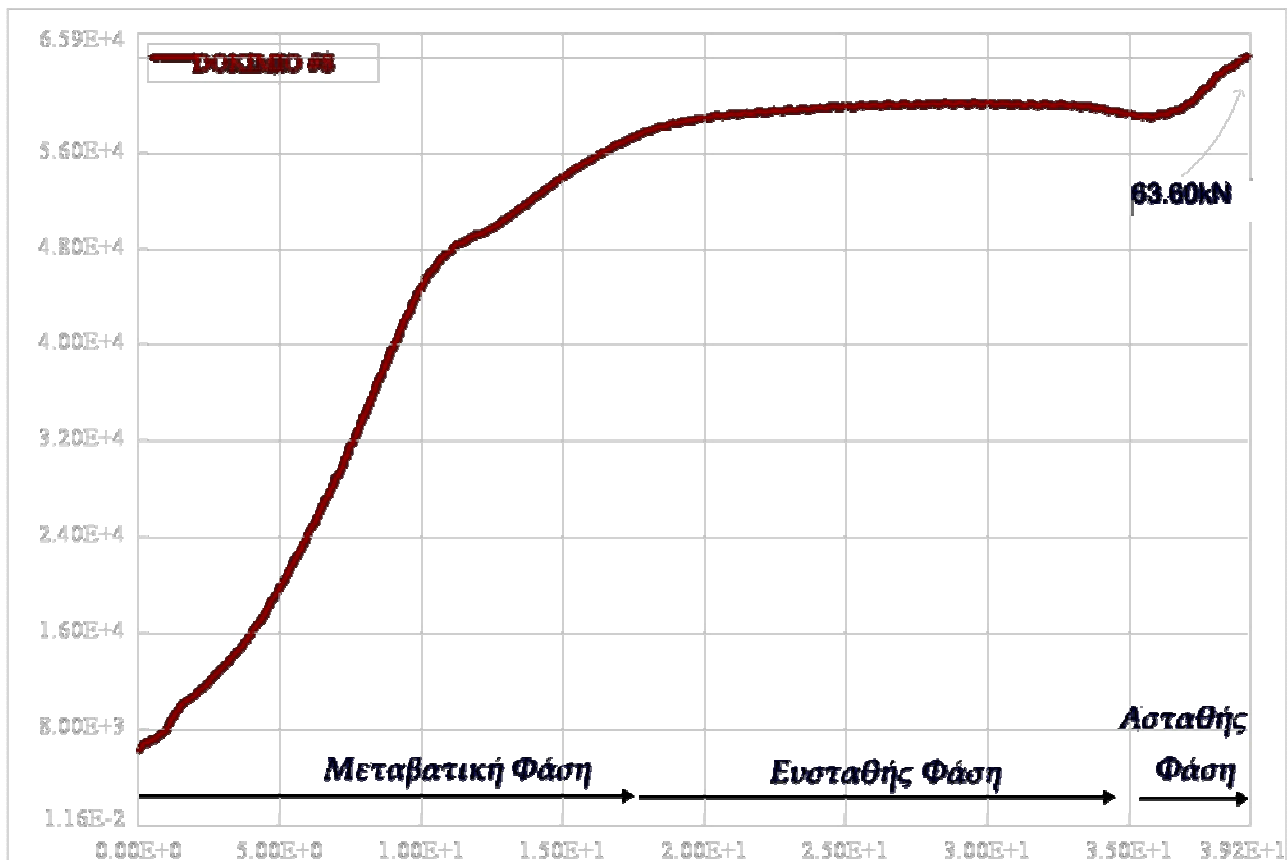
Ομοίως, από την εικόνα 4.8.5, όπου παρουσιάζεται στραμμένο κατά 180° το πλέγμα του εσωτερικού σωλήνα σε 3 χρονικές στιγμές, είναι φανερό ότι υπάρχει έντονη παραμόρφωση (συμπίεση) των πεπερασμένων στοιχείων στις περιοχές που έχουν ήδη υποστεί στην κατεργασία διέλασης (β,γ) καθώς και στην υπό διέλαση περιοχή (β). Τέλος, συμπίεση του πλέγματος παρατηρείται επίσης στο πέρας της κατεργασίας στην περιοχή που βρίσκεται στο μέτωπο του εμβόλου.

Η συνολική παραμόρφωση του πλέγματος στο πέρας της κατεργασίας και για τους 2 σωλήνες δίνεται στην ακόλουθη εικόνα.



Εικόνα 4.8.6: Παραμόρφωση πλέγματος διμεταλλικού σωλήνα
(α) $t=0.00msec$ (β) $t=20.00msec$ (γ) $t=38.99msec$

Διάγραμμα Φορτίου – Μετατόπισης



Διάγραμμα 4.8.4: Καμπύλη Φορτίου-Μετατόπισης για το Δοκίμο #8

Στο διάγραμμα που προέκυψε από την επίλυση του μοντέλου διακρίνονται οι 3 φάσεις της κατεργασίας (Μεταβατική Φάση, Φάση Ευστάθειας, Ασταθής Φάση). Η μορφή της καμπύλης προσεγγίζει κατά πολύ την αντίστοιχη καμπύλη που προέκυψε από την πειραματική διαδικασία, βλ. διάγραμμα 2.8. (Εξαιτίας διαφορετικής κλίμακας που χρησιμοποιείται στα δύο διαγράμματα, φαινομενικά εντοπίζονται μικροδιαφορές στην εμφάνιση της καμπύλης, ωστόσο με μια προσεκτικότερη εξέταση γίνεται φανερό ότι οι τιμές βρίσκονται σε αξιοσημείωτη αντιστοιχία).

Επίσης σημειώνεται το μέγιστο φορτίο διέλασης, δηλαδή 63.60kN , τιμή που προσεγγίζει κατά πολύ την αντίστοιχη πειραματική τιμή, δηλαδή τα 63.80kN , με απόκλιση μόλις 0.3% .

Συνεπώς, από άποψη ακρίβειας υπολογισμού του φορτίου, η μέθοδος κρίνεται ιδιαίτερα αξιόπιστη και η μοντελοποίηση ως ιδανική.

Τασικό Πεδίο

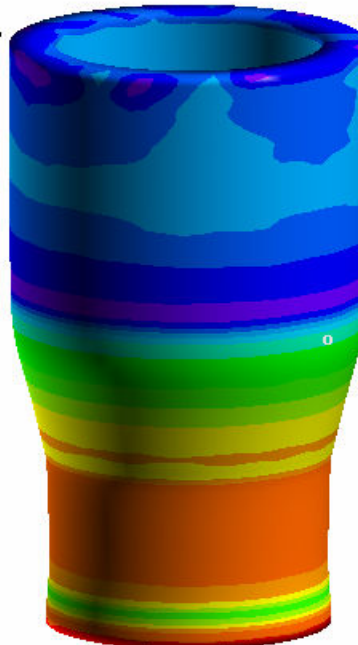
ΔΟΚΙΜΙΟ #8 - ΕΞΩΤ. ΣΤΡΩΜΑ
t=0.49msec



Εικόνα 4.8.7: Ισοδύναμες τάσεις κατά von Mises για τον εξωτερικό σωλήνα κατά τη χρονική στιγμή t=0.49msec

Από την αναπαράσταση αυτή παρατηρείται, όπως είναι αναμενόμενο, ότι η μέγιστη τάση εμφανίζεται στην περιοχή όπου ο σωλήνας εισέρχεται στο κωνικό τμήμα της μήτρας. Η τάση αυτή υπολογίστηκε στα 298-319MPa περίπου. Επίσης, το τμήμα του δοκιμίου που βρίσκεται σε επαφή με το μέτωπο του εμβόλου καταπονείται και αυτό από τάση, αλλά μικρότερη, περίπου 42-63MPa.

ΔΟΚΙΜΙΟ #8 - ΕΞΩΤ. ΣΤΡΩΜΑ
t=19.99msec

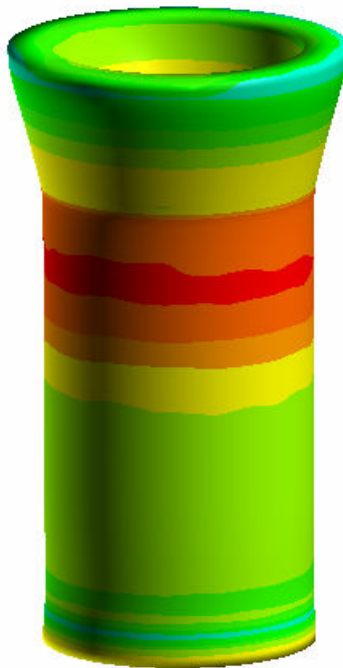
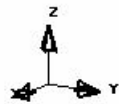


Εικόνα 4.8.8: Ισοδύναμες τάσεις κατά von Mises για τον εξωτερικό σωλήνα κατά τη χρονική στιγμή t=19.99msec

Στην εικόνα αυτή παρατηρείται ότι η μέγιστη τάση που καταπονεί τον εξωτερικό σωλήνα είναι περί τα 506-543MPa και παρουσιάζεται στην περιοχή του δοκιμίου που βρίσκεται στο κωνικό τμήμα της μήτρας και δη στην εσωτερική επιφάνεια του σωλήνα, καθώς αυτό το τμήμα

βρίσκεται υπό τάση τόσο από τα τοιχώματα της μήτρας όσο και από τον εσωτερικό σωλήνα. Επίσης, περιοχές οι οποίες έχουν ήδη υποστεί την κατεργασία της διέλασης καταπονούνται από αρκετά υψηλές τάσεις καθώς πιέζονται από τα τοιχώματα της εξόδου της μήτρας.

ΔΟΚΙΜΙΟ #8 - ΕΞΩΤ. ΣΤΡΩΜΑ
t=38.99msec



Εικόνα 4.8.9: Ισοδύναμες τάσεις κατά von Mises για τον εξωτερικό σωλήνα κατά τη χρονική στιγμή t=38.99msec

Η εικόνα 4.8.9 παρουσιάζει την τελική εντατική κατάσταση του εξωτερικού σωλήνα, στην οποία παρατηρείται αρκετά ομοιόμορφη κατανομή των τάσεων. Στην περιοχή που περισσότερο καταπονείται απαντώνται τάσεις περί τα 520-566MPa.

ΔΟΚΙΜΙΟ #8 - ΕΣΩΤ. ΣΤΡΩΜΑ
t=0.49msec



Εικόνα 4.8.10: Ισοδύναμες τάσεις κατά von Mises για τον εσωτερικό σωλήνα κατά τη χρονική στιγμή t=0.49msec

Από την αναπαράσταση αυτή παρατηρείται, όπως είναι αναμενόμενο, ότι η μέγιστη τάση εμφανίζεται στην περιοχή όπου ο σωλήνας εισέρχεται στο κωνικό τμήμα της μήτρας. Η τάση αυτή υπολογίστηκε στα 191-212MPa περίπου. Επίσης, το τμήμα του δοκιμίου που βρίσκεται σε

επαφή με το μέτωπο του εμβόλου καταπονείται και αυτό από τάση, αλλά μικρότερη, περίπου 63-85MPa.



Εικόνα 4.8.11: Ισοδύναμες τάσεις κατά von Mises για τον εσωτερικό σωλήνα κατά τη χρονική στιγμή t=38.99msec

Η εικόνα 4.8.11 παρουσιάζει την τελική εντατική κατάσταση του εσωτερικού σωλήνα, στην οποία παρατηρείται αρκετά ομοιόμορφη κατανομή των τάσεων. Στην περιοχή που περισσότερο καταπονείται απαντώνται τάσεις περί τα 377-415MPa.

■ Η κατεργασία του δοκιμίου και η μορφή του πλέγματος καθ'όλη την διάρκεια της διαδικασίας έχει καταγραφεί σε video με τη βοήθεια του post-processor. Το video αυτό, καθώς και άλλα αρχεία που αφορούν στην μοντελοποίηση, στην επίλυση και στην εξαγωγή αποτελεσμάτων βρίσκονται στο dvd που συνοδεύει την εργασία στον αντίστοιχο φάκελο για το συγκεκριμένο δοκίμιο.

4.9 Αποτελέσματα Προσομοίωσης - Δοκίμιο #9

Το διμεταλλικό δοκίμιο #9 είναι κατασκευασμένο από καθαρό χαλκό (εξωτερικό στρώμα) και κράμα αλουμινίου Al 6063 F25 (εσωτερικό στρώμα). Ο λόγος διαρροής των 2 υλικών είναι:

$$\lambda = \frac{\text{Sigy}(Cu)}{\text{Sigy}(Al - 6063 - F25)} = \frac{266}{192.2} = 1.384 < 3.5$$

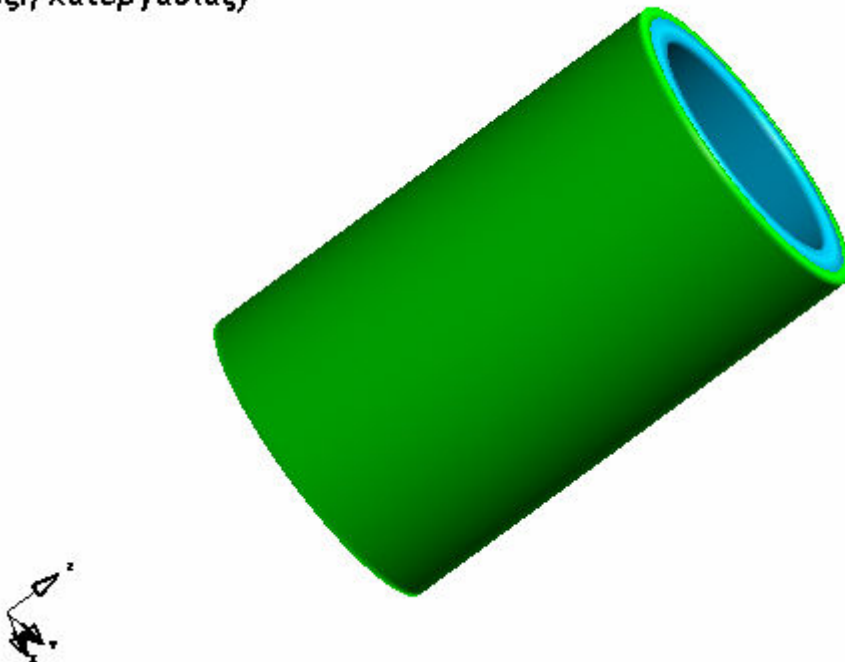
Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [17], ο παραπάνω λόγος των ορίων διαρροής εξασφαλίζει ομαλή διεξαγωγή της κατεργασίας και όχι ιδιαίτερα αυξημένες τιμές τάσεων.

- Αρχικό μήκος εσωτερικού και εξωτερικού στρώματος: 40.00mm
- Αρχικό πάχος εσωτερικού σωλήνα: 2.00mm
- Αρχικό πάχος εξωτερικού σωλήνα: 1.00mm

Μετά την επίλυση του μοντέλου του δοκιμίου #9 από τον solver του LS-DYNA, προκύπτουν τα ακόλουθα αποτελέσματα μέσω των ETA Post-Processor και ETA Graph-Processor.

Φάσεις της Κατεργασίας

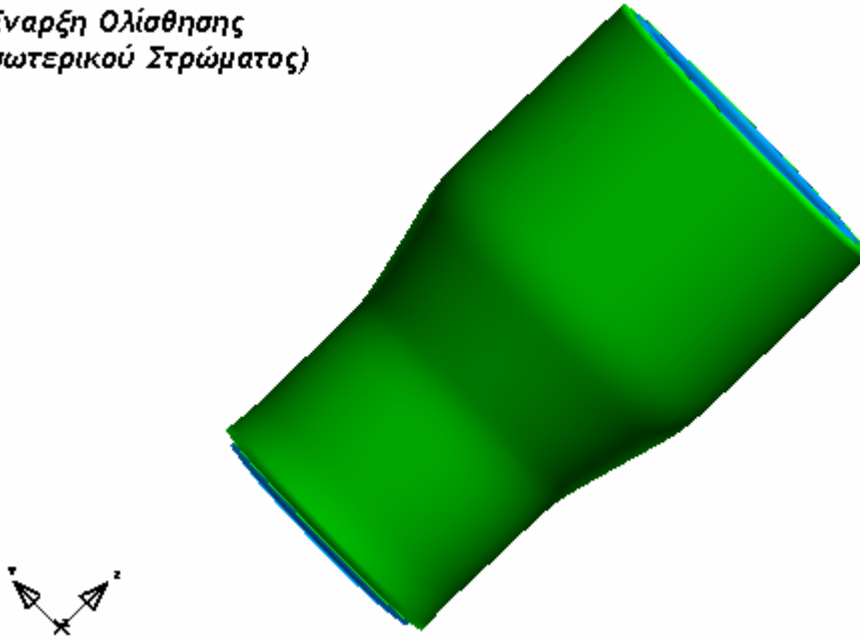
ΔΟΚΙΜΙΟ #9 t=0.00msec
(έναρξη κατεργασίας)



Εικόνα 4.9.1: Αναπαράσταση δοκιμίου #9 κατά την έναρξη της κατεργασίας διέλασης

Τη χρονική στιγμή t=21.99msec αρχίζει η ροή του εσωτερικού στρώματος προς το κάτω μέρος του δοκιμίου.

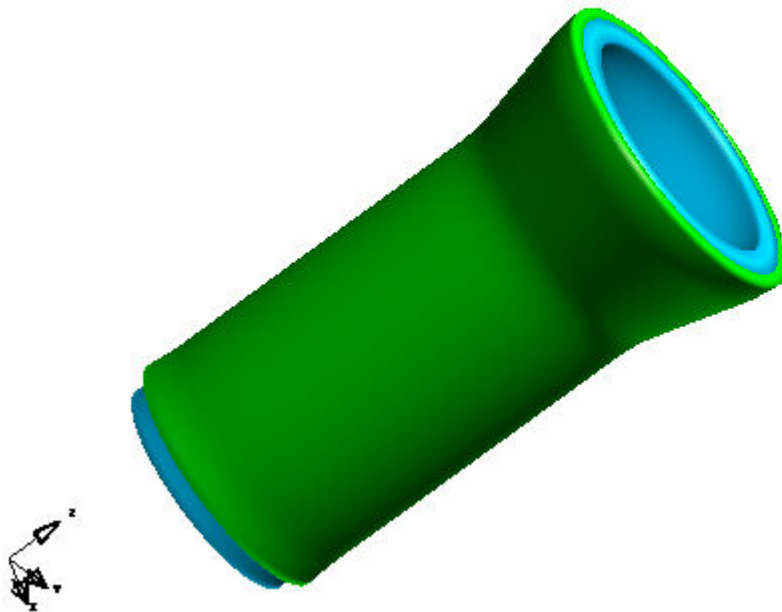
ΔΟΚΙΜΙΟ #9 $t=21.99\text{msec}$
(Εναρξη Ολίσθησης
Εσωτερικού Στρώματος)



Εικόνα 4.9.2: Αναπαράσταση δοκιμίου #9 κατά την χρονική στιγμή $t=21.99\text{msec}$

Η επίλυση συνεχίστηκε απρόσκοπτα μέχρι την χρονική στιγμή $t=38.49\text{msec}$, οπότε και έληξε η κατεργασία. Η τελική εικόνα του δοκιμίου ήταν η εξής:

ΔΟΚΙΜΙΟ #9 $t=38.49\text{msec}$
(τέλος κατεργασίας)



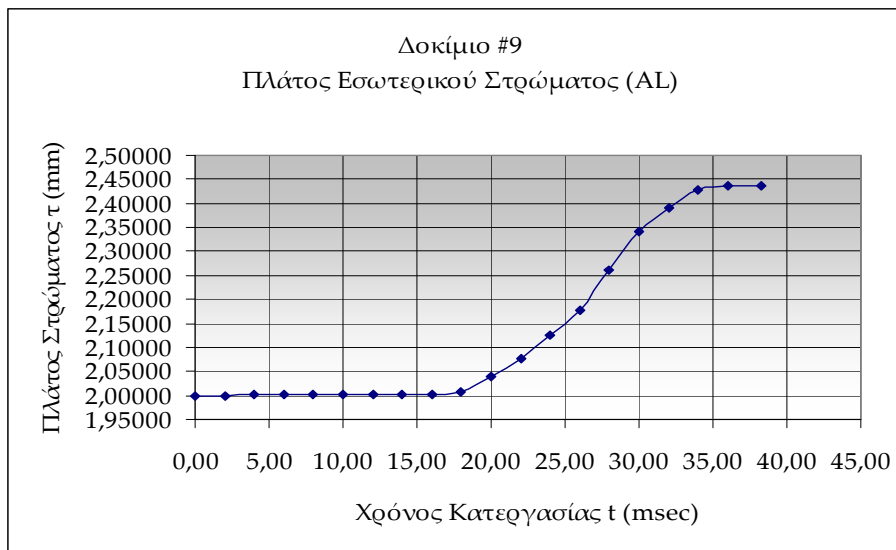
Εικόνα 4.9.3: Αναπαράσταση δοκιμίου #9 κατά τη λήξη της κατεργασίας διέλασης

Η τελική εικόνα του δοκιμίου είναι παρόμοια με την αντίστοιχη πειραματική, βλ. εικόνα 2.27 στο Κεφάλαιο 2.

Παραμόρφωση Πλέγματος

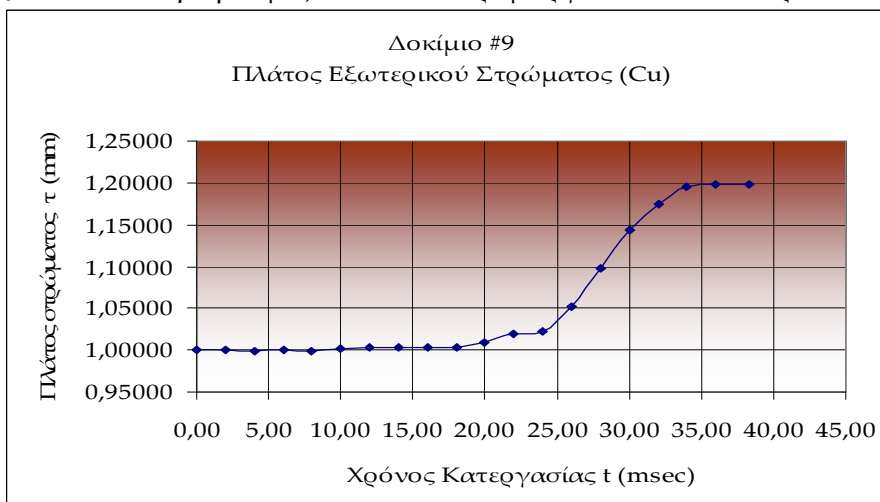
- Τελικό μήκος εσωτερικού στρώματος: 44.97mm (Αύξηση μήκους κατά 11.76%)
- Τελικό μήκος εξωτερικού στρώματος: 42.97mm (Αύξηση μήκους κατά 7.15%)
- Τελικό πάχος εσωτερικού σωλήνα: 2.44mm (Αύξηση πάχους κατά 21.8%)
- Τελικό πάχος εξωτερικού σωλήνα: 1.20mm (Αύξηση πάχους κατά 19.77%)
- Τελικό πάχος διμεταλλικού σωλήνα: 3.63mm (Αύξηση πάχους κατά 21.12%)

Όπως παρατηρείται, αναφορικά με το μήκος των σωλήνων, για το οποίο υπάρχουν μετρήσεις από τις πειραματικές δοκιμές, η επιμήκυνση που προκύπτει από την αριθμητική προσομοίωση για το αλουμίνιο προσεγγίζει αξιοσημείωτα την αντίστοιχη πειραματική τιμή (11.76% έναντι 11.30%), ενώ για τον χαλκό προκύπτει αισθητά μεγαλύτερη (7.15% έναντι 1.0%). Η μέτρηση έγινε σε κόμβους που βρίσκονται στο μέσο του πάχους του πλέγματος (#49331 & #32808, βλέπε εισαγωγή).



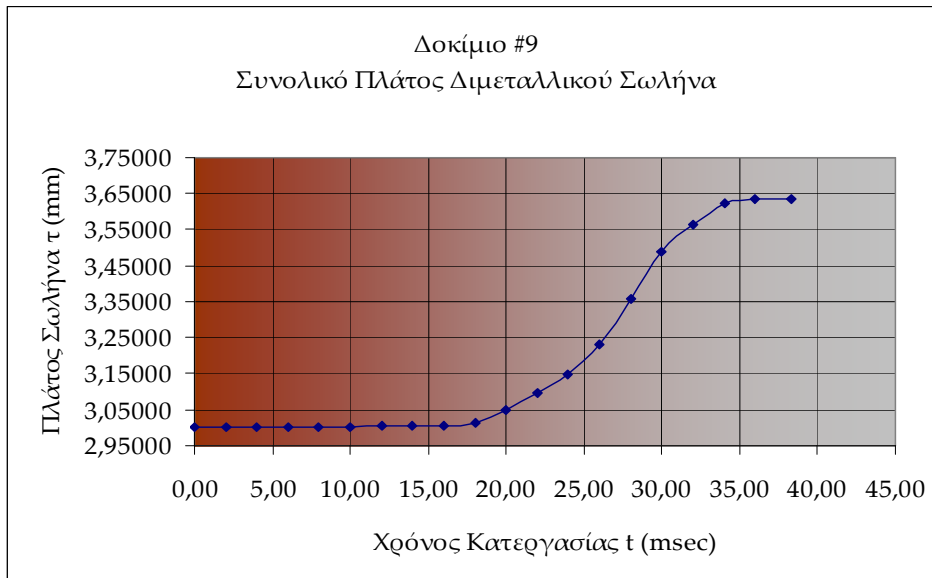
Διάγραμμα 4.9.1: Μεταβολή του πάχους του εσωτερικού σωλήνα του δοκιμίου #9

Στο διάγραμμα 4.9.1 παρατηρείται βαθμιαία αύξηση του πάχους του εσωτερικού σωλήνα από την χρονική στιγμή $t=16.00\text{msec}$ έως την χρονική στιγμή $t=34.00\text{msec}$ και κατόπιν σταθεροποίηση του περί την τελική τιμή ως το πέρας της κατεργασίας. Η αύξηση του πάχους του εσωτερικού σωλήνα είναι εξαιρετικά μεγάλη (21.8%). Κάτι τέτοιο δικαιολογείται εν μέρει από το γεγονός ότι στην εσωτερική επιφάνεια του σωλήνα δεν υπάρχει υλικό το οποίο να περιορίζει την αύξηση του πάχους (π.χ. mandrel, δηλ. βύσμα) και έτσι παραμορφώνεται ελεύθερα.



Διάγραμμα 4.9.2: Μεταβολή του πάχους του εξωτερικού σωλήνα του δοκιμίου #9

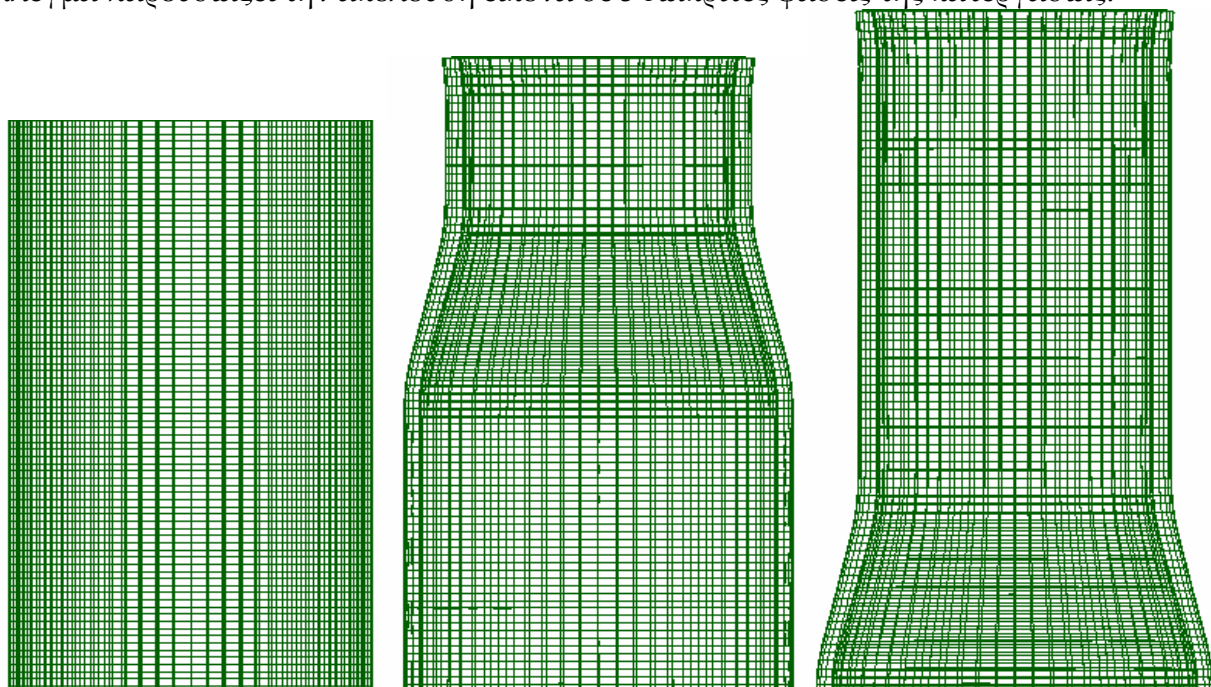
Στο διάγραμμα 4.9.2 παρατηρείται βαθμιαία αύξηση του πάχους του εσωτερικού σωλήνα από την χρονική στιγμή $t=20.00\text{msec}$ έως την χρονική στιγμή $t=34.00\text{msec}$ και κατόπιν σταθεροποίηση του περί την τελική τιμή ως το πέρας της κατεργασίας. Η σταθερότητα αυτή οφείλεται στην επαφή του εξωτερικού στρώματος με τα τοιχώματα της μήτρας από την μια μεριά και την επαφή με το εσωτερικό στρώμα από την άλλη.



Διάγραμμα 4.9.3: Μεταβολή του συνολικού πάχους του διμεταλλικού δοκιμίου #9

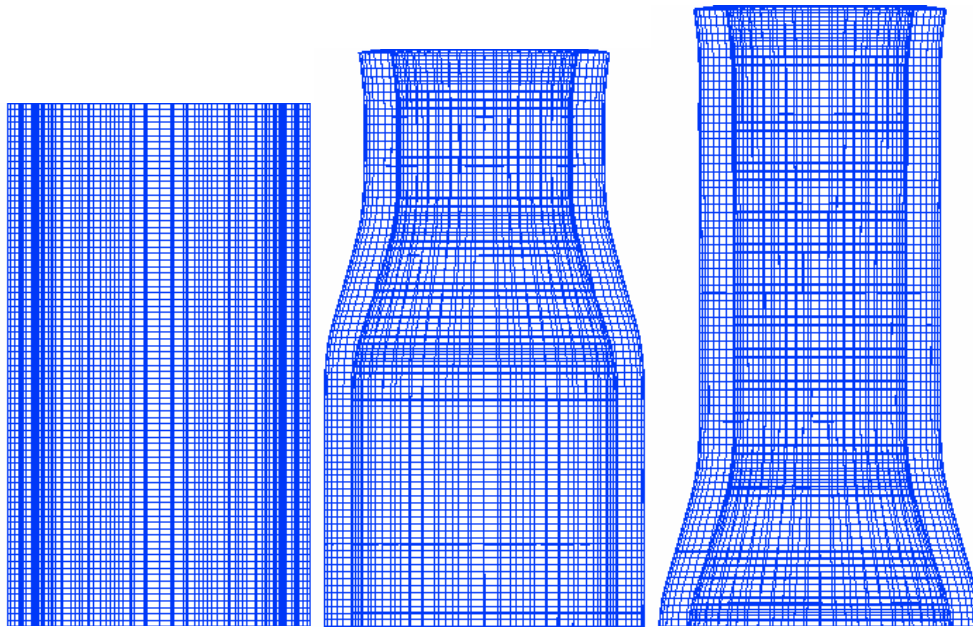
Στο διάγραμμα 4.9.3 παρατηρείται βαθμιαία αύξηση του πάχους του εσωτερικού σωλήνα από την χρονική στιγμή $t=18.00\text{msec}$ έως την χρονική στιγμή $t=34.00\text{msec}$ και κατόπιν σταθεροποίηση του περί την τελική τιμή ως το πέρας της κατεργασίας.

Το πλέγμα παρουσιάζει την ακόλουθη εικόνα σε 3 διακριτές φάσεις της κατεργασίας:



Εικόνα 4.9.4: Πλέγμα εξωτερικού σωλήνα (α) $t=0.00\text{msec}$ (β) $t=20.00\text{msec}$ (γ) $t=38.49\text{msec}$

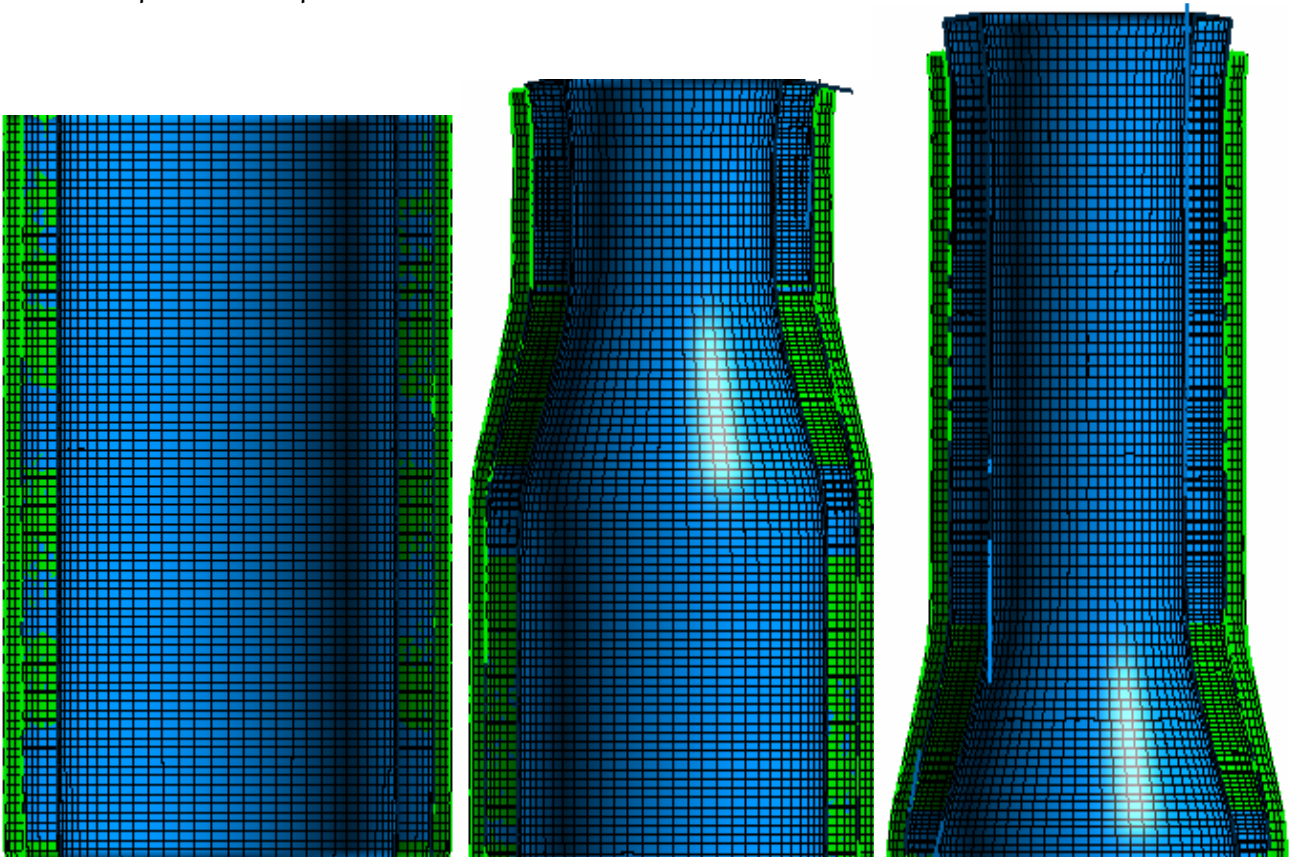
Από την εικόνα 4.9.4, όπου παρουσιάζεται στραμμένο κατά 180° το πλέγμα του εξωτερικού σωλήνα σε 3 χρονικές στιγμές, είναι φανερό ότι υπάρχει έντονη παραμόρφωση (συμπίεση) των πεπερασμένων στοιχείων στις περιοχές που έχουν ήδη υποστεί την κατεργασία διέλασης (β, γ) καθώς και στην υπό διέλαση περιοχή (β). Τέλος, συμπίεση του πλέγματος παρατηρείται επίσης στο πέρας της κατεργασίας στην περιοχή που βρίσκεται στο μέτωπο του εμβόλου.



Εικόνα 4.9.5: Πλέγμα εσωτερικού σωλήνα (α) $t=0.00msec$ (β) $t=20.00msec$ (γ) $t=38.49msec$

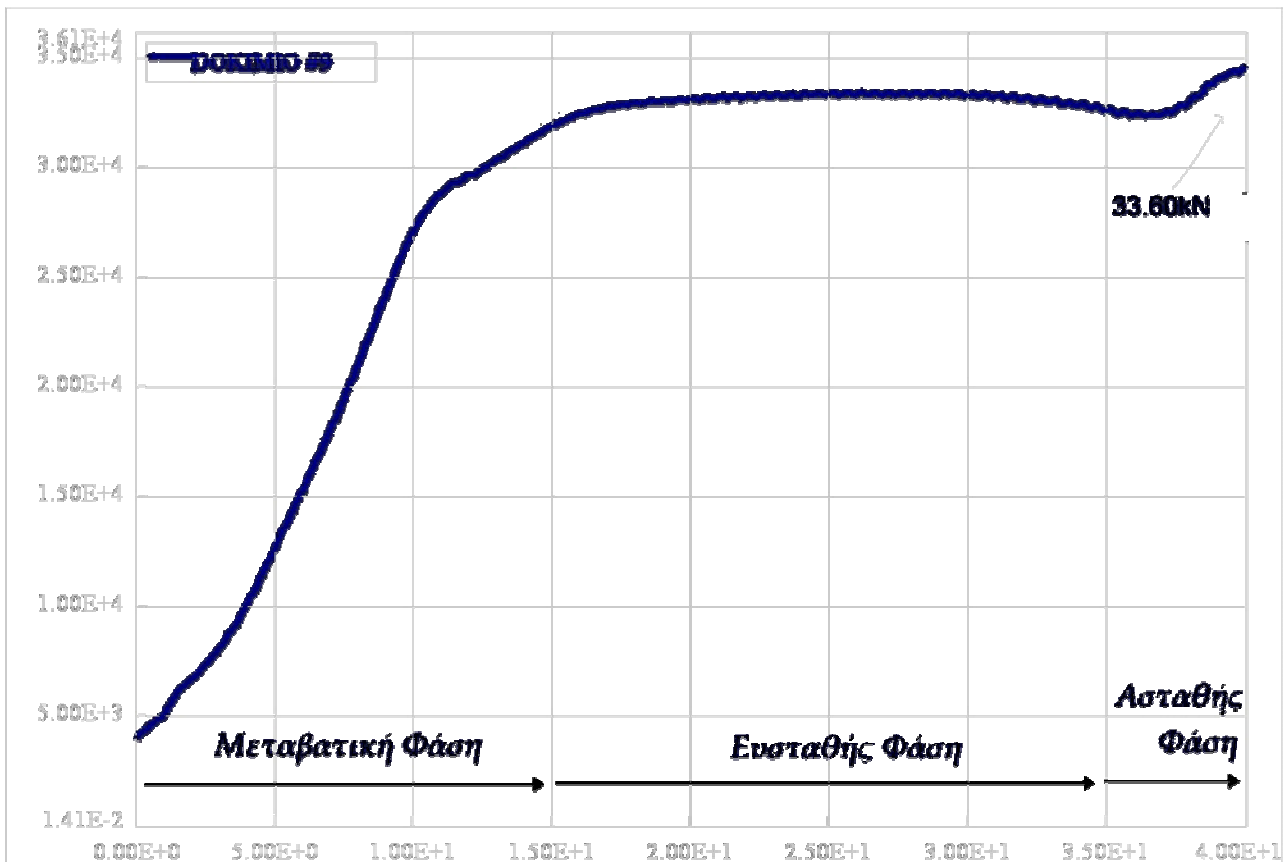
Ομοίως, από την εικόνα 4.9.5, όπου παρουσιάζεται στραμμένο κατά 180° το πλέγμα του εσωτερικού σωλήνα σε 3 χρονικές στιγμές, είναι φανερό ότι υπάρχει έντονη παραμόρφωση (συμπίεση) των πεπερασμένων στοιχείων στις περιοχές που έχουν ήδη υποστεί στην κατεργασία διέλασης (β,γ) καθώς και στην υπό διέλαση περιοχή (β). Τέλος, συμπίεση του πλέγματος παρατηρείται επίσης στο πέρας της κατεργασίας στην περιοχή που βρίσκεται στο μέτωπο του εμβόλου.

Η συνολική παραμόρφωση του πλέγματος στο πέρας της κατεργασίας και για τους 2 σωλήνες δίνεται στην ακόλουθη εικόνα.



Εικόνα 4.9.6: Παραμόρφωση πλέγματος διμεταλλικού σωλήνα (α) $t=0.00msec$ (β) $t=20.00msec$ (γ) $t=38.49msec$

Διάγραμμα Φορτίου – Μετατόπισης



Διάγραμμα 4.9.4: Καμπύλη Φορτίου-Μετατόπισης για το Δοκίμιο #9

Στο διάγραμμα που προέκυψε από την επίλυση του μοντέλου διακρίνονται οι 3 φάσεις της κατεργασίας (Μεταβατική Φάση, Φάση Ευστάθειας, Ασταθής Φάση). Η μορφή της καμπύλης προσεγγίζει κατά πολύ την αντίστοιχη καμπύλη που προέκυψε από την πειραματική διαδικασία, βλ. διάγραμμα 2.9. (Εξαιτίας διαφορετικής κλίμακας που χρησιμοποιείται στα δύο διαγράμματα, φαινομενικά εντοπίζονται μικροδιαφορές στην εμφάνιση της καμπύλης, ωστόσο με μια προσεκτικότερη εξέταση γίνεται φανερό ότι οι τιμές βρίσκονται σε αξιοσημείωτη αντιστοιχία).

Επίσης σημειώνεται το μέγιστο φορτίο διέλασης, δηλαδή $33.80kN$, τιμή που προσεγγίζει την αντίστοιχη πειραματική τιμή, δηλαδή τα $41.26kN$, με απόκλιση 22.07% . Ωστόσο η τιμή του μέγιστου φορτίου $41.26kN$ που προέκυψε στην πειραματική διαδικασία, σημειώθηκε στην φάση αστάθειας, λίγο πριν την ανάπτυξη ελαττώματος, συνεπώς δεν μπορεί να ειπωθεί ότι είναι η τιμή αυτή είναι που πρέπει να συγκριθεί με τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης. Αν όμως λάβουμε υπόψη ότι πριν αυτό το "peak" του φορτίου στην πειραματική διαδικασία η τιμή του ήταν περί τα $34 kN$, τότε η μοντελοποίηση από άποψη φορτίου κρίνεται ως ιδιαίτερα ικανοποιητική.

Τασικό Πεδίο

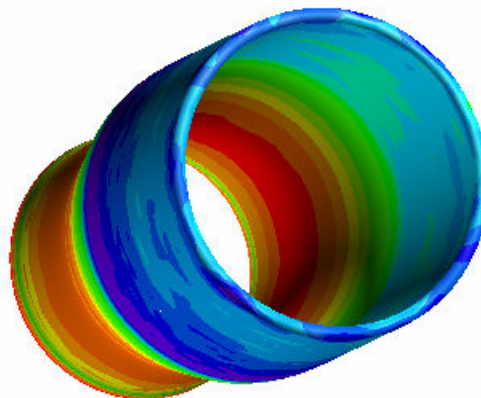
ΔΟΚΙΜΙΟ #9 - ΕΞΩΤ. ΣΤΡΩΜΑ
 $t=0.49msec$



Εικόνα 4.9.7: Ισοδύναμες τάσεις κατά von Mises για τον εξωτερικό σωλήνα κατά τη χρονική στιγμή $t=0.49msec$

Από την αναπαράσταση αυτή παρατηρείται, όπως είναι αναμενόμενο, ότι η μέγιστη τάση εμφανίζεται στην περιοχή όπου ο σωλήνας εισέρχεται στο κωνικό τμήμα της μήτρας. Η τάση αυτή υπολογίστηκε στα 321-344MPa περίπου. Επίσης, το τμήμα του δοκιμίου που βρίσκεται σε επαφή με το μέτωπο του εμβόλου καταπονείται και αυτό από τάση, αλλά πολύ μικρή, περίπου 22MPa.

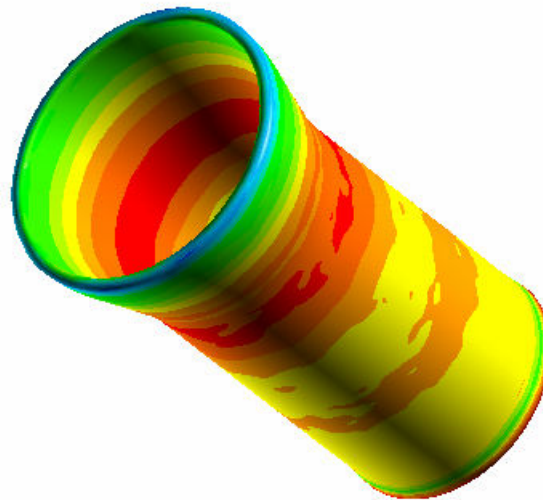
ΔΟΚΙΜΙΟ #9 - ΕΞΩΤ. ΣΤΡΩΜΑ
 $t=19.99msec$



Εικόνα 4.9.8: Ισοδύναμες τάσεις κατά von Mises για τον εξωτερικό σωλήνα κατά τη χρονική στιγμή $t=19.99msec$

Στην εικόνα αυτή παρατηρείται ότι η μέγιστη τάση που καταπονεί τον εξωτερικό σωλήνα είναι περί τα 442-474MPa και παρουσιάζεται στην περιοχή του δοκιμίου που βρίσκεται στο κωνικό τμήμα της μήτρας και δη στην εσωτερική επιφάνεια του σωλήνα, καθώς αυτό το τμήμα βρίσκεται υπό τάση τόσο από τα τοιχώματα της μήτρας όσο και από τον εσωτερικό σωλήνα. Επίσης, περιοχές οι οποίες έχουν ήδη υποστεί την κατεργασία της διέλασης καταπονούνται από αρκετά υψηλές τάσεις καθώς πιέζονται από τα τοιχώματα της εξόδου της μήτρας.

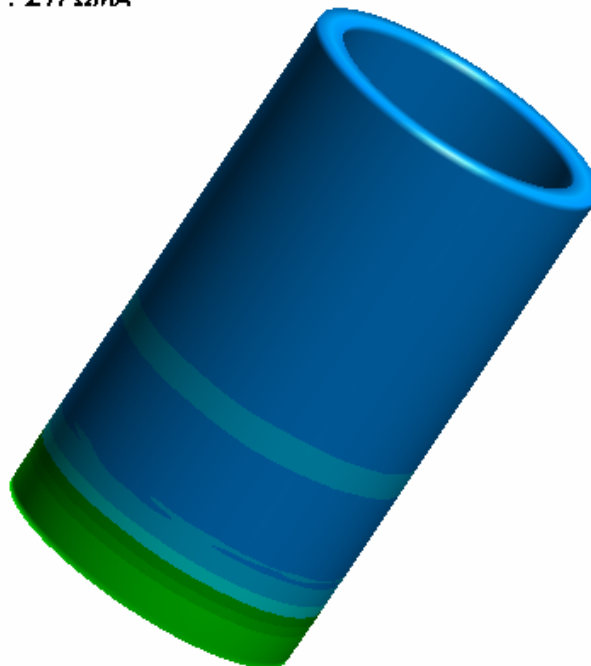
ΔΟΚΙΜΙΟ #9 - ΕΞΩΤ. ΣΤΡΩΜΑ
t=38.49msec



Εικόνα 4.9.9: Ισοδύναμες τάσεις κατά von Mises για τον εξωτερικό σωλήνα κατά τη χρονική στιγμή t=38.49msec

Η εικόνα 4.9.9 παρουσιάζει την τελική εντατική κατάσταση του εξωτερικού σωλήνα, στην οποία παρατηρείται αρκετά ομοιόμορφη κατανομή των τάσεων. Στην περιοχή που περισσότερο καταπονείται απαντώνται τάσεις περί τα 455-488MPa.

ΔΟΚΙΜΙΟ #9 - ΕΣΩΤ. ΣΤΡΩΜΑ
t=0.49msec



Εικόνα 4.9.10: Ισοδύναμες τάσεις κατά von Mises για τον εσωτερικό σωλήνα κατά τη χρονική στιγμή t=0.49msec

Από την αναπαράσταση αυτή παρατηρείται, όπως είναι αναμενόμενο, ότι η μέγιστη τάση εμφανίζεται στην περιοχή όπου ο σωλήνας εισέρχεται στο κωνικό τμήμα της μήτρας. Η τάση αυτή υπολογίστηκε στα 137-172MPa περίπου. Επίσης, το τμήμα του δοκιμίου που βρίσκεται σε επαφή με το μέτωπο του εμβόλου καταπονείται και αυτό από τάση, αλλά πολύ μικρή, περίπου 34MPa.



Εικόνα 4.9.11: Ισοδύναμες τάσεις κατά von Mises για τον εσωτερικό σωλήνα κατά τη χρονική στιγμή $t=38.49\text{msec}$

Η εικόνα 4.9.11 παρουσιάζει την τελική εντατική κατάσταση του εσωτερικού σωλήνα, στην οποία παρατηρείται αρκετά ομοιόμορφη κατανομή των τάσεων. Στην περιοχή που περισσότερο καταπονείται απαντώνται τάσεις περί τα 244-292MPa.

■ Η κατεργασία του δοκιμίου και η μορφή του πλέγματος καθ'όλη την διάρκεια της διαδικασίας έχει καταγραφεί σε video με τη βοήθεια του post-processor. Το video αυτό, καθώς και άλλα αρχεία που αφορούν στην μοντελοποίηση, στην επίλυση και στην εξαγωγή αποτελεσμάτων βρίσκονται στο dvd που συνοδεύει την εργασία στον αντίστοιχο φάκελο για το συγκεκριμένο δοκίμιο.

4.10 Αποτελέσματα Προσομοίωσης - Δοκίμιο #10

Το διμεταλλικό δοκίμιο #10 είναι κατασκευασμένο από καθαρό χαλκό (εξωτερικό στρώμα) και κράμα αλουμινίου Al 6063 F25 (εσωτερικό στρώμα). Ο λόγος διαρροής των 2 υλικών είναι:

$$\lambda = \frac{\text{Sigy}(Cu)}{\text{Sigy}(Al - 6063 - F25)} = \frac{266}{192.2} = 1.384 < 3.5$$

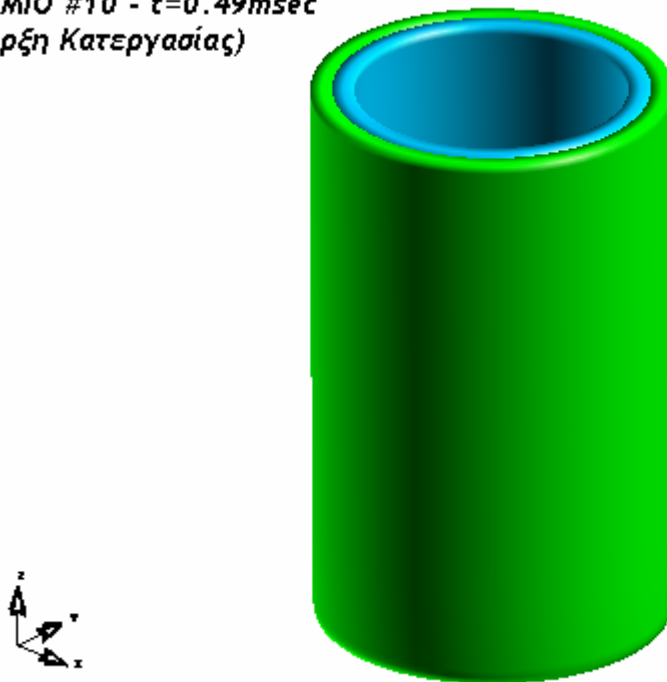
Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [17], ο παραπάνω λόγος των ορίων διαρροής εξασφαλίζει ομαλή διεξαγωγή της κατεργασίας και όχι ιδιαίτερα αυξημένες τιμές τάσεων.

- Αρχικό μήκος εσωτερικού και εξωτερικού στρώματος: 40.00mm
- Αρχικό πάχος εσωτερικού σωλήνα: 1.50mm
- Αρχικό πάχος εξωτερικού σωλήνα: 1.50mm

Μετά την επίλυση του μοντέλου του δοκιμίου #10 από τον solver του LS-DYNA, προκύπτουν τα ακόλουθα αποτελέσματα μέσω των ETA Post-Processor και ETA Graph-Processor.

Φάσεις της Κατεργασίας

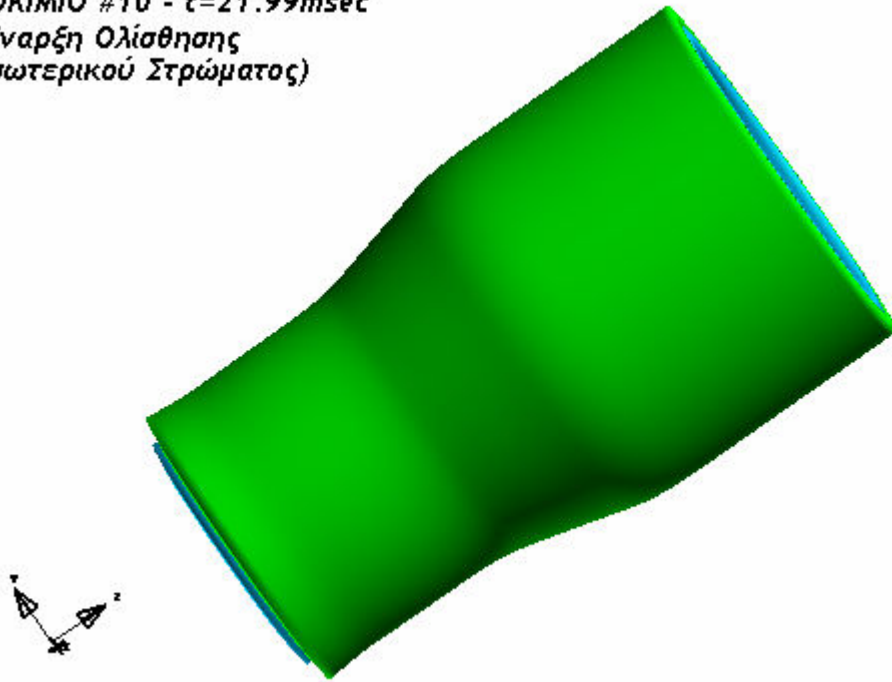
ΔΟΚΙΜΙΟ #10 - t=0.49msec
(Έναρξη Κατεργασίας)



Εικόνα 4.10.1: Αναπαράσταση δοκιμίου #10 κατά την έναρξη της κατεργασίας διέλασης

Τη χρονική στιγμή t=21.99msec αρχίζει η ροή του εσωτερικού στρώματος προς το κάτω μέρος του δοκιμίου.

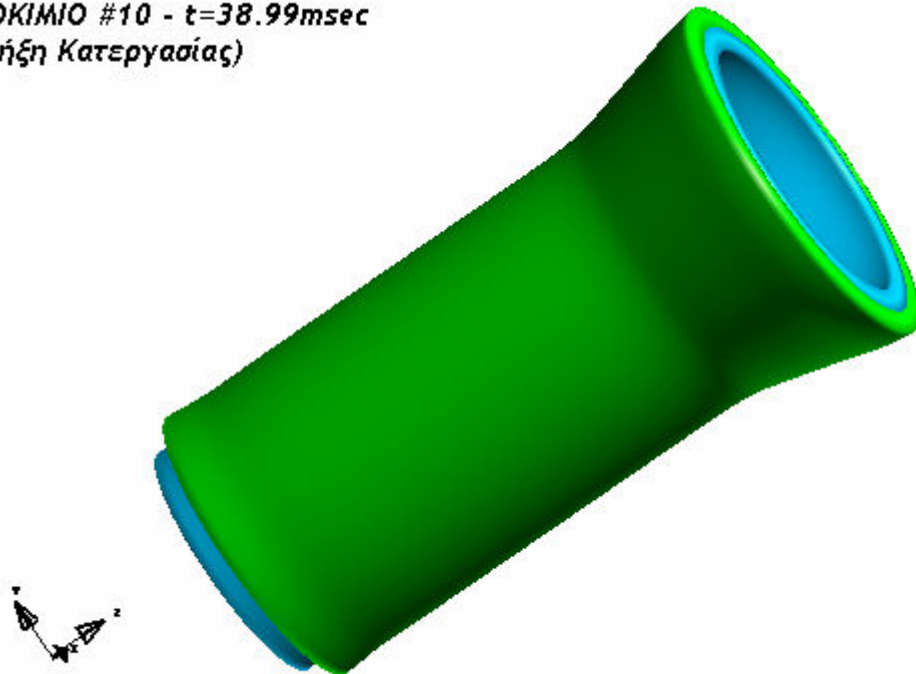
ΔΟΚΙΜΙΟ #10 - $t=21.99\text{msec}$
(Εναρξη Ολίσθησης
Εσωτερικού Στρώματος)



Εικόνα 4.10.2: Αναπαράσταση δοκιμίου #10 κατά την χρονική στιγμή $t=21.99\text{msec}$

Η επίλυση συνεχίστηκε απρόσκοπτα μέχρι την χρονική στιγμή $t=38.99\text{msec}$, οπότε και έληξε η κατεργασία. Η τελική εικόνα του δοκιμίου ήταν η εξής:

ΔΟΚΙΜΙΟ #10 - $t=38.99\text{msec}$
(Λήξη Κατεργασίας)



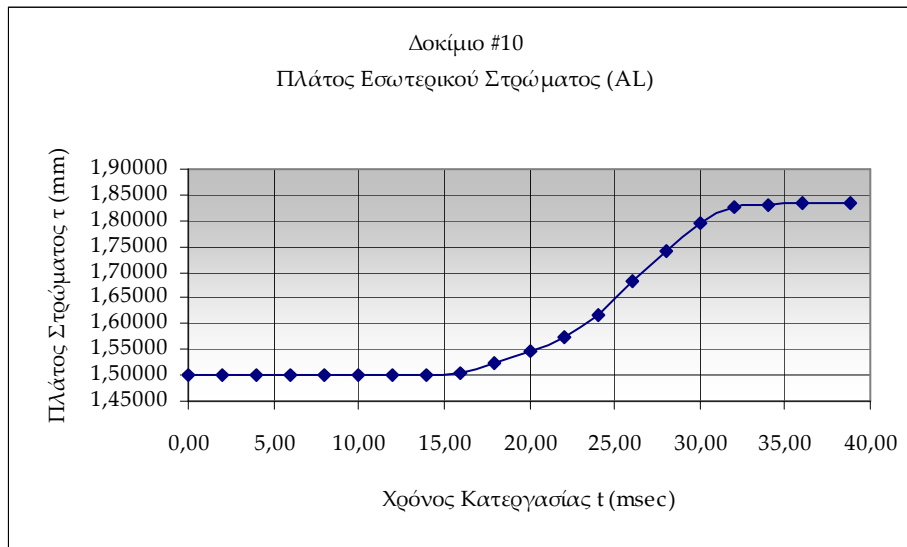
Εικόνα 4.10.3: Αναπαράσταση δοκιμίου #10 κατά τη λήξη της κατεργασίας διέλασης

Η τελική εικόνα του δοκιμίου είναι παρόμοια με την αντίστοιχη πειραματική, βλ. εικόνα 2.29 στο Κεφάλαιο 2.

Παραμόρφωση Πλέγματος

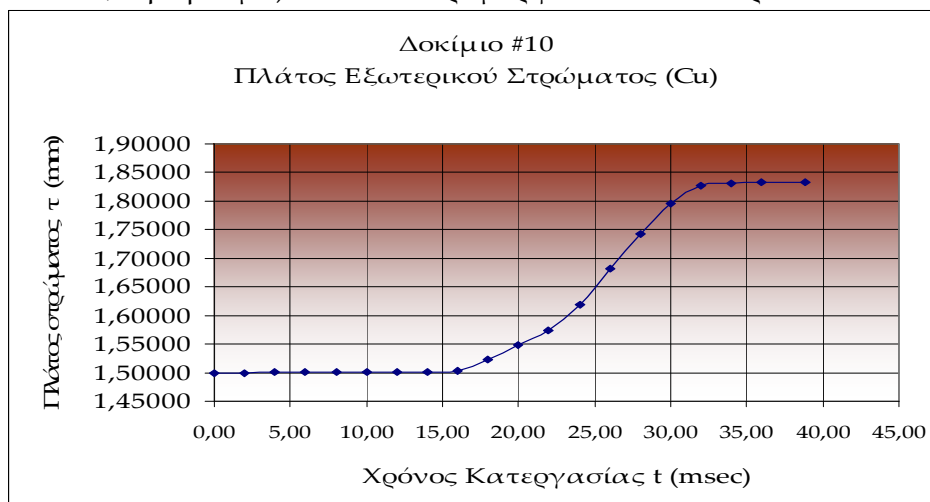
- Τελικό μήκος εσωτερικού στρώματος: 45.41mm (Αύξηση μήκους κατά 13.53%)
- Τελικό μήκος εξωτερικού στρώματος: 43.57mm (Αύξηση μήκους κατά 8.93%)
- Τελικό πάχος εσωτερικού σωλήνα: 1.83mm (Αύξηση πάχους κατά 22.18%)
- Τελικό πάχος εξωτερικού σωλήνα: 1.78mm (Αύξηση πάχους κατά 18.53%)
- Τελικό πάχος διμεταλλικού σωλήνα: 3.61mm (Αύξηση πάχους κατά 20.35%)

Όπως παρατηρείται, αναφορικά με το μήκος των σωλήνων, για το οποίο υπάρχουν μετρήσεις από τις πειραματικές δοκιμές, η επιμήκυνση που προκύπτει από την αριθμητική προσομοίωση είναι σχετικά μεγαλύτερη και για τα δύο στρώματα (13.53% έναντι 10.50% για το αλουμίνιο και 8.93% έναντι 4.50% για το χαλκό). Η μέτρηση έγινε σε κόμβους που βρίσκονται στο μέσο του πάχους του πλέγματος (#49127 & #32604, βλέπε εισαγωγή).



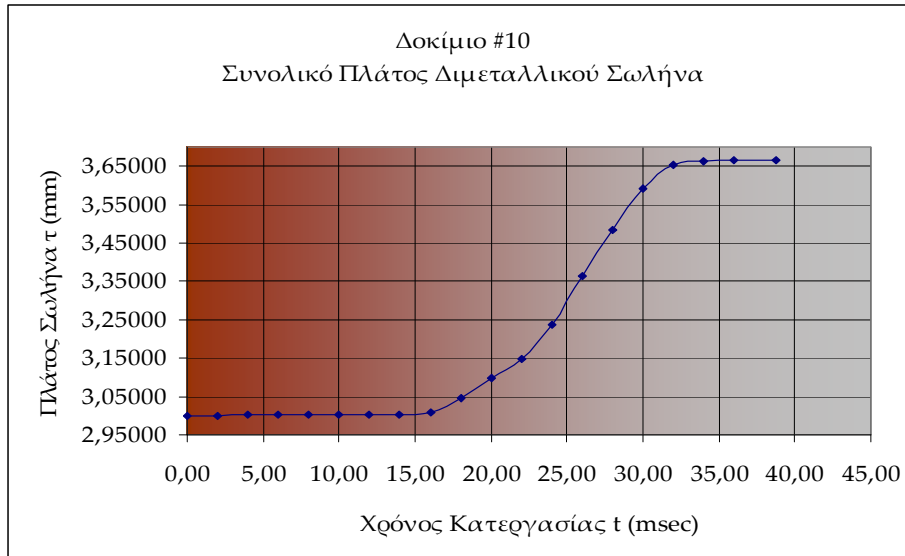
Διάγραμμα 4.10.1: Μεταβολή του πάχους του εσωτερικού σωλήνα του δοκιμίου #10

Στο διάγραμμα 4.10.1 παρατηρείται βαθμιαία αύξηση του πάχους του εσωτερικού σωλήνα από την χρονική στιγμή $t=16.00\text{msec}$ έως την χρονική στιγμή $t=32.00\text{msec}$ και κατόπιν σταθεροποίηση του περί την τελική τιμή ως το πέρας της κατεργασίας. Η αύξηση του πάχους του εσωτερικού σωλήνα είναι σχετικά μεγάλη. Κάτι τέτοιο δικαιολογείται εν μέρει από το γεγονός ότι στην εσωτερική επιφάνεια του σωλήνα δεν υπάρχει υλικό το οποίο να περιορίζει την αύξηση του πάχους (π.χ. mandrel, δηλ. βύσμα) και έτσι παραμορφώνεται ελεύθερα.



Διάγραμμα 4.10.2: Μεταβολή του πάχους του εξωτερικού σωλήνα του δοκιμίου #10

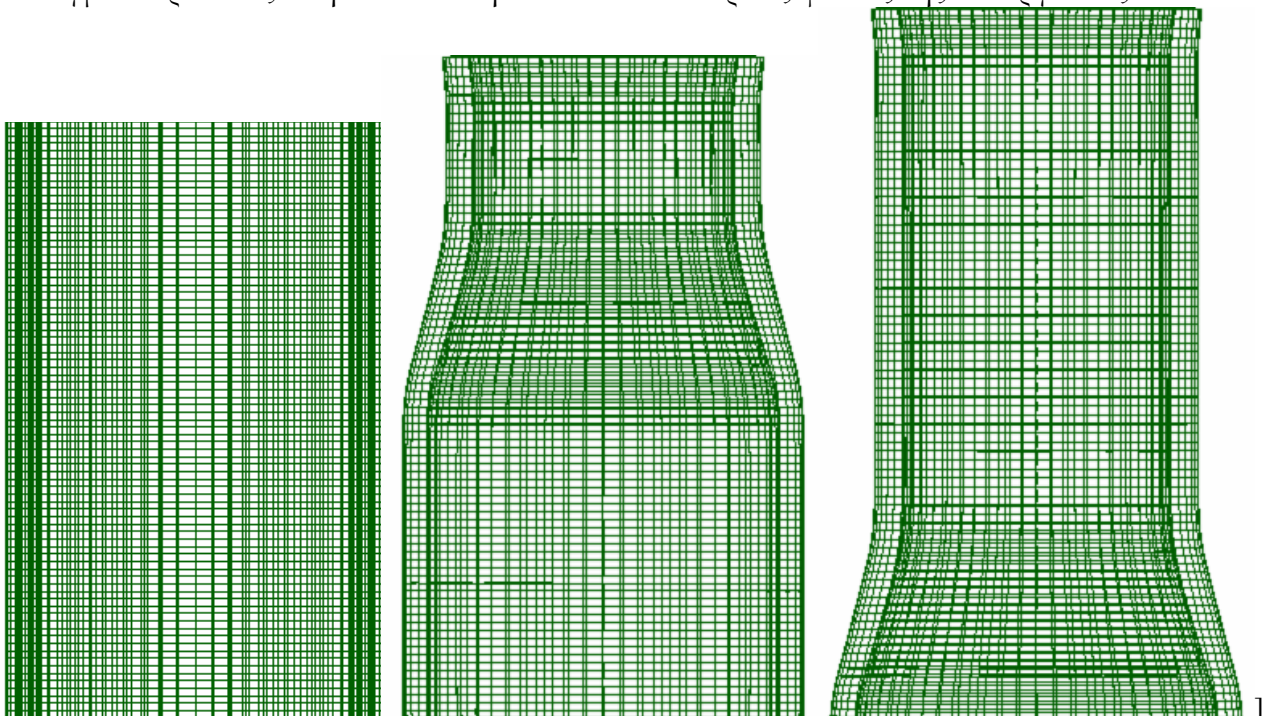
Στο διάγραμμα 4.10.2 παρατηρείται βαθμιαία αύξηση του πάχους του εσωτερικού σωλήνα από την χρονική στιγμή $t=16.00\text{msec}$ έως την χρονική στιγμή $t=32.00\text{msec}$ και σταθεροποίηση του περί την τελική τιμή ως το πέρας της κατεργασίας. Η σταθερότητα αυτή οφείλεται στην επαφή του εξωτερικού στρώματος με τα τοιχώματα της μήτρας από την μια μεριά και την επαφή με το εσωτερικό στρώμα από την άλλη.



Διάγραμμα 4.10.3: Μεταβολή του συνολικού πάχους του διμεταλλικού δοκιμίου #10

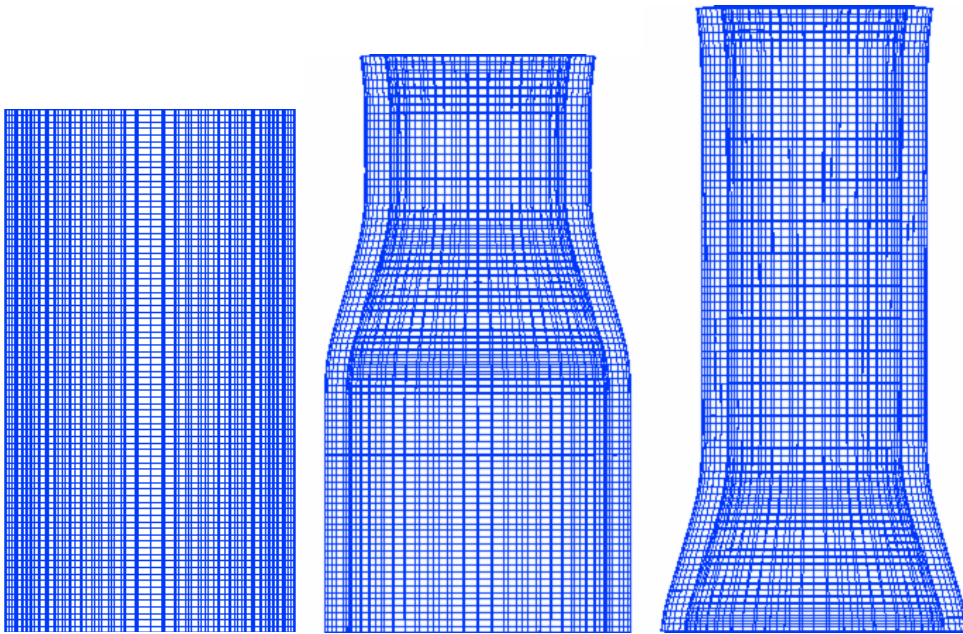
Στο διάγραμμα 4.10.3 παρατηρείται βαθμιαία αύξηση του πάχους του εσωτερικού σωλήνα από την χρονική στιγμή $t=16.00\text{msec}$ έως την χρονική στιγμή $t=32.00\text{msec}$ και κατόπιν σταθεροποίηση του περί την τελική τιμή ως το πέρας της κατεργασίας.

Το πλέγμα παρουσιάζει την ακόλουθη εικόνα σε 3 διακριτές φάσεις της κατεργασίας:



Εικόνα 4.10.4: Πλέγμα εξωτερικού σωλήνα (α) $t=0.00\text{msec}$ (β) $t=20.00\text{msec}$ (γ) $t=38.99\text{msec}$

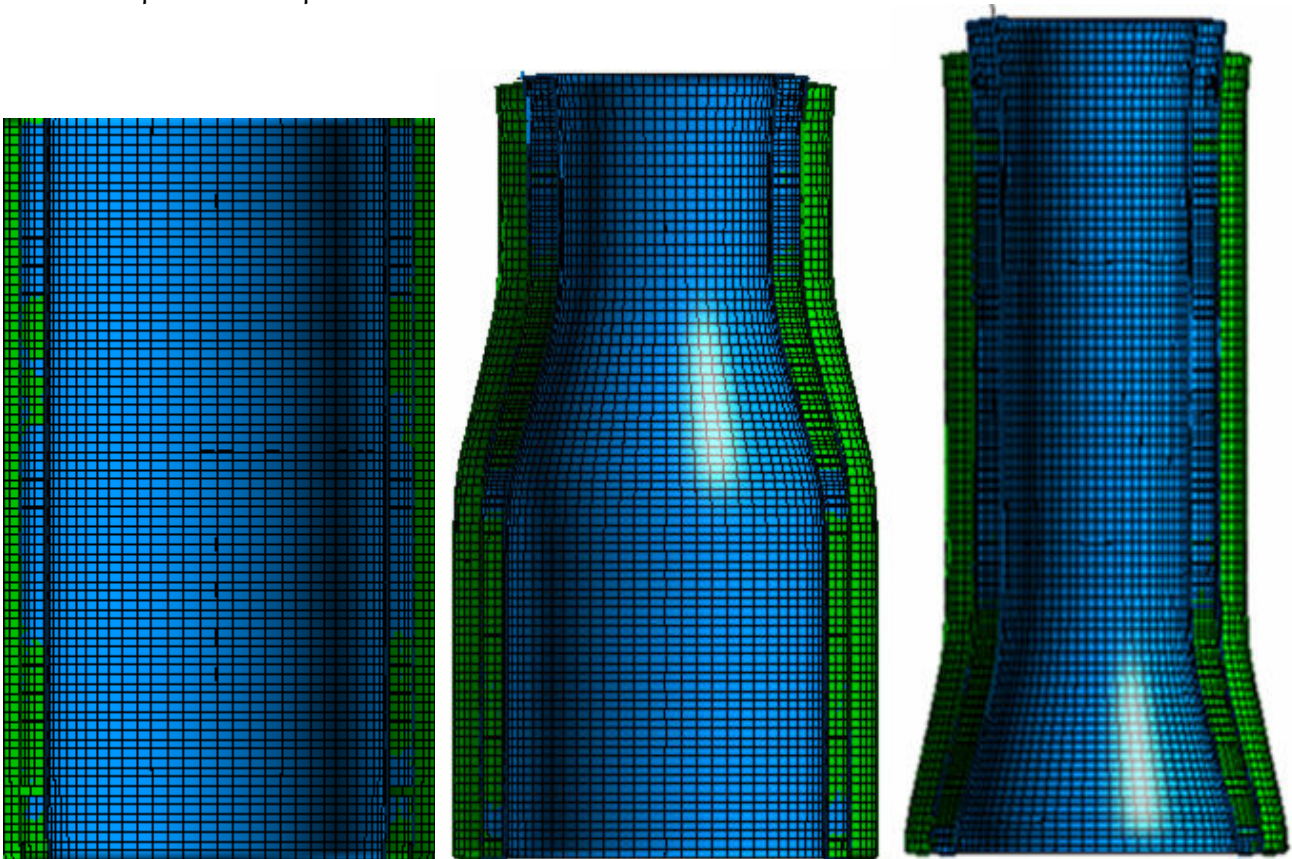
Από την εικόνα 4.10.4, όπου παρουσιάζεται στραμμένο κατά 180° το πλέγμα του εξωτερικού σωλήνα σε 3 χρονικές στιγμές, είναι φανερό ότι υπάρχει έντονη παραμόρφωση (συμπίεση) των πεπερασμένων στοιχείων στις περιοχές που έχουν ήδη υποστεί την κατεργασία διέλασης (β,γ) καθώς και στην υπό διέλαση περιοχή (β). Επίσης, συμπίεση του πλέγματος παρατηρείται επίσης στο πέρας της κατεργασίας στην περιοχή που βρίσκεται στο μέτωπο του εμβόλου.



Εικόνα 4.10.5: Πλέγμα εσωτερικού σωλήνα (α) $t=0.00msec$ (β) $t=20.00msec$ (γ) $t=38.99msec$

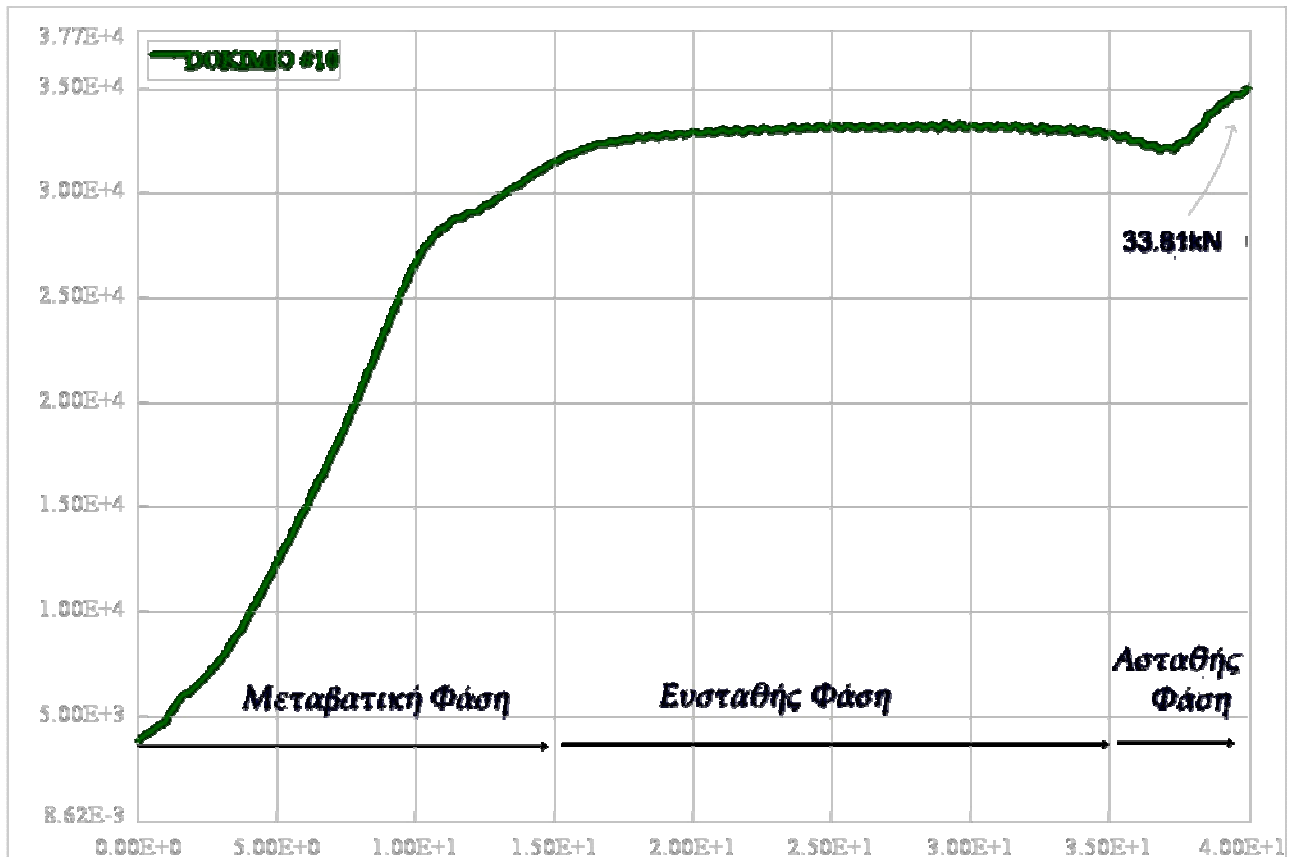
Ομοίως, από την εικόνα 4.10.5, όπου παρουσιάζεται στραμμένο κατά 180° το πλέγμα του εσωτερικού σωλήνα σε 3 χρονικές στιγμές, είναι φανερό ότι υπάρχει έντονη παραμόρφωση (συμπίεση) των πεπερασμένων στοιχείων στις περιοχές που έχουν ήδη υποστεί στην κατεργασία διέλασης (β,γ) καθώς και στην υπό διέλαση περιοχή (β). Τέλος, συμπίεση του πλέγματος παρατηρείται επίσης στο πέρας της κατεργασίας στην περιοχή που βρίσκεται στο μέτωπο του εμβόλου.

Η συνολική παραμόρφωση του πλέγματος στο πέρας της κατεργασίας και για τους 2 σωλήνες δίνεται στην ακόλουθη εικόνα.



Εικόνα 4.10.6: Παραμόρφωση πλέγματος διμεταλλικού σωλήνα (α) $t=0.00msec$ (β) $t=20.00msec$ (γ) $t=38.99msec$

Διάγραμμα Φορτίου – Μετατόπισης



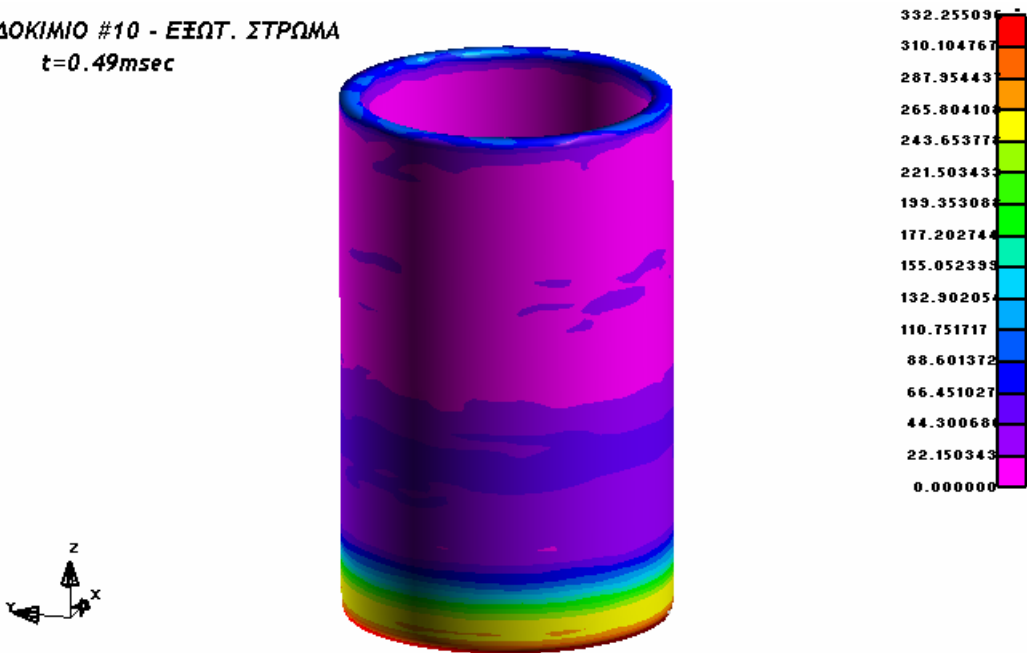
Διάγραμμα 4.10.4: Καμπύλη Φορτίου-Μετατόπισης για το Δοκίμο #10

Στο διάγραμμα που προέκυψε από την επίλυση του μοντέλου διακρίνονται οι 3 φάσεις της κατεργασίας (Μεταβατική Φάση, Φάση Ευστάθειας, Ασταθής Φάση). Η μορφή της καμπύλης προσεγγίζει κατά πολύ την αντίστοιχη καμπύλη που προέκυψε από την πειραματική διαδικασία, βλ. διάγραμμα 2.10. (Εξαιτίας διαφορετικής κλίμακας που χρησιμοποιείται στα δύο διαγράμματα, φαινομενικά εντοπίζονται μικροδιαφορές στην εμφάνιση της καμπύλης, ωστόσο με μια προσεκτικότερη εξέταση γίνεται φανερό ότι οι τιμές βρίσκονται σε αξιοσημείωτη αντιστοιχία).

Επίσης σημειώνεται το μέγιστο φορτίο διέλασης, δηλαδή 33.81kN, τιμή που προσεγγίζει κατά την αντίστοιχη πειραματική τιμή, δηλαδή τα 39.60kN, με απόκλιση 17.13%. Ωστόσο η τιμή του μέγιστου φορτίου 39.60kN που προέκυψε στην πειραματική διαδικασία, σημειώθηκε στην φάση αστάθειας, λίγο πριν την ανάπτυξη ελαττώματος, συνεπώς δεν μπορεί να ειπωθεί ότι είναι η τιμή αυτή είναι που πρέπει να συγκριθεί με τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης. Αν όμως λάβουμε υπόψη ότι πριν αυτό το “peak” του φορτίου στην πειραματική διαδικασία η τιμή του ήταν περί τα 34 kN, τότε η μοντελοποίηση από άποψη φορτίου κρίνεται ως ιδιαίτερα ικανοποιητική.

Τασικό Πεδίο

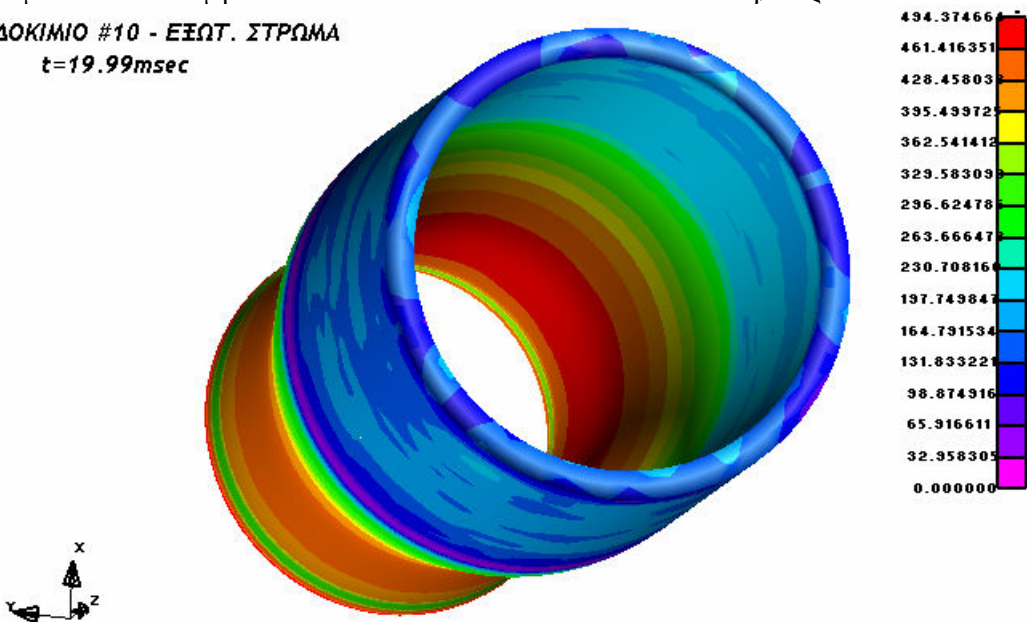
ΔΟΚΙΜΙΟ #10 - ΕΞΩΤ. ΣΤΡΩΜΑ
 $t=0.49msec$



Εικόνα 4.10.7: Ισοδύναμες τάσεις κατά von Mises για τον εξωτερικό σωλήνα κατά τη χρονική στιγμή $t=0.49msec$

Από την αναπαράσταση αυτή παρατηρείται, όπως είναι αναμενόμενο, ότι η μέγιστη τάση εμφανίζεται στην περιοχή όπου ο σωλήνας εισέρχεται στο κωνικό τμήμα της μήτρας. Η τάση αυτή υπολογίστηκε στα 310-332MPa περίπου. Επίσης, το τμήμα του δοκιμίου που βρίσκεται σε επαφή με το μέτωπο του εμβόλου καταπονείται και αυτό από τάση, περίπου 22-44MPa.

ΔΟΚΙΜΙΟ #10 - ΕΞΩΤ. ΣΤΡΩΜΑ
 $t=19.99msec$

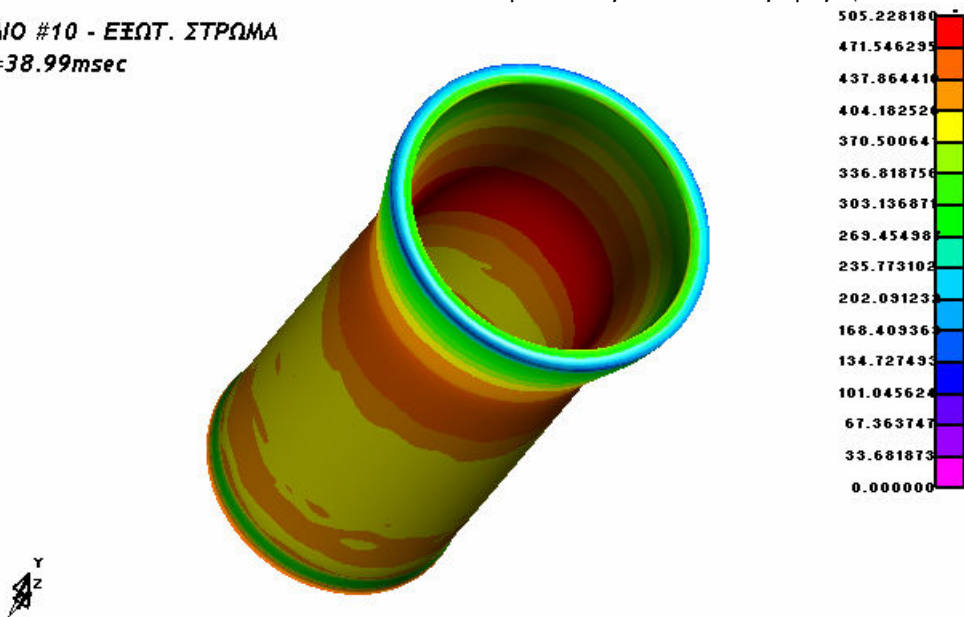


Εικόνα 4.10.8: Ισοδύναμες τάσεις κατά von Mises για τον εξωτερικό σωλήνα κατά τη χρονική στιγμή $t=19.99msec$

Στην εικόνα αυτή παρατηρείται ότι η μέγιστη τάση που καταπονεί τον εξωτερικό σωλήνα είναι περί τα 461-494MPa και παρουσιάζεται στην περιοχή του δοκιμίου που βρίσκεται στο κωνικό τμήμα της μήτρας και δη στην εσωτερική επιφάνεια του σωλήνα, καθώς αυτό το τμήμα βρίσκεται υπό τάση τόσο από τα τοιχώματα της μήτρας όσο και από τον εσωτερικό σωλήνα. Επίσης, περιοχές οι οποίες έχουν ήδη υποστεί την κατεργασία της διέλασης καταπονούνται από

αρκετά υψηλές τάσεις καθώς πιέζονται από τα τοιχώματα της εξόδου της μήτρας.

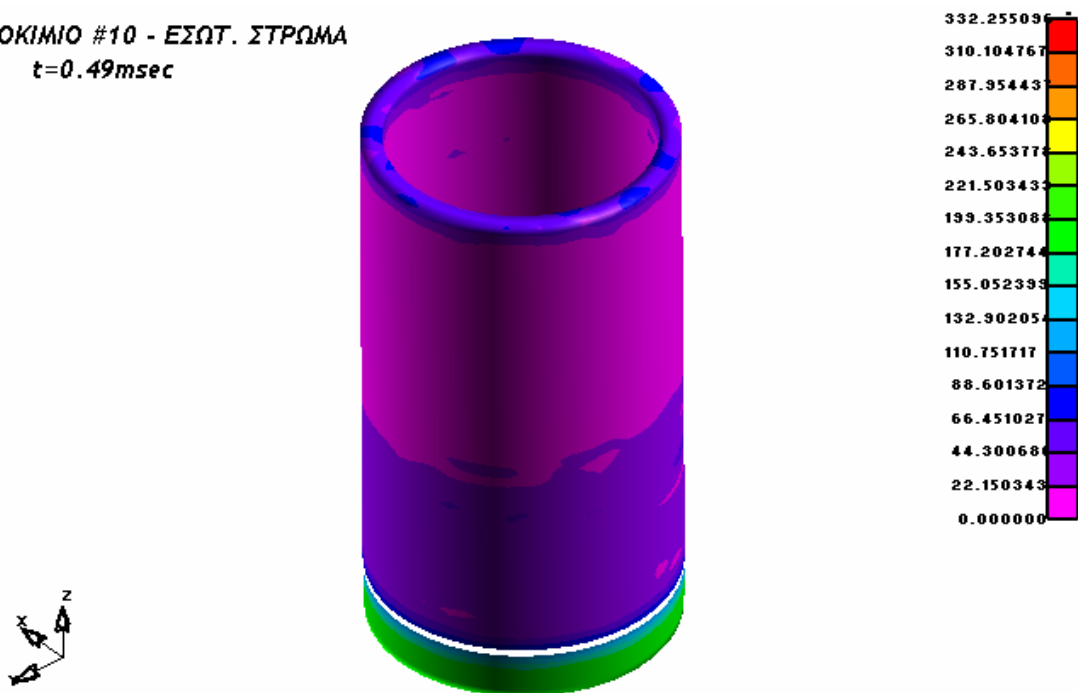
ΔΟΚΙΜΙΟ #10 - ΕΞΩΤ. ΣΤΡΩΜΑ
 $t=38.99msec$



Εικόνα 4.10.9: Ισοδύναμες τάσεις κατά von Mises για τον εξωτερικό σωλήνα κατά τη χρονική στιγμή $t=38.99msec$

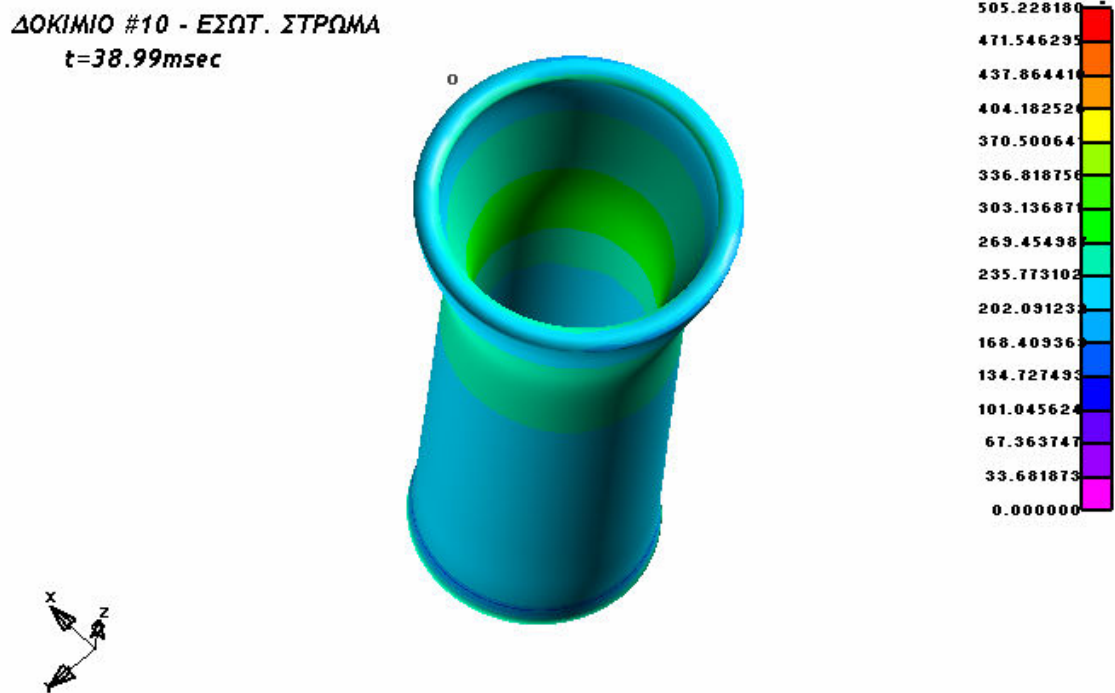
Η εικόνα 4.10.9 παρουσιάζει την τελική εντατική κατάσταση του εξωτερικού σωλήνα, στην οποία παρατηρείται αρκετά ανομοιόμορφη κατανομή των τάσεων. Στην περιοχή που βρίσκεται μετά την έξοδο από το κωνικό τμήμα της μήτρας εμφανίζονται τάσεις περί τα 471-505MPa. Επίσης, το έμβολο ασκεί θλιπτικές τάσεις της τάξης των 269-303MPa στο άνω μέρος του σωλήνα.

ΔΟΚΙΜΙΟ #10 - ΕΣΩΤ. ΣΤΡΩΜΑ
 $t=0.49msec$



Εικόνα 4.10.10: Ισοδύναμες τάσεις κατά von Mises για τον εσωτερικό σωλήνα κατά τη χρονική στιγμή $t=0.49msec$

Από την αναπαράσταση αυτή παρατηρείται, όπως είναι αναμενόμενο, ότι η μέγιστη τάση εμφανίζεται στην περιοχή όπου ο σωλήνας εισέρχεται στο κωνικό τμήμα της μήτρας. Η τάση αυτή υπολογίστηκε στα 199-221MPa περίπου. Επίσης, το τμήμα του δοκιμίου που βρίσκεται σε επαφή με το μέτωπο του εμβόλου καταπονείται και αυτό από τάση, αλλά πολύ μικρή, περίπου 44-66MPa.



Εικόνα 4.10.11: Ισοδύναμες τάσεις κατά von Mises για τον εσωτερικό σωλήνα κατά τη χρονική στιγμή $t=38.99msec$

Η εικόνα 4.10.11 παρουσιάζει την τελική εντατική κατάσταση του εσωτερικού σωλήνα, στην οποία παρατηρείται αρκετά ομοιόμορφη κατανομή των τάσεων. Στην περιοχή που περισσότερο καταπονείται απαντώνται τάσεις περί τα 370MPa.

■ Η κατεργασία του δοκιμίου και η μορφή του πλέγματος καθ'όλη την διάρκεια της διαδικασίας έχει καταγραφεί σε video με τη βοήθεια του post-processor. Το video αυτό, καθώς και άλλα αρχεία που αφορούν στην μοντελοποίηση, στην επίλυση και στην εξαγωγή αποτελεσμάτων βρίσκονται στο dvd που συνοδεύει την εργασία στον αντίστοιχο φάκελο για το συγκεκριμένο δοκίμιο.

4.11 Αποτελέσματα Προσομοίωσης - Δοκίμιο #11

Το διμεταλλικό δοκίμιο #11 είναι κατασκευασμένο από καθαρό χαλκό (εξωτερικό στρώμα) και κράμα αλουμινίου Al 6063 F25 (εσωτερικό στρώμα). Ο λόγος διαρροής των 2 υλικών είναι:

$$\lambda = \frac{\text{Sigy}(Cu)}{\text{Sigy}(Al - 6063 - F25)} = \frac{266}{192.2} = 1.384 < 3.5$$

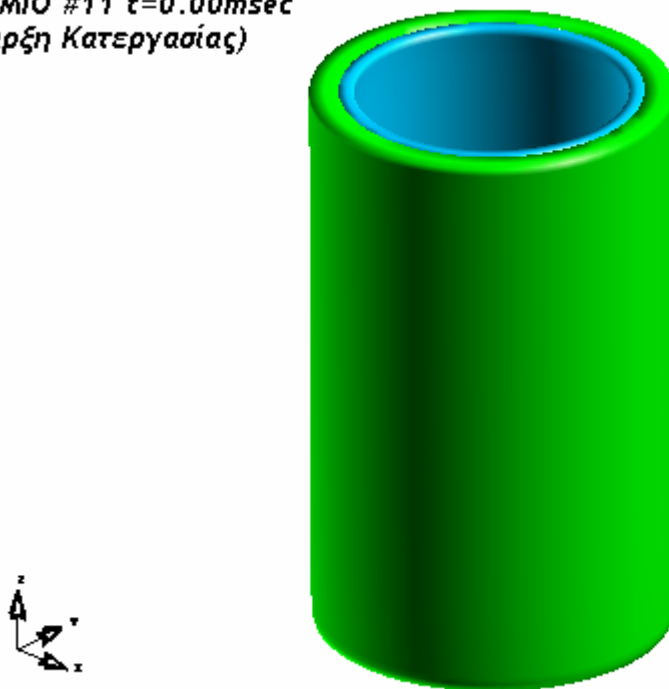
Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [17], ο παραπάνω λόγος των ορίων διαρροής εξασφαλίζει ομαλή διεξαγωγή της κατεργασίας και όχι ιδιαίτερα αυξημένες τιμές τάσεων.

- Αρχικό μήκος εσωτερικού και εξωτερικού στρώματος: 40.00mm
- Αρχικό πάχος εσωτερικού σωλήνα: 1.00mm
- Αρχικό πάχος εξωτερικού σωλήνα: 2.00mm

Μετά την επίλυση του μοντέλου του δοκιμίου #11 από τον solver του LS-DYNA, προκύπτουν τα ακόλουθα αποτελέσματα μέσω των ETA Post-Processor και ETA Graph-Processor.

Φάσεις της Κατεργασίας

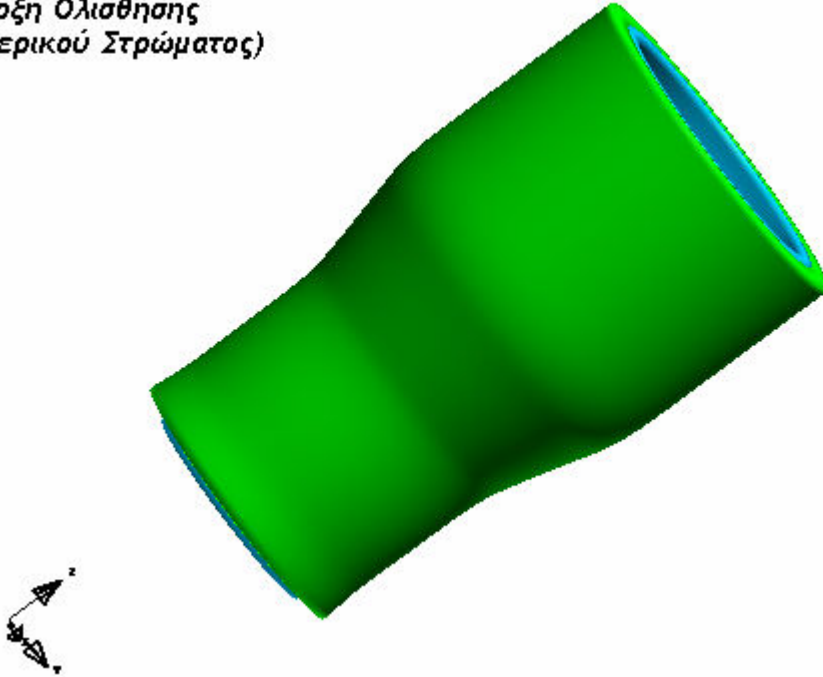
ΔΟΚΙΜΙΟ #11 t=0.00msec
(Έναρξη Κατεργασίας)



Εικόνα 4.11.1: Αναπαράσταση δοκιμίου #11 κατά την έναρξη της κατεργασίας διέλασης

Τη χρονική στιγμή t=21.99msec αρχίζει η ροή του εσωτερικού στρώματος προς το κάτω μέρος του δοκιμίου.

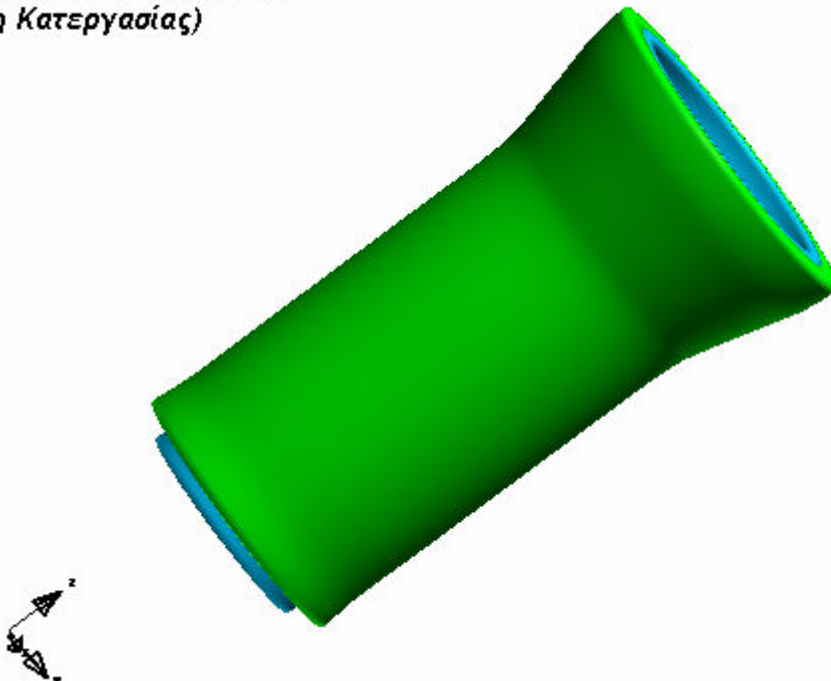
ΔΟΚΙΜΙΟ #11 $t=21.99msec$
(Εναρξη Ολίσθησης
Εσωτερικού Στρώματος)



Εικόνα 4.11.2: Αναπαράσταση δοκιμίου #11 κατά την χρονική στιγμή $t=21.99msec$

Η επίλυση συνεχίστηκε απρόσκοπτα μέχρι την χρονική στιγμή $t=37.70msec$, οπότε και έληξε η κατεργασία. Η τελική εικόνα του δοκιμίου ήταν η εξής:

ΔΟΚΙΜΙΟ #11 $t=37.99msec$
(Λήξη Κατεργασίας)



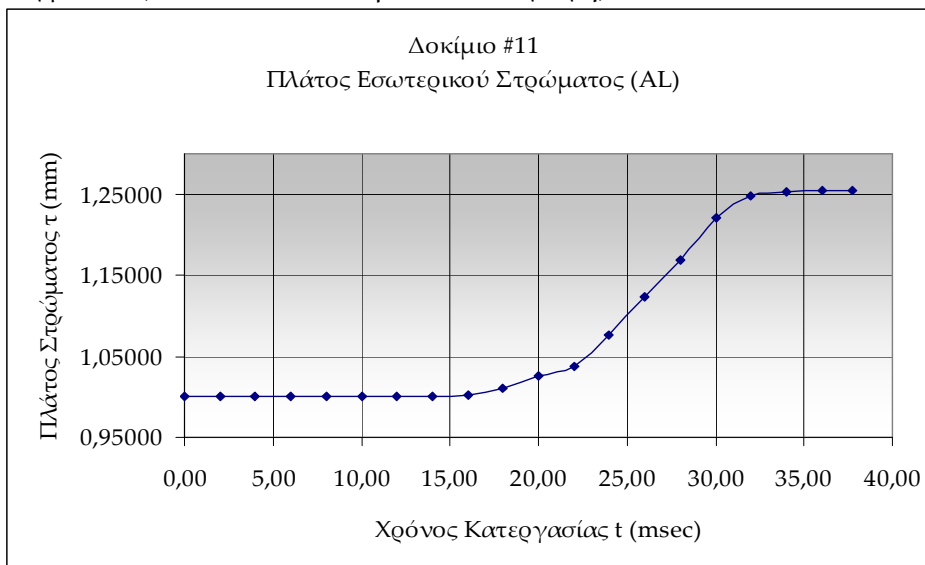
Εικόνα 4.11.3: Αναπαράσταση δοκιμίου #11 κατά τη λήξη της κατεργασίας διέλασης

Η τελική εικόνα του δοκιμίου είναι παρόμοια με την αντίστοιχη πειραματική, βλ. εικόνα 2.31 στο Κεφάλαιο 2.

Παραμόρφωση Πλέγματος

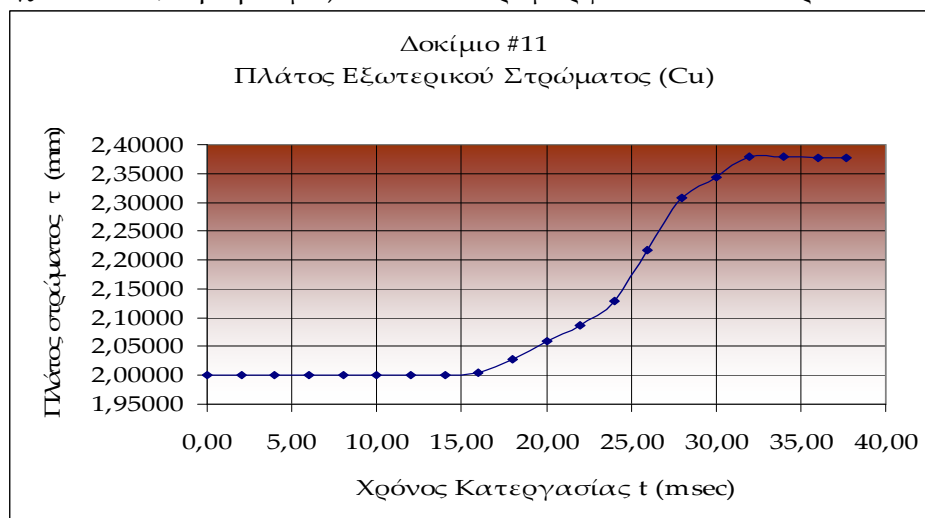
■ Τελικό μήκος εσωτερικού στρώματος: 44.97mm	(Αύξηση μήκους κατά 12.43%)
■ Τελικό μήκος εξωτερικού στρώματος: 43.72mm	(Αύξηση μήκους κατά 9.30%)
■ Τελικό πάχος εσωτερικού σωλήνα: 1.25mm	(Αύξηση πάχους κατά 25.39%)
■ Τελικό πάχος εξωτερικού σωλήνα: 2.38mm	(Αύξηση πάχους κατά 18.83%)
■ Τελικό πάχος διμεταλλικού σωλήνα: 3.63mm	(Αύξηση πάχους κατά 21.03%)

Όπως παρατηρείται, αναφορικά με το μήκος των σωλήνων, για το οποίο υπάρχουν μετρήσεις από τις πειραματικές δοκιμές, η επιμήκυνση που προκύπτει από την αριθμητική προσομοίωση είναι ελάχιστα μεγαλύτερη και για τα δύο στρώματα (12.43% έναντι 10.00% για το αλουμίνιο και 9.30% έναντι 6.30% για το χαλκό). Η μέτρηση έγινε σε κόμβους που βρίσκονται στο μέσο του πάχους του πλέγματος (#65650 & #82173, βλέπε εισαγωγή).



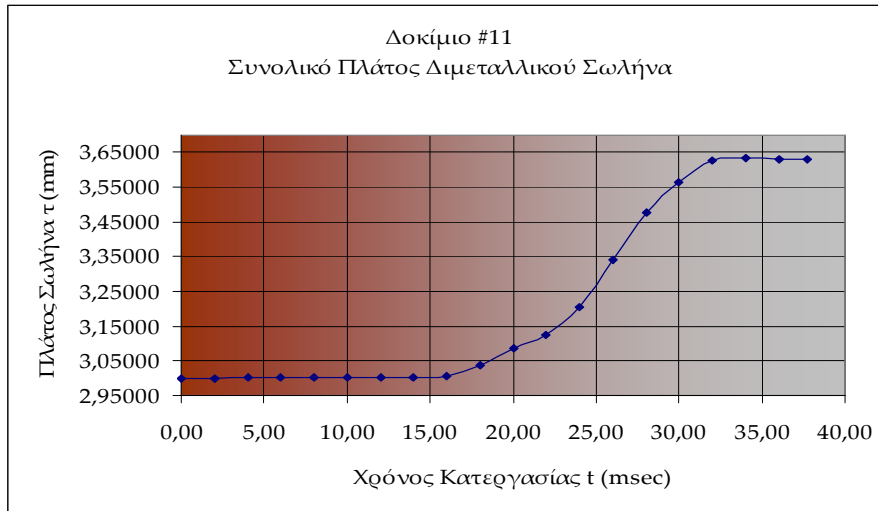
Διάγραμμα 4.11.1: Μεταβολή του πάχους του εσωτερικού σωλήνα του δοκιμίου #11

Στο διάγραμμα 4.11.1 παρατηρείται βαθμιαία αύξηση του πάχους του εσωτερικού σωλήνα από την χρονική στιγμή $t=16.00\text{msec}$ έως την χρονική στιγμή $t=32.00\text{msec}$ και κατόπιν σταθεροποίηση του περί την τελική τιμή ως το πέρας της κατεργασίας. Η αύξηση του πάχους του εσωτερικού σωλήνα είναι σχετικά μεγάλη (25.39%). Κάτι τέτοιο δικαιολογείται εν μέρει από το γεγονός ότι στην εσωτερική επιφάνεια του σωλήνα δεν υπάρχει υλικό το οποίο να περιορίζει την αύξηση του πάχους (π.χ. mandrel, δηλ. βύσμα) και έτσι παραμορφώνεται ελεύθερα.



Διάγραμμα 4.11.2: Μεταβολή του πάχους του εξωτερικού σωλήνα του δοκιμίου #11

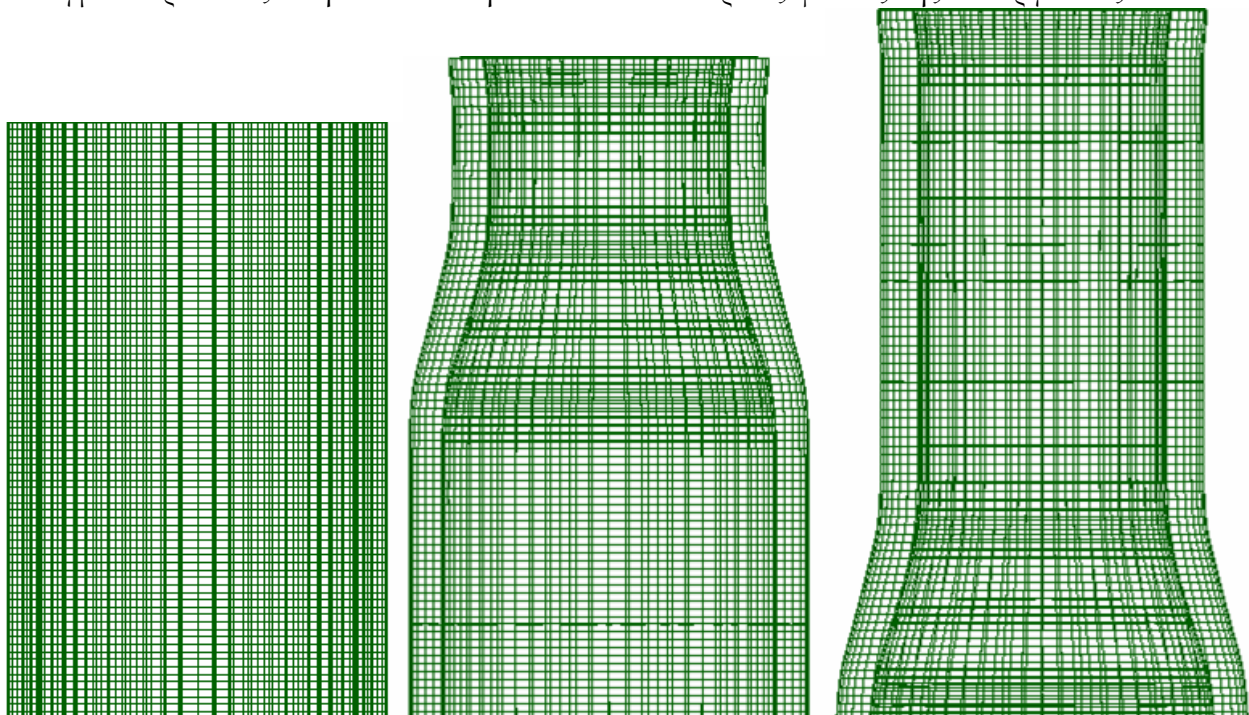
Στο διάγραμμα 4.11.2 παρατηρείται βαθμιαία αύξηση του πάχους του εσωτερικού σωλήνα από την χρονική στιγμή $t=16.00\text{msec}$ έως την χρονική στιγμή $t=32.00\text{msec}$ και σταθεροποίηση του περί την τελική τιμή ως το πέρας της κατεργασίας. Η σταθερότητα αυτή οφείλεται στην επαφή του εξωτερικού στρώματος με τα τοιχώματα της μήτρας από την μια μεριά και την επαφή με το εσωτερικό στρώμα από την άλλη.



Διάγραμμα 4.11.3: Μεταβολή του συνολικού πάχους του διμεταλλικού δοκιμίου #11

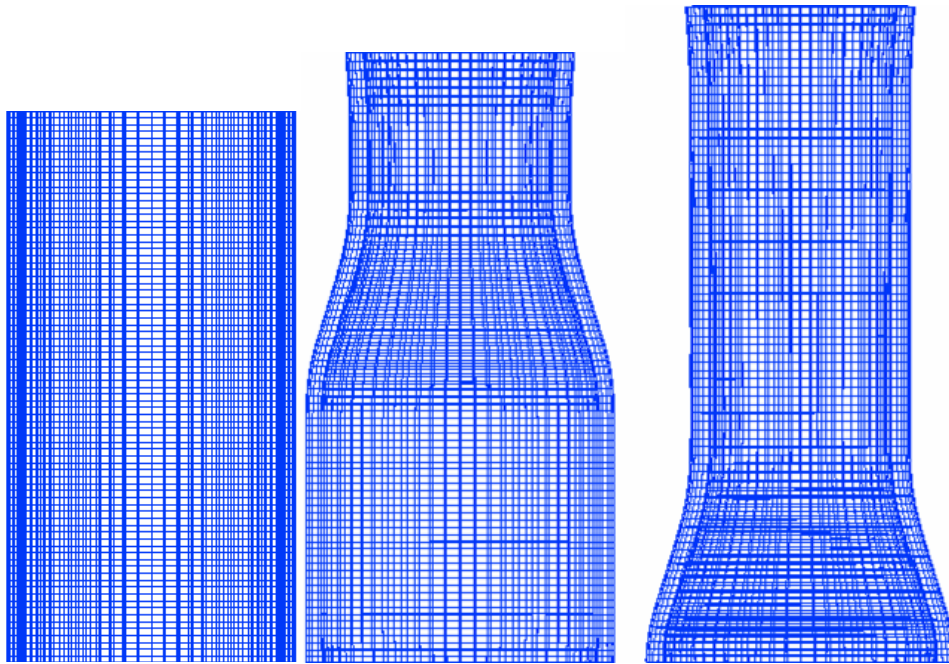
Στο διάγραμμα 4.11.3 παρατηρείται βαθμιαία αύξηση του πάχους του εσωτερικού σωλήνα από την χρονική στιγμή $t=16.00\text{msec}$ έως την χρονική στιγμή $t=32.00\text{msec}$ και κατόπιν σταθεροποίηση του περί την τελική τιμή ως το πέρας της κατεργασίας.

Το πλέγμα παρουσιάζει την ακόλουθη εικόνα σε 3 διακριτές φάσεις της κατεργασίας:



Εικόνα 4.11.4: Πλέγμα εξωτερικού σωλήνα (α) $t=0.00\text{msec}$ (β) $t=20.00\text{msec}$ (γ) $t=37.99\text{msec}$

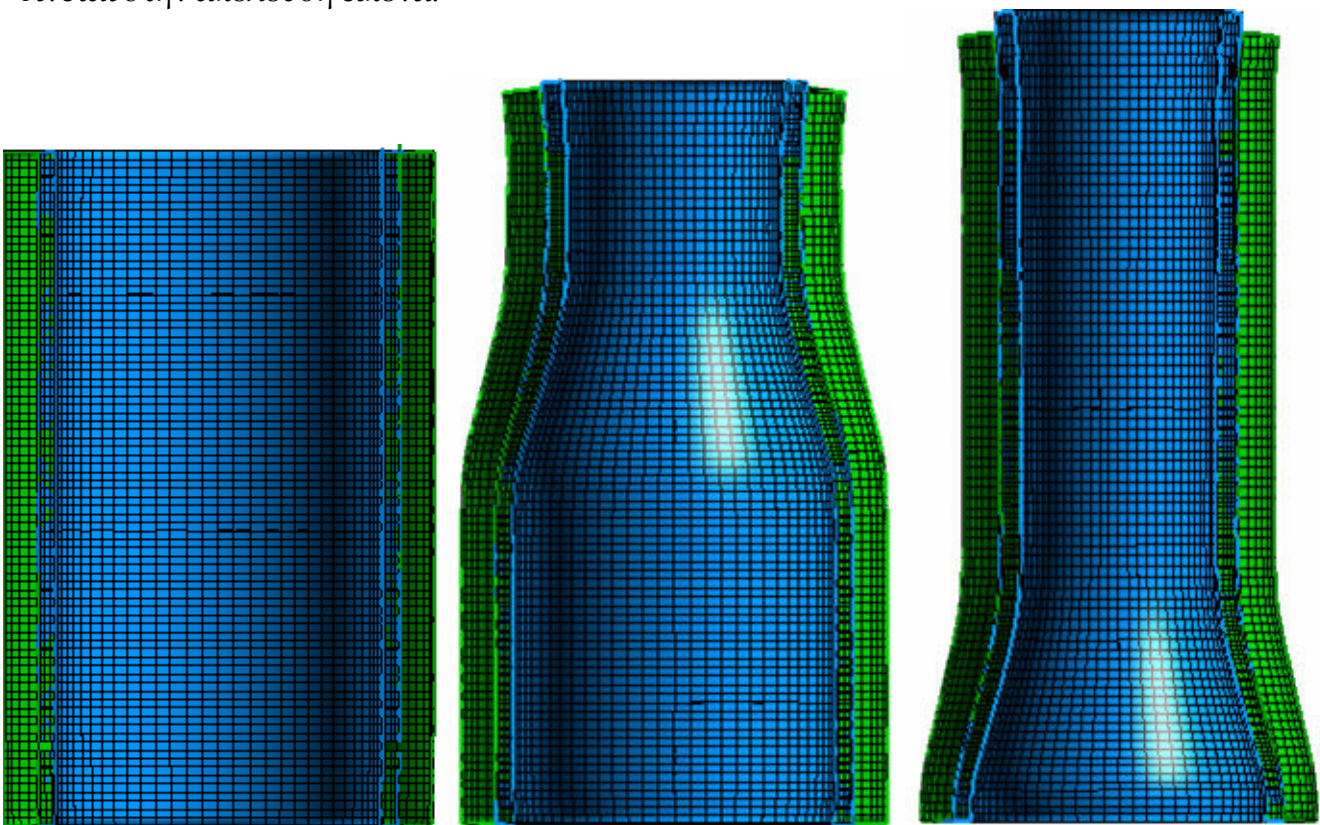
Από την εικόνα 4.11.4, όπου παρουσιάζεται στραμμένο κατά 180° το πλέγμα του εξωτερικού σωλήνα σε 3 χρονικές στιγμές, είναι φανερό ότι υπάρχει έντονη παραμόρφωση (συμπίεση) των πεπερασμένων στοιχείων στις περιοχές που έχουν ήδη υποστεί την κατεργασία διέλασης (β, γ) καθώς και στην υπό διέλαση περιοχή (β). Επίσης, συμπίεση του πλέγματος παρατηρείται επίσης στο πέρας της κατεργασίας στην περιοχή που βρίσκεται στο μέτωπο του εμβόλου.



Εικόνα 4.11.5: Πλέγμα εσωτερικού σωλήνα (α) $t=0.00msec$ (β) $t=20.00msec$ (γ) $t=37.99msec$

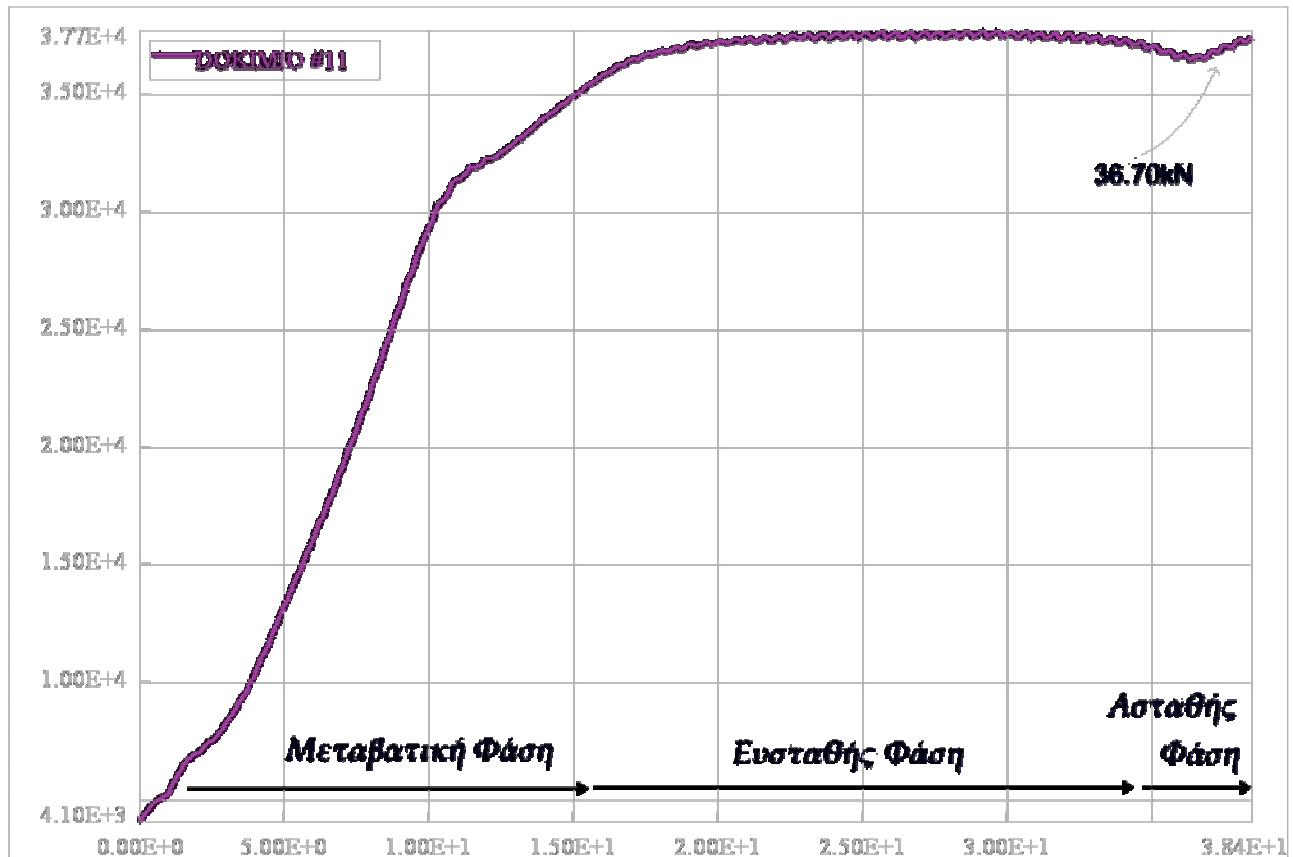
Ομοίως, από την εικόνα 4.11.5, όπου παρουσιάζεται στραμμένο κατά 180° το πλέγμα του εσωτερικού σωλήνα σε 3 χρονικές στιγμές, είναι φανερό ότι υπάρχει έντονη παραμόρφωση (συμπίεση) των πεπερασμένων στοιχείων στις περιοχές που έχουν ήδη υποστεί στην κατεργασία διέλασης (β,γ) καθώς και στην υπό διέλαση περιοχή (β). Τέλος, συμπίεση του πλέγματος παρατηρείται επίσης στο πέρας της κατεργασίας στην περιοχή που βρίσκεται στο μέτωπο του εμβόλου.

Η συνολική παραμόρφωση του πλέγματος στο πέρας της κατεργασίας και για τους 2 σωλήνες δίνεται στην ακόλουθη εικόνα.



Εικόνα 4.11.6: Παραμόρφωση πλέγματος διμεταλλικού σωλήνα (α) $t=0.00msec$ (β) $t=20.00msec$ (γ) $t=37.99msec$

Διάγραμμα Φορτίου – Μετατόπισης



Διάγραμμα 4.11.4: Καμπύλη Φορτίου-Μετατόπισης για το Δοκίμιο #11

Στο διάγραμμα που προέκυψε από την επίλυση του μοντέλου διακρίνονται οι 3 φάσεις της κατεργασίας (Μεταβατική Φάση, Φάση Ευστάθειας, Ασταθής Φάση). Η μορφή της καμπύλης προσεγγίζει ως ένα βαθμό την αντίστοιχη καμπύλη που προέκυψε από την πειραματική διαδικασία, βλ. διάγραμμα 2.11. (Εξαιτίας διαφορετικής κλίμακας που χρησιμοποιείται στα δύο διαγράμματα, φαινομενικά εντοπίζονται μικροδιαφορές στην εμφάνιση της καμπύλης, ωστόσο με μια προσεκτικότερη εξέταση γίνεται φανερό ότι οι τιμές βρίσκονται σε αξιοσημείωτη αντιστοιχία).

Επίσης σημειώνεται το μέγιστο φορτίο διέλασης, δηλαδή 36.70kN, τιμή που προσεγγίζει κατά πολύ την αντίστοιχη πειραματική τιμή, δηλαδή τα 36.56kN, με απόκλιση μόλις 0.3%. Συνεπώς, από άποψη υπολογισμού φορτίου, η μοντελοποίηση κρίνεται ως ιδανική.

Τασικό Πεδίο

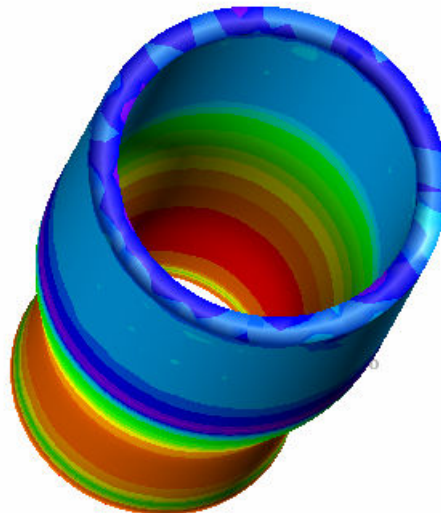
ΔΟΚΙΜΙΟ #11 - ΕΞΩΤ. ΣΤΡΩΜΑ
 $t=0.49msec$



Εικόνα 4.11.7: Ισοδύναμες τάσεις κατά von Mises για τον εξωτερικό σωλήνα κατά τη χρονική στιγμή $t=0.49msec$

Από την αναπαράσταση αυτή παρατηρείται, όπως είναι αναμενόμενο, ότι η μέγιστη τάση εμφανίζεται στην περιοχή όπου ο σωλήνας εισέρχεται στο κωνικό τμήμα της μήτρας. Η τάση αυτή υπολογίστηκε στα 299-321MPa περίπου. Επίσης, το τμήμα του δοκιμίου που βρίσκεται σε επαφή με το μέτωπο του εμβόλου καταπονείται και αυτό από τάση, περίπου 107-128MPa.

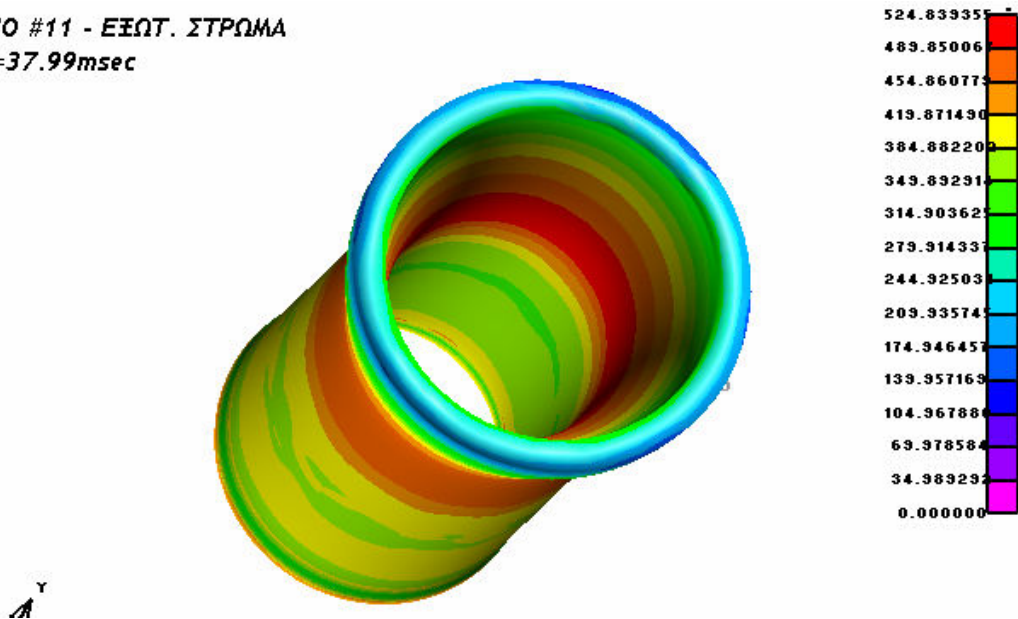
ΔΟΚΙΜΙΟ #11 - ΕΞΩΤ. ΣΤΡΩΜΑ
 $t=19.99msec$



Εικόνα 4.11.8: Ισοδύναμες τάσεις κατά von Mises για τον εξωτερικό σωλήνα κατά τη χρονική στιγμή $t=19.99msec$

Στην εικόνα αυτή παρατηρείται ότι η μέγιστη τάση που καταπονεί τον εξωτερικό σωλήνα είναι περί τα 478-512MPa και παρουσιάζεται στην περιοχή του δοκιμίου που βρίσκεται στο κωνικό τμήμα της μήτρας και δη στην εσωτερική επιφάνεια του σωλήνα, καθώς αυτό το τμήμα βρίσκεται υπό τάση τόσο από τα τοιχώματα της μήτρας όσο και από τον εσωτερικό σωλήνα. Επίσης, περιοχές οι οποίες έχουν ήδη υποστεί την κατεργασία της διέλασης καταπονούνται από αρκετά υψηλές τάσεις καθώς πιέζονται από τα τοιχώματα της εξόδου της μήτρας.

ΔΟΚΙΜΙΟ #11 - ΕΞΩΤ. ΣΤΡΩΜΑ
 $t=37.99msec$



Εικόνα 4.11.9: Ισοδύναμες τάσεις κατά von Mises για τον εξωτερικό σωλήνα κατά τη χρονική στιγμή $t=37.99msec$

Η εικόνα 4.11.9 παρουσιάζει την τελική εντατική κατάσταση του εξωτερικού σωλήνα, στην οποία παρατηρείται αρκετά ανομοιόμορφη κατανομή των τάσεων. Στην περιοχή που βρίσκεται μετά την έξοδο από το κωνικό τμήμα της μήτρας εμφανίζονται τάσεις περί τα 489-525MPa. Επίσης, το έμβολο ασκεί θλιπτικές τάσεις της τάξης των 209-244MPa στο άνω μέρος του σωλήνα.

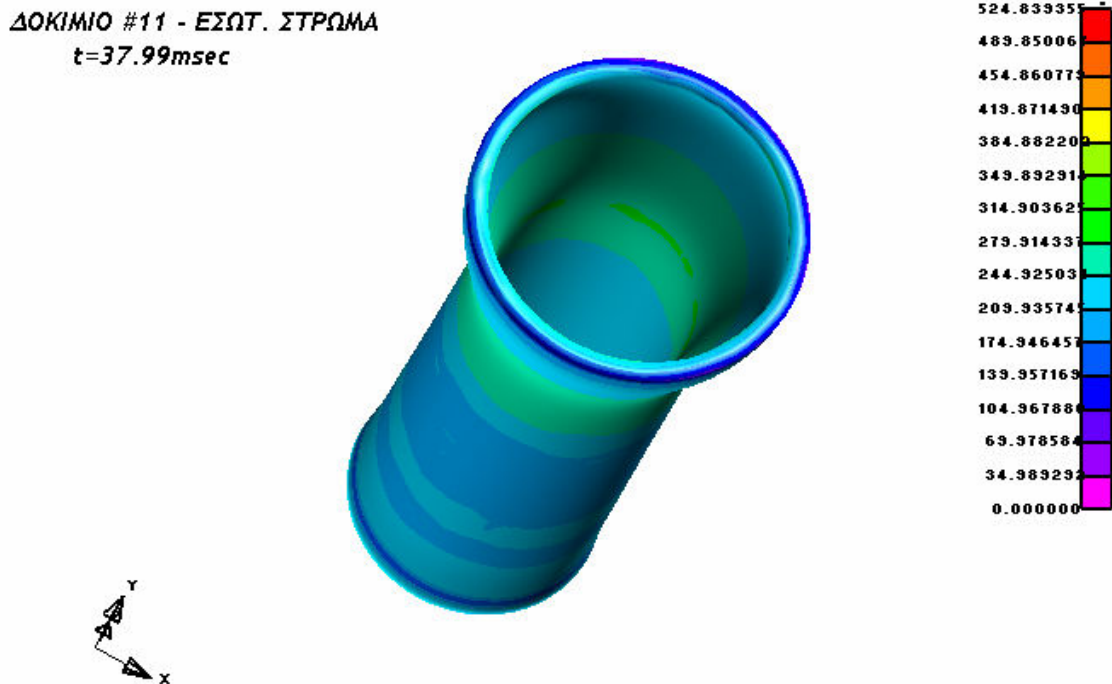
ΔΟΚΙΜΙΟ #11 - ΕΣΩΤ. ΣΤΡΩΜΑ
 $t=0.49msec$



Εικόνα 4.11.10: Ισοδύναμες τάσεις κατά von Mises για τον εσωτερικό σωλήνα κατά τη χρονική στιγμή $t=0.49msec$

Από την αναπαράσταση αυτή παρατηρείται, όπως είναι αναμενόμενο, ότι η μέγιστη τάση εμφανίζεται στην περιοχή όπου ο σωλήνας εισέρχεται στο κωνικό τμήμα της μήτρας. Η τάση αυτή υπολογίστηκε στα 171-192MPa περίπου. Επίσης, το τμήμα του δοκιμίου που βρίσκεται σε

επαφή με το μέτωπο του εμβόλου καταπονείται και αυτό από τάση, αλλά πολύ μικρή, περίπου 21MPa.



Εικόνα 4.11.11: Ισοδύναμες τάσεις κατά τον Mises για τον εσωτερικό σωλήνα κατά τη χρονική στιγμή t=37.99msec

Η εικόνα 4.11.11 παρουσιάζει την τελική εντατική κατάσταση του εσωτερικού σωλήνα, στην οποία παρατηρείται αρκετά ομοιόμορφη κατανομή των τάσεων. Στην περιοχή που περισσότερο καταπονείται απαντώνται τάσεις περί τα 244-280MPa.

■ Η κατεργασία του δοκιμίου και η μορφή του πλέγματος καθ'όλη την διάρκεια της διαδικασίας έχει καταγραφεί σε video με τη βοήθεια του post-processor. Το video αυτό, καθώς και άλλα αρχεία που αφορούν στην μοντελοποίηση, στην επίλυση και στην εξαγωγή αποτελεσμάτων βρίσκονται στο dvd που συνοδεύει την εργασία στον αντίστοιχο φάκελο για το συγκεκριμένο δοκίμιο.

4.12 Αποτελέσματα Προσομοίωσης - Δοκίμιο #12

Το διμεταλλικό δοκίμιο #12 είναι κατασκευασμένο από καθαρό χαλκό (εξωτερικό στρώμα) και κράμα αλουμινίου Al 6063 F25 (εσωτερικό στρώμα). Ο λόγος διαρροής των 2 υλικών είναι:

$$\lambda = \frac{\text{Sigy}(Cu)}{\text{Sigy}(Al - 6063 - F25)} = \frac{266}{192.2} = 1.384 < 3.5$$

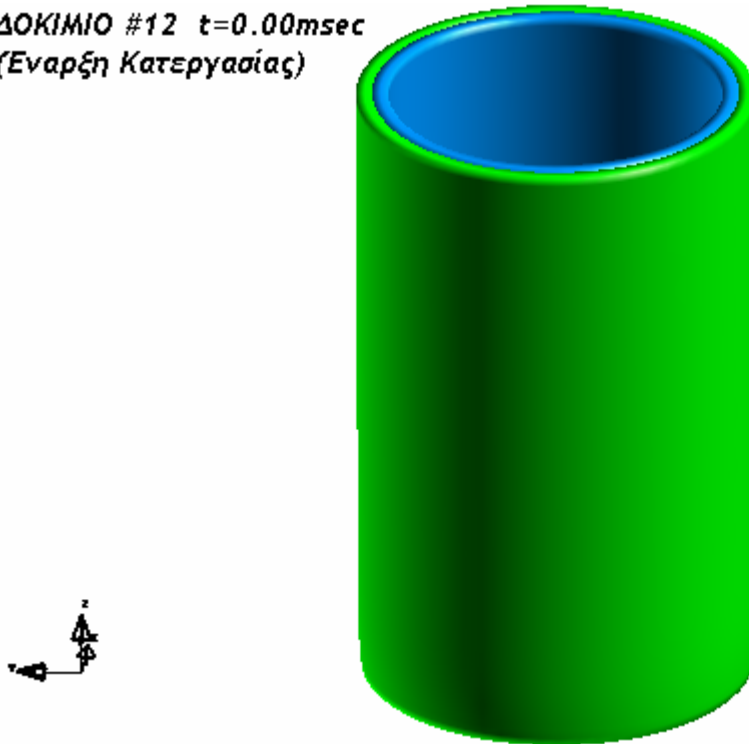
Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [17], ο παραπάνω λόγος των ορίων διαρροής εξασφαλίζει ομαλή διεξαγωγή της κατεργασίας και όχι ιδιαίτερα αυξημένες τιμές τάσεων.

- Αρχικό μήκος εσωτερικού και εξωτερικού στρώματος: 40.00mm
- Αρχικό πάχος εσωτερικού σωλήνα: 1.00mm
- Αρχικό πάχος εξωτερικού σωλήνα: 1.00mm

Μετά την επίλυση του μοντέλου του δοκιμίου #12 από τον solver του LS-DYNA, προκύπτουν τα ακόλουθα αποτελέσματα μέσω των ETA Post-Processor και ETA Graph-Processor.

Φάσεις της Κατεργασίας

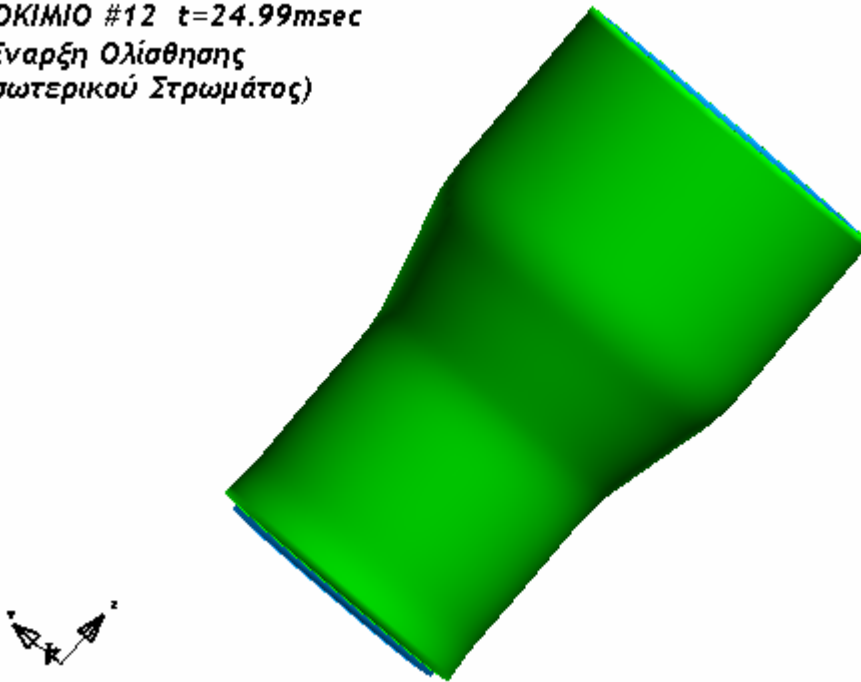
ΔΟΚΙΜΙΟ #12 t=0.00msec
(Έναρξη Κατεργασίας)



Εικόνα 4.12.1: Αναπαράσταση δοκιμίου #12 κατά την έναρξη της κατεργασίας διέλασης

Τη χρονική στιγμή t=24.99msec αρχίζει η ροή του εσωτερικού στρώματος προς το κάτω μέρος του δοκιμίου.

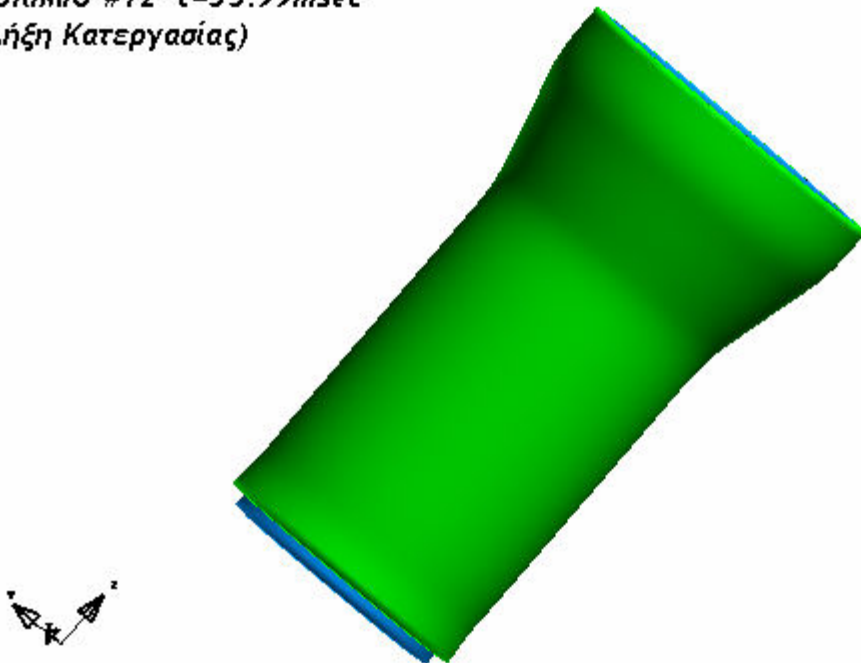
ΔΟΚΙΜΙΟ #12 $t=24.99msec$
(Εναρξη Ολίσθησης
Εσωτερικού Στρωμάτος)



Εικόνα 4.12.2: Αναπαράσταση δοκιμίου #12 κατά την χρονική στιγμή $t=24.99msec$

Η επίλυση συνεχίστηκε απρόσκοπτα μέχρι την χρονική στιγμή $t=35.99msec$, οπότε και έληξε η κατεργασία. Η τελική εικόνα του δοκιμίου ήταν η εξής:

ΔΟΚΙΜΙΟ #12 $t=35.99msec$
(Λήξη Κατεργασίας)



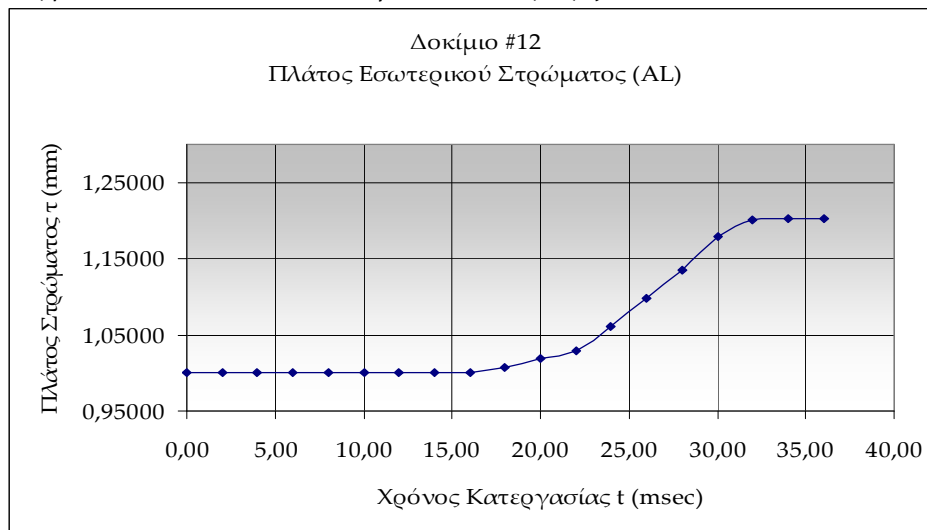
Εικόνα 4.12.3: Αναπαράσταση δοκιμίου #12 κατά τη λήξη της κατεργασίας διέλασης

Η τελική εικόνα του δοκιμίου είναι παρόμοια με την αντίστοιχη πειραματική, βλ. εικόνα 2.33 στο Κεφάλαιο 2.

Παραμόρφωση Πλέγματος

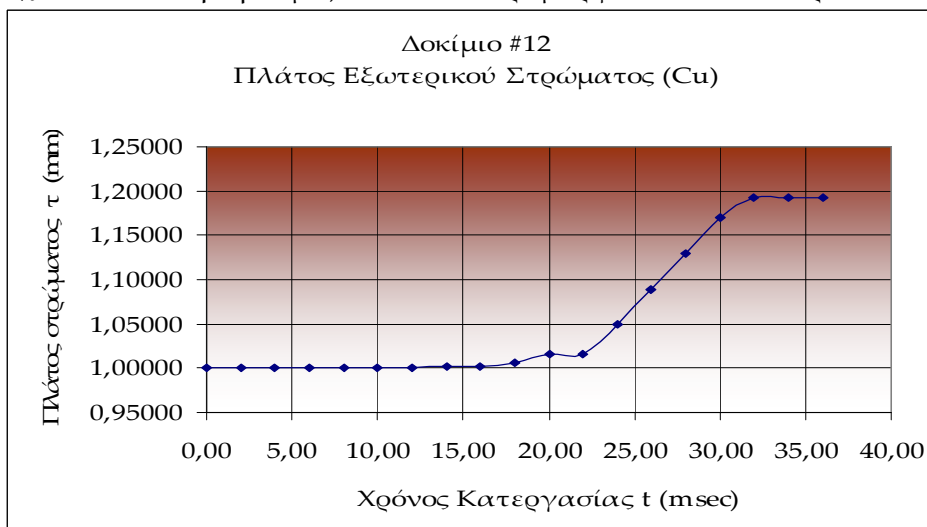
- Τελικό μήκος εσωτερικού στρώματος: 43.78mm (Αύξηση μήκους κατά 9.45%)
- Τελικό μήκος εξωτερικού στρώματος: 42.72mm (Αύξηση μήκους κατά 6.80%)
- Τελικό πάχος εσωτερικού σωλήνα: 1.20mm (Αύξηση πάχους κατά 20.29%)
- Τελικό πάχος εξωτερικού σωλήνα: 1.19mm (Αύξηση πάχους κατά 19.28%)
- Τελικό πάχος διμεταλλικού σωλήνα: 2.40mm (Αύξηση πάχους κατά 19.79%)

Όπως παρατηρείται, αναφορικά με το μήκος των σωλήνων, για το οποίο υπάρχουν μετρήσεις από τις πειραματικές δοκιμές, η επιμήκυνση που προκύπτει από την αριθμητική προσομοίωση είναι ελάχιστα μεγαλύτερη και για τα δύο στρώματα (9.45% έναντι 8.50% για το αλουμίνιο και 6.80% έναντι 2.50% για το χαλκό). Η μέτρηση έγινε σε κόμβους που βρίσκονται στο μέσο του πάχους του πλέγματος (#32604 & #71225, βλέπε εισαγωγή).



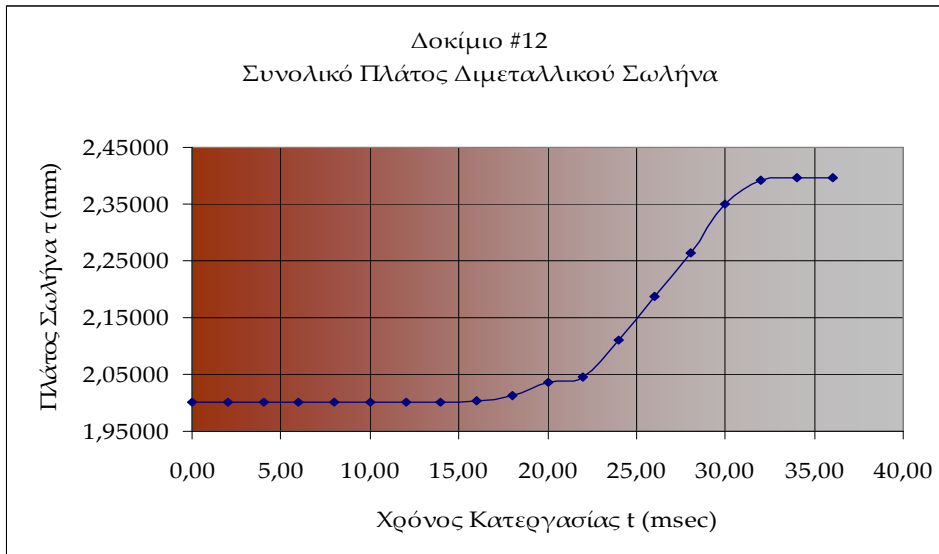
Διάγραμμα 4.12.1: Μεταβολή του πάχους του εσωτερικού σωλήνα του δοκιμίου #12

Στο διάγραμμα 4.12.1 παρατηρείται βαθμιαία αύξηση του πάχους του εσωτερικού σωλήνα από την χρονική στιγμή $t=18.00\text{msec}$ έως την χρονική στιγμή $t=32.00\text{msec}$ και κατόπιν σταθεροποίηση του περί την τελική τιμή ως το πέρας της κατεργασίας. Η αύξηση του πάχους του εσωτερικού σωλήνα είναι σχετικά μεγάλη (20.29%). Κάτι τέτοιο δικαιολογείται εν μέρει από το γεγονός ότι στην εσωτερική επιφάνεια του σωλήνα δεν υπάρχει υλικό το οποίο να περιορίζει την αύξηση του πάχους (π.χ. mandrel, δηλ. βύσμα) και έτσι παραμορφώνεται ελεύθερα.



Διάγραμμα 4.12.2: Μεταβολή του πάχους του εξωτερικού σωλήνα του δοκιμίου #12

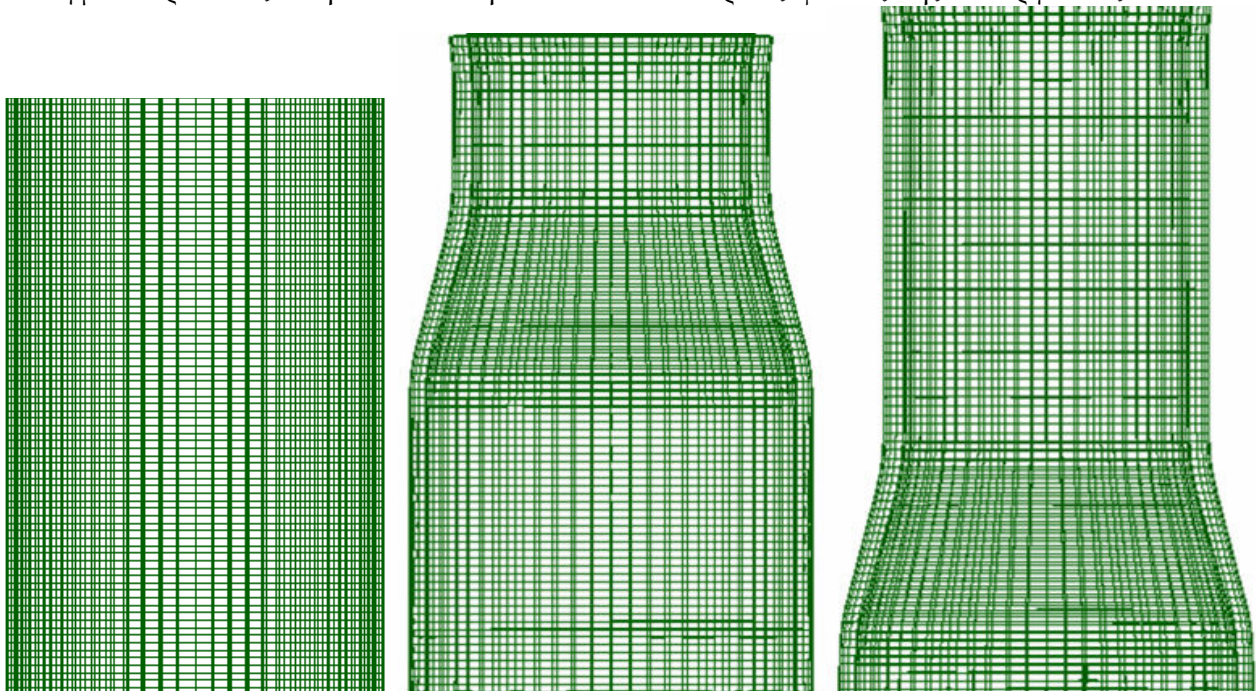
Στο διάγραμμα 4.12.2 παρατηρείται βαθμιαία αύξηση του πάχους του εσωτερικού σωλήνα από την χρονική στιγμή $t=18.00\text{msec}$ έως την χρονική στιγμή $t=32.00\text{msec}$ και σταθεροποίηση του περί την τελική τιμή ως το πέρας της κατεργασίας. Η σταθερότητα αυτή οφείλεται στην επαφή του εξωτερικού στρώματος με τα τοιχώματα της μήτρας από την μια μεριά και την επαφή με το εσωτερικό στρώμα από την άλλη.



Διάγραμμα 4.12.3: Μεταβολή του συνολικού πάχους του διμεταλλικού δοκιμίου #12

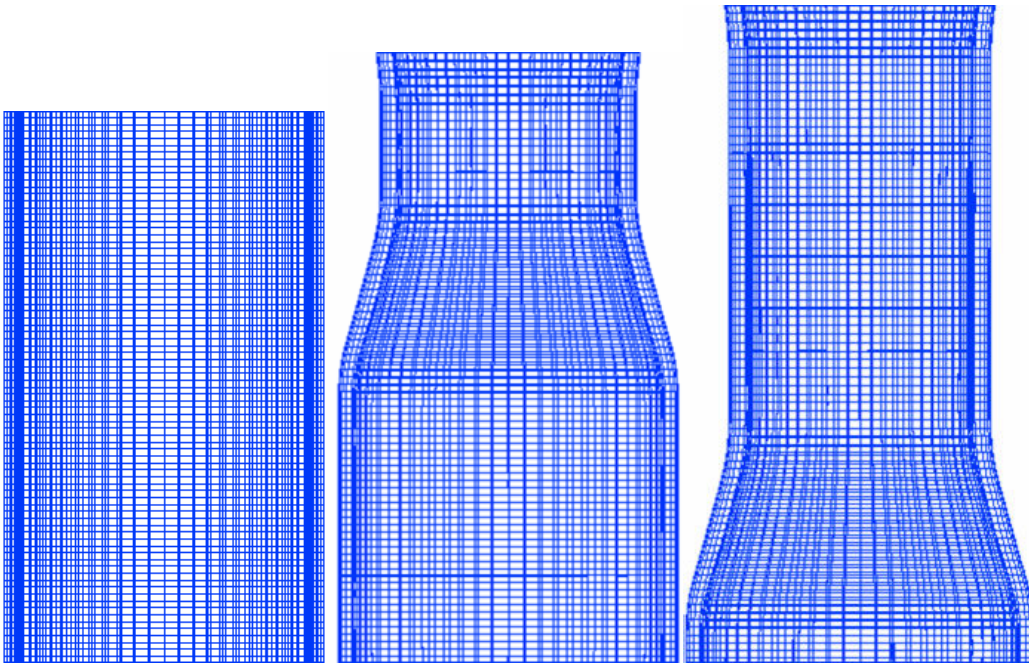
Στο διάγραμμα 4.12.3 παρατηρείται βαθμιαία αύξηση του πάχους του εσωτερικού σωλήνα από την χρονική στιγμή $t=18.00\text{msec}$ έως την χρονική στιγμή $t=32.00\text{msec}$ και κατόπιν σταθεροποίηση του περί την τελική τιμή ως το πέρας της κατεργασίας.

Το πλέγμα παρουσιάζει την ακόλουθη εικόνα σε 3 διακριτές φάσεις της κατεργασίας:



Εικόνα 4.12.4: Πλέγμα εξωτερικού σωλήνα (α) $t=0.00\text{msec}$ (β) $t=20.00\text{msec}$ (γ) $t=35.99\text{msec}$

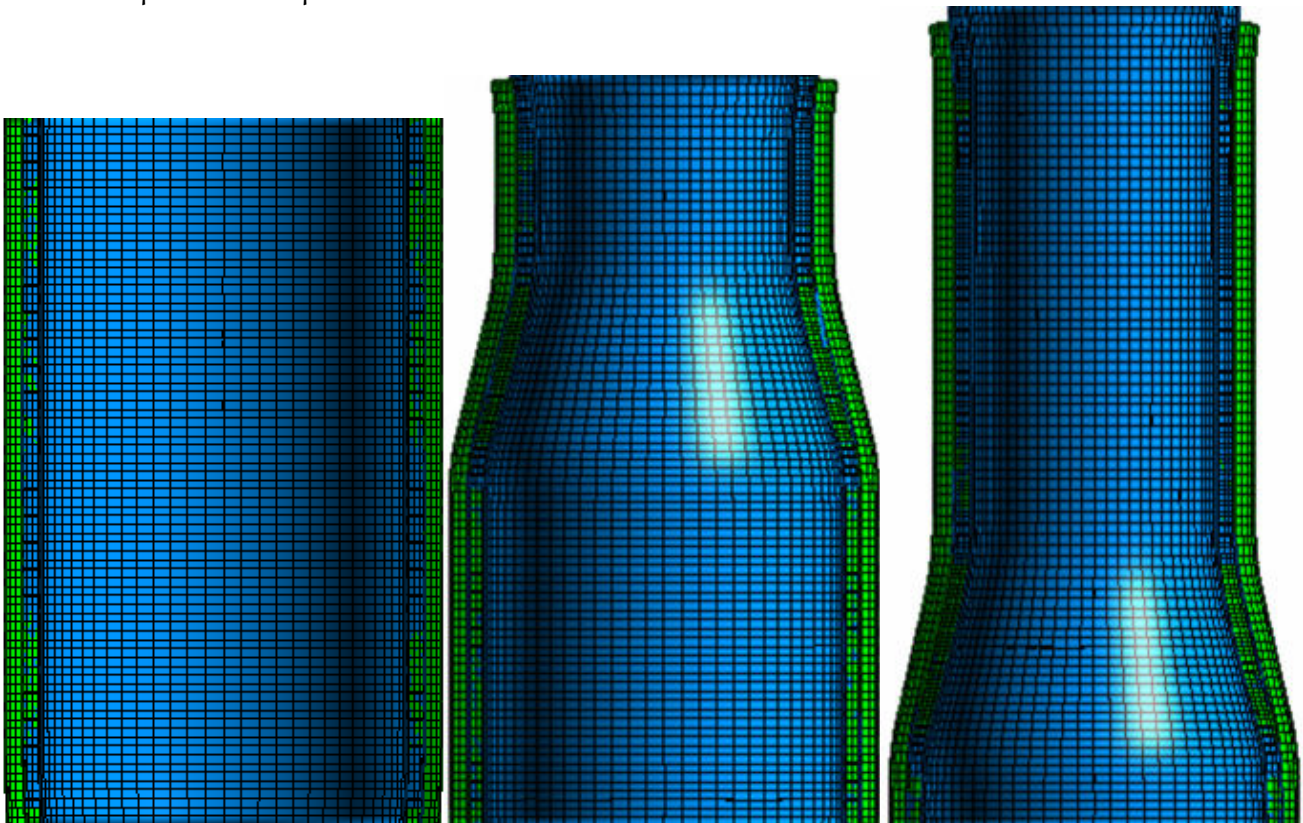
Από την εικόνα 4.12.4, όπου παρουσιάζεται στραμμένο κατά 180° το πλέγμα του εξωτερικού σωλήνα σε 3 χρονικές στιγμές, είναι φανερό ότι υπάρχει έντονη παραμόρφωση (συμπίεση) των πεπερασμένων στοιχείων στις περιοχές που έχουν ήδη υποστεί την κατεργασία διέλασης (β,γ) καθώς και στην υπό διέλαση περιοχή (β). Επίσης, συμπίεση του πλέγματος παρατηρείται επίσης στο πέρας της κατεργασίας στην περιοχή που βρίσκεται στο μέτωπο του εμβόλου.



Εικόνα 4.12.5: Πλέγμα εσωτερικού σωλήνα (α) $t=0.00msec$ (β) $t=20.00msec$ (γ) $t=35.99msec$

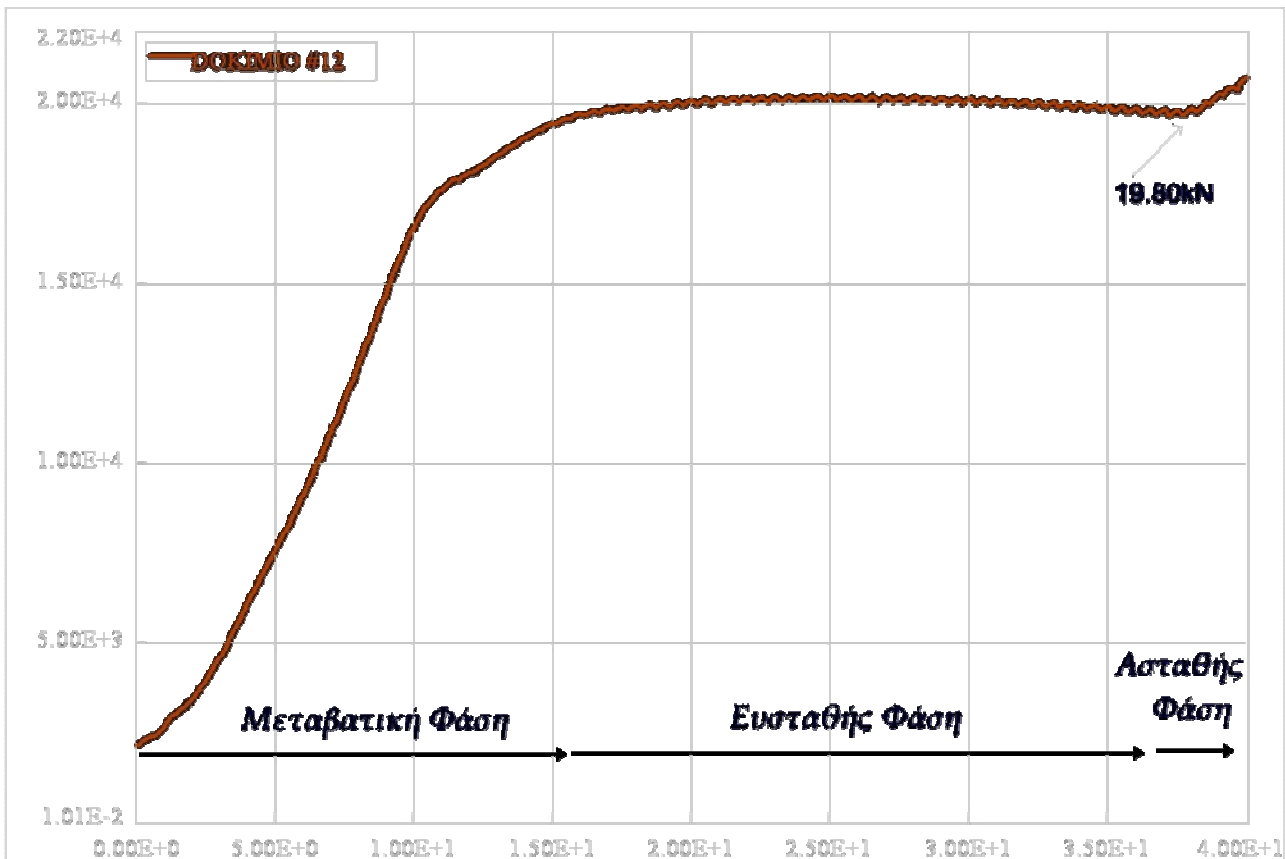
Ομοίως, από την εικόνα 4.12.5, όπου παρουσιάζεται στραμμένο κατά 180° το πλέγμα του εσωτερικού σωλήνα σε 3 χρονικές στιγμές, είναι φανερό ότι υπάρχει έντονη παραμόρφωση (συμπίεση) των πεπερασμένων στοιχείων στις περιοχές που έχουν ήδη υποστεί στην κατεργασία διέλασης (β,γ) καθώς και στην υπό διέλαση περιοχή (β). Τέλος, συμπίεση του πλέγματος παρατηρείται επίσης στο πέρας της κατεργασίας στην περιοχή που βρίσκεται στο μέτωπο του εμβόλου.

Η συνολική παραμόρφωση του πλέγματος στο πέρας της κατεργασίας και για τους 2 σωλήνες δίνεται στην ακόλουθη εικόνα.



Εικόνα 4.12.6: Παραμόρφωση πλέγματος διμεταλλικού σωλήνα (α) $t=0.00msec$ (β) $t=20.00msec$ (γ) $t=35.99msec$

Διάγραμμα Φορτίου – Μετατόπισης



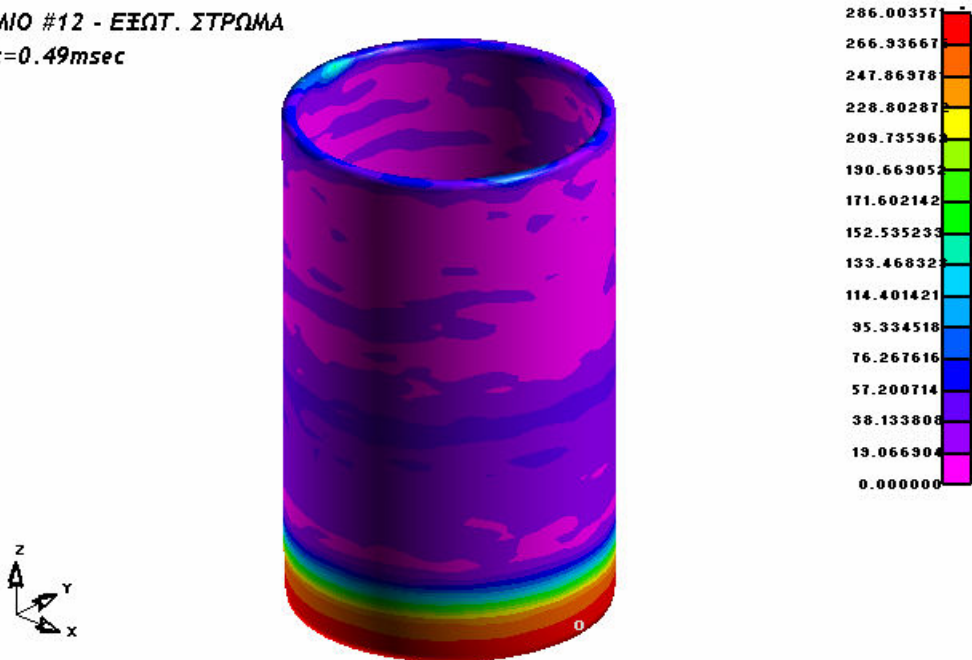
Διάγραμμα 4.12.4: Καμπύλη Φορτίου-Μετατόπισης για το Δοκίμιο #12

Στο διάγραμμα που προέκυψε από την επίλυση του μοντέλου διακρίνονται οι 3 φάσεις της κατεργασίας (Μεταβατική Φάση, Φάση Ευστάθειας, Ασταθής Φάση). Η μορφή της καμπύλης προσεγγίζει ως ένα βαθμό την αντίστοιχη καμπύλη που προέκυψε από την πειραματική διαδικασία, βλ. διάγραμμα 4.12. (Εξαιτίας διαφορετικής κλίμακας που χρησιμοποιείται στα δύο διαγράμματα, φαινομενικά εντοπίζονται μικροδιαφορές στην εμφάνιση της καμπύλης, ωστόσο με μια προσεκτικότερη εξέταση γίνεται φανερό ότι οι τιμές βρίσκονται σε αξιοσημείωτη αντιστοιχία).

Επίσης σημειώνεται το μέγιστο φορτίο διέλασης, δηλαδή 19.80kN, τιμή που προσεγγίζει κατά πολύ την αντίστοιχη πειραματική τιμή, δηλαδή τα 21.52kN, με απόκλιση μόλις 8.7%. Συνεπώς, από άποψη υπολογισμού φορτίου, η μοντελοποίηση κρίνεται ως ιδανική.

Τασικό Πεδίο

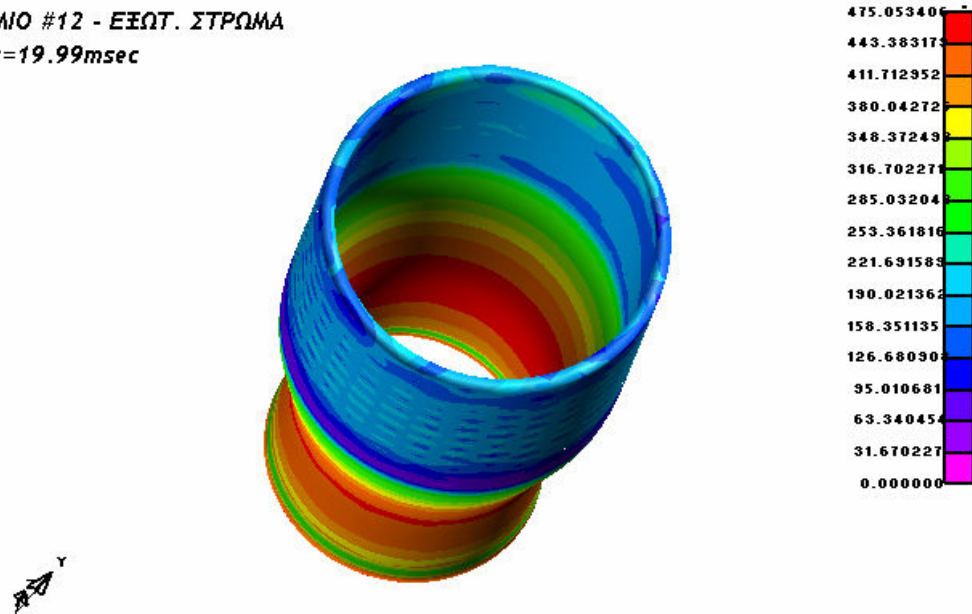
ΔΟΚΙΜΙΟ #12 - ΕΞΩΤ. ΣΤΡΩΜΑ
 $t=0.49msec$



Εικόνα 4.12.7: Ισοδύναμες τάσεις κατά von Mises για τον εξωτερικό σωλήνα κατά τη χρονική στιγμή $t=0.49msec$

Από την αναπαράσταση αυτή παρατηρείται, όπως είναι αναμενόμενο, ότι η μέγιστη τάση εμφανίζεται στην περιοχή όπου ο σωλήνας εισέρχεται στο κωνικό τμήμα της μήτρας. Η τάση αυτή υπολογίστηκε στα 266-286MPa περίπου. Επίσης, το τμήμα του δοκιμίου που βρίσκεται σε επαφή με το μέτωπο του εμβόλου καταπονείται και αυτό από τάση, περίπου 95-114MPa.

ΔΟΚΙΜΙΟ #12 - ΕΞΩΤ. ΣΤΡΩΜΑ
 $t=19.99msec$

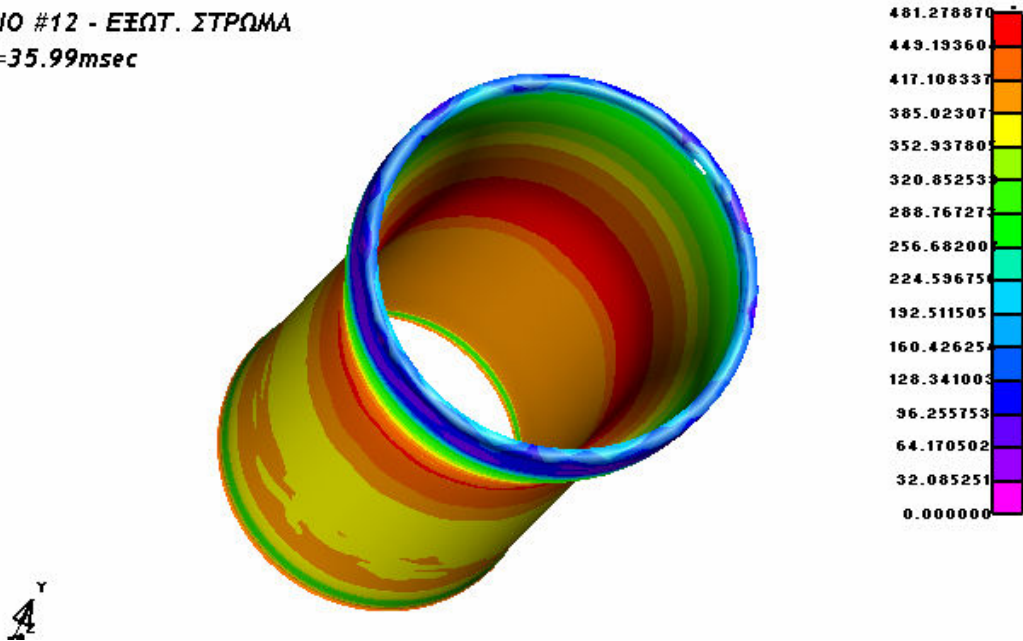


Εικόνα 4.12.8: Ισοδύναμες τάσεις κατά von Mises για τον εξωτερικό σωλήνα κατά τη χρονική στιγμή $t=19.99msec$

Στην εικόνα αυτή παρατηρείται ότι η μέγιστη τάση που καταπονεί τον εξωτερικό σωλήνα είναι περί τα 443-475MPa και παρουσιάζεται στην περιοχή του δοκιμίου που βρίσκεται στο κωνικό τμήμα της μήτρας και δη στην εσωτερική επιφάνεια του σωλήνα, καθώς αυτό το τμήμα βρίσκεται υπό τάση τόσο από τα τοιχώματα της μήτρας όσο και από τον εσωτερικό σωλήνα.

Επίσης, περιοχές οι οποίες έχουν ήδη υποστεί την κατεργασία της διέλασης καταπονούνται από αρκετά υψηλές τάσεις καθώς πιέζονται από τα τοιχώματα της εξόδου της μήτρας.

ΔΟΚΙΜΙΟ #12 - ΕΞΩΤ. ΣΤΡΩΜΑ
 $t=35.99msec$



Εικόνα 4.12.9: Ισοδύναμες τάσεις κατά von Mises για τον εξωτερικό σωλήνα κατά τη χρονική στιγμή $t=35.99msec$

Η εικόνα 4.12.9 παρουσιάζει την τελική εντατική κατάσταση του εξωτερικού σωλήνα, στην οποία παρατηρείται αρκετά ανομοιόμορφη κατανομή των τάσεων. Στην περιοχή που βρίσκεται μετά την έξοδο από το κωνικό τμήμα της μήτρας εμφανίζονται τάσεις περί τα 449-480MPa. Επίσης, το έμβολο ασκεί θλιπτικές τάσεις της τάξης των 192-224MPa στο άνω μέρος του σωλήνα.

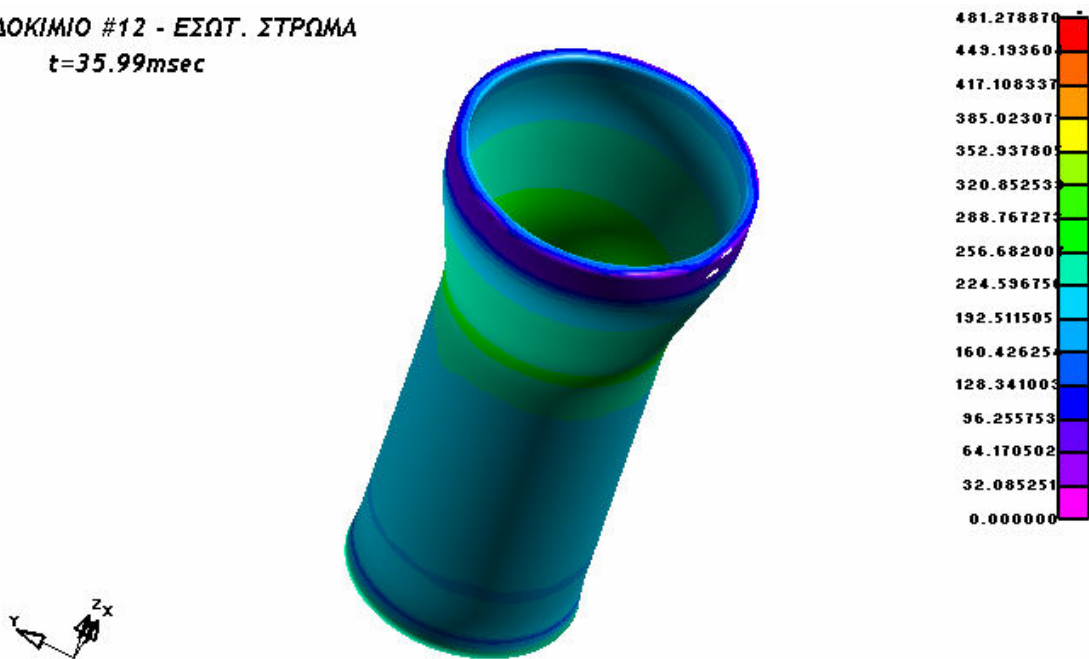
ΔΟΚΙΜΙΟ #12 - ΕΣΩΤ. ΣΤΡΩΜΑ
 $t=0.49msec$



Εικόνα 4.12.10: Ισοδύναμες τάσεις κατά von Mises για τον εσωτερικό σωλήνα κατά τη χρονική στιγμή $t=0.49msec$

Από την αναπαράσταση αυτή παρατηρείται, όπως είναι αναμενόμενο, ότι η μέγιστη τάση εμφανίζεται στην περιοχή όπου ο σωλήνας εισέρχεται στο κωνικό τμήμα της μήτρας. Η τάση αυτή υπολογίστηκε στα 171-190MPa περίπου. Επίσης, το τμήμα του δοκιμίου που βρίσκεται σε επαφή με το μέτωπο του εμβόλου καταπονείται και αυτό από τάση, αλλά πολύ μικρή, περίπου 57MPa.

ΔΟΚΙΜΙΟ #12 - ΕΣΩΤ. ΣΤΡΩΜΑ
 $t=35.99msec$

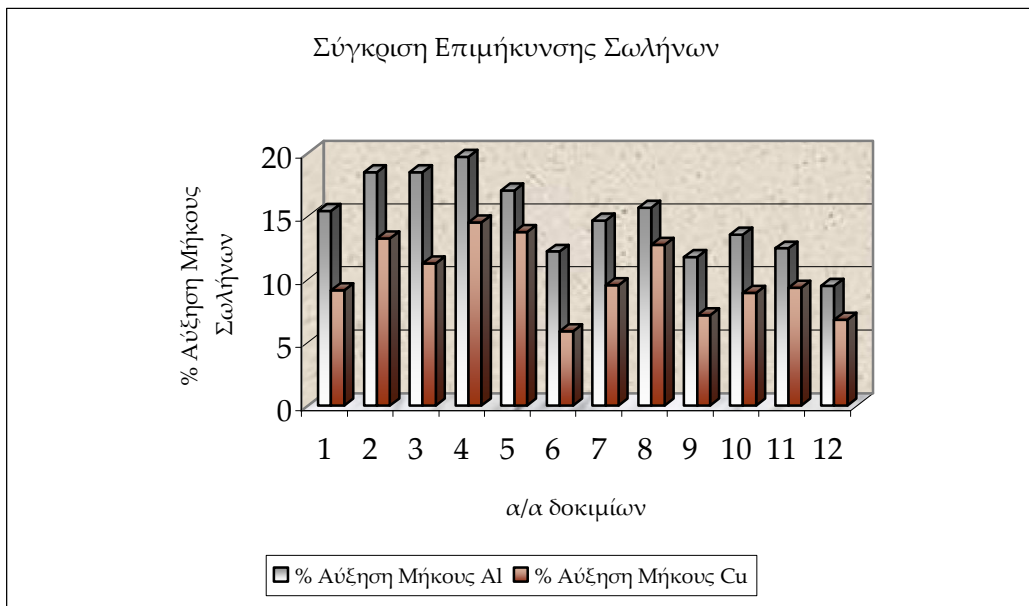


Εικόνα 4.12.11: Ισοδύναμες τάσεις κατά τον *von Mises* για τον εσωτερικό σωλήνα κατά τη χρονική στιγμή $t=35.99msec$

Η εικόνα 4.12.11 παρουσιάζει την τελική εντατική κατάσταση του εσωτερικού σωλήνα, στην οποία παρατηρείται αρκετά ομοιόμορφη κατανομή των τάσεων. Στην περιοχή που περισσότερο καταπονείται απαντώνται τάσεις περί τα 256-288MPa.

■ Η κατεργασία του δοκιμίου και η μορφή του πλέγματος καθ'όλη την διάρκεια της διαδικασίας έχει καταγραφεί σε video με τη βοήθεια του post-processor. Το video αυτό, καθώς και άλλα αρχεία που αφορούν στην μοντελοποίηση, στην επίλυση και στην εξαγωγή αποτελεσμάτων βρίσκονται στο dvd που συνοδεύει την εργασία στον αντίστοιχο φάκελο για το συγκεκριμένο δοκίμιο.

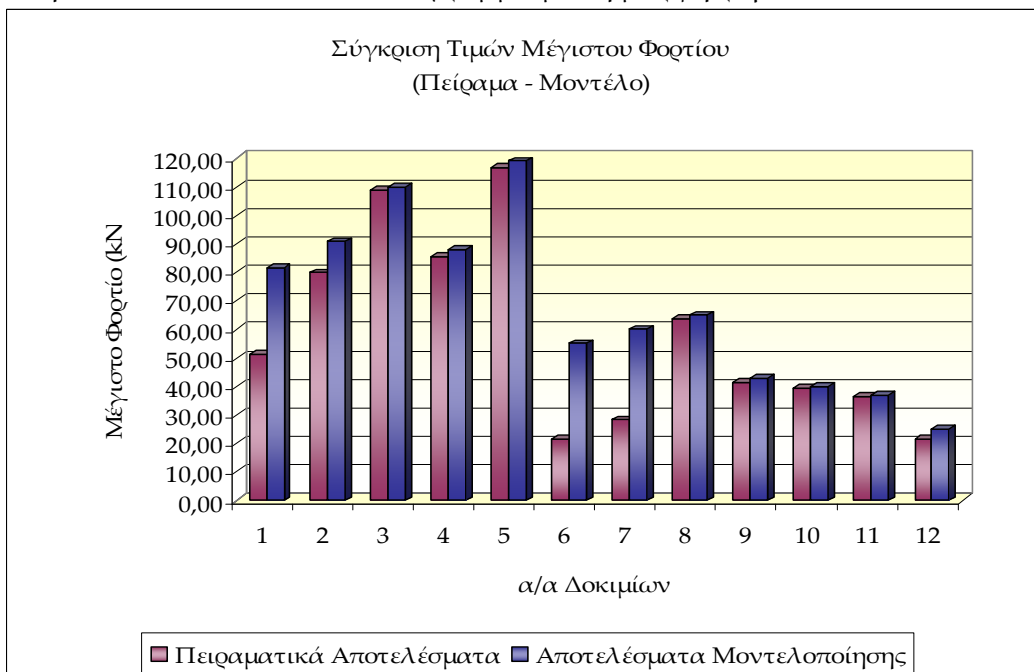
Στο ακόλουθο διάγραμμα παριστάνεται η σύγκριση της % αύξησης του μήκους των σωλήνων όπως προέκυψε από την αριθμητική προσομοίωση για τα 12 δοκίμια.



Το αντίστοιχο διάγραμμα για τα πειραματικά αποτελέσματα δίνεται στο κεφάλαιο 2, βλ. διάγραμμα 2.13.

Σημειώνεται ότι το ανωτέρω διάγραμμα προσφέρει απλά οπτικοποίηση των μετρήσεων που διεξήχθησαν μετά την εκτέλεση της προσομοίωσης της κατεργασίας και για τα 12 δοκίμια.

Μία σύγκριση των μέγιστων φορτίων μεταξύ της πειραματικής διαδικασίας και της αριθμητικής προσομοίωσης δίνεται στο ακόλουθο διάγραμμα με τη μορφή ράβδων:



Παρατηρείται ότι για τα δοκίμια #3, #4, #5, #8, #9, #10, #11 και #12 υπάρχει αξιοσημείωτη αντιστοιχία μεταξύ των τιμών μέγιστων φορτίων. Αυτό συμβαίνει επειδή έχουν εισαχθεί οι σωστές τιμές μηχανικών και φυσικών ιδιοτήτων των υλικών και των τιμών των συντελεστών τριβής. Ωστόσο, για τα δοκίμια #1, #2, #6 και #7 παρατηρούνται σημαντικές αποκλίσεις, κυρίως εξαιτίας εισαγωγής ανακριβών τιμών μηχανικών και φυσικών ιδιοτήτων του υλικού του εσωτερικού στρώματος.

Κεφάλαιο 5

Συζήτηση και Συμπεράσματα

5.0 Εισαγωγή

Ανακεφαλαιώνοντας κανείς όσα αναπτύχθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, συνειδητοποιεί πόσο σημαντική και συνάμα περίπλοκη είναι η επιτυχής προσέγγιση και προσομοίωση της κατεργασίας διέλασης διμεταλλικών σωλήνων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Στο κεφάλαιο αυτό παρατίθενται ομαδοποιημένα τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη μελέτη της πειραματικής και αριθμητικής προσομοίωσης της κατεργασίας διέλασης διμεταλλικών σωλήνων. Αφορούν μεν και την πειραματική διαδικασία, ωστόσο επικεντρώνονται στην αριθμητική προσομοίωση της κατεργασίας. Ακολουθούν μία σύντομη αναφορά σε αδυναμίες και πλεονεκτήματα της μεθόδου καθώς και προτάσεις για μελλοντικές επεκτάσεις. Η παρούσα διπλωματική εργασία ερεύνησε βασικές πτυχές των καθοριστικών για το αποτέλεσμα της προσομοίωσης παραμέτρων που διέπουν την κατεργασία και έγινε προσπάθεια, πέρα από την καταγραφή τους, να εισαχθούν οι όποιες παρατηρήσεις στον κώδικα ώστε να δημιουργηθεί ένα αξιόπιστο μοντέλο της κατασκευής και της κατεργασίας.

Από την μελέτη των αποτελεσμάτων της αριθμητικής προσομοίωσης της κατεργασίας διέλασης διμεταλλικών σωλήνων, επιβεβαιώθηκε η ισχύς όσων αναφέρονται στην σχετική βιβλιογραφία για το εν λόγω ζήτημα.

5.1 Γενικά Σχόλια

α) Ολίσθηση & Τριβή

Η μελέτη των χαρακτηριστικών επαφής μεταξύ των δύο σωλήνων αλλά και μεταξύ του διμεταλλικού δοκιμίου και της μήτρας και από την σχετική παραμετρική διερεύνηση προέκυψε ότι η τριβή είναι παράγοντας κεφαλαιώδους σημασίας για την τελική έκβαση της πειραματικής διαδικασίας αλλά και της αριθμητικής προσομοίωσης.

■ Από την μελέτη των παραμέτρων της μοντελοποίησης για κάθε ένα εκ των δοκιμίων χωριστά, έγινε φανερό ότι ο συντελεστής τριβής μεταξύ μεταλλικής μήτρας και διμεταλλικού σωλήνα επηρεάζει την καμπύλη φορτίου – μετατόπισης και ειδικά τις τιμές του φορτίου που αναπτύσσεται στο δοκίμιο. Αύξηση του συντελεστή αυτού οδηγεί σε αύξηση του φορτίου (ακόμα και κατά τάξη μεγέθους). Σε περιπτώσεις που για λόγους διερεύνησης επελέγησαν ιδιαίτερα υψηλές τιμές του εν λόγω συντελεστή (π.χ. $F_s=0.5$) επήλθε αστοχία και το τελικό δοκίμιο χαρακτηρίστηκε ως μη αποδεκτό.

■ Τα 2 στρώματα των σωλήνων ολισθαίνουν το ένα σε σχέση με το άλλο κατά την αξονική διεύθυνση του κυλίνδρου καθ'όλη τη διάρκεια της διέλασης. Υπάρχει μεταξύ τους τριβή με διαφορετικούς συντελεστές και συνεπώς οι αξονικές παραμορφώσεις διαφέρουν μεταξύ των 2 κυλίνδρων. Επίσης, αυτό ισχύει και λόγω του ότι τα υλικά διαφέρουν. Οπότε οποιαδήποτε μέτρηση μήκους ή πάχους σε μία μόνο θέση του δοκιμίου είναι απλά ενδεικτική της αξονικής ή ακτινικής παραμόρφωσης.

■ Ο συντελεστής τριβής στην διεπιφάνεια μεταξύ των παραμορφούμενων υλικών είναι σημαντικά μεγαλύτερος συγκριτικά με τον αντίστοιχο συντελεστή στην διεπιφάνεια μήτρας-μετάλλου (Συντελεστής στατικής τριβής μεταξύ στρωμάτων διμεταλλικού σωλήνα: 0.5 - Συντελεστής στατικής τριβής μεταξύ μήτρας και δοκιμίου: [0.05-0.11])

β) Χαρακτηριστικά Ροής

Προκειμένου να προκύψουν αποδεκτά τελικά προϊόντα, απαιτείται τα δύο προς διέλαση υλικά να έχουν όμοια ή παραπλήσια χαρακτηριστικά ροής, ώστε η κατάρρευση να είναι σχετικά ομοιόμορφη.

■ Τα δύο μέταλλα, δηλαδή ο χαλκός και το αλουμίνιο, εμφανίζουν παραπλήσια χαρακτηριστικά ροής, κάτι το οποίο είναι ιδιαίτερα σημαντικό για διμεταλλικά δοκίμια που υφίστανται την κατεργασία της διέλασης. Βέβαια, ο χαλκός παραμορφώνεται κατάτι περισσότερο σε πλάτος σε σχέση με το αλουμίνιο, το οποίο παραμορφώνεται κατάτι περισσότερο κατά μήκος σε σχέση με τον χαλκό. Κατά τη διάρκεια της διέλασης των σύνθετων ράβδων η διαφορά αυτή που παρουσιάζεται ανάμεσα στις τάσεις ροής των μετάλλων προκαλεί μερικές φορές την αύξηση της μεταβλητότητας του λόγου των επιφανειών διατομής των προϊόντων, ο οποίος μπορεί να διαφέρει σε πολύ μεγάλο βαθμό από τον αρχικό λόγο, πριν από την πραγματοποίηση της κατεργασίας.

■ Η όποια ανομοιογένεια στην ταχύτητα ροής του διμεταλλικού στρώματος μειώνεται κοντά στα τοιχώματα της μήτρας εξαιτίας των δυνάμεων τριβής που αναπτύσσονται, καθώς επίσης και εξαιτίας της αύξησης της αντίστασης ροής του εξωτερικού στρώματος.

■ Κατά τη διάρκεια της διέλασης το εσωτερικό στρώμα είναι σαν να διέρχεται μέσω νέου καλουπιού που αποτελούν η μήτρα και το εξωτερικό στρώμα μαζί.

γ) Ανάπτυξη Τάσεων

Το πεδίο τάσεων των δοκιμίων που υφίστανται την κατεργασία της διέλασης αναλύθηκε στο 7ο Κεφάλαιο για καθένα εκ των δοκιμίων ξεχωριστά.

■ Ο λόγος των τάσεων διαρροής των 2 υλικών αποδείχτηκε η πιο κρίσιμη παράμετρος της διαδικασίας για την παραγωγή αποδεκτών προϊόντων. Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι στις περιπτώσεις των δοκιμίων #1, #2, #6 και #7 παρουσιάστηκαν προβλήματα τόσο στη μορφή του τελικού προϊόντος όσο και στα μεγέθη που το αφορούν. Τα προβλήματα αυτά εμφανίστηκαν και στα πειράματα και στην αριθμητική προσομοίωση. Σχετίζονταν δε με ανωμαλίες στην καμπύλη φορτίου-μετατόπισης, καθώς η μορφή της δεν ήταν η τυπική της διέλασης, με αυξημένες τάσεις και έντονη παραμόρφωση πλέγματος, κυρίως του άνω τμήματος του δοκιμίου. Επιβεβαιώνεται λοιπόν ότι υψηλότερες τάσεις, ειδικά στη διεπιφάνεια εξόδου της μήτρας παρουσιάζονται όταν ο λόγος των ορίων διαρροής των 2 υλικών αυξάνεται. Λόγοι που υπερβαίνουν το 3.5 δεν συστήνονται.

δ) Πειραματικά αποτελέσματα

Κατά την παρατήρηση των δοκιμίων που προέκυψαν από τις πειραματικές δοκιμές προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

■ Σε όλα τα δοκίμια παρατηρείται έντονη παραμόρφωση, κυρίως του εσωτερικού στρώματος και στο επάνω μέρος του δοκιμίου εξαιτίας της ανάπτυξης ισχυρών θλιπτικών φορτίων στην περιοχή αυτή καθ'όλη τη διάρκεια της κατεργασίας. Αυτό το τμήμα του δοκιμίου δεν υφίσταται διέλαση, αλλά μόνο συμπίεση (σφυρηλάτηση).

■ Επίσης, προέκυψε το συμπέρασμα ότι θα ήταν πιο ομαλή η παραμόρφωση του εσωτερικού στρώματος εάν η μήτρα διέθετε βύσμα (mandrel) στην έξοδο της. Τότε το εσωτερικό στρώμα δεν θα παραμορφώνονταν ελεύθερα κατά το πάχος και η εσωτερική διάμετρος του σωλήνα θα ήταν εξ' αρχής ορισμένη.

■ Το πάχος του εξωτερικού στρώματος είναι σταθερό στην αρχική φάση της κατεργασίας, ακολουθεί ένα χρονικό διάστημα ταχείας παραμόρφωσης κατά το πάχος (αύξηση) και ακολουθεί σταθεροποίηση του λίγο πριν το τέλος της κατεργασίας. Η σταθερότητα αυτή οφείλεται στην επαφή του εξωτερικού στρώματος με τα τοιχώματα της μήτρας από την μια μεριά και την επαφή με το εσωτερικό στρώμα από την άλλη.

ε) Πλεονεκτήματα & περιορισμοί της μεθόδου αριθμητικής προσομοίωσης

Το πλεονέκτημα της μεθόδου μοντελοποίησης της κατεργασίας με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων σε σχέση με την πειραματική διαδικασία έγκειται στο ότι προσφέρει άμεσα αποτελέσματα που σχετίζονται με τάσεις και παραμορφώσεις, καθώς και άλλα μεγέθη που πιθανόν ενδιαφέρουν, με λεπτομέρεια και ακρίβεια. Ακόμη και αν η μοντελοποίηση δεν κρίνεται ως ιδανική από κάποιες απόψεις, σίγουρα η εικόνα των μεγεθών που προσφέρεται μπορεί να αποδειχτεί ιδιαίτερα κατατοπιστική.

Τα στάδια της διέλασης είναι ιδιαίτερα ακριβή υπό την προϋπόθεση ότι έχουν εισαχθεί σωστά οι τιμές των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών και η γεωμετρία είναι ακριβής.

Η αλλαγή οποιωνδήποτε παραμέτρων είναι εύκολη και γρήγορη, οπότε δίνεται η δυνατότητα πειραματισμού ώστε να βρεθεί ο βέλτιστος τρόπος επίλυσης από πλευράς ακρίβειας αποτελεσμάτων και από πλευράς κόστους. Η παραμετρική αυτή μελέτη προσφέρει καλύτερη και βαθύτερη κατανόηση της μηχανικής της διέλασης διμεταλλικών σωλήνων.

Ωστόσο, ο βασικός περιορισμός της μεθόδου αριθμητικής προσομοίωσης με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων έγκειται στο ότι προς το παρόν, εάν δεν υπάρχουν ανάλογες εργαστηριακές μετρήσεις δεν μπορεί να ελεγχθεί η εγκυρότητα των αποτελεσμάτων. Και σε αυτήν την περίπτωση όμως, υπό την προϋπόθεση ότι έχουν εισαχθεί σωστά τα δεδομένα και έχουν χρησιμοποιηθεί οι κατάλληλες τιμές των κρίσιμων παραμέτρων της κατεργασίας, τα αποτελέσματα πιθανότατα είναι ενδεικτικά της πραγματικής κατάστασης.

Πέραν αυτού, τίθενται περιορισμοί στον αριθμό των πεπερασμένων στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν για την μοντελοποίηση της γεωμετρίας της κατασκευής, ώστε να διατηρηθεί σε χαμηλά επίπεδα το υπολογιστικό κόστος (χρόνος επίλυσης). Συνέπεια αυτού είναι ότι γίνονται αντίστοιχες «εκπτώσεις» στην ακρίβεια των τελικών αποτελεσμάτων, γι' αυτό και πρέπει πάντα να γίνεται μία εκ των προτέρων ανάλυση αναφορικά με το ποια στοιχεία είναι ζωτικού ενδιαφέροντος και άρα πρέπει να μοντελοποιηθούν λεπτομερώς και ποια στοιχεία επιδέχονται επιπλέον απλοποιητικές παραδοχές.

Στα πλαίσια μιας διπλωματικής εργασίας και στα χρονικά όρια που η εκπόνησή της συνεπάγεται, δεν κρίθηκε σκόπιμο να αυξηθεί περαιτέρω ο βαθμός διακριτοποίησης, διότι όπως ήδη έγινε φανερό από το Κεφάλαιο 4, τα αποτελέσματα ανταποκρίνονται στην πειραματική διαδικασία σε ιδιαίτερα ικανοποιητικό βαθμό. Σε περίπτωση όμως ερευνητικής εργασίας της οποίας ο χρονικός ορίζοντας το επιτρέπει, θα είχε ενδιαφέρον να εξετάσει κανείς εάν με αύξηση του βαθμού διακριτοποίησης θα επιτυγχάνονταν προσομοίωση της πειραματικής διαδικασίας με μεγαλύτερη ακρίβεια.

5.2 Επικύρωση Αποτελεσμάτων Προσομοίωσης

Η επικύρωση του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων που αναπτύχθηκε πραγματοποιήθηκε με άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων της αριθμητικής και της πειραματικής προσομοίωσης και με οπτικές παρατηρήσεις των δοκιμίων που προέκυψαν από την πειραματική διαδικασία. Στην δημιουργία των μοντέλων χρησιμοποιήθηκε η ίδια γεωμετρία και δομή των δοκιμίων που χρησιμοποιήθηκε στις πειραματικές δοκιμές.

Έγινε προσπάθεια ώστε οι φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των υλικών, που εισήχθησαν κατά την μοντελοποίηση, να ταυτίζονται με τις πραγματικές, ωστόσο αυτό δεν ήταν εφικτό σε όλες τις περιπτώσεις. Παρά την αδυναμία ακριβούς προσδιορισμού των ιδιοτήτων αυτών, εισήχθησαν τιμές που θεωρείται ότι προσεγγίζουν τις πραγματικές σε ικανοποιητικό βαθμό. Μία άλλη διαφορά ανάμεσα στην πειραματική διαδικασία και την αριθμητική προσομοίωση εντοπίζεται στην ταχύτητα πρόωσης του εμβόλου. Στις δοκιμές η ταχύτητα αυτή ήταν σημαντικά μικρότερη σε σχέση με την εικονική ταχύτητα πρόωσης. Έγινε διερεύνηση προκειμένου να βρεθεί εκείνη η ταχύτητα για την οποία όταν μειωθεί ο χρόνος υπολογισμού, η μέθοδος θα αποβεί συμφέρουσα από άποψη υπολογιστικού κόστους και τα αποτελέσματα δεν θα ενέχουν σφάλματα.

Δεν υπήρξε δυνατότητα οπτικής παρακολούθησης της πειραματικής διαδικασίας, ώστε να υπάρχει εικόνα της ενδιάμεσης φάσης της κατεργασίας για κάθε δοκίμιο. Υπάρχει μόνο η τελική μορφή των δοκιμίων διαθέσιμη ώστε να συγκριθεί με την αντίστοιχη μορφή της αριθμητικής προσομοίωσης. Είναι αξιοσημείωτο το γεγονός ότι αυτές οι δύο εικόνες για καθένα δοκίμιο είναι εντελώς όμοιες. Οπότε καθίσταται σαφές ότι ο μηχανισμός παραμόρφωσης και τα χαρακτηριστικά τα οποία παρατηρήθηκαν από μακροσκοπικής πλευράς προσομοιώθηκαν σε ιδιαίτερα ικανοποιητικό βαθμό από το αναπτυχθέν μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων.

Ένα άλλο χαρακτηριστικό το οποίο αποτέλεσε μέσο σύγκρισης ήταν ο πίνακας των μέγιστων φορτίων για κάθε δοκίμιο (από το πείραμα και το μοντέλο). Από τον πίνακα αυτό, ο οποίος παρουσιάστηκε με τη μορφή διαγράμματος στο τέλος του κεφαλαίου 4, γίνεται αντιληπτό ότι οι τιμές βρίσκονται σε αντιστοιχία, εξαιρουμένων των δοκιμίων #1, #2, #6 και #7, όπου λόγω ανακριβών τιμών των ιδιοτήτων του υλικού του εσωτερικού σωλήνα, οι τιμές των φορτίων διαφέρουν.

Τέλος, ένα εξέχον χαρακτηριστικό και μέσο σύγκρισης υπήρξε το διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης (πειραματική καμπύλη και αντίστοιχο διάγραμμα που παρήχθη από το πρόγραμμα των πεπερασμένων στοιχείων). Υπάρχει ιδιαίτερα ικανοποιητική προσέγγιση των πειραματικών αποτελεσμάτων από το μοντέλο, τόσο από άποψη μορφής της καμπύλης, όσο και από άποψη ζευγών τιμών. Όπου παρατηρούνται κάποιες έντονες διακυμάνσεις στις καμπύλες του προγράμματος, αυτό οφείλεται στον υψηλό βαθμό διακριτοποίησης, κάτι που ήταν απολύτως απαραίτητο ώστε να ληφθούν όσο το δυνατόν πιο ακριβή αποτελέσματα. Το γεγονός ότι τα εκάστοτε διαγράμματα παρουσιάζουν αυτές τις ομοιότητες είναι ιδιαίτερα σημαντικό, καθώς αποδεικνύει ότι το μοντέλο της προσομοίωσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά για τον ακριβή υπολογισμό ορισμένων κρίσιμων παραμέτρων της κατεργασίας και επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως άριστο προπαρασκευαστικό εργαλείο για την επιλογή συνδυασμών υλικών των προς συνδιέλαση σωλήνων και των συνθηκών διέλασης για την παραγωγή αποδεκτών διμεταλλικών σωλήνων, προτού ξεκινήσουν οι δαπανηρές, τόσο από άποψη υλικών όσο και από άποψη χρόνου, πραγματικές δοκιμές, δεδομένου ότι παρέχει

χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με τη μορφή και τις παραμορφώσεις που δέχεται ένα δοκίμιο ανάλογα με τις μηχανικές και φυσικές ιδιότητες των μετάλλων που το αποτελούν.

Όλα αυτά βέβαια υπό την προϋπόθεση ότι έχουν εισαχθεί οι ακριβέστερες δυνατές τιμές των ιδιοτήτων των υλικών πρωτίστως και κάποιων άλλων παραμέτρων (π.χ. συντελεστές τριβής) δευτερευόντως.

Τυχόν αποκλίσεις που παρατηρούνται μπορούν να αποδοθούν στους ακόλουθους παράγοντες:

- Οι οριακές συνθήκες (κυρίως οι τριβές) στις οποίες δεν ήταν διαθέσιμες ακριβείς πληροφορίες για την εισαγωγή τους στον κώδικα του LS-DYNA και επελέγησαν κάποιες τιμές σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, διαμορφώνουν τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης.

- Σημαντικό ρόλο διαδραματίζει η κινηματική ακρίβεια του πειραματικού εξοπλισμού.

- Τέλος, διαφορές πιθανότατα προκύπτουν και από το γεγονός ότι στο πρόγραμμα Πεπερασμένων Στοιχείων LS-DYNA μοντελοποιείται ένα δυναμικό φαινόμενο ενώ στο πείραμα η καταπόνηση είναι στατική.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία η σύγκριση των εκάστοτε μοντέλων με τα πειραματικά δεδομένα υπέδειξαν συμφωνία των αποτελεσμάτων, γεγονός που αποδεικνύει την αξιοπιστία και εγκυρότητα της ερευνητικής διαδικασίας που αναπτύσσεται στο παρόν σύγγραμμα.

5.3 Πιθανές Επεκτάσεις

Η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων τα τελευταία έτη έχει διαγράψει λαμπρή πορεία στο χώρο της προσομοίωσης των κατασκευών και χρησιμοποιείται ευρύτατα για την μοντελοποίηση και αριθμητική προσομοίωση πολλών κατεργασιών των υλικών, συμβατικών και μη. Είναι σαφές ότι το μέλλον μόνο θετικές εξελίξεις μπορεί να υποσχεθεί στον τομέα αυτό. Ειδικά δε για την μοντελοποίηση και προσομοίωση της κατεργασίας διέλασης, εκτός από την συνδιέλαση διμεταλλικών σωλήνων, πεδίο που πραγματεύτηκε η παρούσα εργασία, ενδιαφέρον παρουσιάζει η εκ του μηδενός μοντελοποίηση ή/και βελτίωση των υπαρχόντων μοντέλων:

- Διέλασης πολυστρωματικών μεταλλικών σωλήνων
- Διέλασης πολυστρωματικών σωλήνων από προηγμένα υλικά (πολυμερή, κεραμικά κλπ)
- Διέλασης διμεταλλικών αγωγών μικρής διατομής (π.χ. καλώδια)

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Έντυπη Βιβλιογραφία

- [1] **A.G.Mamalis, G.L.Petrosyan, D.E.Manolakos, M.B.Safaryan & H.G.Petrosyan:**
On the Processing through Conical Dies of Bimetallic Tubes Under Various Contact Conditions between Layers
- [2] **A.G.Mamalis, G.L.Petrosyan, D.E.Manolakos, M.B.Safaryan & H.G.Petrosyan:**
Investigation of Bimetallic Tubes Manufacturing Processes in cases of Different Conditions of Contact Between Layers
- [3] **A.G.Mamalis, G.L.Petrosyan, D.E.Manolakos & H.G.Petrosyan:**
Determination of Initial Compression Stresses when Extruding Bimetallic Tubes with Porous Internal Layer, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 172 (2006), pp. 277-282
- [4] **A.G.Mamalis, G.L.Petrosyan, D.E.Manolakos & A.F. Hambardzumyan:**
Mathematical Modelling of Plastic Deformation Processes of Bimetallic Tubes with Porous Internal Layer in Conical Dies, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 172 (2006), pp. 243-248
- [5] **A.G.Mamalis, A. Szalay, N.M.Vaxevanidis & D.E.Manolakos:**
Fabrication of Bimetallic Rods by Explosive Cladding and Warm Extrusion, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 83 (1998), pp. 48-53
- [6] **A.G.Mamalis:**
Near net-shape manufacturing of bulk ceramic high-Tc superconductors for application in electricity and transportation, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 108 (2001), pp. 126-140
- [7] **A.G. Mamalis, N.M. Vaxevanidis, A. Szalay, J. Prohaszka:**
Fabrication of aluminium/copper bimetals by explosive cladding and rolling, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 44 (1994), pp. 99-117
- [8] **A.G. Mamalis, D.E. Manolakos, M.B. Ioannidis, P.K. Kostazos:**
Crushing of hybrid square sandwich composite vehicle hollow bodyshells with reinforced core subjected to axial loading: numerical simulation, *Composite Structures*, Vol. 61 (2003), pp. 175-186
- [9] **A.G. Mamalis, D.E. Manolakos, M.B. Ioannidis, P.K. Kostazos, D.P. Papapostolou:**
Axial collapse of hybrid square sandwich composite tubular components with corrugated core: numerical modelling, *Composite Structures*, Vol. 58 (2002), pp. 571-582
- [10] **Αθ. Μάμαλης:**
Κατεργασίες των υλικών Ι, Αθήνα 1998
- [11] **A.K.Tayal & R.Natarajan:**
A Finite Element Analysis of Axisymmetric Extrusion of Composite Rods, *International Journal Mach. Tool Des. Res.*, Vol. 21 (1981), pp. 227-235, Pergamon Press Ltd.
- [12] **Α.Κανάραχος, Χρ. Προβατίδης:**
Πεπερασμένα στοιχεία στη μηχανολογία, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα 2000.

- [13] **Δ.Ε.Μανωλάκος:**
Κατεργασίες Ι, Σημειώσεις Παραδόσεων, Αθήνα 2004
- [14] **Θ. Διαμαντούδης:**
Συγκολλήσεις Μετάλλων
- [15] **Θ. Γ.Κατσάνος:**
Μελέτη της διαμορφωσιμότητας διμεταλλικών σωλήνων μέσω διέλασης, Μεταπτυχιακή Εργασία, Αθήνα 2004.
- [16] **J.L.Alcaraz:**
Instabilities in Bimetallic Layers, International Journal of Plasticity, Vol. 15 (1999), pp. 1341-1358
- [17] **J.L. Alcaraz & J.Gil-Sevillano:**
An Analysis of the Extrusion of Bimetallic Tubes by Numerical Simulation, International Journal Mech. Sci. Vol. 38 (1996), pp. 157-173
- [18] **J.L.Alcaraz & J.M.Martinez-Esnaola:**
An Analytical Approach to the Stress Field in the Extrusion of Bimetallic Tubes, International Journal Solids Structures, Vol. 33 (1996),pp. 2075-2093, Pergamon Press Ltd.
- [19] **Knut Tersmeden:**
Bimetallic Tubing as an Answer to Process Tubing Corrosion, Anti-Corrosion Methods & Materials, Vol. 44 (1997), pp. 269-270
- [20] **M.I.Chepurko, G.A.Legavets, E.A.Reznikov, V.P.Konovalov, A.M.Buinovskii & V.S.Smorshckov:**
Manufacture of Bimetallic Tubes, UDC 621.774.5
- [21] **N.R.Chitkara & A. Aleem:**
Extrusion of Axi-symmetric Bimetallic Tubes from Solid Circular Billets: Application of a generalised upper bound analysis and some experiments, International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 43 (2001), pp. 2833-2856
- [22] **Office of Industrial Technologies:**
Energy Efficiency and Renewable Energy- U.S.Department of Energy: Physical and Numerical Analysis of extrusion Process for Production of Bimetal Tubes
- [23] **Π.Α.Βουθούνης**
Τεχνική Μηχανική – Αντοχή των Υλικών, Ζ' Έκδοση, Αθήνα 2002
- [24] **S.Berski, H.Dyja, A.Maranda, J.Nowaczewski & G. Banaszek:**
Analysis of Quality of Bimetallic Rod after Extrusion Process, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 177 (2006), pp. 582-586
- [25] **User's manual, LS-DYNA Keyword Manual, Vol 1&2**

[26] V.Y.Ostrenko, M.I.Chepurko, A.M.Buinovskii, P.M. Yushkevich, N.S.Kirvalidze, N.S.Ykimenko, P.I.Sherlin, Y.M.Egorov, Y.A.Sosnitskii:
Production of Bimetallic Tubes, UDC 621.774.5

[27] Wenquan Zhang, Jianxin Xie & Congzeng Wang:
Fabrication of multilayer 316L/PSZ Gradient Composite Pipes by means of Multi-billet Extrusion, Materials Science and Engineering A, Vol. 382 (2004), pp. 371–377

[28] Zhongchun Chen, Keisuke Ikeda, Tadasu Murakami, Jian-Xin Xie & Takenobu Takeda:
Fabrication of Composite Pipes by Multi-billet Extrusion Technique, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 137 (2003), pp. 10-16

[29] Zhongchun Chen, Keisuke Ikeda, Tadasu Murakami & Takenobu Takeda:
Extrusion Behavior of Metal-Ceramic Composite Pipes in Multi-billet Extrusion Process, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 114 (2001), pp. 154-160.

2. Ηλεκτρονικές Πηγές:

[e1] http://www.roymech.co.uk/Useful_Tables/Tribology/co_of_frict.htm

[e2] <http://www.engin.brown.edu/courses/en3/Notes/Statics/friction/friction.htm>

[e3] <http://www.tribology-abc.com>

[e4] <http://www.hydro.com/upload/documents/tonder/uk.pdf>

Παράρτημα 1

Πίνακας Ιδιοτήτων ΑΙ 6063 F25

Π.1.0 Εισαγωγή

Στο παρόν παράρτημα επισυνάπτεται ένας πίνακας στον οποίο αναφέρονται οι ιδιότητες του τυποποιημένου κράματος αλουμινίου Al 6063 F25.

Π.1.1 Πίνακας Ιδιοτήτων Al 6063 F25.

Profile specifications UK

Description		Chemical composition ¹⁾							
EN 573-3	(DIN 1725-1) withdrawn	Min. Max.	Si%	Fe%	Mn%	Mg%	Cr%	Zn%	Cu%
EN AW-6060/ Al MgSi	AlMgSi0.5	Min. Max.	0.30-0.60	0.10-0.30	0.10	0.35-0.60	0.05	0.15	0.10
EN AW-6063/ Al Mg0.7Si	AlMg0.7Si	Min. Max.	0.20-0.60	0.35	0.10	0.45-0.90	0.10	0.10	0.10
EN AW-6005 A/ Al SiMg(A)	AlMgSi0.7	Min. Max.	0.50-0.90	0.35	0.50	0.40-0.70	0.30	0.20	0.30
EN AW-6062/ Al SiMgMn	AlMgSi1	Min. Max.	0.70-1.30	0.50	0.40-1.0	0.60-1.20	0.25	0.0-0.02	0.10

1) If only 1 value is stated this is the maximum value

Description			Mechanical properties ²⁾						
EN 573-3	F-Strength	(DIN 1725-1) withdrawn	Rm (MPa)	Rp0.2 (MPa)	A5%	A10%	HB (kp/mm ²)	WB	Water quench / mm wall thickness ³⁾
EN AW-6060 TF	F22	AlMgSi0.5	215	160	12	10	70-80	11	> 10 mm
EN AW-6060 TB	-	AlMgSi0.5	130-215	65-160	15	13	45	8-11	> 10 mm
EN AW-6060 SP1	F17-F21	AlMgSi0.5	170-210	70-150	12	10	62-70	7-10	> 10 mm
EN AW-6060 SP2	F17-F21	AlMgSi0.5	170-210	70-150	15	13	62-70	7-10	> 10 mm
EN AW-6060 SP3	F22	AlMgSi0.5	215	160	12	10	70-75	11	> 10 mm
EN AW-6063 TF	F25	AlMg0.7Si	245	195	10	8	75-91	14	> 6 mm
EN AW-6063 TB	-	AlMg0.7Si	130	65	15	-	45-50	8-10	> 6 mm
EN AW-6063 SP4	F22	AlMg0.7Si	215	160	12	10	70-75	11	> 6 mm
EN AW-6005 TF	F27	AlMgSi0.7	270	225	8	6	90-110	15	> 5 mm
EN AW-6062 TF	F28	AlMgSi1	275	200	12	10	80-100	15	> 2.5 mm
EN AW-6062 SP10	F31	AlMgSi1	310	260	8	8	95-120	16	> 2.5 mm
EN AW-6062 TB	F21	AlMgSi1	205	110	14	12	65	9-15	> 2.5 mm

2) If only 1 value is stated this is the minimum value

3) = Water quenching depends on the wall thickness of the profile. Water quenching will reduce the value of the surface quality.

Παράρτημα 2

Εντολές Κώδικα LS-DYNA

Π.2.0 Εισαγωγή

Στο παρόν παράρτημα παρουσιάζονται οι εντολές που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή της γεωμετρίας των μοντέλων εργαλείου-δοκιμίων κατά την εισαγωγή τους στον Pre-Processor, καθώς επίσης και οι εντολές που καθορίζουν τις παραμέτρους επίλυσης.

Π.2.1 Γεωμετρία Μοντέλων

Μοντελοποίηση Εμβόλου

Part > Create Part > RAM

Εξωτερική Επιφάνεια:

*Line > Create > Arc > About a center
12.5,0,90,0*

Εσωτερική Επιφάνεια:

*Line > Create > Arc > About a center
2.5,0,90,0*

Μεταφορά στο 0,0,40 και δημιουργία άνω επιφάνειας:

Line > Copy > Translate > Select All > Displayed > Translate > Global Coordinate System > 0,0,20

Ένωση τεταρτημορίου:

Line > Create > Lines

Αντικατοπτρισμός τεταρτημορίου:

Line > Mirror > Select All > Displayed > Mirror > Define > Pick a point > W along Z axis > UW plane

Line > Mirror > Select All > Displayed > Mirror > Define > Pick a point > W along Z axis > VW plane

Μοντελοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία:

Element > Plate/Solid Mesh > 12 line solid mesh > 2,16,16

Επιλογή Υλικού:

*Material > Create > Structural > 20.1 (mat_rigid)
 $\rho=0,00783\text{gr/mm}^3$, $E=207.000\text{MPa}$, $\nu=0.28$, $\text{CMO}=1$, $\text{CON1}=4$ (κίνηση μόνο κατά τον Z), $\text{CON2}=7$*

Material > Assign

Μοντελοποίηση Μήτρας

Part > Create Part > DIE

■ Είσοδος Μήτρας:

Εξωτερική Επιφάνεια:

*Line > Create > Arc > About a center
45,0,90,0*

Εσωτερική Επιφάνεια:

*Line > Create > Arc > About a center
12.5,0,90,0*

Δημιουργία άνω επιφάνειας:

Line > Copy > Translate > Select All > Displayed > Translate > Global Coordinate System > 0,0,67

Ένωση τεταρτημορίου:

Line > Create > Lines

Αντικατοπτρισμός τεταρτημορίου:

Line > Mirror > Select All > Displayed > Mirror > Define > Pick a point > W along Z axis > UW plane

Line > Mirror > Select All > Displayed > Mirror > Define > Pick a point > W along Z axis > VW plane

Μοντελοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία:

Element > Plate/Solid Mesh > 12 line solid mesh > 4,16,14

■ Κωνικό Τμήμα Μήτρας:

Εξωτερική Επιφάνεια:

*Line > Create > Arc > About a center
45,0,90,0*

Εσωτερική Επιφάνεια:

*Line > Create > Arc > About a center
12.5,0,90,0*

Δημιουργία κάτω επιφάνειας:

*Line > Create > Arc > About a center
10,0,90,0*

*Line > Create > Arc > About a center
45,0,90,0*

Μεταφορά στο 0,0,-9,26 (γωνία 15°)

Line > Copy > Translate > Select by Region > Translate > Global Coordinate System > 0,0,-9,26

Ένωση τεταρτημορίου:

Line > Create > Lines

Αντικατοπτρισμός τεταρτημορίου:

Line > Mirror > Select All > Displayed > Mirror > Define > Pick a point > W along Z axis > UW plane

Line > Mirror > Select All > Displayed > Mirror > Define > Pick a point > W along Z axis > VW plane

Μοντελοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία:

Element > Plate/Solid Mesh > 12 line solid mesh > 4,16,2

Έξοδος Μήτρας:

Εξωτερική Επιφάνεια:

*Line > Create > Arc > About a center
45,0,90,0*

Εσωτερική Επιφάνεια:

*Line > Create > Arc > About a center
10,0,90,0*

Δημιουργία άνω επιφάνειας:

Line > Copy > Translate > Select All > Displayed > Translate > Global Coordinate System > 0,0,-57.74

Ένωση τεταρτημορίου:

Line > Create > Lines

Αντικατοπτρισμός τεταρτημορίου:

Line > Mirror > Select All > Displayed > Mirror > Define > Pick a point > W along Z axis > UW plane

Line > Mirror > Select All > Displayed > Mirror > Define > Pick a point > W along Z axis > VW plane

Μοντελοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία:

Element > Plate/Solid Mesh > 12 line solid mesh > 4,16,12

Επιλογή Υλικού:

Material > Create > Structural > 20.1 (mat_rigid)

$\rho=0,00783\text{gr/mm}^3$, $E=207.000\text{MPa}$, $\nu=0.28$, $\text{CMO}=1$, $\text{CON1}=7$ (πλήρης ακινησία), $\text{CON2}=7$

Material > Assign

Μοντελοποίηση Εσωτερικού / Εξωτερικού Σωλήνα

Part > Create Part > TUBE_IN / TUBE_OUT

Εξωτερική Επιφάνεια:

Line > Create > Arc > About a center

Διαστάσεις σύμφωνα με τον πίνακα 2.1

Εσωτερική Επιφάνεια:

Line > Create > Arc > About a center

Διαστάσεις σύμφωνα με τον πίνακα 2.1

Line > Copy > Translate > Select All > Displayed > Translate > Global Coordinate System > 0,0,40

Ένωση τεταρτημορίου:

Line > Create > Lines

Αντικατοπτρισμός τεταρτημορίου:

Line > Mirror > Select All > Displayed > Mirror > Define > Pick a point > W along Z axis > UW plane

Line > Mirror > Select All > Displayed > Mirror > Define > Pick a point > W along Z axis > VW plane

Μοντελοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία:

Element > Plate/Solid Mesh > 12 line solid mesh > 2,16,80

Επιλογή Υλικού Εξωτερικού Σωλήνα:

Material > Create > Structural > 24.1 (mat_piecewise linear plasticity)

$r=0,008913\text{gr/mm}^3$, $E=119.000\text{MPa}$, $\nu=0.35$

$\text{sigy}=266\text{MPa}$

Ζεύγη τιμών τάσης-παραμόρφωσης σύμφωνα με τον πίνακα 3.2

Material > Assign

Επιλογή Υλικού Εσωτερικού Σωλήνα:

Material > Create > Structural > 24.1 (mat_piecewise linear plasticity)

$r=0,0027\text{gr/mm}^3$, $E=70.000\text{MPa}$, $\nu=0.34$

$\text{sigy}=160\text{MPa}$

Ζεύγη τιμών τάσης-παραμόρφωσης σύμφωνα με τον πίνακα 3.3 / 3.4

Material > Assign

Π.2.2 Καθορισμός Παραμέτρων

Επιλογή Συστήματος Μονάδων

Analysis > Set up Analysis > Analysis Unit: mm, g, msec, N / Ls - Dyna Solver:

C:\LSDYNA\program\ls960-nsmpr.exe

Ορισμός Διεπιφανειών

1. Διεπιφάνεια Σωλήνων

Set > Part > Create > Set Name: Part _Set 1_Tubes> TUBE_IN , TUBE_OUT > Apply

2. Διεπιφάνεια Εμβόλου-Σωλήνων

Set > Segments > Create > Set Name: Segment _Set 1_Ram> By elements > Επιλογή των κατώτερων elements > Apply

Καθορισμός Φυσικών Ιδιοτήτων

Property > Create > Solids > Element Formulation: Constant Stress Solid Element (1)

Property > Create > Solids > Element Formulation: Fully Integrated S/R Solid (2))

> Assign> P-1_TOOLS > DIE / RAM > Apply

> Assign> P-2_TUBES > TUBE_IN / TUBE_OUT > Apply

Καθορισμός Συνθηκών Επαφής (Contacts)

Contact > Create > 3 Dimension > Tiebreak Surface to Surface > Contact 1 TUBES>

Tab 2.1: Master Type: Part ID > Tube_out

Slave Type: Part ID > Tube_in

Tab 3.1: Static Coefficient of Friction: 0.5

Dynamic Coefficient of Friction: 0.4

Tab 5.1: Normal Failure Force: 1E+10 MPa

Shear Failure Force: 1.0 MPa

Contact > Create > 3 Dimension > Surface to Surface > Contact 2 Ram-Tubes>

Tab 2.1: Master Type: Segment Set ID > Ram

Slave Type: Part Set ID > Tubes

Tab 3.1: Static Coefficient of Friction: 0.3
Dynamic Coefficient of Friction: 0.2

Contact > Create > 3 Dimension > Surface to Surface > Contact 3 Die-Tubes>

Tab 2.1: Master Type: Part ID >Die
Slave Type: Part Set ID > Tubes

Tab 3.1: Static Coefficient of Friction: 0.05
Dynamic Coefficient of Friction: 0.03

Contact > Create > 3 Dimension > Automatic Single Surface > Contact 4 Single Auto>

Tab 2.1: Slave Type: Part ID > Tube_In

Tab 3.1: Static Coefficient of Friction: 0.6
Dynamic Coefficient of Friction: 0.5

Παράμετροι Σχεδίασης

1. Διάγραμμα ταχύτητας – χρόνου:

DynaMisc > Load Curve > Create > OK > OK > Insert > Key-in > 0.0,-0.10 & 400.0,-0.10 > OK

2. Επιβαλλόμενη Δεσμική Κίνηση:

BC > Boundary > Prescribed Motion > Create > Rigid > Part ID (Rigid Body): RAM , Degree of freedom: Z-Translation (3) > Apply

3. Έκβαση των πιέσεων επαφής:

DynaMisc > Database > ASCII > RCFORC > Define > Time interval of output=1.0

4. Παράμετροι Σχεδίασης:

DynaMisc > Database > Binary > D3PLOT > Define > Time interval of output=5.0
DynaMisc > Database > Binary > D3THDT > Define > Time interval of output=5.0

5. Χρόνος Λήξης της διαδικασίας:

DynaMisc > Control > Termination > Define > Termination Time=400.0

6. Εισαγωγή Mass-scaling:

DynaMisc > Control > Timestep > DT2MS=0.007

Παράρτημα 3

*Αρχείο *.dyn Δεδομένων Εισαγωγής στον Επιλυτή*

Π.3.0 Εισαγωγή

Στο παρόν παράρτημα παρουσιάζεται το αρχείο δεδομένων εισαγωγής (*.dyn) στον επιλυτή (solver) του προγράμματος. Το αρχείο αυτό προκύπτει από εξαγωγή του κατασκευασθέντος μοντέλου μέσω γραφικών σύμφωνα με το παράρτημα 1 της παρούσης. Παραλείφθηκαν όλα τα αριθμητικά δεδομένα που αναφέρονται στην αρίθμηση των πεπερασμένων στοιχείων και των κόμβων τους.

Π.3.1 Αρχείο *.dyn

```

$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$  LS-DYNA(970) DECK WRITTEN BY : eta/FEMB-PC version
$  ENGINEER :
$  PROJECT :
$  UNITS : MM, G,  MSEC, N
$  TIME :
$  DATE :
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
*KEYWORD
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
*TITLE

$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$
$                                     CONTROL CARD
$
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
*CONTROL_TERMINATION
$  ENDTIM  ENDCYC  DTMIN  ENDENG  ENDMAS
$    400.0    0    0.0    0.0    0.0
*CONTROL_TIMESTEP
$  DTINIT  TSSFAC  ISDO  TSLIMIT  DT2MS  LCTM  ERODE  MS1ST
$    0.0    0.90    0    0.0    0.0070    0    0
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$
$                                     DATABASE CONTROL FOR ASCII
$
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
*DATABASE_RCFORC
$  DT
$    1.0
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$
$                                     DATABASE CONTROL FOR BINARY
$
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
*DATABASE_BINARY_D3PLOT
$  DT/CYCL  LCDT  BEAM  NPLTC
$    5.0    0    0
*DATABASE_BINARY_D3THDT
$  DT/CYCL  LCDT
$    5.0

```

Παράρτημα 3: Αρχείο *.dyn

```

$---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8
$
$
$          PART CARDS
$
$---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8
*PART
$HEADING
DIE
$      PID      SECID      MID      EOSID      HGID      GRAV      ADPOPT      TMID
$          4          1          2          0          0
*PART
$HEADING
RAM
$      PID      SECID      MID      EOSID      HGID      GRAV      ADPOPT      TMID
$          3          1          1          0          0
*PART
$HEADING
TUBE_OUT
$      PID      SECID      MID      EOSID      HGID      GRAV      ADPOPT      TMID
$          1          2          4          0          0
*PART
$HEADING
TUBE_IN
$      PID      SECID      MID      EOSID      HGID      GRAV      ADPOPT      TMID
$          2          2          3          0          0
$---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8
$
$
$          SECTION CARDS
$
$---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8
*SECTION_SOLID
$^P-1-TOOLS
$      SECID      ELFORM      AET
$          1          1          0
*SECTION_SOLID
$^P-2-TUBES
$      SECID      ELFORM      AET
$          2          2          0
$---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8
$
$
$          MATERIAL CARDS
$
$---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8
*MAT_RIGID
$^M-1-RAM-RIGID
$      MID      RO      E      PR      N      COUPLE      M      ALIAS
$          1      0.00783  207000.0  0.28  0.0  0.0  0.0  0.0
$      CMO      CON1      CON2
$          1.0      4.0      7.0
$LCO_OR_A1      A2      A3      V1      V2      V3
$          0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
*MAT_RIGID
$^M-2-DIE-RIGID
$      MID      RO      E      PR      N      COUPLE      M      ALIAS
$          2      0.00783  207000.0  0.28  0.0  0.0  0.0  0.0
$      CMO      CON1      CON2
$          1.0      7.0      7.0
$LCO_OR_A1      A2      A3      V1      V2      V3
$          0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
*MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY
$^M-3-IN
$      MID      RO      E      PR      SIGY      ETAN      FAIL      TDEL
$          3      0.0027  70000.0  0.34  192.2  0.0  0.0  0.0

```

Παράρτημα 3: Αρχείο *.dyn

```

$      C      P      LCSS      LCSR      VP
      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
$      EPS1      EPS2      EPS3      EPS4      EPS5      EPS6      EPS7      EPS8
      0.0000      0.0160      0.0209      0.0278      0.0318      0.0368      0.0427      0.0727
$      ES1      ES2      ES3      ES4      ES5      ES6      ES7      ES8
      192.2      195.0      202.5      208.0      210.0      213.0      217.0      222.0
*MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY
$^M-4-OUT
$      MID      RO      E      PR      SIGY      ETAN      FAIL      TDEL
      4      0.008913      119000.0      0.35      266.0      0.0      0.0      0.0
$      C      P      LCSS      LCSR      VP
      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
$      EPS1      EPS2      EPS3      EPS4      EPS5      EPS6      EPS7      EPS8
      0.0000      0.0078      0.0539      0.0986      0.1408      0.1842      0.1956      0.2287
$      ES1      ES2      ES3      ES4      ES5      ES6      ES7      ES8
      266.00      288.63      309.94      336.66      376.74      410.42      420.42      438.06
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$
$                               SEGMENT SET CARDS
$
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$
*SET_SEGMENT
$^SEGMENT_SET
$      SID      DA1      DA2      DA3      DA4
      1      0.0      0.0      0.0      0.0
$      N1      N2      N3      N4      A1      A2      A3      A4
      96625      96642      96641      96624      0.0      0.0      0.0      0.0
..
..
..
..
..
..
..
..
..
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$
$                               PART SET CARDS
$
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$
*SET_PART_LIST
$^PART_SET
$      SID      DA1      DA2      DA3      DA4
      1      0.0      0.0      0.0      0.0
$      PID1      PID2      PID3      PID4      PID5      PID6      PID7      PID8
      1      2
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$
$                               BOUNDARY PRESCRIBED CARDS
$
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$
*BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_RIGID
$^PRESCRIBED
$      PID      DOF      VAD      LCID      SF      VID      DEATH      BIRTH
      3      3      0      1      1.0      1.000E+28      0.0
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$
$                               CONTACT CARDS
$
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$
*CONTACT_SURFACE_TO_SURFACE_TITLE
$      CID
      3

```

Παράρτημα 3: Αρχείο *.dyn

```

$      SSID      MSID      SSTYP      MSTYP      SBOXID      MBOXID      SPR      MPR
      1          4          2          3          0          0
$      FS        FD          DC          VC          VDC        PENCHK      BT      DT
      0.05      0.03      0.0        0.0        0.0        0          0.0 1.000E+20
$      SFS        SFM        SST          MST          SFST        SFMT        FSF      VSF
      1.0        1.0        0.0        0.0        1.0        1.0        1.0      1.0
$      SOFT      SOFSCl     LCIDAB      MAXPAR      PENTOL      DEPTH      BSORT      FRCFRQ
      0          0.10      0          1.025      0.0        2.0        0          1
$      PENMAX    THKOPT     SHLTHK      SNLOG      ISYM        I2D3D
      0.0        0          0          0          0          0
*CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE_TITLE
$      CID
      4
$      SSID      MSID      SSTYP      MSTYP      SBOXID      MBOXID      SPR      MPR
      2          0          3          0          0          0          0          0
$      FS        FD          DC          VC          VDC        PENCHK      BT      DT
      0.60      0.50      0.0        0.0        0.0        0          0.0 1.000E+20
$      SFS        SFM        SST          MST          SFST        SFMT        FSF      VSF
      1.0        1.0        0.0        0.0        1.0        1.0        1.0      1.0
$      SOFT      SOFSCl     LCIDAB      MAXPAR      PENTOL      DEPTH      BSORT      FRCFRQ
      0          0.10      0          1.025      0.0        2.0        100       1
$      PENMAX    THKOPT     SHLTHK      SNLOG      ISYM        I2D3D
      0.0        0          0          0          0          0
*CONTACT_TIEBREAK_SURFACE_TO_SURFACE_TITLE
$      CID
      1
$      SSID      MSID      SSTYP      MSTYP      SBOXID      MBOXID      SPR      MPR
      2          1          3          3          0          0          0          0
$      FS        FD          DC          VC          VDC        PENCHK      BT      DT
      0.50      0.40      0.0        0.0        0.0        0          0.0 1.000E+20
$      SFS        SFM        SST          MST          SFST        SFMT        FSF      VSF
      1.0        1.0        0.0        0.0        1.0        1.0        1.0      1.0
$      NFLS      SFLS      TBLCID
      1E+10     1.0
$      SOFT      SOFSCl     LCIDAB      MAXPAR      PENTOL      DEPTH      BSORT      FRCFRQ
      0          0.10      0          1.025      0.0        2.0        0          1
$      PENMAX    THKOPT     SHLTHK      SNLOG      ISYM        I2D3D
      0.0        0          0          0          0          0
*CONTACT_SURFACE_TO_SURFACE_TITLE
$      CID
      2
$      SSID      MSID      SSTYP      MSTYP      SBOXID      MBOXID      SPR      MPR
      1          1          2          0          0          0          0          0
$      FS        FD          DC          VC          VDC        PENCHK      BT      DT
      0.30      0.20      0.0        0.0        0.0        0          0.0 1.000E+20
$      SFS        SFM        SST          MST          SFST        SFMT        FSF      VSF
      1.0        10.0      0.0        0.0        1.0        1.0        1.0      1.0
$      SOFT      SOFSCl     LCIDAB      MAXPAR      PENTOL      DEPTH      BSORT      FRCFRQ
      0          0.10      0          1.025      0.0        2.0        0          1
$      PENMAX    THKOPT     SHLTHK      SNLOG      ISYM        I2D3D
      0.0        0          0          0          0          0
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$
$                                LOAD CURVE CARDS
$
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
*DEFINE_CURVE
$^LCUR_1
$      LCID      SIDR      SFA      SFO      OFFA      OFFO      DATTYP
      1          0          1.0      1.0      0.0      0.0      0
$
$              A1              O1
$              0.0              -0.10
$              400.0             -0.10
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

```

Παράρτημα 3: Αρχείο *.dyn

```
$
$
$
$
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$
*NODE
$      NID          X          Y          Z          TC          RC
      35          12.5          0.0          0.0          0.0          0.0

..
..
..
..
..
..
..
..
..
..
..
..
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
*END
```