



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΠΜΣ : ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΔΙΕΛΑΣΗ ΔΙΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΡΑΒΔΩΝ

Καραουλάνης Βαγγέλης
Πτυχιούχος Μηχανικός Μεταλλείων Μεταλλουργός

Ακαδημαϊκό Έτος 2011 / 2012

Επιβλέπων Καθηγητής: Δημήτριος Μανωλάκος

ΑΘΗΝΑ 2011



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΠΜΣ : ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΔΙΕΛΑΣΗ ΔΙΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΡΑΒΔΩΝ

Καραουλάνης Βαγγέλης
Πτυχιούχος Μηχανικός Μεταλλείων Μεταλλουργός

Ακαδημαϊκό Έτος 2011 / 2012

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Δ. ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Χ. ΠΑΝΑΓΟΠΟΥΛΟΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Δ. ΠΑΝΤΕΛΗΣ, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ 2011

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	5
1. Διέλαση	6
1.1. Γενικά.....	6
1.2. Ταξινόμηση των μεθόδων διέλασης.....	8
1.3. Φάσεις της διέλασης.....	10
1.4. Υπολογισμός του φορτίου διέλασης.....	12
1.5. Τεχνολογικά Χαρακτηριστικά.....	14
1.6. Ελαττώματα κατά τη διέλαση.....	18
1.7. Μηχανική της διέλασης.....	20
2. Διμεταλλικά Υλικά	25
2.1. Γενικά.....	25
2.2. Παραδείγματα Εφαρμογών Διμεταλλικών Υλικών.....	27
3. Η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων	29
3.1. Ιστορικά Στοιχεία.....	29
3.2. Βασικά Στοιχεία της Μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων	31
3.3. Στάδια Επίλυσης Προβλήματος με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων.....	33
3.4. Πρόγραμμα Πεπερασμένων Στοιχείων LS-Dyna.....	39
3.5. Διαδικασία Προσομοίωσης Πειράματος.....	43
4. Διάταξη Πειράματος	49
4.1. Υδραυλική πρέσα SMG.....	49
4.2. Δοκίμια Πειράματος.....	55
5. Αποτελέσματα Πειραματικά και Προσομοίωσης	59
6. Συμπεράσματα	107
7. Παράρτημα	111
8. Βιβλιογραφία	119

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Κατεργασιών των Υλικών (Μηχανουργικό και Μηχανολογικό Εργοστάσιο) της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και αναφέρεται στην Διέλαση διμεταλλικών ράβδων καθώς και στην προσομοίωση του πειράματος με την εφαρμογή του προγράμματος LS-DYNA.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Δημήτριο Μανωλάκο για την ανάθεση της εργασίας, καθώς και για τις πολύτιμες συμβουλές και παρατηρήσεις του κατά τη συγγραφή της. Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον Υποψήφιο Διδάκτορα Πρωτεσίλαο Κωστάζο για τη βοήθειά του και τις συμβουλές του για την πραγματοποίηση της διπλωματικής καθώς και τον Υποψήφιο Διδάκτορα Σωτήρη Γεωργιόπουλο. Επίσης ευχαριστώ τα μέλη του τεχνικού προσωπικού για την τεχνική υποστήριξη που παρείχαν στην κατασκευή των δοκιμίων και στην πραγματοποίηση των πειραματικών δοκιμών.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο τίτλος της διπλωματικής εργασίας είναι «Διέλαση Διμεταλλικών Ράβδων». Οι διμεταλλικές ράβδοι ήταν χαλκός – αλουμίνιο και χαλκός - μόλυβδος. Σκοπός ήταν ο προσδιορισμός της συμπεριφοράς των δοκιμίων κατά την κατεργασία της διέλασης καθώς και η προσομοίωση της κατεργασίας στο πρόγραμμα LS-Dyna.

Κατασκευάστηκαν συνολικά τρεις πεντάδες (set) δοκιμίων. Πέντε δοκίμια ήταν σωλήνας χαλκού με χυτό αλουμίνιο εσωτερικά, πέντε επίσης με αλουμίνιο αλλά με πάτο και τέλος πέντε με χυτό μόλυβδο με πάτο. Κάθε πεντάδα δοκιμίων είχε διαφορετικές εσωτερικές διαμέτρους του εκάστοτε υλικού. Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε η κατεργασία της διέλασης για όλα τα δοκίμια. Η πειραματική διαδικασία προσομοιώθηκε, με την χρήση του προγράμματος LS-Dyna. Τέλος τα αποτελέσματα της πειραματικής μεθόδου της διέλασης συγκρίνονται με τα αντίστοιχα αποτελέσματα που έδωσε η προσομοίωση του πειράματος.

1. Διέλαση [1]

1.1. Γενικά

Οι κατεργασίες των διαμορφώσεων αποτελούν ένα από τα σημαντικότερα τμήματα της τεχνολογίας των κατεργασιών των υλικών. Στις κατεργασίες αυτές μεταβάλλεται η γεωμετρική μορφή του υλικού, η διάταξη των ινών διατηρείται, βελτιώνεται η αντοχή και μπορούν να αποδοθούν πολύπλοκες γεωμετρικές μορφές με ικανοποιητική ποιότητα επιφάνειας και σχετικά μικρές ανοχές. Σκοπός των διαμορφώσεων είναι η πρόσδοση μίας διαφορετικής γεωμετρικής μορφής στα αντικείμενα με την επιβολή εξωτερικών δυνάμεων, η οποία θα πρέπει να παραμείνει και με τη λήξη της επιβολής των εξωτερικών δυνάμεων. Η διαμόρφωση γίνεται στην περιοχή μεταξύ του ορίου διαρροής και του ορίου θραύσεως. Τα υλικά τα οποία χαρακτηρίζονται από μικρό όριο διαρροής και από μεγάλη επιμήκυνση διαμορφώνονται πολύ καλά και παρουσιάζουν μικρές δυνάμεις επανατάξεως.

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 (**Σχήμα 2**). Κατά συνέπεια το εργαλείο διέλασης περιλαμβάνει:

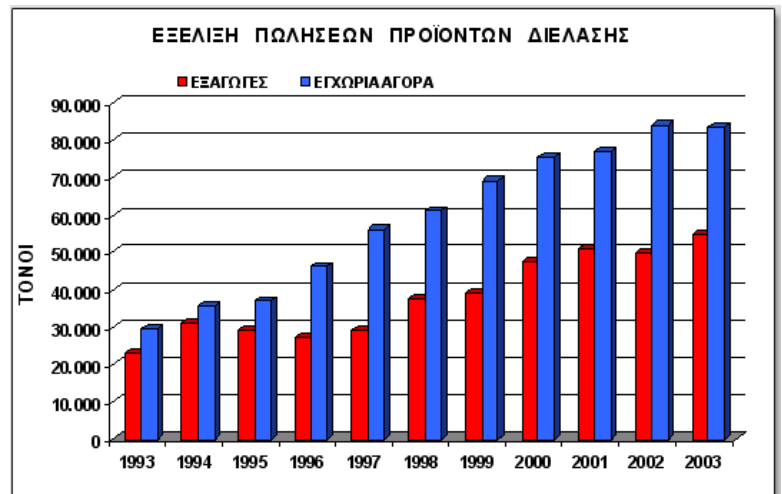
- Τον μεταλλικό θάλαμο
- Την μήτρα
- Το έμβολο
- Και τον συμπληρωματικό εξοπλισμό

Η διέλαση είναι γνωστή από τον 18^ο αιώνα και εκτελείται είτε ως θερμή είτε ως ψυχρή κατεργασία. Η χρησιμοποιούμενη εργαλειομηχανή (EM) για την εκτέλεση της διέλασης είναι πρέσα, συνήθως υδραυλική και οριζόντια για την θερμή διέλαση και κατακόρυφη για την ψυχρή διέλαση. Οι ταχύτητες του εμβόλου φθάνουν μέχρι 0,5 m/s. Οι μικρότερες ταχύτητες προτιμούνται για την κατεργασία μαλακών υλικών (Al, Mg, Cu), ενώ οι μεγαλύτερες τιμές για τα σκληρότερα υλικά (χάλυβες, πυρίμαχα κράματα).

Στην Ελλάδα δραστηριοποιούνται πάνω από 20 βιομηχανίες διέλασης με δυναμικότητα περίπου 320.000 τόνους. Τα προϊόντα διέλασης (διατομές αλουμινίου) στην εγχώρια αγορά αφορούν κυρίως τις αρχιτεκτονικές εφαρμογές. Οι κύριες εφαρμογές αποτελούν τα εξωτερικά κουφώματα αλουμινίου τα οποία κατέχουν ποσοστό πάνω από το 75% της εγχώριας αγοράς.

Οι πωλήσεις του κλάδου απευθύνονται κατά 60% περίπου στην εγχώρια και κατά 40% στην διεθνή αγορά, με σημαντικότερο προορισμό την Ε.Ε..

Επιπλέον θα πρέπει να σημειώσουμε ότι για τη μοντελοποίηση της κατεργασίας της διέλασης είναι απαραίτητο να έχουν προσδιοριστεί ορισμένες βασικές παράμετροι όπως το εφαρμοζόμενο κριτήριο διαρροής, οι συνθήκες τριβής, το αναπτυσσόμενο τασικό πεδίο και οι πραγματοποιούμενες παραμορφώσεις. Οι παράμετροι αυτοί θα αναπτυχθούν διεξοδικά στη συνέχεια.



Σχήμα 1: Πωλήσεις προϊόντων διέλασης στην Ελλάδα

1.2. Ταξινόμηση των μεθόδων διέλασης

Ανάλογα με την διαδικασία εκτέλεσης της διέλασης, διακρίνονται τα ακόλουθα είδη:

1. Άμεση διέλαση (Direct extrusion)

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

2. Έμμεση διέλαση (Indirect extrusion)

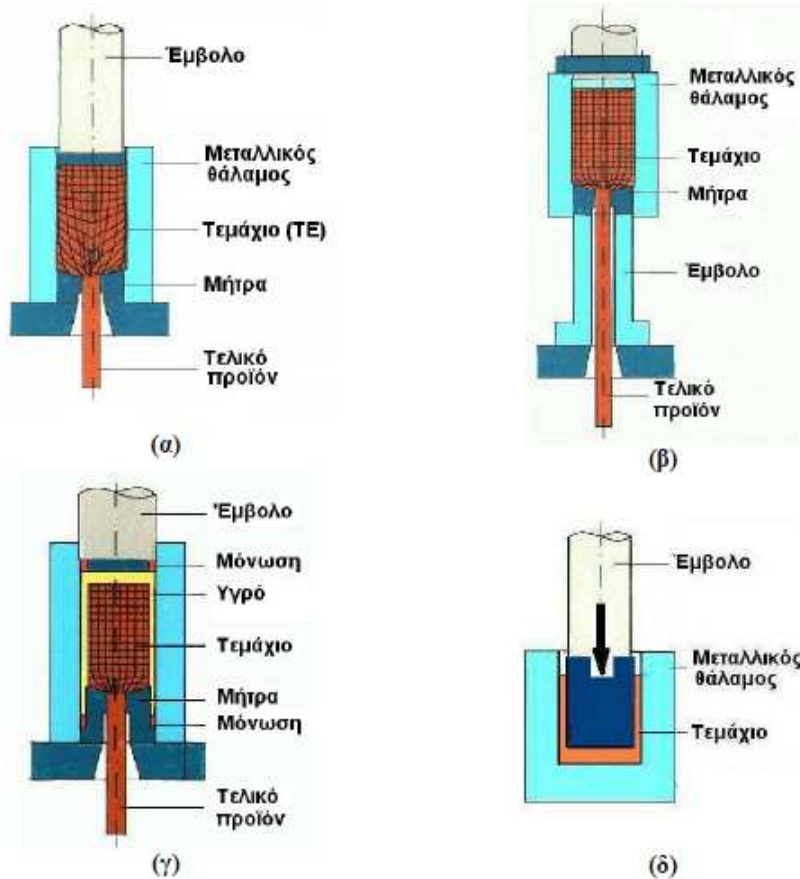
Είναι η διέλαση στην οποία στο μέτωπο του εμβόλου έχει ενσωματωθεί η μήτρα. Με την κίνηση του εμβόλου η μήτρα κινείται ως προς το TE, ενώ το τελευταίο παραμένει ακίνητο μέσα στον θάλαμο. Το τελικό προϊόν εξέρχεται από κεντρική οπή του άξονα του εμβόλου. Η ροή του υλικού έχει αντίθετη κατεύθυνση από αυτή της κίνησης του εμβόλου. Τέλος οι τριβές στην διεπιφάνεια TE / θαλάμου είναι αμελητέες.

3. Υδροστατική διέλαση (Hydrostatic extrusion)

Ο μεταλλικός θάλαμος πληρούται με υγρό, το οποίο συμπιέζεται από το έμβολο. Η αναπτυσσόμενη υδραυλική πίεση μεταφέρεται ομοιόμορφα στην μπιγιέτα, η οποία και διελάσσεται. Χαρακτηριστικό είναι ότι δεν υπάρχει τριβή του TE με τα τοιχώματα του θαλάμου. Θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην στεγανότητα της εγκατάστασης.

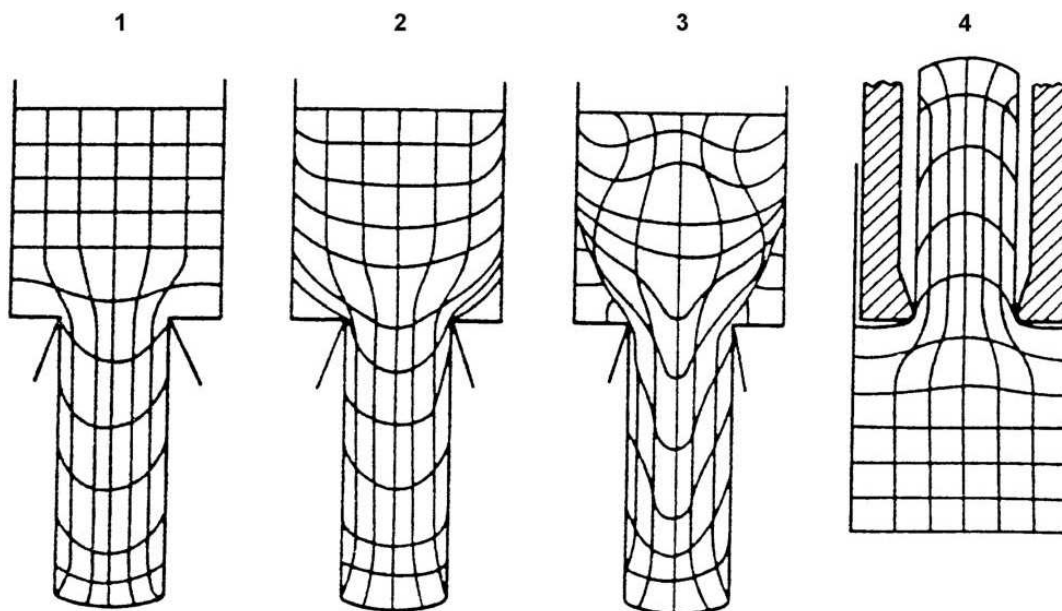
4. Κρουστική διέλαση (Impact extrusion)

Πρόκειται για μια μορφή έμμεσης διέλασης και εκτελείται με μεγάλη ταχύτητα εμβόλου. Ο θάλαμος έχει αντικατασταθεί από αβαθή κοιλότητα και το υλικό αναγκάζεται να περιρρέει το περίγραμμα του εμβόλου. Εφαρμόζεται σε σχετικά μαλακά υλικά (Pb, Zn, Al, Cu) για την παραγωγή μικρού μήκους κυαθίων.



Σχήμα 2: Είδη διέλασης. (α) Ευθεία διέλαση, (β) Έμμεση διέλαση, (γ) Υδροστατική διέλαση, (δ) Κρουστική διέλαση

Στο σχήμα 3 που ακολουθεί παρουσιάζεται η ροή υλικού κατά τη διέλαση:



Σχήμα 3: Ροή του υλικού κατά την 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).

1.3. Φάσεις της διέλασης

Διακρίνουμε τις ακόλουθες φάσεις μιας άμεσης διέλασης μαζί με την επίδραση καθεμιάς στην διαμόρφωση του φορτίου κατεργασίας:

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.

2. Ευσταθής φάση

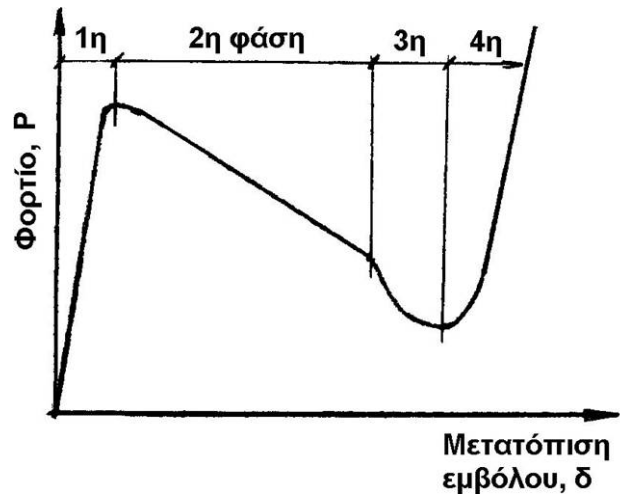
Ομαλή διεξαγωγή της διέλασης με σταθερό ρυθμό. Ανάπτυξη της νεκρής ζώνης (ακίνητο υλικό) στην έξοδο της μήτρας. Μείωση του μήκους της μπιγιέτας μέσα στον θάλαμο με συνέπεια την μείωση της αντίστασης τριβών. Βαθμιαία μείωση του φορτίου διέλασης, σε μικρότερο βαθμό στην θερμή διέλαση ή για να μη κρατυνόμενα υλικά και σε μεγαλύτερο ρυθμό για την ψυχρή διέλαση κρατυνόμενων υλικών.

3. Φάση αστάθειας

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

4. Ανάπτυξη ελαττώματος

Περαιτέρω μείωση του μήκους της μπιγιέτας οδηγεί σε απώλεια επαφής του κεντρικού τμήματος της μπιγιέτας με την πιέζουσα επιφάνεια του εμβόλου, δημιουργείται κεντρική κοιλότητα στο τελικό προϊόν και το υπόλοιπο τμήμα της μπιγιέτας παρασύρεται μέσα σε αυτήν την κοιλότητα. Το τμήμα του τελικού προϊόντος που φέρει την σχηματιζόμενη κοιλότητα θεωρείται ελαττωματικό και αποκόπτεται. Κατά την φάση αυτή σημειώνεται απότομη αύξηση του φορτίου κατεργασίας και συνίσταται η διακοπή της κατεργασίας.

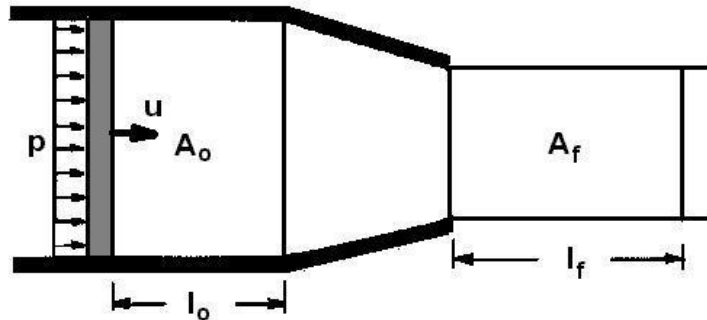


Σχήμα 4: Φάσεις διέλασης

1.4. Υπολογισμός του φορτίου διέλασης

(α) Ομοιογενής παραμόρφωση (απουσία τριβών)

Θεωρούμε τμήμα της κατεργαζόμενης μπιγιέτας μήκους I_0 και διατομής A_0 το οποίο όταν μετατραπεί σε τελικό προϊόν έχει διατομή A_f και μήκος I_f .



Σχήμα 5: Υπολογισμός φορτίου διέλασης

Από την αρχή διατήρησης του όγκου είναι: $A_0 \cdot I_0 = A_f \cdot I_f$ ή $\frac{A_0}{A_f} = \frac{I_f}{I_0}$

Σημειούμενη παραμόρφωση στην έξοδο της μήτρας: $\bar{\varepsilon} = \ln\left(\frac{A_0}{A_f}\right)$

Ρυθμός έργου εξωτερικού φορτίου:

$$\dot{W}_e = (\text{φορτίο}) \times (\text{ταχύτητα}) = P \cdot u = (p \cdot A_0) \cdot u$$

Ρυθμός πλαστικού έργου:

$$\begin{aligned} \dot{W}_i &= \left(\text{ειδικό πλαστικό έργο} \right) \times \left(\text{κατεργαζόμενο όγκο ανά μονάδα χρόνου} \right) \\ &= \left(\int_0^{\bar{\varepsilon}} \sigma \cdot d\varepsilon \right) \cdot (A_0 \cdot u) \end{aligned}$$

Αν εισάγουμε το μέσο όριο διαρροής $\bar{Y} = \frac{\int_0^{\bar{\varepsilon}} \sigma \cdot d\varepsilon}{\bar{\varepsilon}}$, από την εξίσωση των δύο έργων παίρνουμε, μετά την εκτέλεση των πράξεων την ακόλουθη σχέση για την πίεση εμβόλου p:

$$p = \bar{Y} \cdot \ln\left(\frac{A_0}{A_f}\right) = \bar{Y} \cdot \ln R_e$$

όπου $R_e = \frac{A_0}{A_f}$ ο λόγος διέλασης

(β) Ανομοιογενής παραμόρφωση

Χρησιμοποιείται η γενική σχέση: $p = c \cdot \bar{Y} \cdot \ln \left(\frac{A_0}{A_f} \right) = c \cdot \bar{Y} \cdot \ln R_e$

όπου $c=1,67-3,3$ ο συντελεστής ανομοιογένειας που υπολογίζεται εμπειρικά για συγκεκριμένες συνθήκες διέλασης.

Ισχύει επίσης και η ημι-εμπειρική σχέση του **Johnson** που δίνει πολύ καλά αποτελέσματα στις περισσότερες περιπτώσεις.

$$p = \bar{Y} \cdot \left[0,8 + 1,5 \ln \left(\frac{A_0}{A_f} \right) \right] = \bar{Y} \cdot [0,8 + 1,5 \ln R_e]$$

1.5. Τεχνολογικά Χαρακτηριστικά

Όπως προαναφέρθηκε κατά τη διάρκεια της κατεργασίας της διέλασης το υλικό συμπιέζεται μέσω ενός εμβόλου και αναγκάζεται να περάσει παραμορφούμενο πλαστικά μέσα από μία κατάλληλα διαμορφωμένη μήτρα για να σχηματιστεί ένα προϊόν με ελαττωμένη διατομή. Η κατεργασία της διέλασης πραγματοποιείται συνήθως είτε εν θερμώ είτε εν ψυχρώ.

Θερμή διέλαση

Παράγοντες που επηρεάζουν το φορτίο διέλασης είναι:

- (i) ο τύπος διέλασης (άμεση ή έμμεση)
- (ii) ο λόγος διέλασης R_e
- (iii) η θερμοκρασία διέλασης
- (iv) η ταχύτητα παραμόρφωσης
- (v) οι συνθήκες τριβής στις τριβόμενες επιφάνειες.

Τα φορτία άμεσης διέλασης είναι μεγαλύτερα από τα αντίστοιχα της έμμεσης διέλασης διότι στην τελευταία οι τριβές είναι πολύ μικρότερες. Άρα, στη φάση ευστάθειας το φορτίο δεν αναμένεται να έχει σοβαρή μείωση κατά την έμμεση διέλαση. Όσον αφορά τον λόγο διέλασης μπορεί να φθάσει μέχρι την τιμή 40:1 σκληρά υλικά (χάλυβες) ή αντίστοιχα μέχρι 400:1 σε μαλακά υλικά (Al). Η ταχύτητα εξόδου του τελικού προϊόντος ισούται με το γινόμενο $u \cdot R_e$ όπως προκύπτει από την εξίσωση συνεχείας, οπότε για μεγάλους λόγους διέλασης μπορεί να σημειωθούν μεγάλες ταχύτητες ολίσθησης στην έξοδο της μήτρας. Ομοίως, όπως προκύπτει από την εξίσωση (5), η πίεση του εμβόλου είναι ευθέως ανάλογη του $\ln R_e$. Κατά τη θερμή διέλαση η κατεργασία πραγματοποιείται σε υψηλές θερμοκρασίες για να μειωθεί η τάση ροής του υλικού και συνεπώς το φορτίο διέλασης και να αυξηθεί η ολκιμότητά του ή την αντίσταση σε παραμόρφωση του υλικού ΤΕ.

Χαρακτηριστικές θερμοκρασίες θερμής διέλασης για τα διάφορα υλικά είναι:

- Χάλυβας 1200° C
- Cu και κράματά του 800° C
- Al και κράματά του 470° C
- Pb 230° C κλπ.

Οι υψηλές θερμοκρασίες εισάγουν προβλήματα οξείδωσης του

κατεργαζόμενου υλικού και του εργαλείου διέλασης, εξασθένησης (**softening**) των υλικών μήτρας/ θαλάμου/ εμβόλου και διάσπασης του χρησιμοποιούμενου λιπαντικού. Η θερμοκρασία κατεργασίας πρέπει να είναι η ελάχιστη δυνατή, η οποία θα εξασφαλίζει επαρκή πλαστικότητα στο υλικό ΤΕ και δεν θα προκαλεί θερμική συστολή.

Σημαντική αύξηση της θερμοκρασίας παρατηρείται στις σχετικά μεγάλες μειώσεις της διατομής (έργο παραμόρφωσης), οπότε στον υπολογισμό της βέλτιστης θερμοκρασίας πρέπει να λαμβάνεται υπόψη αυτή η θερμοκρασιακή μεταβολή για να μην φθάσει το υλικό κοντά στο σημείο τήξης του ή στην περιοχή που λαμβάνει χώρα θερμική συστολή. Αύξηση της ταχύτητας εμβόλου προκαλεί αύξηση της πίεσης εμβόλου, διότι το υλικό ΤΕ συμπεριφέρεται ως πιο κρατυνόμενο. Στις χαμηλές ταχύτητες παρατηρείται ταχύτερη απόψυξη της μπιγιέτας. Άμεση συνέπεια αυτού είναι η σιλήρυνση του υλικού και η βαθμιαία αύξηση του φορτίου διέλασης με τη διαδρομή του εμβόλου. Όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία του ΤΕ, τόσο πιο έντονη είναι η επίδραση της χαμηλής ταχύτητας στην απόψυξη του ΤΕ. Άρα, όπου απαιτούνται υψηλές θερμοκρασίες θα εφαρμόζονται σχετικά μεγάλες ταχύτητες εμβόλου. Για τα σκληρά υλικά (χάλυβες, κράματα Ni κ.α.) αποτελεσματικό λιπαντικό που δεν διασπάται στις υψηλές θερμοκρασίες είναι τήγμα υάλου, η οποία διατηρεί το ιξώδες της στις υψηλές θερμοκρασίες, έχει καλά χαρακτηριστικά διαβροχής και ενεργεί και ως θερμομονωτικό.

Η εφαρμογή του λιπαντικού μπορεί να γίνει κατά δύο τρόπους:

(α) Η μπιγιέτα θερμαίνεται σε αδρανή ατμόσφαιρα και επικαλύπτεται με σκόνη υάλου πριν εισέλθει στο μεταλλικό θάλαμο. Το επίστρωμα υάλου παρέχει λιπαντική δράση και συγχρόνως λειτουργεί ως θερμομονωτικό μειώνοντας την απορροή θερμότητας από το ΤΕ προς το ΕΡ και ως προστατευτική επικάλυψη από την επίδραση της ατμόσφαιρας.

(β) Στην είσοδο της μήτρας τοποθετείται υάλινος δίσκος μπροστά από την μπιγιέτα. Κατά την εκτέλεση της θερμής διέλασης ο υάλινος δίσκος μαλακώνει βαθμιαία, τήκεται και μετατρέπεται σε λεπτή μεμβράνη πάχους γύρω στα 0.03 mm που καλύπτει πλήρως το ΤΕ. Άλλα χρησιμοποιούμενα στερεά λιπαντικά: γραφίτης και MoS₂.

Στα μη σιδηρούχα μέταλλα συνήθως δεν χρησιμοποιείται λιπαντικό ή σπάνια γραφίτης. Υλικά που έχουν την τάση να «κολλούν» στα τοιχώματα του ΕΡ καλύπτονται συνήθως με ελαφρά επικάλυψη από μαλακό υλικό (Cu, μαλακός χάλυβας) που εκτός από λιπαντικό λειτουργεί και ως προστατευτικό επίστρωμα

έναντι της ατμόσφαιρας.

Ψυχρή διέλαση

Η εν ψυχρώ διέλαση εφαρμόζεται για την παραγωγή διαφόρων προϊόντων σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Τα υλικά που μπορούν να διαμορφωθούν με τη μέθοδο αυτή ποικίλουν και κυμαίνονται από μολυβδο μέχρι και χάλυβα. Λόγω της κράτυνσης του υλικού ΤΕ που σημειώνεται σε κάθε ψυχρή κατεργασία, τα φορτία κατεργασίας είναι σχετικά υψηλά. Γι' αυτό πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην κατασκευή των διαφόρων μερών του ΕΡ διέλασης από απόψεως υλικών κατασκευής και αντοχής. Συνεπώς οι μήτρες κατασκευάζονται από χάλυβες υψηλής αντοχής και άλλα υπέρσκληρα υλικά. Τα έμβολα διαμόρφωσης αντέχουν σε πιέσεις έως περίπου 1700 MPa και κατασκευάζονται από ταχυχάλυβες, ή από χάλυβες με υψηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα και χρώμιο (2% C, 12% Cr), ή από καρβίδια.

Ιδιαίτερη σημασία για την απρόσκοπτη εκτέλεση της ψυχρής διέλασης έχει το σύστημα λίπανσης, για την αποφυγή επικόλλησης του κατεργάσιμου τεμαχίου στο εργαλείο και συνεπώς τη μείωση της φθοράς αυτού και τη βελτίωση της ποιότητας επιφάνειας του τελικού προϊόντος. Για την λίπανση χρησιμοποιούνται υψηλής πίεσης λιπαντικά και σάπωνες. Για τους χάλυβες εφαρμόζεται χημική επιφανειακή επικάλυψη Zn (φωσφάτωση) σε συνδυασμό με σάπινα. Προσοχή πρέπει να δίνεται στη ακριβή οδήγηση του εμβόλου προς αποφυγή φαινομένων λυγισμού ή θραύσης του, λόγω των αναπτυσσόμενων μεγάλων τάσεων. Για το λόγο αυτό προτιμούνται οι κατακόρυφες πρέσες.

Τα μαλακά υλικά διελάσσονται σε μία κατεργασία ενώ τα σκληρότερα υλικά μπορεί να απαιτήσουν περισσότερες φάσεις για τη διαμόρφωση, με ορισμένη ελάττωση της διατομής ανά φάση, για να διατηρηθούν οι αναπτυσσόμενες τάσεις εντός των επιτρεπόμενων ορίων. Εάν οι φάσεις πραγματοποιούνται διαδοχικά, με την πρόσδοση του πλαστικού έργου σε κάθε περίπτωση προκύπτει αύξηση της θερμοκρασίας κατά 500 έως 600°C.

Συντελεστές Δυσχέρειας

Για την αξιολόγηση του βαθμού δυσκολίας που εισάγει μια μήτρα στη διεξαγωγή της διέλασης χρησιμοποιούνται οι παράμετροι:

$\Delta_1 = (\text{περίμετρος διατομής προϊόντος}) / (\text{περίμετρος μπιγιέτας ισοδύναμης κυκλικής διατομής})$

$\Delta_2 = (\text{περίμετρος διατομής προϊόντος}) / (\text{βάρος ανά μονάδα μήκους})$

$\Delta_3 = (\text{διάμετρος περιγεγραμμένου κύκλου}) / (\text{ελάχιστο πάχος διατομής})$

Η φυσική ερμηνεία αυτών των συντελεστών είναι η εξής:

- Αυξανόμενης της περιμέτρου της διατομής και των λεπτομερειών της (εσοχές, εξοχές) (συνδυασμός των $\Delta 1$ και $\Delta 2$), αυξάνεται η δυσκολία διέλασης.
- Αυξανόμενου του βάρους ανά μονάδα μήκους (μεγάλες διατομές), μειώνεται η δυσχέρεια διέλασης (δείκτης $\Delta 2$).
- Αυξανόμενου του βάρους αυξάνεται η ευκολία διέλασης (δείκτης $\Delta 3$).

1.6. Ελαττώματα κατά τη διέλαση

Επιφανειακές ρωγματώσεις

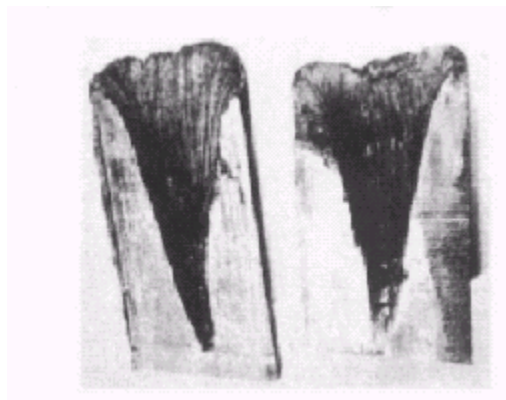
Υψηλές θερμοκρασίες κατεργασίας, δυνάμεις τριβής και ταχύτητες ευνοούν την ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών στην επιφάνεια του τεμαχίου οδηγώντας σε επιφανειακές ρωγματώσεις (Εικόνα 1). Πρόκειται για ενδοκρυσταλλικές θραύσεις λόγω θερμής συστολής και παρατηρούνται σε κράματα Al, Mg, Zn, Mo κλπ. Αποφεύγονται με χρήση χαμηλότερων θερμοκρασιών και ταχυτήτων. Επιφανειακές ρωγματώσεις συμβαίνουν και σε χαμηλότερες θερμοκρασίες και οφείλονται σε περιοδικές συγκολλήσεις της μπιγιέτας στην έξοδο της μήτρας.



Εικόνα 1: Επιφανειακές ρωγματώσεις

Ελαττώματα άκρων

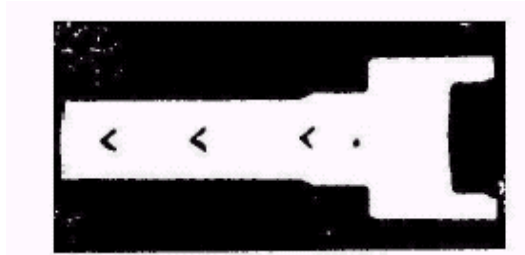
Τα ελαττώματα των άκρων (Εικόνα 2) οφείλονται σε φαινόμενα αστάθειας κατά το τελευταίο στάδιο της διέλασης λόγω ανομοιομορφης παραμόρφωσης. Σχηματίζονται κεντρικές κοιλότητες στο άκρο της μπιγιέτας όπου απορροφώνται τυχόν οξείδια και ακαθαρσίες. Το τμήμα αυτό τελικά απορρίπτεται.



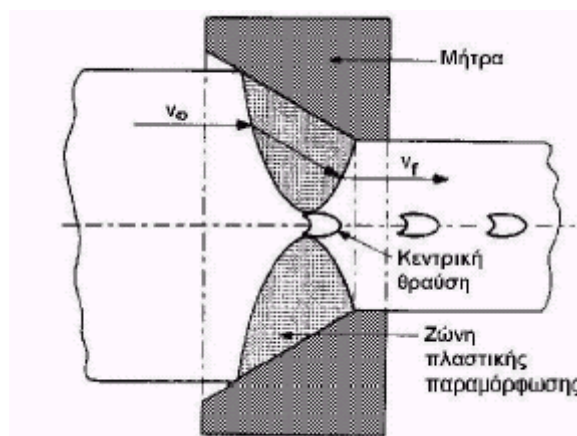
Εικόνα 2: Ελαττώματα άκρων

Εσωτερικές ρωγματώσεις

Εσωτερικές ρωγματώσεις (Σχήμα 6) οφείλονται στην ανάπτυξη δευτερογενών εφελκυστικών τάσεων στον άξονα της ζώνης παραμόρφωσης στη μήτρα. Η κατάσταση μοιάζει με την ανάπτυξη λαιμού σε μοναξονικό εφελκυσμό. Παράγοντες που επηρεάζουν είναι η ημιγωνία μήτρας, ο λόγος διέλασης και η τριβή. Σημαντικός παράγοντας είναι και το μήκος επαφής της μπιγιέτας με την μήτρα. Αύξηση του μήκους επαφής οδηγεί σε αύξηση της έκτασης της ζώνης παραμόρφωσης. Ο μηχανισμός ανάπτυξης κεντρικής ρωγμάτωσης φαίνεται στο Σχήμα 7.



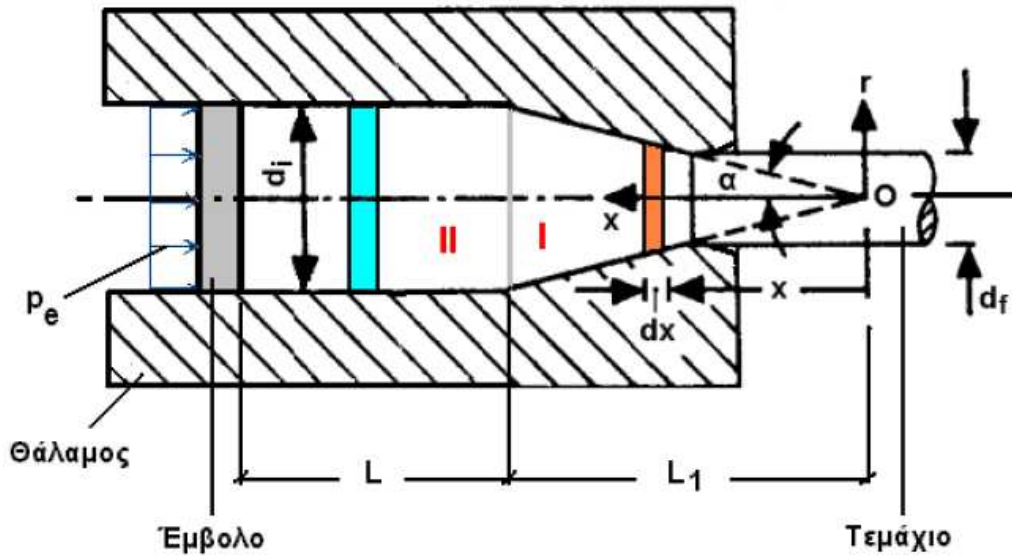
Σχήμα 6: Εσωτερική ρωγμάτωση



Σχήμα 7: Μηχανισμός δημιουργίας εσωτερικής ρωγμάτωσης

1.7. Μηχανική της Διέλασης

Θεωρούμε διέλαση μέσω κωνικής μήτρας (Σχήμα 8).



Σχήμα 8: Διέλαση μέσω κωνικής μήτρας

Αναγνώριση του προβλήματος

- Διέλαση μέσω κωνικής μήτρας με δύναμη εμβόλου που ασκεί θλιπτική τάση p_e .
- Υφίστανται δύο διακεκριμένες περιοχές, η κωνική περιοχή I (μήτρα) και η κυλινδρική περιοχή II (θάλαμος).
- Συνθήκες τριβής κατά **Coulomb** ($\tau = \mu p$) στην περιοχή I και συνθήκες **sticking** στην περιοχή II.
- Ροή του υλικού μόνο προς τα έξω.
- Θεωρούμε κυλινδρικό σύστημα αξόνων (r, θ, x) με άξονα x τον άξονα συμμετρίας του σύρματος με αρχή την κορυφή O του κώνου.
- Σε κάθε μία από τις περιοχές I και II θα μελετηθεί η ισορροπία στοιχειώδους λωρίδας πάχους dx , σε απόσταση x από τον άξονα, όπου η τριβή θα έχει φορά προς τα αριστερά.

A. Περιοχή I:

Ισορροπία στοιχειώδους λωρίδας

- Από την υφιστάμενη γεωμετρία προκύπτουν οι ακόλουθες σχέσεις:

$$r = x \cdot \tan a \quad (1a)$$

$$dr = dx \cdot \tan a \quad (1\beta)$$

$$ds = \frac{dx}{\cos a} \quad (1\gamma)$$

- Ισορροπία στοιχειώδους λωρίδας κατά τον άξονα x (Σχήμα 9)

Οι συνιστώσες δυνάμεις είναι:

$$(\sigma_x + d\sigma_x) \pi (r + dr)^2$$

$$-\sigma_x \pi r^2$$

$$p \cdot 2\pi r \cdot ds \cdot \sin a = p \cdot 2\pi r \frac{dx}{\cos a} \sin a = p \cdot 2\pi r \cdot \tan a \cdot dx$$

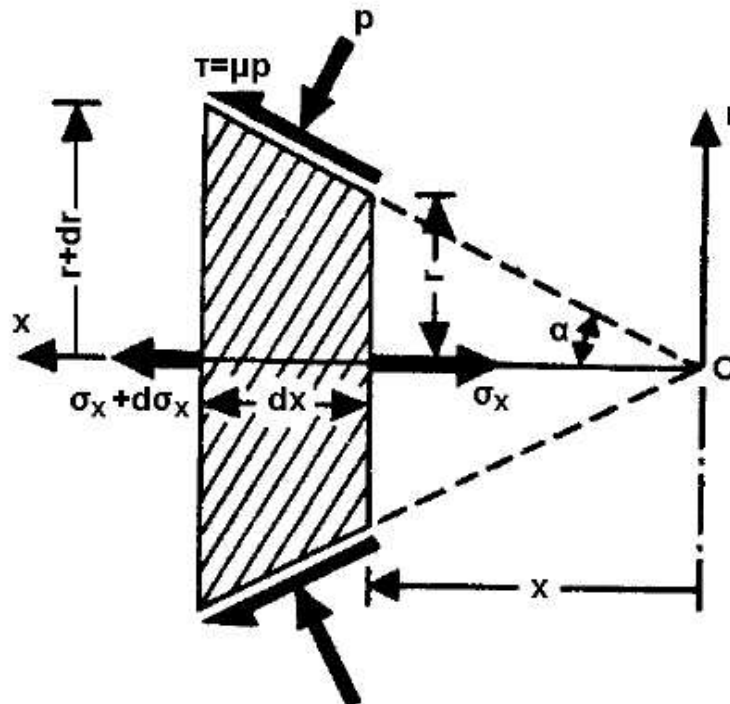
$$\tau \cdot 2\pi r \cdot ds \cdot \cos a = \mu p \cdot 2\pi r \frac{dx}{\cos a} \cos a = \mu p \cdot 2\pi r \cdot dx$$

Η εξίσωση ισορροπίας γράφεται:

$$(\sigma_x + d\sigma_x) \pi (r + dr)^2 - \sigma_x \pi r^2 + p \cdot 2\pi r \cdot \tan a \cdot dx + \mu p \cdot 2\pi r \cdot dx = 0$$

ή λόγω των εξισώσεων (1) και με απαλοιφή του x:

$$r \cdot d\sigma_x + 2[\sigma_x + p(1 + \mu \cdot \cot a)] \cdot dr = 0 \quad (2)$$

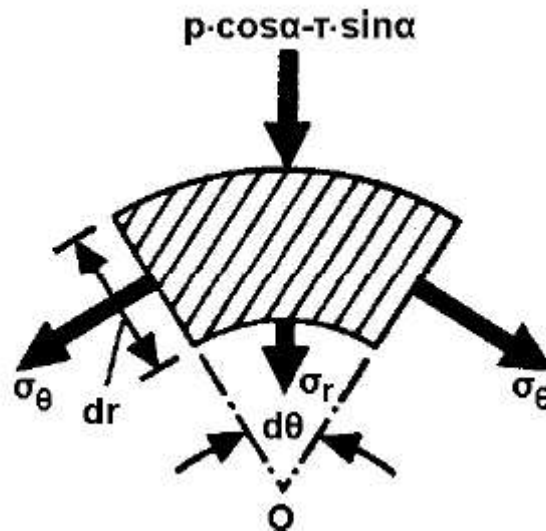


Σχήμα 9 : Ισορροπία στοιχειώδους λωρίδας κατά τον άξονα x

Εισαγωγή κριτηρίου διαρροής

Κατά τα γνωστά ισχύει $\sigma_1 - \sigma_3 = Y$.

Θεωρώντας ως κύριες διευθύνσεις τις x και r , αντίστοιχα (δηλαδή $\sigma_1 - \sigma_x$ και $\sigma_3 = \sigma_r$), με κατάλληλες τομές της στοιχειώδους λωρίδας, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 10**, ελευθερώνονται εσωτερικές τάσεις σ_r και σ_θ .



Σχήμα 10 : Ισορροπία κατά διεύθυνση r

Από την ισορροπία κατά την ακτινική διεύθυνση r προκύπτει:

$$-(p \cdot \cos a - \mu p \cdot \sin a)(r + dr) d\theta \cdot dx - \sigma_r r \cdot d\theta \cdot dx - 2\sigma_\theta \sin \frac{d\theta}{2} \cdot dr \cdot dx = 0$$

Θέτοντας $\sigma_r = \sigma_\theta$ και αντικαθιστώντας το \sin με το τόξο του, μετά την εκτέλεση των πράξεων λαμβάνεται:

$$\sigma_r = -p(1 - \mu \cdot \tan a)$$

και επειδή $\mu \cdot \tan a \rightarrow 0$, τελικά θα είναι:

$$\sigma_r = -p \quad (3)$$

Με αντικατάσταση στο κριτήριο διαρροής παίρνουμε:

$$\sigma_x - (-p) = Y$$

ή τελικά

$$p = Y - \sigma_x \quad (4)$$

Επίλυση

Η εξίσωση (2) γίνεται λόγω της εξίσωσης (4)

$$r \cdot d\sigma_x + 2 \cdot [\sigma_x + (Y - \sigma_x)(1 + \mu \cdot \cot a)] \cdot dr = 0 \quad \text{ή θέτοντας} \quad B = \mu \cdot \cot a$$

$$\frac{dr}{r} = \frac{d\sigma_x}{2 \cdot [\sigma_x + (Y - \sigma_x)(1 + B)]} \quad \text{ή}$$

$$\frac{dr}{r} = \frac{d\sigma_x}{2 \cdot [Y(1 + B) - B\sigma_x]} \quad \text{ή}$$

$$\frac{dr}{r} = \frac{d[(1 + B)Y - B\sigma_x]}{2B \cdot [(1 + B)Y - B\sigma_x]} \quad \text{ή με ολοκλήρωση}$$

$$\ln r = \frac{1}{2B} \ln [(1 + B)Y - B\sigma_x] + c \quad (5)$$

Οριακή συνθήκη για τον προσδιορισμό της σταθεράς ολοκλήρωσης c.

Στην έξοδο ($r = d_f/2$) η ροή είναι ελεύθερη, συνεπώς θα είναι $\sigma_x = 0$. Με αντικατάσταση στην εξίσωση (5) προκύπτει:

$$c = \ln \frac{d_f}{2} - \frac{1}{2B} \ln [(1 + B)Y] \quad (6)$$

Από τον συνδυασμό των εξισώσεων (5) και (6) παίρνουμε:

$$\ln \left(\frac{2r}{d_f} \right) = \frac{1}{2B} \ln \left[\frac{(1 + B)Y - B\sigma_x}{(1 + B)Y} \right] \quad \text{ή}$$

$$\left(\frac{2r}{d_f} \right)^{2B} = \frac{(1 + B)Y - B\sigma_x}{(1 + B)Y} \quad \text{ή μετά την εκτέλεση των πράξεων}$$

$$\sigma_x = Y \left(\frac{1 + B}{B} \right) \left[1 - \left(\frac{2r}{d_f} \right)^{2B} \right] \quad (7)$$

Η αντίστοιχη τάση στην είσοδο της μήτρας ($2r = d_i$) είναι:

$$\sigma_{xi} = Y \left(\frac{1 + B}{B} \right) \left[1 - \left(\frac{d_i}{d_f} \right)^{2B} \right] \quad (8)$$

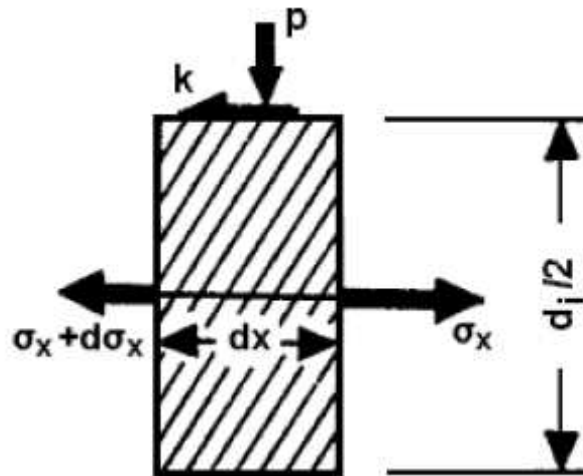
B. Περιοχή II:

Ισορροπία στοιχειώδους λωρίδας

Από την ισορροπία κατά τον άξονα x προκύπτει (Σχήμα 11)

$$(\sigma_x + d\sigma_x) \cdot \frac{\pi \cdot d_i^2}{4} - \sigma_x \cdot \frac{\pi \cdot d_i^2}{4} + k \cdot (\pi d_i) \cdot dx = 0$$

ή μετά την εκτέλεση των πράξεων $d\sigma_x = -\frac{4k}{d_i} \cdot dx$ (9)



Σχήμα 11: Ισορροπία στοιχειώδους λωρίδας

Επίλυση

Η εξίσωση (9) με ολοκλήρωση δίνει:

$$\sigma_x = -\frac{4kx}{d_i} + c_1 \quad (10)$$

Οριακές συνθήκες

(i) Στην θέση $x=L_1$ είναι $\sigma_x = \sigma_{xi}$, από την οποία υπολογίζεται η σταθερά ολοκλήρωσης c_1

$$c_1 = Y \left(\frac{1+B}{B} \right) \left[1 - \left(\frac{d_i}{d_f} \right)^{2B} \right] + \frac{4kL_1}{d_i} \quad (11)$$

(ii) Στην θέση $x=L+L_1$ είναι $\sigma_x = -p_e$ (θλιπτική), από την οποία υπολογίζεται η πίεση εμβόλου (σε συνδυασμό με τις εξισώσεις (10) και (11))

$$p_e = Y \left(\frac{1+B}{B} \right) \left[\left(\frac{d_i}{d_f} \right)^{2B} - 1 \right] + \frac{4kL}{d_i} \quad (12\alpha)$$

ή αντικαθιστώντας για τον λόγο διέλασης $R = \frac{A_i}{A_f} = \left(\frac{d_i}{d_f} \right)^2$

$$p_e = Y \left(\frac{1+B}{B} \right) (R^B - 1) + \frac{4kL}{d_i} \quad (12\beta)$$

Δύναμη εμβόλου

$$P_e = p_e \cdot \frac{\pi d_i^2}{4} \quad (13)$$

2. Διμεταλλικά Υλικά

2.1. Γενικά

Η συνεχής ανάπτυξη της τεχνολογίας των κατασκευών κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών πρόβαλε την ανάγκη χρησιμοποίησης νέων υλικών που θα παρουσιάζουν συγκεκριμένες και βελτιωμένες ιδιότητες. Στα πλαίσια λοιπόν αυτής της εξέλιξης, προωθήθηκε η χρήση των διμεταλλικών και των πορωδών υλικών και συνεκδοχικά η εφαρμογή των κατεργασιών διαμόρφωσης σε αυτά.

Αρχικά η εφαρμογή και η ανάλυση των περισσότερων κατεργασιών διαμόρφωσης μετάλλων βασίζονταν σε μεγάλο βαθμό στην εμπειρία και η εξάσκηση ήταν ουσιαστικά η εφαρμογή δοκιμαστικών και λανθασμένων τεχνικών. Όμως στα τελευταία χρόνια πραγματοποιήθηκε ειτεταμένη ερευνητική εργασία προκειμένου να κατανοηθούν οι μηχανισμοί που εμπλέκονται στις διάφορες κατεργασίες. Είναι γνωστό ότι κατά την διάρκεια της παραγωγής σωληνοειδών προϊόντων με εφαρμογή της διέλασης, η πίεση διέλασης και η κατάσταση των τάσεων και των μοντέλων ροής επηρεάζονται από διάφορες παραμέτρους όπως η μείωση της επιφανειακής διατομής, το σχήμα τόσο της μήτρας όσο και του πυρήνα, οι συνθήκες τριβής στις διεπιφάνειες εργαλείου – τεμαχίου και οι βασικές ιδιότητες αντοχής και τριβής του υλικού.

Οι σύνθετες ράβδοι, που αποτελούνται από δύο ή περισσότερα στρώματα διαφορετικών υλικών, χρησιμοποιούνται ευρέως στις βιομηχανικές εφαρμογές εξαιτίας της ποικιλίας των ιδιοτήτων που παρουσιάζουν όπως η υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα, η υψηλή ειδική αντίσταση σε διάβρωση, η υψηλή αντοχή και η βελτιωμένη αντίσταση σε φθορά. Οι κατεργασίες της υδροστατικής διέλασης χρησιμοποιούνται συνήθως για την παραγωγή σύνθετων ράβδων λόγω της χαμηλής πίεσης, του υψηλού λόγου διέλασης και της μεγάλης ημιγωνίας μήτρας που παρουσιάζουν. Όμως ο απαιτούμενος εξοπλισμός για την κατεργασία αυτή είναι σχετικά ακριβός και η διατήρηση και συντήρηση αυτού πολύπλοκη και δύσκολη.

Κατά την 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 είναι περισσότερο πολύπλοκος από τον αντίστοιχο μηχανισμό της διέλασης απλών μετάλλων. Μέχρι σήμερα έχουν παρουσιαστεί αριστέες μελέτες σχετικά με την διέλαση των σύνθετων ράβδων. Ο Avitzur χρησιμοποίησε την μέθοδο του άνω οριακού φορτίου για να αναλύσει την θραύση του πυρήνα, ενώ ο Osaka χρησιμοποίησε την ενεργειακή μέθοδο για να προσδιορίσει την ανάπτυξη λαιμού (**necking**) στο σκληρό στρώμα του πυρήνα. Όμως θα πρέπει να σημειωθεί ότι όλες αυτές οι μελέτες έγιναν με την βασική προϋπόθεση ότι τα υλικά που αποτελούν τις ράβδους είναι ισχυρά συνδεδεμένα μεταξύ τους πριν την πραγματοποίηση της κατεργασίας της διέλασης. Ο Yang πρότεινε ένα κινηματικά αποδεικτό πεδίο ταχυτήτων για την ανάλυση των άκαμπτων – πλαστικών ορίων στην είσοδο και την έξοδο της μήτρας καθώς και της απαιτούμενης πίεσης διέλασης. Ακόμα ο Silva πρότεινε ένα πεδίο ταχυτήτων για την διέλαση των σύνθετων ράβδων όμως το μοντέλο του μπορεί να εφαρμοστεί μόνο στις περιπτώσεις επίπεδης μήτρας και συνεπώς δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην μελέτη των κατεργασιών διέλασης με μήτρα μεγαλύτερης ημιγωνίας.

Οι Tayal και Natarajan και οι Alcaraz και Sevillano επιχείρησαν να αναλύσουν την κατανομή των τάσεων και των παραμορφώσεων στις ράβδους, καθώς και την γεωμετρία της διεπιφάνειας και την κατεργασία των σύνθετων ράβδων με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

2.2. Παραδείγματα Εφαρμογών Διμεταλλικών Υλικών

Εξαιτίας των απαιτήσεων για επαναλαμβανόμενη και μακρά λειτουργία σε καυστήρες υψηλών θερμοκρασιών, όπως αυτοί των κινητήρων διαστημικών σκαφών [2], 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.

Στην ηλεκτρική, χημική και πυρηνική βιομηχανία, όπου οι ιδιαίτερες συνθήκες απαιτούν διαφορετικές ιδιότητες στην εξωτερική και στην εσωτερική επιφάνεια ενός σωλήνα ή ράβδου, τα διμεταλλικά υλικά χρησιμοποιούνται ευρέως. 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 δύο 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 [3], απαιτεί έναν μεγάλο όγκο διμεταλλικών προϊόντων, ιδίως σε σύρματα και καλώδια ή σε αγωγούς εξαιρετικά μικρής διατομής.

Σε διάφορες κατασκευές και εγκαταστάσεις έχουν εύρος εφαρμογών διμεταλλικά προϊόντα [4] [5], όπως π.χ.: σωλήνες λεβήτων βιομάζας, λέβητες αστικών αποβλήτων (οι σωλήνες των υπερθερμαντήρων και των ατμοποιητών στους λέβητες αποτέφρωσης απορριμμάτων εκτίθενται σε ισχυρά διαβρωτικά περιβάλλοντα), σωληνογραμμές σε εγκαταστάσεις διυλιστηρίων, επεξεργασίας καυσίμων αερίων, παραγωγής λιπασμάτων και χημικών. Επιπλέον αγωγοί και σωληνώσεις σε χημικές και πετροχημικές βιομηχανίες, ιδίως για την διαδικασία διάσπασης του αιθυλενίου.

Μεγάλο εύρος εφαρμογών παρουσιάζουν επίσης τα διμεταλλικά ρουλεμάν [6], τα οποία χρησιμοποιούνται: (α) στην αυτοκινητοβιομηχανία και στα αγροτικά μηχανήματα, γιατί έχουν υψηλές αντοχές, δεν απαιτούν συχνή συντήρηση και αντεπεξέρχονται στις υψηλές απαιτήσεις, (β) ως υδραυλικός εξοπλισμός, λόγω της μεγάλης τους αντοχής σε διάβρωση, και συνολικότερα

στη βιομηχανία και όχι μόνο, όπου απαιτούνται ιδιαίτερες συνθήκες που τα απλά ρουλεμάν δεν καλύπτουν.

Γενικά οι διμεταλλικές ράβδοι και συνολικότερα τα διμεταλλικά προϊόντα βρίσκουν εφαρμογή σε:

- Ναυπηγική
- Φίλτρα
- Στοιχεία μετάδοσης θερμότητας
- Εφαρμογές φαρμακοβιομηχανιών
- Εφαρμογές βιομηχανιών τροφίμων
- Ατμολέβητες
- Εναλλάκτες θερμότητας
- Ηλεκτρόδια
- Σύρματα και Καλώδια
- Μεταφορά ρευστών με διαφορετικά διαβρωτικά χαρακτηριστικά
- Εφαρμογές υψηλής πίεσης σε προηγμένα ενεργειακά συστήματα και συστήματα ανάκτησης ενέργειας (συστήματα υψηλής θερμοκρασίας).

3. Η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων

3.1. Ιστορικά Στοιχεία [7]

Στην δεκαετία του 1950 οι αεροναυπηγοί βρέθηκαν μπροστά στην ιδιαίτερα πιεστική ανάγκη να βρουν μεθόδους υπολογισμού των αεροναυπηγικών κατασκευών που την εποχή εκείνη είχαν αρχίσει ν' αναπτύσσονται ραγδαία. Έτσι στα μέσα στην δεκαετία 1950 ανέπτυξαν ιδέες που μπορούν να θεωρηθούν οι προπομποί της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Σύμφωνα με τις ιδέες αυτές η κατασκευή χωρίζεται σε μικρότερα τμήματα- στοιχεία που συνδέονται μεταξύ τους με κόμβους. Οι κομβικές δυνάμεις και οι κομβικές μετατοπίσεις συνδέονται με σχέσεις. Η παραπέρα ανάπτυξη της προσεγγιστικής αυτής μεθόδου οφείλεται σ' ένα τεράστιο αριθμό εργασιών που δημοσίευσαν, και εξακολούθησαν να δημοσιεύουν ερευνητές μηχανικοί. Η αλήθεια όμως είναι ότι η πρώτη δημοσίευση πάνω στην μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και μάλιστα σε αρκετά γενική μορφή, έγινε από τον διάσημο μαθηματικό Courant το 1940. Όμως η εργασία αυτή πέρασε απαρατήρητη από τους μαθηματικούς και δεν έγινε φυσικά γνωστή στους μηχανικούς που ανακάλυψαν ξανά και θεμελίωσαν. Μόνο μετά το 1967, όταν δημοσιεύτηκε η πρώτη έκδοση του βιβλίου του O.C.Zienkiewicz πάνω στα πεπερασμένα στοιχεία, αρχίζουν ουσιαστικά να ασχολούνται οι μαθηματικοί με την μέθοδο. Η προσπάθειά τους ήταν να υπολογίσουν το σφάλμα καθώς και την ταχύτητα σύγκλισης της μεθόδου. Ακόμα προσπάθησαν να εξηγήσουν μαθηματικά διάφορες ιδιαίτερα ευφυείς και πετυχημένες εμπνεύσεις των μηχανικών (δοκιμασία συρραφής, ισοπαραμετρικά στοιχεία κλπ). Βέβαια αυτήν την στιγμή τα πεπερασμένα στοιχεία έχουν θεμελιωθεί μαθηματικά και αποτελούν μία ιδιαίτερα ισχυρή μέθοδο της αριθμητικής ανάλυσης για την επίλυση οριακών προβλημάτων (**boundary value problems**). Αυτή όμως η πλευρά της μεθόδου δεν θα μας απασχολήσει εδώ.

Όπως έχουμε πει προηγούμενα, τα πεπερασμένα στοιχεία αποτελούν επέκταση της μητρωϊκής ανάλυσης κατασκευών στις μη ραβδωτές, δηλαδή στις ολόσωμες κατασκευές.

Έτσι πάλι η κατασκευή υποδιαιρείται σε στοιχεία. Η υποδιαιρέση εδώ είναι πιο σύνθετη διαδικασία από ότι είναι η αντίστοιχη διαδικασία στους ραβδωτούς φορείς. Τα στοιχεία εξακολουθούν να είναι από το ίδιο υλικό, η σύνδεση όμως μεταξύ τους γίνεται σε έναν αριθμό διακριτών σημείων, τους κόμβους. Η ικανοποίηση των σχέσεων ισορροπίας και συμβιβαστού περιορίζεται σε ένα πεπερασμένο αριθμό σημείων της κατασκευής. Για να αποκτήσουμε την ακριβή λύση πρέπει το μέγεθος των στοιχείων να γίνει απειροστό. Αν το μέγεθος των στοιχείων είναι πεπερασμένο, τα αποτελέσματα θα είναι προσεγγιστικά θα περιέχουν δηλαδή κάποιο σφάλμα που θα γίνεται μικρότερο όσο το μέγεθος των στοιχείων μειώνεται.

Μια άλλη προσέγγιση εισάγεται στην σχέση που συνδέει τις μετατοπίσεις στους κόμβους με τις κομβικές δυνάμεις. Η απόδειξη αυτών των σχέσεων βασίζεται σε ενεργειακά θεωρήματα και διευκολύνεται από την απλή μορφή των στοιχείων. Όμως στην μητρωϊκή ανάλυση των κατασκευών έτσι και εδώ έχουμε την δυνατότητα να εκλέξουμε σαν βασικές μεταβλητές του προβλήματος τις κομβικές μετατοπίσεις ή τις κομβικές δυνάμεις. Έτσι έχουμε δύο μοντέλα ανάπτυξης της μεθόδου, το μοντέλο των μετατοπίσεων ή κινηματικό μοντέλο και το μοντέλο των δυνάμεων ή στατικό μοντέλο. Βέβαια η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων έχει παύσει από καιρό να αποτελεί μόνο μία απλή προέκταση της μητρωϊκής ανάλυσης των κατασκευών και είναι μία προσεγγιστική μέθοδος που στηρίζεται στην μέθοδο των μεταβολών. Αυτό επιτρέπει μεγαλύτερη ευελιξία στην μέθοδο.

Έτσι εκτός από τα δύο αυτά μοντέλα υπάρχει το μικτό μοντέλο στο οποίο μεταβλητές του προβλήματος είναι τόσο οι κομβικές μετατοπίσεις όσο και οι κομβικές δυνάμεις. Ακόμη υπάρχει και το υβριδικό μοντέλο το οποίο είναι ακόμη πιο σύνθετο. Τα τρία τελευταία μοντέλα έχουν μεγάλο ενδιαφέρον ιδιαίτερα για κατασκευές όπως οι πλάκες κ.λ.π. Όμως το μοντέλο που κύρια χρησιμοποιείται είναι το μοντέλο των μετατοπίσεων. Η προτίμηση προς το μοντέλο αυτό οφείλεται στην ευκολία της εξαγωγής των σχέσεων, στην μεγάλη προγραμματιστική απλότητα, κ.λ.π.

Το αρχαιότερο εν ζωή εμπορικό πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων είναι το **NASTRAN** ενώ η συστηματική παράθεση των σήμερα υπαρχόντων προγραμμάτων και των δυνατοτήτων τους θα μπορούσε να αποτελέσει ένα ογκώδες εγχειρίδιο. Με την επιφύλαξη παραλείψεων, κατά αλφαβητική σειρά άλλα γενικής χρήσης προγράμματα είναι τα εξής: **ABAQUS, ADINA, ALGOR, ANSYS, COSMOS/M, DYTRAN, MARC, NISA, LS-DYNA3D, LUSAS, MSC/NASTRAN, SOL YIA**, 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**, κ.α. Εξειδικευμένα προγράμματα για συνδυασμένη κινηματική και ελαστική ανάλυση μηχανισμών είναι: **ADAMS, D.ApS**.

3.2. Βασικά Στοιχεία της Μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων [8]

Όλα τα φυσικά φαινόμενα που αντιμετωπίζονται στη μηχανολογία μοντελοποιούνται από διαφορικές εξισώσεις.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μία 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 ήταν 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.

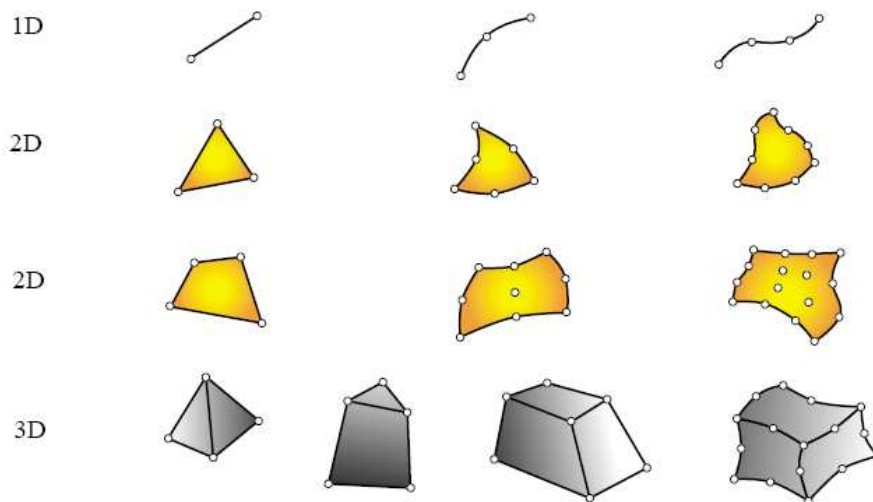
Συνοπτικά, λοιπόν, ένα πεπερασμένο στοιχείο είναι μία υποπεριοχή ενός μέσου (συνεχούς ή διακριτού), με πεπερασμένο μέγεθος και συνήθως πιο απλής γεωμετρίας από το μέσο το οποίο προσομοιάζει.

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, δισδιάστατα και τρισδιάστατα στοιχεία. Τα δισδιάστατα 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 (Σχήμα 12).



Σχήμα 12: Τυπικές γεωμετρίες πεπερασμένων στοιχείων σε μία έως τρεις διαστάσεις

Η υποδιαίρεση μιας ολόσωμης κατασκευής σε πεπερασμένα στοιχεία είναι αριετὰ σύνθετη διαδικασία. Όπως προαναφέρθηκε, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μια προσεγγιστική μέθοδος. Άρα τα αποτελέσματα που παίρνουμε από τη χρήση της μεθόδου σε μία 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 μία συμβιβαστική λύση. Συνήθως πραγματοποιείται μια συμπύκνωση των στοιχείων στις περιοχές όπου υπολογίζεται ότι θα υπάρχουν ραγδαίες μεταβολές τάσεων.

Συνοψίζοντας, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων έχει σκοπό 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 ξεινήσει εδώ και πολλά χρόνια με σκοπό την προσομοίωση της συμπεριφοράς σε θλίψη διαφόρων κατασκευών και τη μελέτη ολοκληρών συστημάτων αλλά και μεμονωμένων συνιστωσών τους.

3.3. Στάδια Επίλυσης Προβλήματος με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων

Ένα από τα πρώτα μελήματα του μηχανικού όταν αυτός αναλάβει την ανάπτυξη ενός μοντέλου, είναι η επιλογή των κατάλληλων πεπερασμένων στοιχείων. Ακόμη και σε δισδιάστατες κατασκευές η χρήση τριγωνικών στοιχείων τριών κόμβων και τετραπλευρικών στοιχείων τεσσάρων κόμβων δεν είναι η μόνη επιλογή του, ανάλογα με τις δυνατότητες του διαθέσιμου λογισμικού. Πράγματι, μια από τις κρισιμότερες αποφάσεις είναι η επιλογή των κατάλληλων στοιχείων με τον κατάλληλο αριθμό κόμβων από τη διαθέσιμη βιβλιοθήκη στοιχείων. Επιπρόσθετα, το πλήθος των στοιχείων (με άλλα λόγια το μέσο μέγεθος των στοιχείων) που πρέπει να χρησιμοποιηθούν για την επίλυση ενός συγκεκριμένου προβλήματος είναι αποτέλεσμα της κρίσης του μηχανικού.

Σαν γενικός κανόνας, όσο μεγαλύτερο είναι το πλήθος των κόμβων και των στοιχείων (στην *h version*) ή όσο μεγαλύτερος ο βαθμός πολυωνύμου της συνάρτησης μορφής (στην *P version*), τόσο ακριβέστερη είναι η λύση των πεπερασμένων στοιχείων, αλλά επίσης τόσο πιο δαπανηρή είναι η επίλυση. Οι διάφοροι τύποι πεπερασμένων στοιχείων εισάγονται στην επόμενη ενότητα. Ένα άλλο σημαντικό πρόβλημα είναι η γένεση πλέγματος του υπό ανάλυση αντικειμένου, ειδικά όταν έχει περίπλοκο γεωμετρικό σχήμα. Η δημιουργία τρισδιάστατων πλεγμάτων είναι μια διαδικασία που απαιτεί πολλές εργατώρες και είναι επιρρεπής σε σφάλματα. Γίνονται πολλές προσπάθειες αυτόματης γένεσης πλεγμάτων που να συνδέονται με συστήματα μοντελοποίησης όγκου (*solid modeling*).

Στην κλασική μέθοδο (στην *h version*), εάν n είναι το πλήθος των κόμβων τότε το πλήθος των βαθμών ελευθερίας είναι $2n$ και $3n$ για δισδιάστατα και τρισδιάστατα μοντέλα, αντίστοιχα.

Μοντελοποίηση

Το σύνολο των απαραίτητων διαδικασιών για την ανάπτυξη ενός πλήρους μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων, δηλαδή η εισαγωγή της γεωμετρίας, η γένεση πλέγματος, η επιβολή στηρίξεων και φόρτισης αποτελούν αυτό που συνοπτικά ονομάζεται μοντελοποίηση πεπερασμένων στοιχείων (*finite-element modeling*), η οποία συνήθως εκτελείται με τη βοήθεια κατάλληλου προεπεξεργαστή. Πολύ παλαιότερα, η εισαγωγή των δεδομένων δινόταν με γραμμές

εντολών με τη βοήθεια ενός αυτόνομου αρχείου δεδομένων (batch file).

Ο Προ-επεξεργαστής (pre-processor) ξεκινάει από τη γεωμετρία του αντικειμένου ή του πεδίου ορισμού του προβλήματος. Παραδοσιακά συστήματα FEA (Finite Element Analysis) είχαν μόνο στοιχειώδεις λειτουργίες μοντελοποίησης, αλλά σήμερα τα περισσότερα είτε προσφέρουν προηγμένες δυνατότητες ή έχουν στενούς δεσμούς με συστήματα CAD (μερικές φορές και τα δύο). Συστήματα που στηρίζονται σε γεωμετρική μοντελοποίηση CAD είτε εργάζονται απευθείας με το μοντέλο CAD ή μεταφράζουν και εισάγουν τη γεωμετρία. Η απευθείας σύνδεση με CAD κερδίζει όλο και μεγαλύτερο έδαφος διότι εξαλείφει τα βήματα μετάφρασης την απώλεια δεδομένων και μικραίνει τον κύκλο σχεδιασμού-ανάλυσης - αλλαγής. Περαιτέρω, η χρήση συστήματος CAD διευκολύνει τη μοντελοποίηση και παρέχει πιο ισχυρές λειτουργίες δημιουργίας και αλλαγής σύνθετης γεωμετρίας.

Πράγματι, σήμερα τα περισσότερα υβριδικά συστήματα μοντελοποίησης (με ολοκληρωμένη μοντελοποίηση όγκου, επιφάνειας και wireframe, και παραμετρικών μεθόδων που στηρίζονται σε features) μπορούν να κτίσουν οποιαδήποτε γεωμετρία απαιτείται για ανάλυση. Τα περισσότερα συστήματα FEA δίνουν επίσης έμφαση στη δυνατότητα που έχουν να εισάγουν τη γεωμετρία, είτε μέσω τυποποιήσεων όπως το IGES ή απευθείας από συγκεκριμένα συστήματα CAD. Ωστόσο, η απευθείας χρήση δεν είναι πάντα άμεσα εφαρμόσιμη. Το μοντέλο μπορεί να φαίνεται στο μάτι ότι είναι τέλειο αλλά μπορεί στην πραγματικότητα να έχει σφάλματα που αποκαλύπτονται στο σύστημα FEA, κυρίως κατά τη διαδικασία γένεσης πλέγματος. Μερικά συστήματα προσφέρουν λειτουργίες που μπορούν να «καθαρίσουν» την εισαγόμενη γεωμετρία.

Επιπλέον, ακόμη και αν η γεωμετρία CAD δεν περιέχει σφάλματα, η ανάλυση δεν απαιτεί όλες τις λεπτομέρειές του, οπότε μερικές από αυτές (π.χ. ένα fillet) θα μπορούσαν να απαλειφθούν. Μερικά συστήματα διαθέτουν τέτοιες αυτόματες δυνατότητες απενεργοποίησης γεωμετρικών οντοτήτων.

Το επόμενο στάδιο είναι η δημιουργία πλέγματος και κατανομής κόμβων. Όταν σε κάθε πλέγμα αποδίδονται κόμβοι, τότε αυτό μετατρέπεται σε πεπερασμένο στοιχείο. Η γένεση πλέγματος είναι το πλέον σημαντικό και δύσκολο στάδιο της μοντελοποίησης πεπερασμένων στοιχείων. Για τη διευκόλυνση αυτού του σταδίου, σήμερα όλα τα συστήματα προσφέρουν

δυνατότητες αυτόματης γένεσης πλέγματος. Η τυπική προσέγγιση είναι να προσφέρουν αυτόματο πλέγμα τετραεδρικών στοιχείων για στερεή γεωμετρία και τετραπλευρικά ή τριγωνικά στοιχεία για επιφάνεια στον τρισδιάστατο χώρο (κελύφη, επίπεδη εντατική ή επίπεδη παραμορφωσιακή κατάσταση). Πολλά συστήματα επιτρέπουν στους χρήστες να επέμβουν στις παραμέτρους αυτόματης γένεσης πλέγματος όπως η πυκνότητα πλέγματος. Αυτές επιπλέον επιτρέπουν τοπική επέμβαση σε κρίσιμες περιοχές. Πολλά συστήματα επιτρέπουν τη διασύνδεση πλέγματος με τη γεωμετρία έτσι ώστε κάθε αλλαγή αυτής να αντανακλάται αυτόματα στο πλέγμα.

Τα διάφορα στοιχεία που υποστηρίζονται από ένα σύστημα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων αποτελούν τη λεγόμενη βιβλιοθήκη στοιχείων (*element library*). Όσο πιο μεγάλο το είδος των στοιχείων τόσο περισσότερα είδη προβλημάτων μπορούν να επιλυθούν. Να σημειωθεί ότι το ίδιο πλέγμα μπορεί να αντιστοιχεί σε διαφορετικά πεπερασμένα στοιχεία ανάλογα με τον αριθμό κόμβων που αποδίδονται σε αυτό. Τέλος, οι ζώνες στις οποίες αναμένεται απότομη μεταβολή στη συμπεριφορά των προς επίλυση αγνώστων (όπως συγκέντρωση τάσεων γύρω από οπές) πρέπει να διακριτοποιηθούν από στοιχεία μεγαλύτερης πυκνότητας πλέγματος από εκείνες που εμφανίζουν προοδευτική μεταβολή.

Μια διαφορετική προσέγγιση στο δίλημμα του πλέγματος είναι η χρήση της **p-version** μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων. Αυτή στηρίζεται σε ένα απλούστερο, αυτόματα γεννημένο πλέγμα, αλλά κατόπιν μεταβάλλει αυτόματα τον πολυωνυμικό βαθμό των συναρτήσεων μορφής. Παρόλο που σήμερα είναι διαθέσιμα πολλά τέτοια προγράμματα FEA, δύο προγράμματα (PTC's Pro/MECHANICA και CADSI's PolyFEM) σχεδιάστηκαν ειδικά για ανάλυση τύπου **p-version**. Επιπλέον από το εύκολο πλέγμα, τα πλεονεκτήματα αυτής της προσέγγισης είναι η ικανότητα να καθορίσουν όρια ακρίβειας και πλησιέστερης προσέγγισης της γεωμετρίας του μοντέλου CAD. Χρησιμοποιώντας χαμηλότερο επίπεδο ακρίβειας, ο σχεδιαστής μπορεί να πάρει γρήγορα αποτελέσματα ανάλυσης στο προκαταρκτικό στάδιο σχεδιασμού.

Αφού επιλεγεί η διάταξη των στοιχείων, καθορίζεται ο τύπος της ανάλυσης (π.χ. στατική ή δυναμική, γραμμική ή μη-γραμμική, επίπεδη εντατική κατάσταση, και επίπεδη παραμορφωσιακή κατάσταση). Επίσης, οι άγνωστοι ή αλλιώς οι βαθμοί ελευθερίας συσχετίζονται με τους κόμβους. Οι άγνωστοι περιέχουν μετατοπίσεις, περιστροφές, θερμοκρασία, ροή θερμότητας, Κ.Ο.Κ. Κατόπιν καθορίζονται οι οριακές συνθήκες. Οριακές συνθήκες όπως

μετατοπίσεις, δυνάμεις, και θερμοκρασίες συνήθως είναι γνωστές για το συνεχές τμήμα του συνόρου του αντικειμένου. Αυτές οι οριακές συνθήκες πρέπει να εκφραστούν σαν ένα σύνολο τιμών μετατοπίσεων, δυνάμεων, ή θερμοκρασιών σε συγκεκριμένους κόμβους των πεπερασμένων στοιχείων. Ωστόσο, μερικές φορές τα πεπερασμένα στοιχεία πρέπει να γεννηθούν χωρίς να έχουν οριακές συνθήκες. Εάν πρόκειται να εισαχθούν σημειακά φορτία, πρέπει να δημιουργηθούν κόμβοι στα αντίστοιχα σημεία εφαρμογής τους.

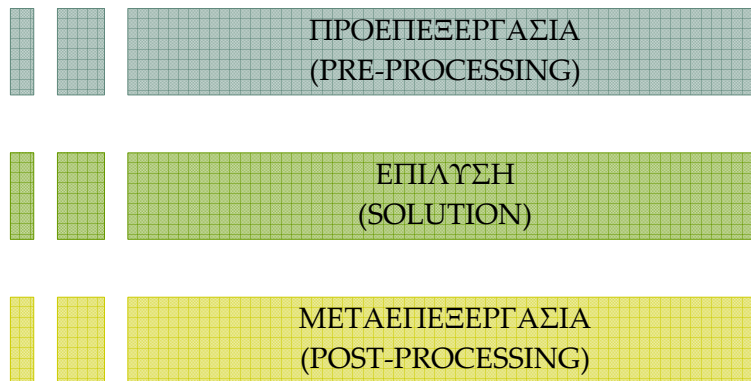
Τα περισσότερα συστήματα που είναι συνδεδεμένα με CAD επιτρέπουν στο χρήστη να ορίσει τις οριακές συνθήκες στη γεωμετρία CAD, και σε αυτή την περίπτωση οι οριακές συνθήκες μετατρέπονται σε ισοδύναμες οριακές συνθήκες στους κόμβους του πλέγματος από το ίδιο το σύστημα. Οι περισσότεροι μοντελοποιητές πεπερασμένων στοιχείων επίσης παρέχουν έναν αριθμό τρόπων εύκολου καθορισμού των φορτίσεων και των οριακών συνθηκών για το χειρισμό ευρείας κλίμακας προβλημάτων και ρεαλιστικών συνθηκών.

Σε κάθε πεπερασμένο στοιχείο πρέπει επίσης να αποδοθούν ιδιότητες υλικού. Αυτές οι ιδιότητες είναι τυπικά το μέτρο ελαστικότητας του Young και ο λόγος του Poisson για ελαστικές κατασκευές. Το πάχος στοιχείων κελύφους και πλακών διαχειρίζεται περισσότερο σαν ιδιότητα του υλικού παρά σαν γεωμετρική ιδιότητα για την αποφυγή επίλυσης του προβλήματος στις τρεις διαστάσεις.

Άλλες ιδιότητες υλικών περιλαμβάνουν θερμικές ιδιότητες (ειδική θερμότητα, συντελεστής αγωγιμότητας, λανθάνουσα θερμότητα, κλπ), ιξωδοελαστικότητα, κλπ, για άλλου τύπου προβλήματα. Γίνεται μόνο μια απλή παραδοχή: σε διαφορετικές περιοχές στοιχείων αποδίδονται διαφορετικές ιδιότητες υλικών. Αυτό δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να αναλύσει ένα αντικείμενο κατασκευασμένο από σύνθετο υλικό. Ένα κρίσιμο ζήτημα στην ανάλυση σύνθετων υλικών είναι η διαχείριση της διεπιφάνειας μεταξύ των στρώσεων προκειμένου να υπολογισθεί η αποκόλληση (delamination).

Από τη στιγμή που θα ορισθεί το μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων επιλέγοντας όλες τις παραμέτρους του πλέγματος, το μοντέλο εισάγεται στον κώδικα που εκτελεί την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. Μετά την αριθμητική επίλυση, τα αποτελέσματα απεικονίζονται σε ένα στάδιο που παραδοσιακά ονομάζεται μετά-επεξεργαστής (post-processor). Τα περισσότερα πακέτα προσφέρουν ποικίλους τρόπους καταλογοποίησης, εκτίμησης και απεικόνισης των αποτελεσμάτων, τα οποία περιλαμβάνουν τάσεις, παραμορφώσεις, και παραμορφωμένο σχήμα.

Γενικά η διαδικασία σχεδίασης 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 ράβδων, περιέχει 3 στάδια, τα οποία περιγράφονται στο Σχήμα 13.



Σχήμα 13: Αλληλουχία Σταδίων Επίλυσης Προβλήματος με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων

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

Προ-επεξεργασία

Η προ-επεξεργασία αναλαμβάνει να ετοιμάσει τα δεδομένα για την επίλυση. Δηλαδή, θα ετοιμάσει κάποια μητρωϊκά μεγέθη τα οποία η διαδικασία της επίλυσης θα τα χρησιμοποιήσει για να επιλύσει το πρόβλημα. Ο προ-επεξεργαστής 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 προ-επεξεργαστής, 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 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 μετά-επεξεργασίας, 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.

Μετά-επεξεργασία

Αφού γίνει η επίλυση, ακολουθεί η μετά-επεξεργασία 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.

3.4. Πρόγραμμα Πεπερασμένων Στοιχείων LS-DYNA

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.

Ο κώδικας **LS-DYNA** που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί εξέλιξη του προκατόχου του **DYNA 3D**, ο οποίος εμφανίστηκε για πρώτη φορά το 1976, προερχόμενος από το **Lawrence Livermore National Laboratory**. Η βασική χρήση του αφορούσε τη μελέτη συγκρούσεων βαρέων συμπαγών κατασκευών. Όμως η αρχική αυτή έκδοση έδινε στο χρήστη σχετικά περιορισμένες δυνατότητες, οι αναπτυσσόμενες ταχύτητες ήταν μικρές με συνέπεια ο υπολογιστικός χρόνος να είναι μεγάλος. Με το πέρασμα των χρόνων ο κώδικας συνεχώς εξελισσόταν και άρχισε να προσαρμόζεται στις ολοένα αυξανόμενες ανάγκες. Έτσι προστέθηκαν πολλές νέες δυνατότητες ενώ κάποιες ήδη υπάρχουσες εξελίχθηκαν. Σαν παράδειγμα αναφέρονται οι νέοι τύποι πεπερασμένων στοιχείων και υλικών, οι καινούργιες διεπιφάνειες ολίσθησης και το φιλικότερο περιβάλλον προς τον χρήστη. Σήμερα ο κώδικας έχει φθάσει σε πολύ υψηλά επίπεδα και αποτελεί απαραίτητο εργαλείο έρευνας στην αεροδυναμική τεχνολογία, σε πολλές αυτοκινητοβιομηχανίες, σε πανεπιστήμια καθώς και σε εργαστήρια τόσο σε εθνικό όσο και σε βιομηχανικό επίπεδο.

Κατασκευάστηκαν 15 μοντέλα διαφορετικών παραμέτρων και μελετήθηκε ο τρόπος παραμόρφωσής τους. Από την λήψη των διαγραμμάτων φορτίου – μετατόπισης μπορεί να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα για τον τρόπο διέλασης των δοκιμών. Επίσης, στα ίδια διαγράμματα παρουσιάζονται οι καμπύλες φορτίου μετατόπισης που εξήχθησαν από τον επίλυση του κώδικα **LS-DYNA** και πραγματοποιείται σύγκριση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

Δύο είναι τα βασικά προγράμματα του κώδικα. Το ένα είναι ο Προ/Μετά–επεξεργαστής (**Pre/Post-Processor**) ο οποίος στη συγκεκριμένη

περίπτωση είναι το πρόγραμμα FEMB (Finite Element Model Builder). Το άλλο είναι το ίδιο το LS-DYNA, το οποίο περιέχει ενσωματωμένα δυο προγράμματα, τον επεξεργαστή κειμένου (LS-DYNA Text Editor) και τον επιλυτή (LS-DYNA Solver).

Η διαδικασία που ακολουθείται περιλαμβάνει τα παρακάτω στάδια:

Με τη βοήθεια του FEMB κατασκευάζεται η βασική γεωμετρία του μοντέλου δίνοντάς του διαστάσεις με τη χρήση απλών γεωμετρικών σχημάτων. Ακολουθεί η διακριτοποίηση και η δημιουργία πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων με βάση την αρχική γεωμετρία. Καθορίζονται τα υλικά και οι φυσικές ιδιότητες των επιμέρους στοιχείων του μοντέλου. Στη συνέχεια ορίζονται διεπιφάνειες μεταξύ των σωμάτων που έρχονται σε επαφή. Τέλος καθορίζονται οι αρχικοί περιορισμοί όπως μετατοπίσεις και περιστροφές, φορτίσεις και ταχύτητες.

Με αυτό τον τρόπο δημιουργείται η αρχική κατάσταση του μοντέλου (Initial State Of Model On Screen). Με την ολοκλήρωση των σταδίων αυτών μπορεί με τη βοήθεια του FEMB να αποθηκευτεί το τελικό μοντέλο με τη μορφή **output** αρχείου κατάληξης **dyn**, όπου είναι κατάλληλο για ανάγνωση τόσο από τον επεξεργαστή κειμένου όσο και από τον επιλυτή. Αφού επιδιορθωθούν από τον επεξεργαστή κειμένου οι όποιες ατέλειες που παρουσιάζει το μοντέλο, το αρχείο εισάγεται στον επιλυτή. Αυτός αναλαμβάνει να προχωρήσει στην επίλυση του μοντέλου και να δημιουργήσει με τη σειρά του κάποιους συγκεκριμένους τύπους **output** αρχείων (D3PLOT, GRAPH). Αυτά περιλαμβάνουν τα αποτελέσματα της επίλυσης (π.χ. θέσεις των κόμβων κάθε χρονική στιγμή, ασκούμενες δυνάμεις, επιταχύνσεις διάφορων κόμβων κλπ).

Τέλος με τη χρήση πάλι του προγράμματος FEMB και συγκεκριμένα του Μετά-Επεξεργαστή (Post-Processor) μπορεί να χρησιμοποιηθούν τα παραπάνω αρχεία για την παρακολούθηση του τρόπου παραμόρφωσης του μοντέλου σε διάφορα χρονικά διαστήματα.

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:

- α. Ορίζεται πλήρως η γεωμετρία, δίνοντας τις ακριβείς διαστάσεις.
- β. Δηλώνεται το υλικό, ή τα υλικά από τα οποία αποτελείται το μοντέλο, καθώς και οι φυσικές και μηχανικές τους ιδιότητες.
- γ. Διακριτοποιείται η κατασκευή με πεπερασμένα στοιχεία και δηλώνονται οι ιδιότητες των πεπερασμένων στοιχείων.
- δ. 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.
- ε. 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 ειτός 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 **preprocessor** 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-μετατόπισης, στον Graph Processor.

Βασικό σημείο της διαδικασίας είναι η επιλογή του συστήματος των μονάδων μέτρησης. Υπάρχουν προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων ή σχεδιαστικά προγράμματα όπου αρκεί η επιλογή ενός συστήματος και κάποιας κλίμακας ώστε να γίνει η εισαγωγή των δεδομένων. Το μόνο που χρειάζεται είναι να γίνονται οι κατάλληλες μετατροπές όπου είναι απαραίτητες. Στον κώδικα LS-DYNA εισάγονται τα δεδομένα χωρίς διαστάσεις αλλά με συνέπεια στην αρχική επιλογή του συστήματος μονάδων. Σε διαφορετική περίπτωση ο κώδικας οδηγεί σε παρουσίαση λανθασμένων αποτελεσμάτων.

Γεωμετρικές ατέλειες, ασυνέχειες του υλικού, ανακριβείς 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].

3.5. Διαδικασία προσομοίωσης πειράματος

Κατασκευή – Διακριτοποίηση

Το μοντέλο αποτελείται από τέσσερα μέρη. Το έμβολο, τη μήτρα, τον χαλκό και το αλουμίνιο ή τον μόλυβδο αναλόγως το δοκίμιο. Κάθε ένα από αυτά τα μέρη κατασκευάστηκε ξεχωριστά. Η διαδικασία περιγράφεται στο σύνολό της στο **Παράρτημα**. Τα σχήματα που ακολουθούν πάρθηκαν από τον Post – Processor. Το σύστημα μονάδων που ακολουθήθηκε είναι το παρακάτω:

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

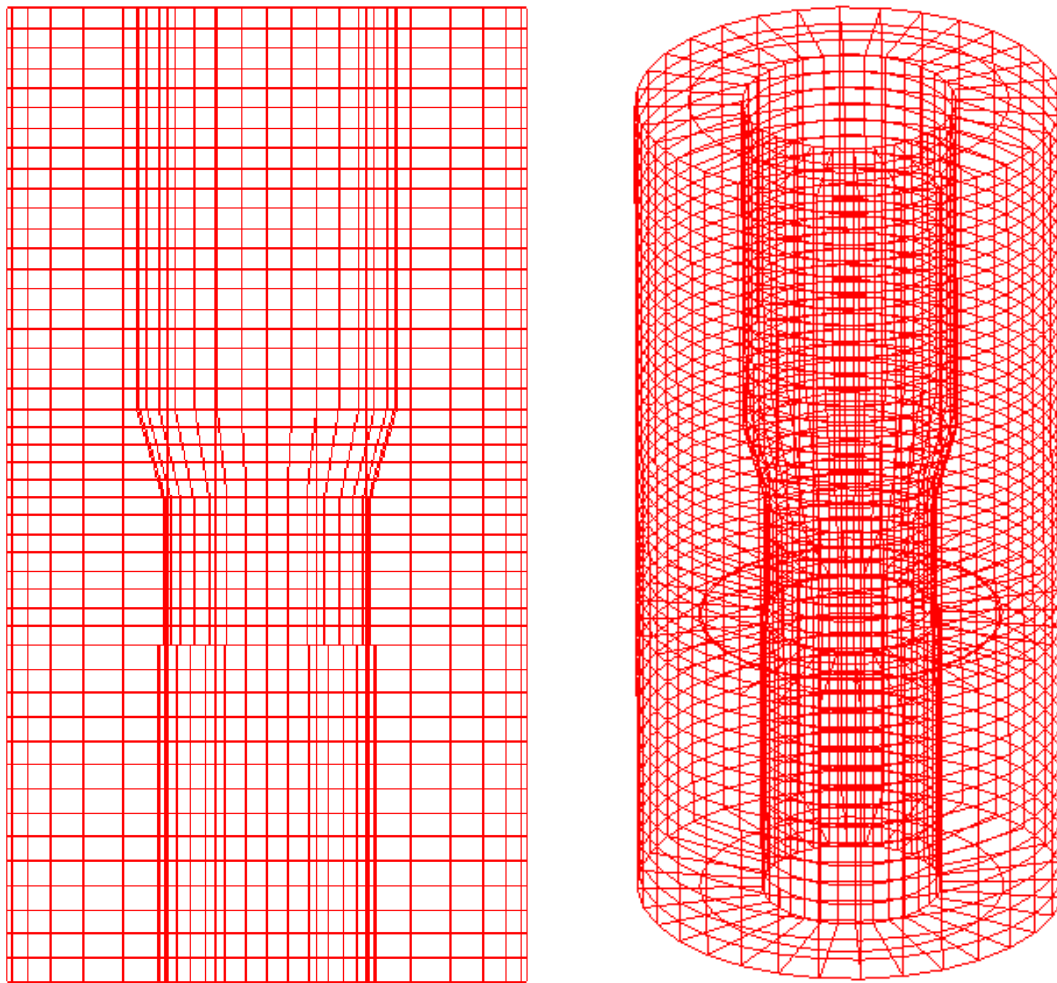
Πίνακας 5: Σύστημα μονάδων μοντελοποίησης

Αρχικά κατασκευάστηκε η μήτρα (Mitra), σύμφωνα με τις διαστάσεις που αναφέρονται στο κεφάλαιο 1 του πειραματικού. Στο **Σχήμα 13** απεικονίζεται η μήτρα όπως υπήρξε στο LS-Dyna, ενώ στο **Σχήμα 14** το έμβολο. Η διακριτοποίηση στα απαραμόρφωτα μέρη της μήτρας και του εμβόλου δεν ήταν αναγκαίο να είναι πυκνή.

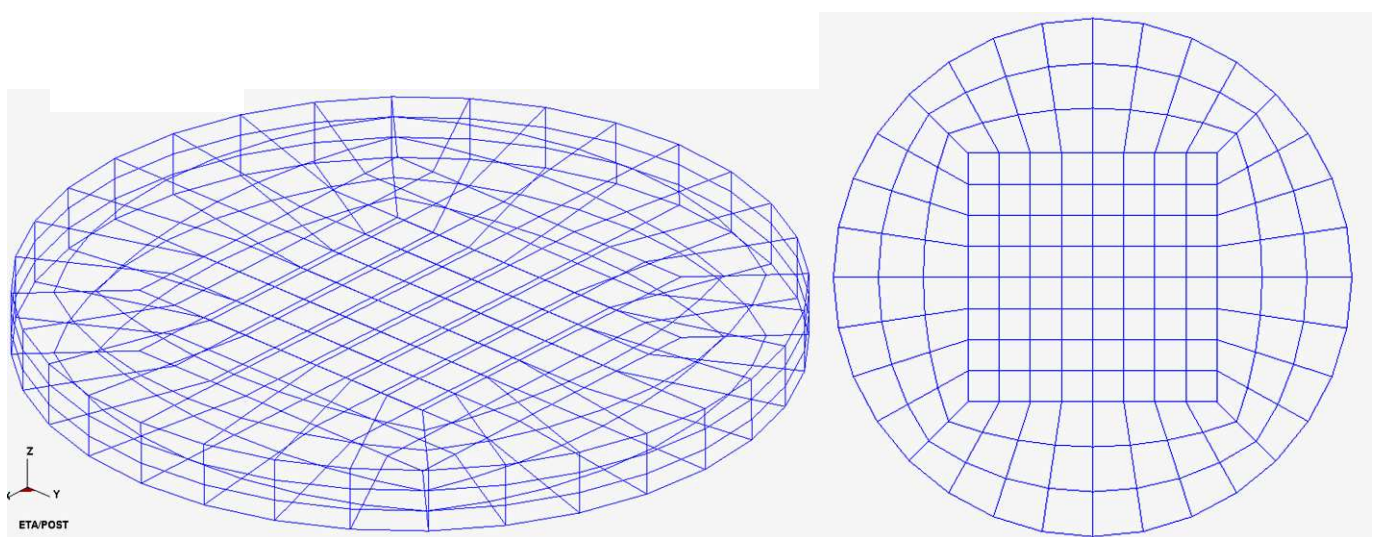
Για το έμβολο και τη μήτρα το υλικό που επιλέχθηκε είναι το MAT_RIGID - 20.1, το οποίο είναι ένα άκαμπτο υλικό. Ορίστηκαν οι ιδιότητες που αντιστοιχούν στο χάλυβα και αναφέρεται στο επόμενο κεφάλαιο.

Οι ιδιότητες αυτές ισχύουν τόσο για το έμβολο όσο και για τη μήτρα. Το μόνο που αλλάζει είναι κάποιες παράμετροι που είναι διαφορετικές που ορίζουν της συνθήκες κινήσεις. Έτσι για τη μήτρα οι τιμές είναι : CMO=1, CON1=7 και CON2=7. Αυτές ορίζουν την ακινησία της μήτρας σε όλες τις διευθύνσεις και όλες τις περιστροφές. Για το έμβολο ισχύουν: CMO=1, CON1=4 και

CON2=7. Οι περιορισμοί αυτοί ορίζουν την κίνηση του εμβόλου μόνο κατά τον άξονα των Z και το απαλλάσσουν από κάθε είδους περιστροφή.

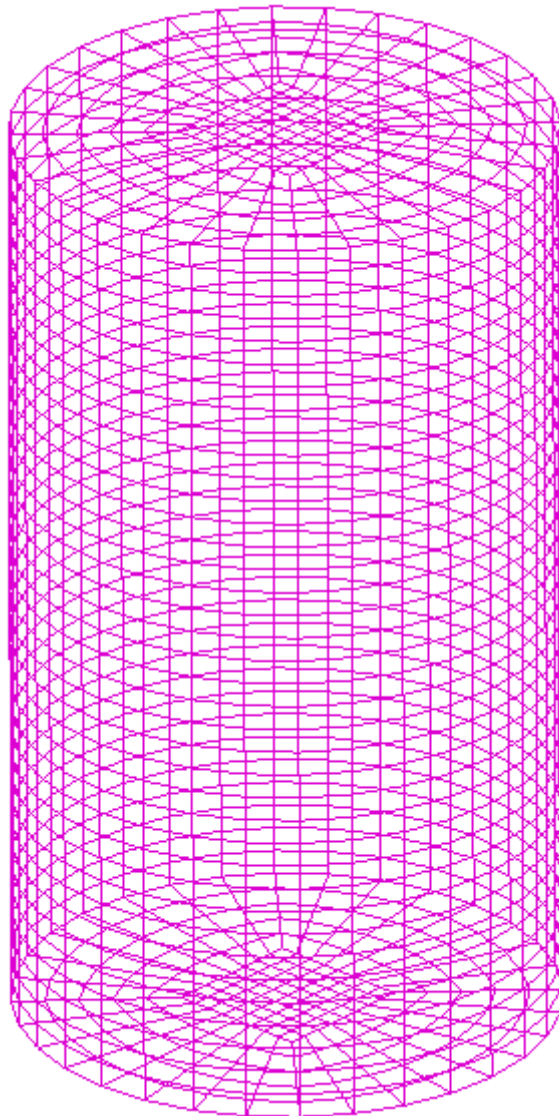


Σχήμα 13: Αναπαράσταση της μήτρας (Mitra) σε πλάγια και ισομετρική όψη

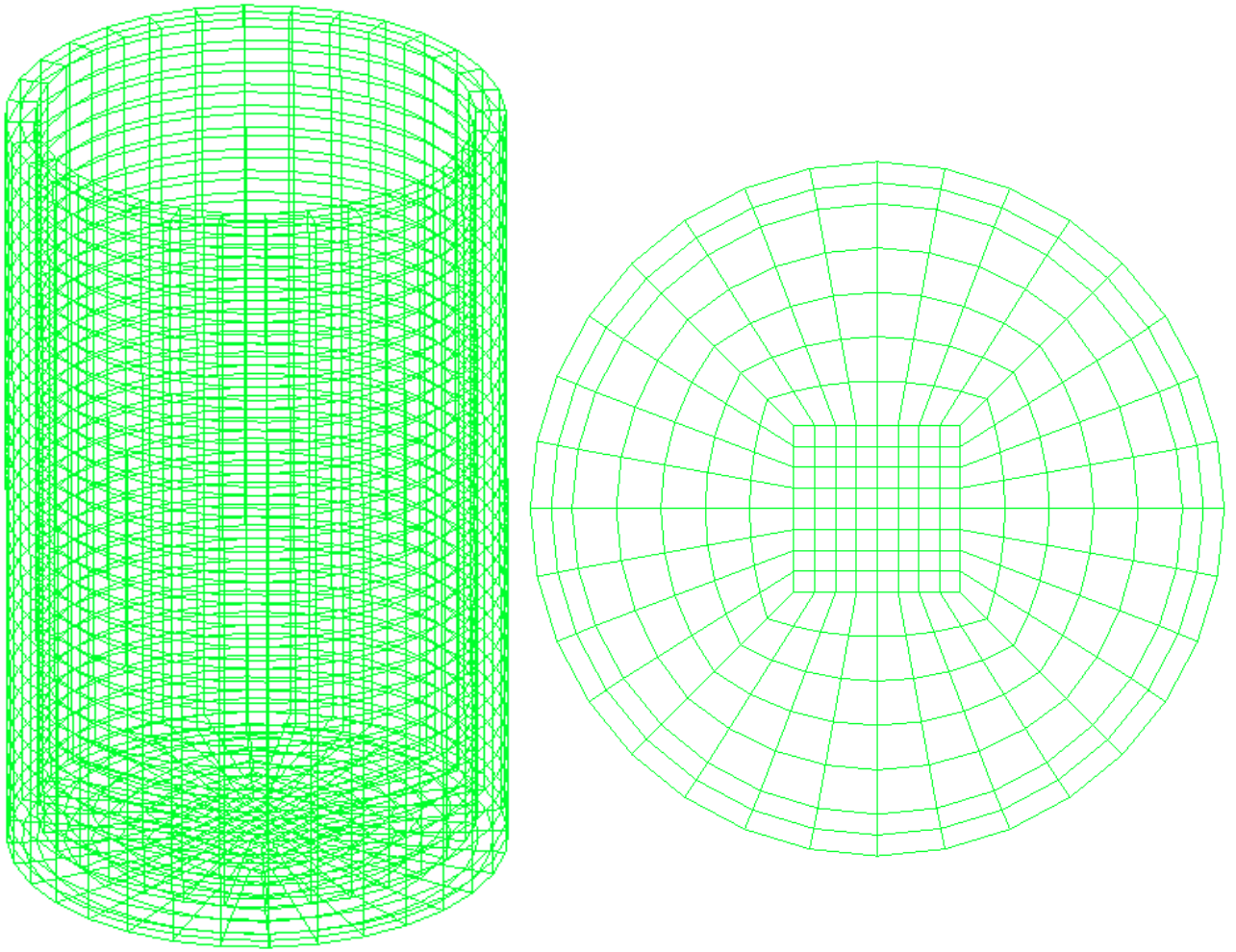


Σχήμα 14: Αναπαράσταση του Εμβόλου (Emvolo) σε ισομετρική όψη και κάτοψη

Ενδεικτικά θα παρουσιαστεί η μοντελοποίηση δοκιμίου με εσωτερική διάμετρο χαλκού 22.0 mm, με πάτο. Το υλικό που επιλέχθηκε από τη βάση δεδομένων του LS – DYNA για τον χαλκό και για το αλουμίνιο (ή μόλυβδο) είναι το MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY – 24.1, το οποίο είναι ένα ελαστοπλαστικό υλικό με μια αυθαίρετη καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης, την οποία ορίζεται από τους Πίνακες 2, 3 και 4, στο κεφάλαιο 4.2. Οι ιδιότητες που ορίστηκαν αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Η μορφή που είχαν μέρη του χαλκού και του αλουμινίου (ή μολύβδου) παρουσιάζονται στα Σχήματα 15 και 16. Κατά τον σχεδιασμό των πεπερασμένων στοιχείων τηρήθηκε όσο ήταν εφικτό η σχέση 1 element ανά 1 mm.



Σχήμα 15: Αναπαράσταση του Αλουμινίου ή Μολύβδου (Cu ή Pb) σε ισομετρική όψη

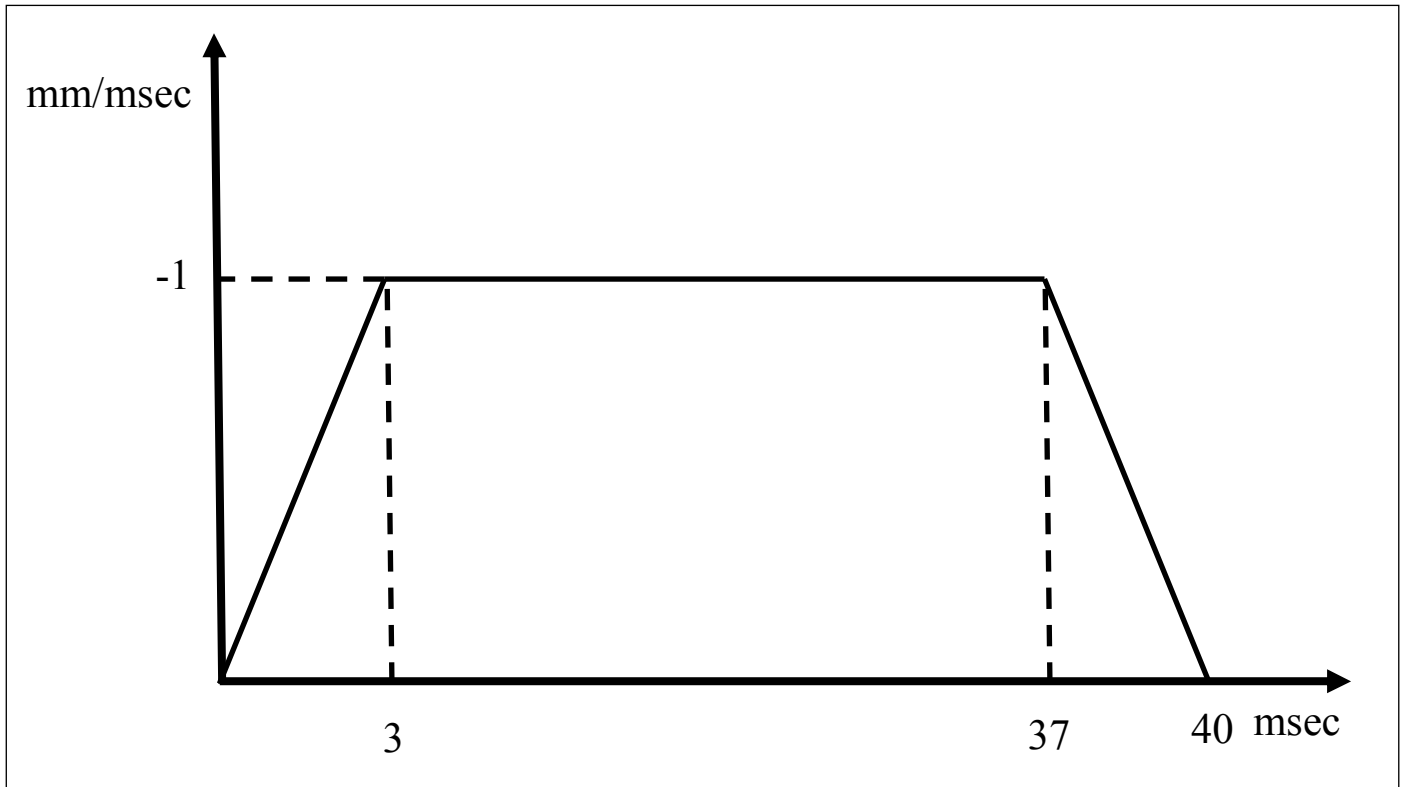


Σχήμα 16: Αναπαράσταση του Χαλκού (Cu) σε ισομετρική όψη και κάτοψη

Οι διεπιφάνειες που ορίστηκαν, βάση των οποίων ορίστηκαν και οι συνθήκες τριβής ήταν:

- Cu-Al (ή Pb)
- Mitra-Cu
- Cu-Al (ή Pb)—Emvolo

Η καμπύλη ταχύτητας-χρόνου του πειράματος ορίστηκε όπως παρουσιάζεται στο **Σχήμα 17** και ο χρόνος τερματισμού στα 40 msec. Έτσι με δεδομένο ότι στις φάσεις πειράματος που θα παρθούν ορίσαμε DT/CYCLE 1.0, τα διαγράμματα που θα εξάγουμε θα έχουν μετατόπιση των δοκιμίων ίση περίπου με 40 mm.

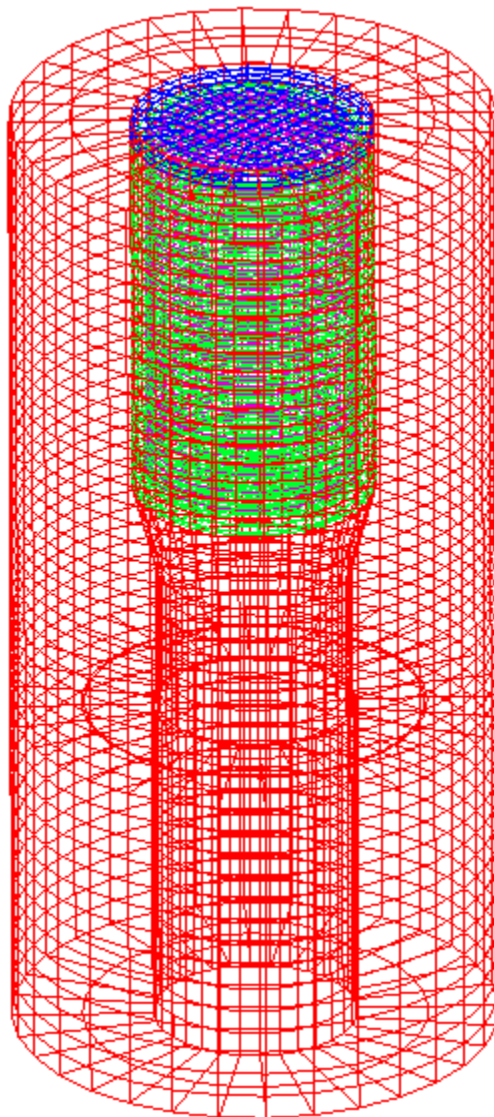


Σχήμα 17: Καμπύλη ταχύτητας □ χρόνου πειράματος

Μετά την κατασκευή των δοκιμίων και την εισαγωγή των παραμέτρων του πειράματος το αρχείο κατάληξης μετατράπηκε από **fmb**, που είχε σωθεί, σε **output** αρχείο κατάληξης **dyn**, ώστε να μπορεί να εισαχθεί στον επιλυτή (Solver) για να γίνει η επίλυση της προσομοίωσης.

Τα αποτελέσματα του μοντέλου λαμβάνονται μέσω του **Post - Processor**. Με το πρόγραμμα αυτό είναι δυνατή η λήψη εικόνων του δοκιμίου κατά την κατάρρευσή του οποιαδήποτε χρονική στιγμή. Έτσι μπορεί κάποιος να επιλέξει να παραστήσει όλα τα στάδια της διαδικασίας είτε σε μορφή βίντεο, είτε σε μορφή εικόνας. Επίσης δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να εξάγει καμπύλη φορτίου-μετατόπισης.

Η επαφή που επιλέχθηκε στον **Post - Processor** για να παρθεί η καμπύλη ήταν εκείνη του εμβόλου με τον χαλκό και το αλουμίνιο (ή μόλυβδο). (Βλέπε Παράρτημα).



Σχήμα 18: Ισομετρική άποψη του τελικού μοντέλου

4. Διάταξη Πειράματος

4.1. Υδραυλική πρέσα SMG [9]

Η διέλαση των διμεταλλικών ράβδων διεξήχθη με την Υδραυλική πρέσα του εργαστηρίου του Τομέα, ονομαστικού φορτίου 100tn. Πρόκειται για πρέσα διπλής ενεργείας, η οποία κατασκευάστηκε από την εταιρεία SMG στην Γερμανία. Είναι πρέσα ορθού πλαισίου (ή τύπου O) (Εικόνα 3). Το κύριο έμβολο (άνω) κινείται από επάνω προς τα κάτω και έχει μέγιστη διαδρομή 600mm. Τέσσερις πείροι σταθερά προσαρμοσμένοι στη κάτω 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 εξολιέας. Όλες οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν με σταθερή ταχύτητα πρόωσης του εμβόλου 10 mm/min.



Εικόνα 3: Υδραυλική Πρέσα SMG

Στην πειραματική διαδικασία το εργαλείο αποτελείται από το τμήμα εισόδου (μεταλλικός θάλαμος, δακτύλιος συγκράτησης και καπάκι), τη μήτρα, τη βάση

της και το έμβολο. Ακολουθεί αναλυτική παρουσίαση των εξαρτημάτων του εργαλείου.

Μήτρα

Η μήτρα (**Εικόνα 4**) αποτελείται από το κωνικό τμήμα και το τμήμα εξόδου. Όσον αφορά το κωνικό τμήμα, αυτό είναι κόνιλος κωνικός δακτύλιος με ημιγωνία κωνικότητας 15° . Η εσωτερική διάμετρος είναι: $D_{in1}=25.00\text{mm}$ και η εξωτερική $D_{out1}=30.20\text{mm}$ όπου τοποθετείται στην ειδική διαμόρφωση του μεταλλικού θαλάμου, του τμήματος εισόδου. Το τμήμα εξόδου είναι κυλινδρικό, με εσωτερική διάμετρο: $D_{in2}=20.00\text{mm}$ και η εξωτερική $D_{out2}=39.90\text{mm}$ όπου τοποθετείται στην ειδική διαμόρφωση της βάσης της μήτρας. Το συνολικό ύψος είναι: $H=24.7\text{mm}$ ενώ το ύψος του κωνικού τμήματος είναι $h=9.25\text{mm}$. Αυτό το τμήμα της μήτρας είναι κατασκευασμένο από χάλυβα CK 45 και είναι αυτό που καθορίζει τη διάμετρο του προϊόντος.



Εικόνα 4: Μήτρα

Τμήμα εισόδου

Ο μεταλλικός θάλαμος είναι κυλινδρικός δακτύλιος, εξωτερικής διαμέτρου: $D_{out}=45.00\text{mm}$, εσωτερικής: $D_{in}=25.00\text{mm}$, ύψους: $H=71.90\text{mm}$ και στο κάτω τμήμα του φέρει εσωτερικά ειδική διαμόρφωση διαμέτρου $D=30.30\text{mm}$ για τη τοποθέτηση του κωνικού τμήματος της μήτρας. Είναι το τμήμα μέσα στο οποίο τοποθετείται το δοκίμιο. Κατά την κατεργασία εισέρχεται στο θάλαμο το

έμβολο με αποτέλεσμα την έξοδο του δοκιμίου από το κωνικό τμήμα της μήτρας.

Το καπάκι είναι κυλινδρικός δακτύλιος εξωτερικής διαμέτρου: $D_{out}=90.00\text{mm}$, εσωτερικής: $D_{in}=25.00\text{mm}$, ύψους: $H=24.50\text{mm}$ και φέρει ειδική διαμόρφωση διαμέτρου $D=45.00\text{mm}$ στη κάτω πλευρά όπου τοποθετείται ο θάλαμος. Το καπάκι τοποθετείται πάνω από τον δακτύλιο συγκράτησης.

Ο δακτύλιος συγκράτησης του θαλάμου είναι κυλινδρικός, εξωτερικής διαμέτρου: $D_{out}=90.00\text{mm}$, εσωτερικής: $D_{in}=45.00\text{mm}$ και ύψους: $H=67.30\text{mm}$ εντός του οποίου βρίσκεται ο θάλαμος. Το καπάκι και ο δακτύλιος συγκράτησης του θαλάμου είναι κατασκευασμένα από εργαλειοχάλυβα, ενώ ο θάλαμος από χάλυβα CK 45.



Εικόνα 5: Εξαρτήματα Τμήματος Εισόδου Μήτρας

Τμήμα εξόδου

Πρόκειται για κυλινδρικό δακτύλιο (Εικόνα 6) εξωτερικής διαμέτρου $D_{out}=90.00\text{mm}$, εσωτερικής διαμέτρου $D_{in}=21.00\text{mm}$ και ύψους $H=68.60\text{mm}$. Αυτό το τμήμα της μήτρας είναι κατασκευασμένο από κοινό χάλυβα και φέρει ειδική εσωτερική διαμόρφωση διαμέτρου $D=40.00\text{mm}$ στο πάνω μέρος του, για την τοποθέτηση της κωνικής μήτρας. Στη κάτω πλάκα της πρέσας τοποθετήθηκε ένας ξύλινος κυλινδρικός δακτύλιος με εσωτερική

διάμετρο $D_{in}=90.00\text{mm}$ για τη συγκράτηση του εργαλείου και ευθυγράμμισής του με το έμβολο.



Εικόνα 6: Τμήμα Εξόδου Μήτρας

Έμβολο

Το έμβολο (Εικόνα 7) είναι ένας συμπαγής κύλινδρος διαμέτρου $D=25.00\text{mm}$ και ύψους $H=80.00\text{mm}$. Είναι κατασκευασμένο από σκληρό χάλυβα και είναι συνδεδεμένο με την άνω πλάκα της πρέσας. Το έμβολο εισέρχεται στο μεταλλικό θάλαμο και μπορεί να φτάσει μέχρι και την αρχική εσωτερική διάμετρο του κωνικού τμήματος.



Εικόνα 7: Έμβολο

Μετρητικά όργανα και εξοπλισμός λήψης μετρήσεων

Το άνω έμβολο της πρέσας είναι συνδεδεμένο με δυναμόμετρο πιεζοκρυστάλλου, τύπου 9091 (SN81780) με ονοματικό φορτίο 1000kN (100tn) και ευαισθησία 2.23pC/N ή 2.16pC/N για τη πλήρη ή το 10% της πλήρους κλίμακας αντίστοιχα. Στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν επιλέχθηκε ευαισθησία 2.16pC/N λόγω του μεγέθους του φορτίου. Επίσης το άνω έμβολο της πρέσας είναι συνδεδεμένο με επαγωγικό μετατοπισιόμετρο (LVDT). Τόσο το δυναμόμετρο όσο και το LVDT είναι συνδεδεμένα με ενισχυτές σήματος, οι οποίοι με τη σειρά τους στέλνουν το σήμα στη μετρητική κάρτα (ADC) και έπειτα μέσω του προγράμματος LAB VIEW γίνεται η μετάφραση των δεδομένων και η έξοδος των αποτελεσμάτων στην οθόνη του Η/Υ.

Έλεγχος και Ρύθμιση των Μετρητικών της Πρέσας

Πριν τη διεξαγωγή των πειραμάτων της διέλασης πραγματοποιήθηκε έλεγχος στα μετρητικά συστήματα της υδραυλικής πρέσας SMG. Πιο συγκεκριμένα επαναλάβουμε τη δοκιμή της θλίψης στην πρέσα SMG με τις ίδιες ακριβώς συνθήκες που πραγματοποιήσαμε τη δόκιμη στη μηχανή INSTRON (πρότυπη μηχανή) για δοκίμια χαλκού διαστάσεων $\text{Ø}15.00\text{mm} \times 30.00\text{mm}$ και $\text{Ø}26.00\text{mm} \times 30.00\text{mm}$ αντίστοιχα. Συγκρίναμε τις μετρήσεις και τα διαγράμματα φορτίου - μετατόπισης και ύστερα από επεξεργασία τους καταλήξαμε στην επιλογή του συντελεστή: 54000V/N και στη ρύθμιση του μετρητικού. Αυτός ο συντελεστής χρησιμοποιείται από το πρόγραμμα LAB VIEW για τη μετατροπή της διαφοράς δυναμικού (V), η οποία μετρείται από το δυναμόμετρο πιεζοκρυστάλλου που βρίσκεται στο άνω έμβολο της πρέσας, σε φορτίο (N). Επιπλέον επιλέχθηκε συχνότητα δειγματοληψίας τα 5Hz.

Λίπανση

Οι τριβές, επομένως και οι πιέσεις, που αναπτύσσονται στη κατεργασία της διέλασης είναι αρκετά υψηλές και μπορούν να προκαλέσουν αστοχία στο τελικό προϊόν αν δε ληφθούν υπόψη κάποιοι σημαντικοί παράγοντες. Ένας από αυτούς είναι και η λίπανση, για να αποφευχθεί η επικόλληση του κατεργάσιμου τεμαχίου στο εργαλείο, να μειωθεί η φθορά αυτού καθώς και να βελτιωθεί η ποιότητα επιφάνειας του τελικού προϊόντος. Επομένως τόσο για την επιτυχημένη πραγματοποίησή της διέλασης, όσο και για να έχουμε τη καλύτερη δυνατή επιφάνεια μετά από αυτή, πραγματοποιήθηκε λίπανση των δοκιμίων, του μεταλλικού θαλάμου και της μήτρας. Επιλέξαμε ως λιπαντικό το Interflon food

lube G100 που είναι λάδι λευκό, ιατρικού τύπου, το οποίο είναι ανθεκτικό σε υψηλές πιέσεις και περιέχει τεφλόν (**Teflon**). Χαρακτηριστική ιδιότητα αυτού είναι να διεισδύει στο εσωτερικό των εξαρτημάτων και να δημιουργεί φιλμ για να μειώσει σημαντικά τη φθορά, την τριβή και να αυξήσει τη διάρκεια ζωής των βασικών εξαρτημάτων. Ο συντελεστής τριβής που επιτυγχάνει θεωρητικά είναι **$\mu=0.02-0.06$** . Στην παρούσα διπλωματική στο πρόγραμμα προσομοίωσης επιλέχθηκαν οι τιμές **$\mu=0.03-0.07$** .

4.2. Δοκίμια πειράματος

Κατασκευάστηκαν 3 σετ (πεντάδες) δοκιμίων, ύψους 40mm έκαστο, όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 1. Στα δοκίμια με πάτο, το πάχος του πάτου ήταν 1.5mm.

Σετ δοκιμίων	Ονομασία δοκιμίου	Εσωτερική διάμετρος Cu	Εξωτερική διάμετρος Cu	Ύψος
Cu-Al (με πάτο)	Cu-Al 1	D=22mm	D=25mm	40mm
	Cu-Al 2	D=20mm	D=25mm	40mm
	Cu-Al 3	D=17.7mm	D=25mm	40mm
	Cu-Al 4	D=15mm	D=25mm	40mm
	Cu-Al 5	D=12.5mm	D=25mm	40mm
Cu-Al (χωρίς πάτο)	Cu-Al 6	D=22mm	D=25mm	40mm
	Cu-Al 7	D=20mm	D=25mm	40mm
	Cu-Al 8	D=17.7mm	D=25mm	40mm
	Cu-Al 9	D=15mm	D=25mm	40mm
	Cu-Al 10	D=12.5mm	D=25mm	40mm
Cu-Pb (με πάτο)	Cu-Pb 1	D=22mm	D=25mm	40mm
	Cu-Pb 2	D=20mm	D=25mm	40mm
	Cu-Pb 3	D=17.7mm	D=25mm	40mm
	Cu-Pb 4	D=15mm	D=25mm	40mm
	Cu-Pb 5	D=12.5mm	D=25mm	40mm

Πίνακας 1: Δοκίμια πειράματος

Η σύσταση των εξωτερικών δακτυλίων (Εικόνα 8) των δοκιμίων ήταν συμπαγής ηλεκτρολυτικός χαλκός εμπορίου (Cu 99.9%), η κατασκευή των οποίων επιτεύχθηκε με εσωτερική και εξωτερική τόνρευση από συμπαγείς ράβδους. Οι ιδιότητές του παρουσιάζονται παρακάτω:

Πυκνότητα: $\rho = 0.008913 \text{ gr/mm}^3$
 Μέτρο Ελαστικότητας: $E = 124000 \text{ MPa}$
 Λόγος Poisson: $\nu = 0.35$
 Τάση Διαρροής: $\text{Sigy} = 266 \text{ MPa}$



Εικόνα 8: Εξωτερικοί δακτύλιοι χαλκού

Από δοκιμές θλίψης που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών, για τον χαλκό προέκυψαν οι ακόλουθες τιμές φορτίου-μετατόπισης που παρουσιάζονται στον Πίνακα 2:

Χαλκός (Cu)	
Τάση σ (MPa)	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 2: Τιμές φορτίου-μετατόπισης χαλκού

Το εσωτερικό μέρος των ράβδων πραγματοποιήθηκε με χύτευση (Εικόνα 9) καθαρού αλουμινίου (Al) και καθαρού μολύβδου (Pb) στα δοκίμια του χαλκού.

Το αλουμίνιο είχε τις εξής ιδιότητες:

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

Μέτρο Ελαστικότητας: $E=70000 \text{ MPa}$

Λόγος Poisson: $\nu=0.34$

Τάση Διαρροής: $\text{Sigy}=43.8 \text{ MPa}$



Εικόνα 9: Χύτευση στα δοκίμια του χαλκού

Από δοκιμές θλίψης που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών, για το αλουμίνιο προέκυψαν οι ακόλουθες τιμές φορτίου-μετατόπισης που παρουσιάζονται στον **Πίνακα 3**:

Αλουμίνιο (Al)	
Τάση σ (MPa)	Παραμόρφωση ϵ (mm/mm)
43.8	0.000
102.2	0.023
129.2	0.038
140.4	0.068
160.1	0.098
186.5	0.138
196.6	0.178
217.4	0.228

Πίνακας 3: Τιμές φορτίου-μετατόπισης αλουμινίου

Ο μόλυβδος είχε τις εξής ιδιότητες:

Πυκνότητα: $\rho = 0.0113 \text{ gr/mm}^3$

Μέτρο Ελαστικότητας: $E = 11500 \text{ MPa}$

Λόγος Poisson: $\nu = 0.4$

Τάση Διαρροής: $\text{Sigy} = 8.5 \text{ MPa}$

Από δοκιμές θλίψης που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών, για τον μόλυβδο προέκυψαν οι ακόλουθες τιμές φορτίου-μετατόπισης που παρουσιάζονται στον **Πίνακα 4**:

Μόλυβδος (Pb)	
Τάση σ (Mpa)	Παραμόρφωση ϵ (mm/mm)
8.50	0.000
12.90	0.010
17.18	0.030
21.45	0.050
24.92	0.070
31.61	0.100
37.10	0.130
50.00	0.190

Πίνακας 4: Τιμές φορτίου-μετατόπισης μολύβδου

Παρακάτω ακολουθούν οι τελικές πεντάδες δοκιμίων μετά την χύτευση:



Εικόνα 10: Δοκίμια Cu-Al (με πάτο)



Εικόνα 11: Cu-Al (χωρίς πάτο)



Εικόνα 12: Cu-Pb (με πάτο)

5. Αποτελέσματα Πειράματος και Προσομοίωσης

Δοκίμιο Cu-Al 1

Αρχικά παρουσιάζεται στην **Εικόνα 13** η μορφή του δοκιμίου πριν την κατεργασία της διέλασης. Όπως προαναφέρθηκε η διάμετρος του Al είναι 22 mm και η συνολική του δοκιμίου 25 mm. Το ύψος όπως και σε όλα τα δοκίμια είναι 40mm, με το 1.5 mm να είναι ο πάτος.

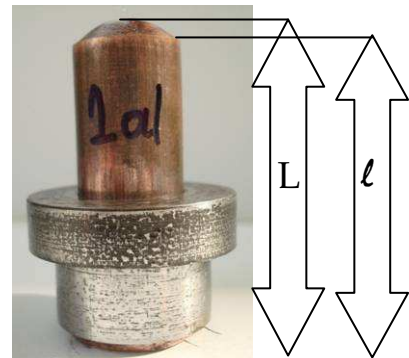


Εικόνα 13: Δοκίμιο Cu-Al 1 πριν την κατεργασία της διέλασης

Οι διαστάσεις που προέκυψαν μετά τη διέλαση, πριν την εξόλκευση (**Εικόνα 14**) είναι:

Τελικό Μήκος L: 58.5 mm (+ 46.3%)

Τελικό Μήκος ℓ : 54.3 mm



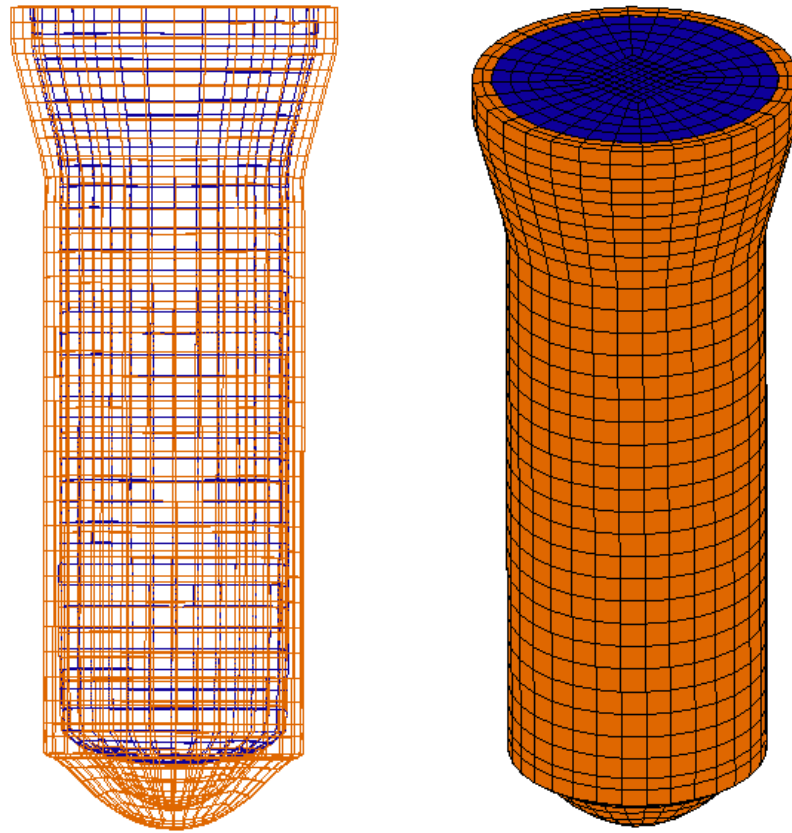
Εικόνα 14: Δοκίμιο Cu-Al 1 μετά τη διέλαση και πριν την εξόλκευση

Στην συνέχεια απεικονίζεται η τελική μορφή του δοκιμίου μετά την διεργασία της διέλασης:



Εικόνα 15: Δοκίμιο Cu-Al 1 μετά την κατεργασία της διέλασης (μετά την εξόλκευση)

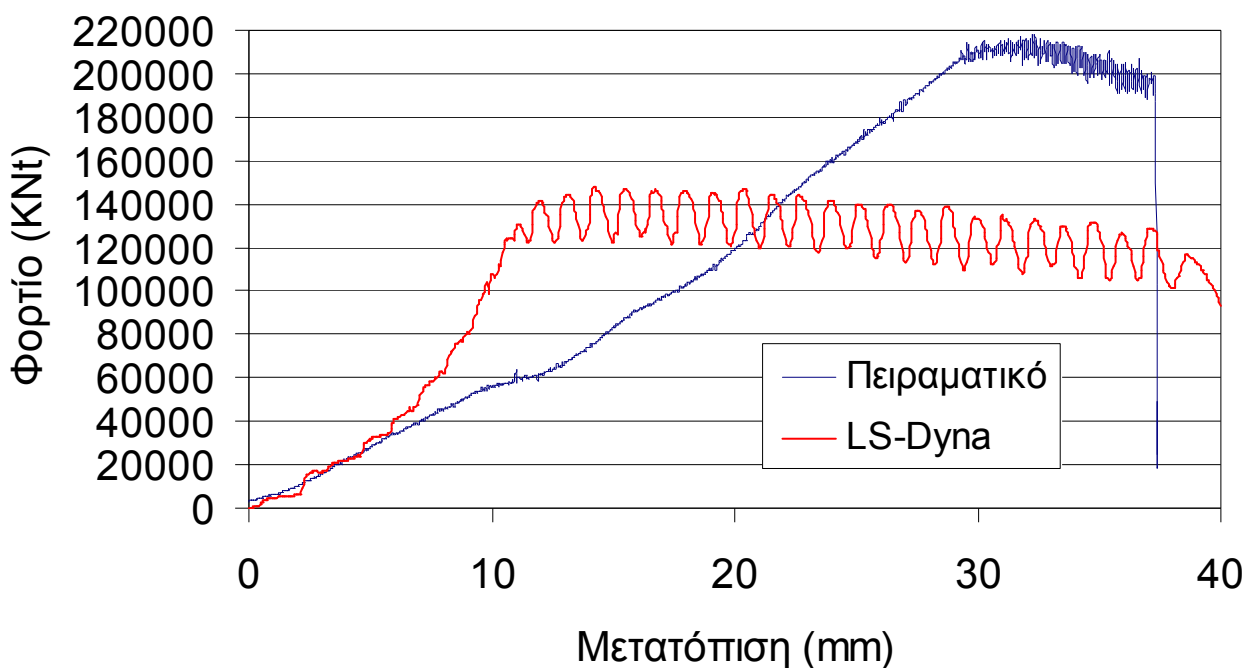
Η τελική μορφή του δοκιμίου, όπως προέκυψε κατά την προσομοίωση του πειράματος στο LS-Dyna, παρουσιάζεται στο Σχήμα 19.



Σχήμα 19: Δοκίμιο προσομοίωσης Cu-Al 1 μετά το πέρας της διέλασης σε πλάγια και ισομετρική όψη

Παρατηρείται ελαφρώς εντονότερη ροή του εσωτερικού στρώματος του αλουμινίου, σε σχέση με την αντίστοιχη ροή του χαλκού. Ο βαθμός παραμόρφωσης των δύο στρωμάτων είναι διαφορετικός και το καθένα διελάσσεται με το δικό του τρόπο.

Στο Διάγραμμα 1 που ακολουθεί δίνεται η καμπύλη φορτίου-μετατόπισης όπως προέκυψε από την πειραματική διαδικασία και την διαδικασία προσομοίωσης στο πρόγραμμα LS-Dyna για το δοκίμιο Cu-Al 1.



Διάγραμμα 1: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης (πειραματική και LS-Dyna) για την κατεργασία διέλασης του δοκιμίου Cu-Al 1

Το “κατσάρωμα” που κάνει η καμπύλη φορτίου-μετατόπισης του LS-Dyna οφείλεται στην διακριτοποίηση των πεπερασμένων στοιχείων. Η επιφάνεια του δοκιμίου, χωρισμένη όπως είναι σε πεπερασμένα στοιχεία, συμπεριφέρεται ως αλυσίδα καθώς διέρχεται από την μήτρα και διελάσσεται. Επίσης τυχούσες αποκλίσεις κατά τη διάρκεια αύξησης του φορτίου οφείλονται στη λείανση που είχαν υποστεί τα πειραματικά δοκίμια, ώστε να εισέρχονται πιο εύκολα στη μήτρα. Έτσι η καμπύλες του LS-Dyna παρουσιάζουν πιο απότομη άνοδο του φορτίου στα πρώτα χιλιοστά της κατεργασίας.

Η διαδρομή του εμβόλου ήταν 37 mm και το μέγιστο φορτίο 215000 kNt. Στην καμπύλη της προσομοίωσης με το LS-Dyna το μέγιστο φορτίο ανήλθε στα 146000 kNt, δηλαδή με απόκλιση 32,1 % από το πειραματικό. Αυτό υποδηλώνει ότι το μέγιστο φορτίο της προσομοίωσης δεν συμπίπτει καθόλου με το πειραματικό. Ο λόγος είναι ότι υπήρξε σφήνωμα του εξωτερικού τοιχώματος του χαλκού κατά τη διεργασία της διέλασης, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 16**.



Εικόνα 16: Άποψη δοκιμίου πριν την εξόλκευση

Αυτό είχε ως αποτέλεσμα να αναπτυχθούν πολύ μεγαλύτερες δυνάμεις ώστε να πραγματοποιηθεί η διέλαση.

Ακόμα τυχούσες αποκλίσεις που μπορεί να παρατηρηθούν για τον λόγο του ότι δεν υπάρχουν πρότυπες ιδιότητες και ορισμένες τιμές μηχανικών ιδιοτήτων για τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν.

Η μεταβατική φάση της διέλασης υφίσταται περίπου ως τα **29 mm**, η ευσταθής φάση περίπου ως τα **36mm** και η φάση αστάθειας μέχρι τέλους. Στην καμπύλη του **LS-Dyna** η μεταβατική μπορεί να θεωρηθεί ότι τελειώνει στα **10 mm** και η ευσταθής στα **38 mm**.

Δοκίμιο Cu-Al 2

Στην **Εικόνα 17** παρουσιάζεται η μορφή του δοκιμίου πριν την κατεργασία της διέλασης. Η διάμετρος του Al είναι 20 mm και η συνολική του δοκιμίου 25mm.



Εικόνα 17: Δοκίμιο Cu-Al 2 πριν την κατεργασία της διέλασης

Οι διαστάσεις που προέκυψαν μετά τη διέλαση, πριν την εξόλκευση είναι:

Τελικό Μήκος L: 58.9 mm (+ 47.3%)

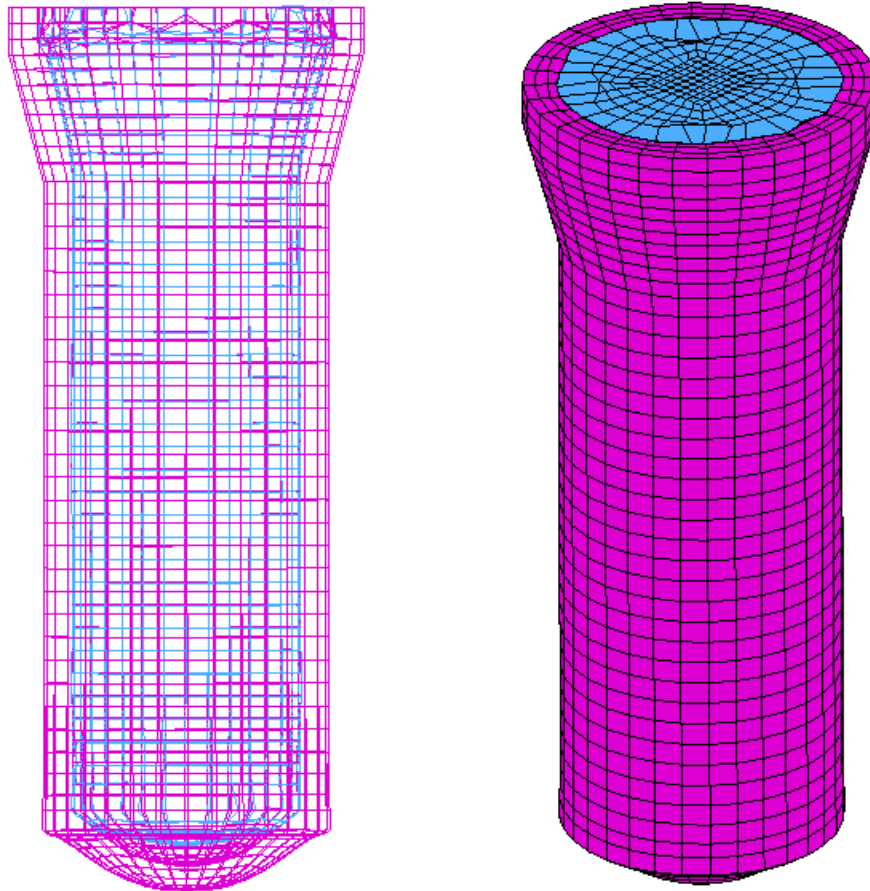
Τελικό Μήκος l : 52.8 mm

Στην συνέχεια απεικονίζεται η τελική μορφή του δοκιμίου μετά την διεργασία της διέλασης:



Εικόνα 18: Δοκίμιο Cu-Al 2 μετά την κατεργασία της διέλασης (μετά την εξόλκευση)

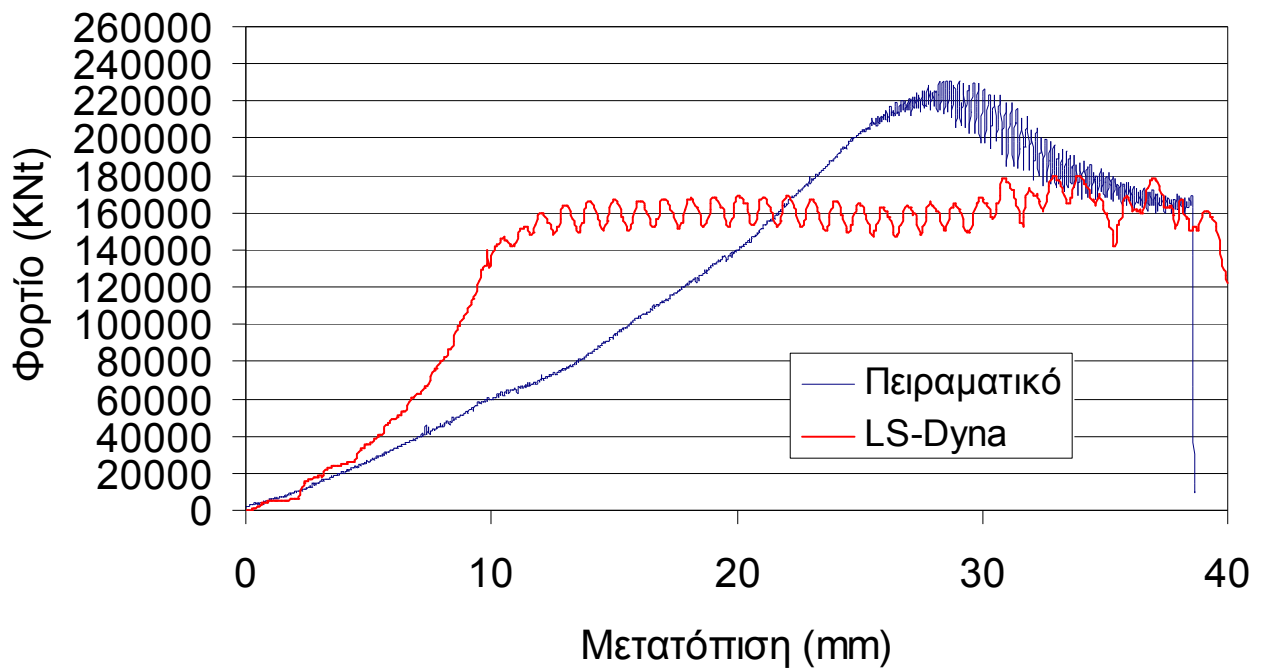
Η τελική μορφή του δοκιμίου, όπως προέκυψε κατά την προσομοίωση του πειράματος στο LS-Dyna, παρουσιάζεται στο Σχήμα 20.



Σχήμα 20: Δοκίμιο προσομοίωσης Cu-Al 2 μετά το πέρας της διέλασης σε πλάγια και ισομετρική όψη

Παρατηρείται ελαφρώς εντονότερη ροή του εσωτερικού στρώματος του αλουμινίου, σε σχέση με την αντίστοιχη ροή του χαλκού.

Στο Διάγραμμα 2 που ακολουθεί δίνεται η καμπύλη φορτίου-μετατόπισης όπως προέκυψε από την πειραματική διαδικασία και την διαδικασία προσομοίωσης στο πρόγραμμα LS-Dyna για το δοκίμιο Cu-Al 2.



Διάγραμμα 2: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης (πειραματική και LS-Dyna) για την κατεργασία διέλασης του δοκιμίου Cu-Al 2

Η διαδρομή του εμβόλου ήταν 39 mm και το μέγιστο φορτίο 228000 kNt. Στην καμπύλη της προσομοίωσης με το LS-Dyna το μέγιστο φορτίο ανήλθε στα 180000 kNt, δηλαδή με απόκλιση 21,1 %. Έτσι έχουμε μια σχετική προσέγγιση του πειράματος και της προσομοίωσης. Η μικρή απόκλιση που υπάρχει οφείλεται σε ένα μικρό σφήνωμα του εξωτερικού τοιχώματος του χαλκού κατά τη διεργασία της διέλασης, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 19**.



Εικόνα 19: Άποψη δοκιμίου πριν την εξόλκευση

Η μεταβατική φάση της διέλασης υφίσταται περίπου ως τα 25 mm, η ευσταθής φάση περίπου ως τα 36 mm και η φάση αστάθειας μέχρι τέλους. Στην καμπύλη του LS-Dyna η μεταβατική μπορεί να θεωρηθεί ότι τελειώνει στα 10 mm και η ευσταθής στα 34 mm.

Δοκίμιο Cu-Al 3

Στην **Εικόνα 20** παρουσιάζεται η μορφή του δοκιμίου πριν την κατεργασία της διέλασης. Η διάμετρος του Al είναι 17.5 mm και η συνολική του δοκιμίου 25mm.



Εικόνα 20: Δοκίμιο Cu-Al 3 πριν την κατεργασία της διέλασης

Οι διαστάσεις που προέκυψαν μετά τη διέλαση, πριν την εξόλκευση είναι:

Τελικό Μήκος L: 56.2 mm (+ 40.5%)

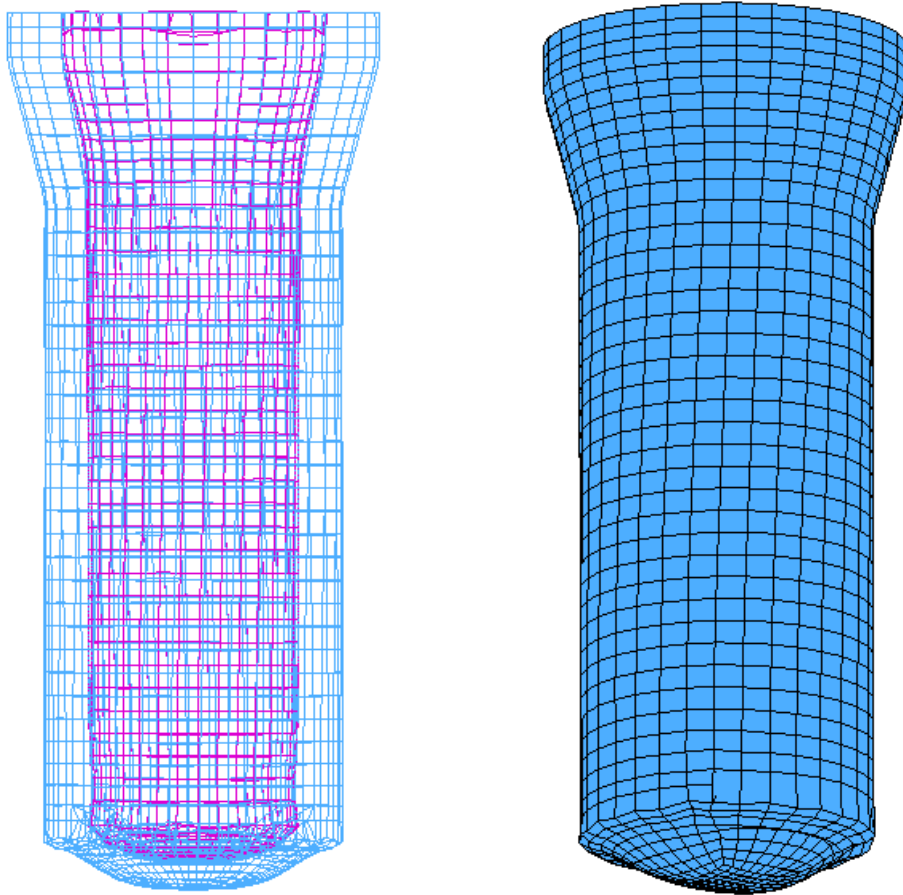
Τελικό Μήκος l : 51.0 mm

Στην συνέχεια απεικονίζεται η τελική μορφή του δοκιμίου μετά την διεργασία της διέλασης:



Εικόνα 21: Δοκίμιο Cu-Al 3 μετά την κατεργασία της διέλασης (μετά την εξόλκευση)

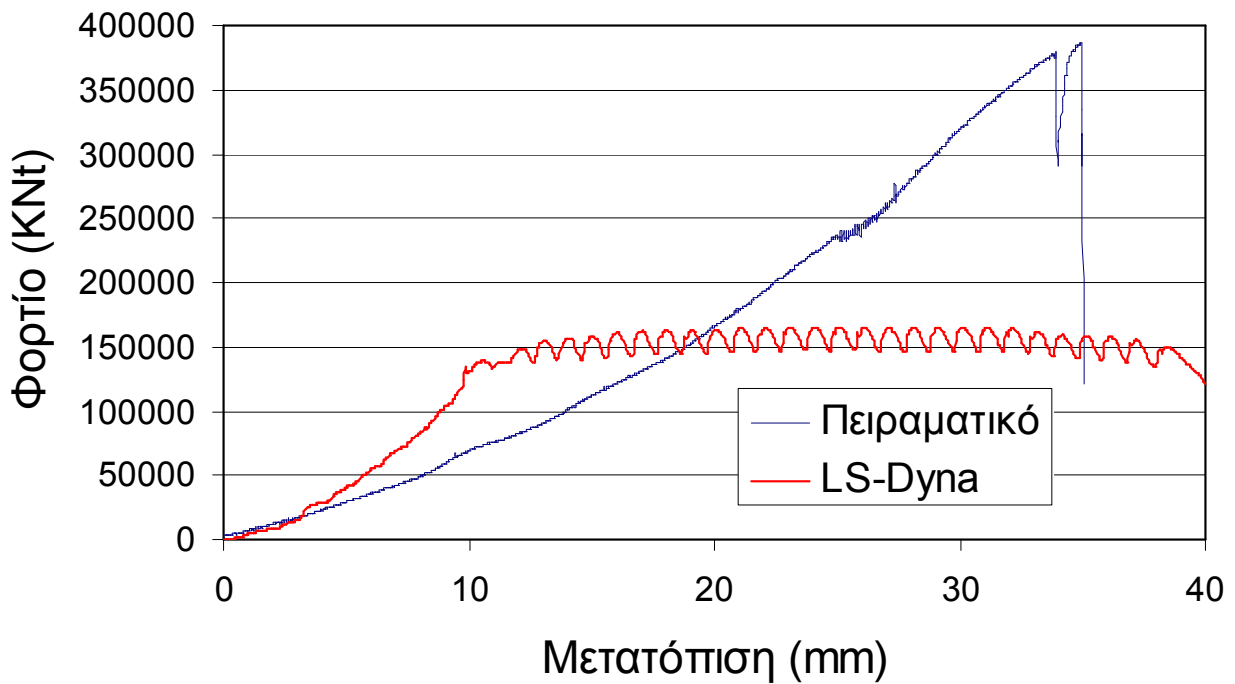
Η τελική μορφή του δοκιμίου, όπως προέκυψε κατά την προσομοίωση του πειράματος στο LS-Dyna, παρουσιάζεται στο Σχήμα 21.



Σχήμα 21: Δοκίμιο προσομοίωσης Cu-Al 3 μετά το πέρας της διέλασης σε πλάγια και ισομετρική όψη

Παρατηρείται ελαφρώς εντονότερη ροή του εσωτερικού στρώματος του αλουμινίου, σε σχέση με την αντίστοιχη ροή του χαλκού.

Στο Διάγραμμα 3 που ακολουθεί δίνεται η καμπύλη φορτίου-μετατόπισης όπως προέκυψε από την πειραματική διαδικασία και την διαδικασία προσομοίωσης στο πρόγραμμα LS-Dyna για το δοκίμιο Cu-Al 3.



Διάγραμμα 3: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης (πειραματική και LS-Dyna) για την κατεργασία διέλασης του δοκιμίου Cu-Al 3

Η καμπύλη του LS-Dyna δεν προσεγγίζει καθόλου την πειραματική καμπύλη ούτε σαν μορφή, αλλά ούτε ως προς το μέγιστο φορτίο.

Η διαδρομή του εμβόλου ήταν 35 mm και το μέγιστο φορτίο 386000 kNt. Στην καμπύλη της προσομοίωσης με το LS-Dyna το μέγιστο φορτίο ανήλθε στα 162000 kNt, δηλαδή με απόκλιση 58,0 %. Αυτό υποδηλώνει ότι το μέγιστο φορτίο της προσομοίωσης δεν συμπίπτει καθόλου με το πειραματικό. Ο λόγος είναι ότι υπήρξε εκτεταμένο σφήνωμα του εξωτερικού τοιχώματος του χαλκού κατά τη διεργασία της διέλασης, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 22**.



Εικόνα 22: Άποψη δοκιμίου πριν την εξόλκευση

Αυτό είχε ως αποτέλεσμα να αναπτυχθούν πολύ μεγαλύτερες δυνάμεις ώστε να πραγματοποιηθεί η διέλαση.

Οι φάσεις της διέλασης δεν είναι διακριτές καθώς η μορφή της καμπύλης δεν είναι τυπική μορφή διαγράμματος διέλασης. Αυτό είναι πιθανό να οφείλεται και στο έντονο σφήνωμα που παρουσιάστηκε κατά την διεργασία της διέλασης. Στην καμπύλη του **LS-Dyna** η μεταβατική μπορεί να θεωρηθεί ότι τελειώνει στα **10 mm** και η ευσταθής στα **38 mm**.

Δοκίμιο Cu-Al 4

Στην **Εικόνα 23** παρουσιάζεται η μορφή του δοκιμίου πριν την κατεργασία της διέλασης. Η διάμετρος του Al είναι 15 mm και η συνολική του δοκιμίου 25mm.



Εικόνα 23: Δοκίμιο Cu-Al 4 πριν την κατεργασία της διέλασης

Οι διαστάσεις που προέκυψαν μετά τη διέλαση, πριν την εξόλκευση είναι:

Τελικό Μήκος L: 58.0 mm (+ 45.0%)

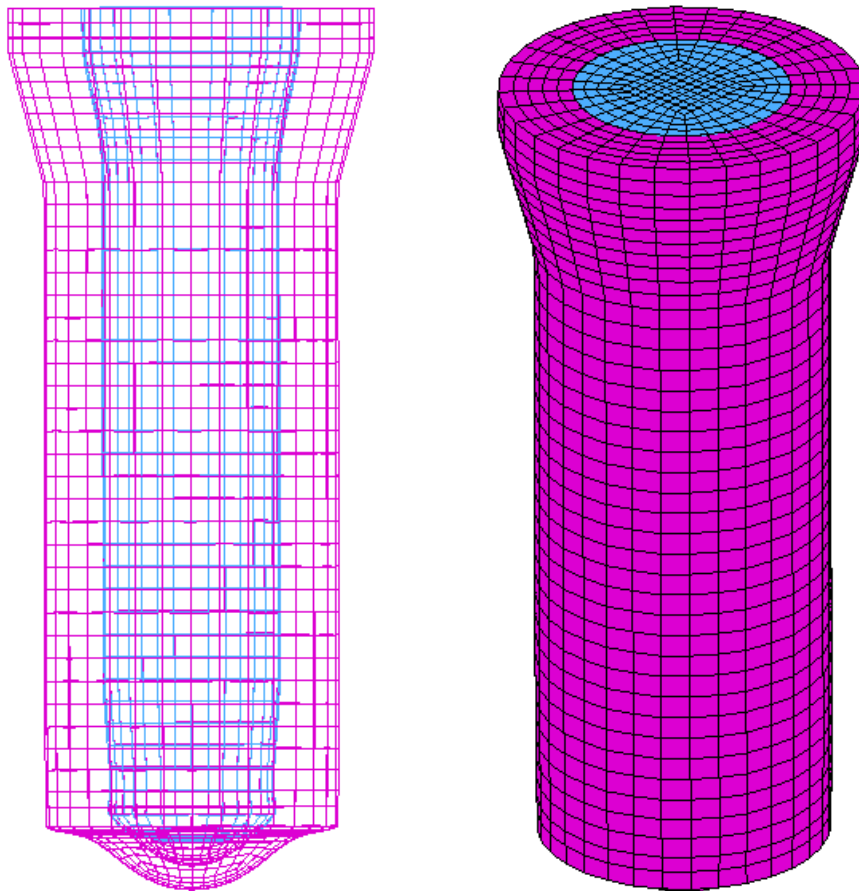
Τελικό Μήκος l : 53.7 – 54.5 mm

Στην συνέχεια απεικονίζεται η τελική μορφή του δοκιμίου μετά την διεργασία της διέλασης:



Εικόνα 23: Δοκίμιο Cu-Al 4 μετά την κατεργασία της διέλασης (μετά την εξόλκευση)

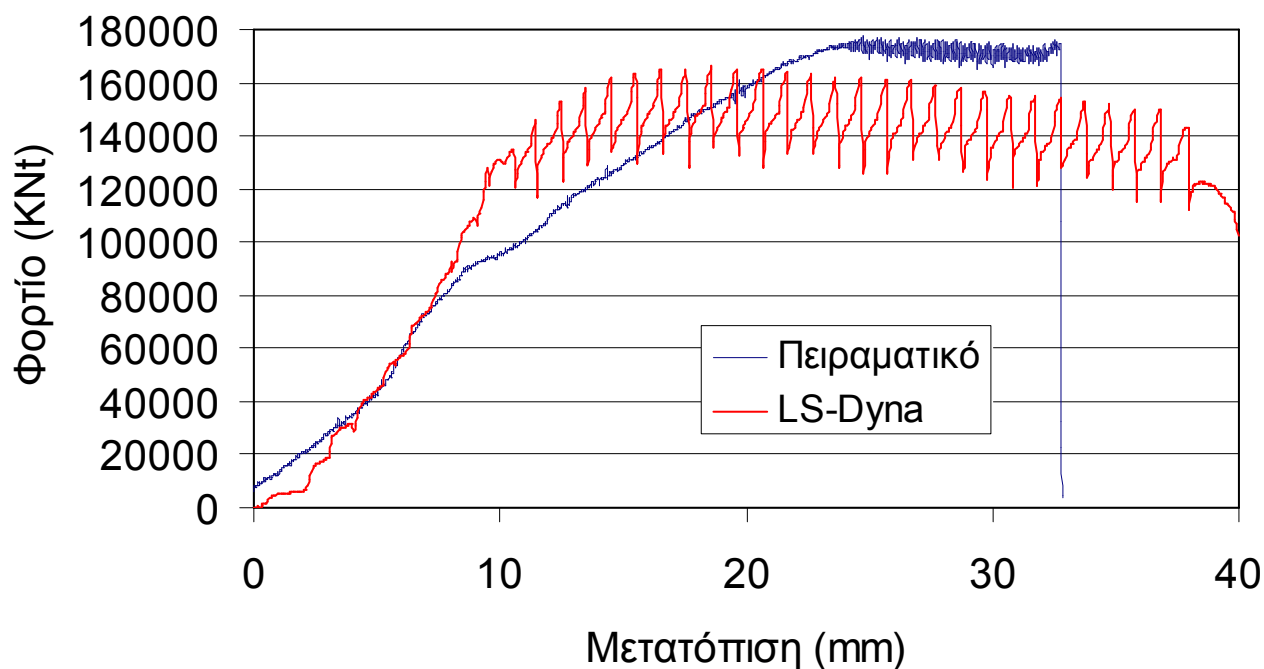
Η τελική μορφή του δοκιμίου, όπως προέκυψε κατά την προσομοίωση του πειράματος στο LS-Dyna, παρουσιάζεται στο Σχήμα 22.



Σχήμα 22: Δοκίμιο προσομοίωσης Cu-Al 4 μετά το πέρας της διέλασης σε πλάγια και ισομετρική όψη

Παρατηρείται ελαφρώς εντονότερη ροή του εσωτερικού στρώματος του αλουμινίου, σε σχέση με την αντίστοιχη ροή του χαλκού.

Στο Διάγραμμα 4 που ακολουθεί δίνεται η καμπύλη φορτίου-μετατόπισης όπως προέκυψε από την πειραματική διαδικασία και την διαδικασία προσομοίωσης στο πρόγραμμα LS-Dyna για το δοκίμιο Cu-Al 4.



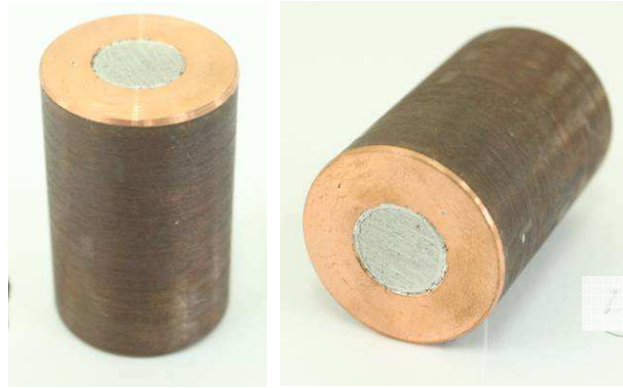
Διάγραμμα 4: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης (πειραματική και LS-Dyna) για την κατεργασία διέλασης του δοκιμίου Cu-Al 4

Η διαδρομή του εμβόλου ήταν 33 mm και το μέγιστο φορτίο 175000 kNt. Στην καμπύλη της προσομοίωσης με το LS-Dyna το μέγιστο φορτίο ανήλθε στα 164000 kNt, δηλαδή με απόκλιση 6,3 %. Η προσέγγιση του πειράματος και της προσομοίωσης είναι αρκετά ικανοποιητική.

Η μεταβατική φάση της διέλασης υφίσταται περίπου ως τα 25 mm, η ευσταθής φάση περίπου ως τα 31 mm και η φάση αστάθειας μέχρι τέλους. Στην καμπύλη του LS-Dyna η μεταβατική μπορεί να θεωρηθεί ότι τελειώνει στα 10 mm και η ευσταθής στα 38 mm.

Δοκίμιο Cu-Al 5

Στην **Εικόνα 25** παρουσιάζεται η μορφή του δοκιμίου πριν την κατεργασία της διέλασης. Η διάμετρος του Al είναι 12.5 mm και η συνολική του δοκιμίου 25mm.



Εικόνα 25: Δοκίμιο Cu-Al 5 πριν την κατεργασία της διέλασης

Οι διαστάσεις που προέκυψαν μετά τη διέλαση, πριν την εξόλκευση είναι:

Τελικό Μήκος L: 58.3 mm (+ 45.8%)

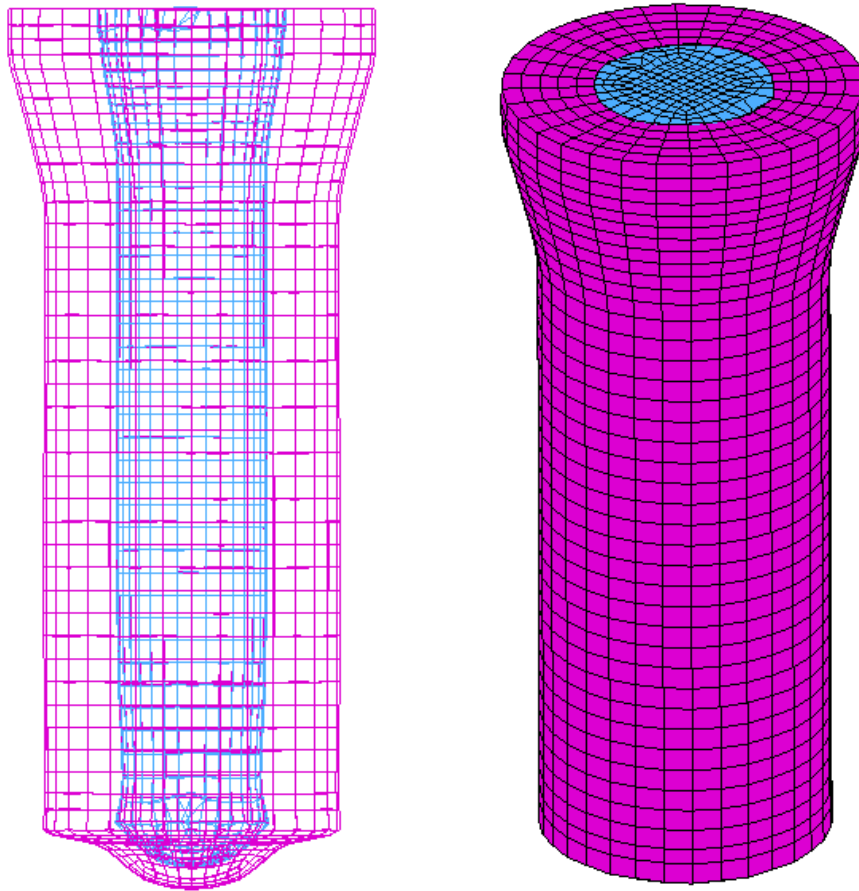
Τελικό Μήκος l : 53.8 – 54.8 mm

Στην συνέχεια απεικονίζεται η τελική μορφή του δοκιμίου μετά την διεργασία της διέλασης:



Εικόνα 26: Δοκίμιο Cu-Al 5 μετά την κατεργασία της διέλασης (μετά την εξόλκευση)

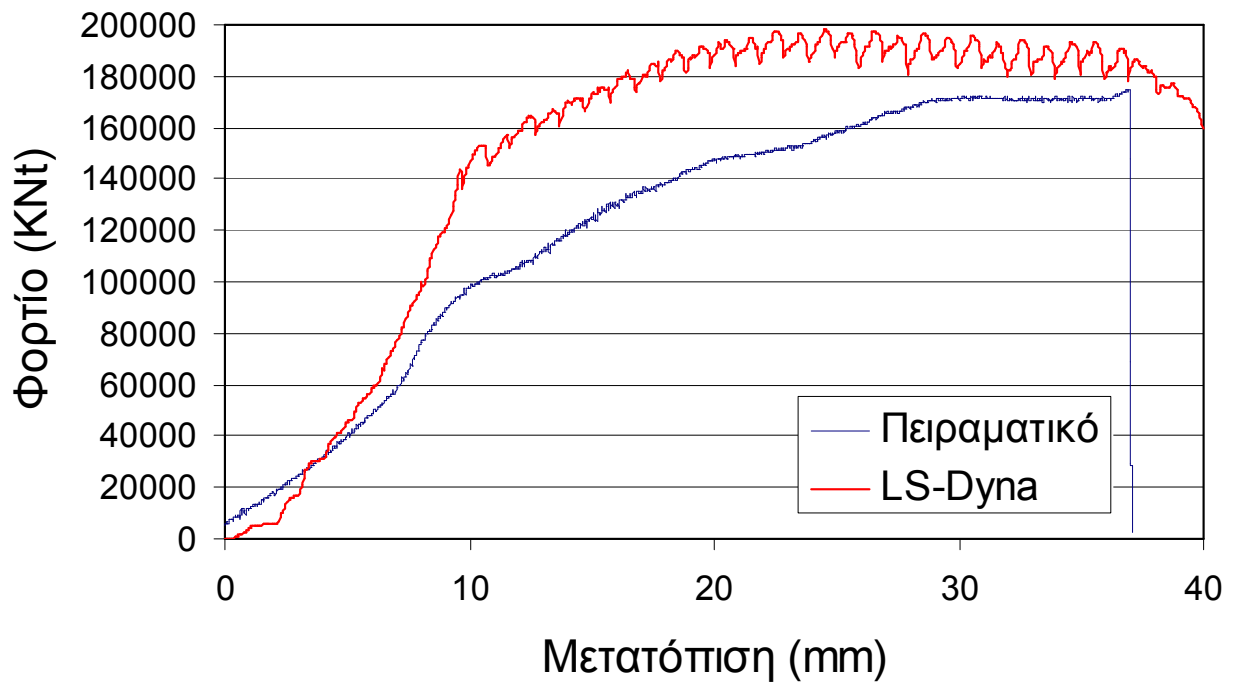
Η τελική μορφή του δοκιμίου, όπως προέκυψε κατά την προσομοίωση του πειράματος στο LS-Dyna, παρουσιάζεται στο Σχήμα 23.



Σχήμα 23: Δοκίμιο προσομοίωσης Cu-Al 5 μετά το πέρας της διέλασης σε πλάγια και ισομετρική όψη

Παρατηρείται ελαφρώς εντονότερη ροή του εσωτερικού στρώματος του αλουμινίου, σε σχέση με την αντίστοιχη ροή του χαλκού.

Στο Διάγραμμα 5 που ακολουθεί δίνεται η καμπύλη φορτίου-μετατόπισης όπως προέκυψε από την πειραματική διαδικασία και την διαδικασία προσομοίωσης στο πρόγραμμα LS-Dyna για το δοκίμιο Cu-Al 5.



Διάγραμμα 5: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης (πειραματική και LS-Dyna) για την κατεργασία διέλασης του δοκιμίου Cu-Al 5

Η διαδρομή του εμβόλου ήταν 37 mm και το μέγιστο φορτίο 175000 kNt. Στην καμπύλη της προσομοίωσης με το LS-Dyna το μέγιστο φορτίο ανήλθε στα 195000 kNt, δηλαδή με απόκλιση 11,4 %. Η προσέγγιση του πειράματος και της προσομοίωσης είναι ικανοποιητική.

Η μεταβατική φάση της διέλασης υφίσταται περίπου ως τα 26 mm, η ευσταθής φάση περίπου ως τα 36 mm και η φάση αστάθειας μέχρι τέλους. Στην καμπύλη του LS-Dyna η μεταβατική μπορεί να θεωρηθεί ότι τελειώνει στα 10 mm και η ευσταθής στα 37 mm.

Δοκίμιο Cu-Al 6

Στην **Εικόνα 27** παρουσιάζεται η μορφή του δοκιμίου πριν την κατεργασία της διέλασης. Η διάμετρος του Al είναι 22 mm και η συνολική του δοκιμίου 25mm.



Εικόνα 27: Δοκίμιο Cu-Al 6 πριν την κατεργασία της διέλασης

Οι διαστάσεις που προέκυψαν μετά τη διέλαση, πριν την εξόλκευση είναι:

Τελικό Μήκος L: 56.0 mm (+ 40.0%)

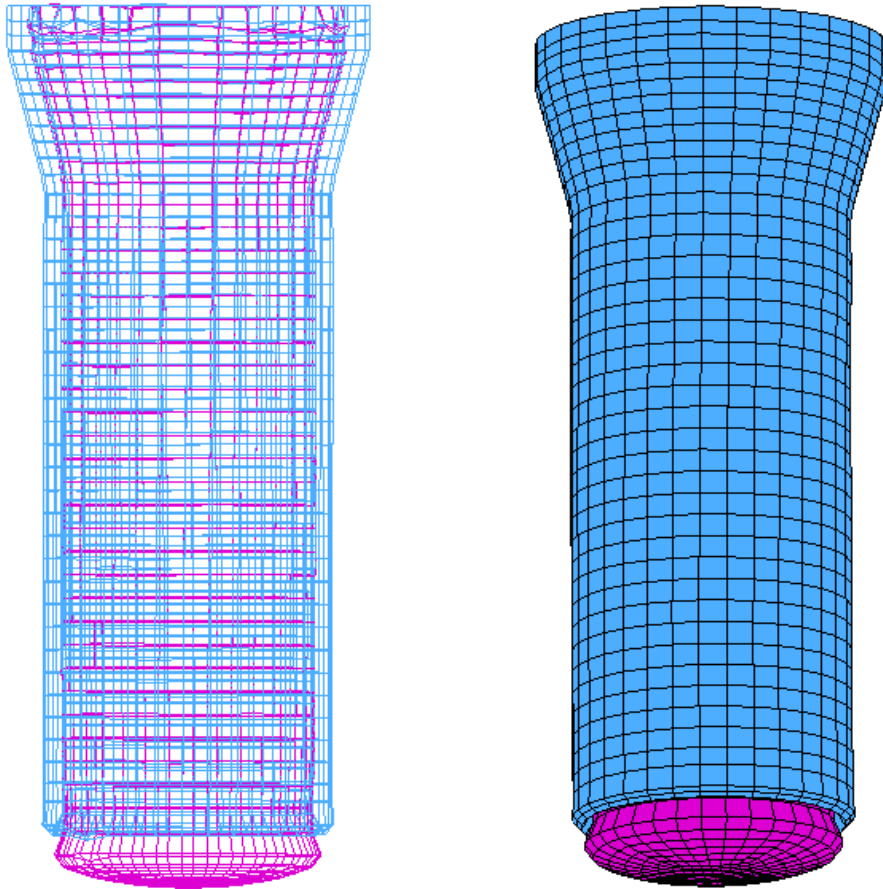
Τελικό Μήκος l : 53.1 mm

Στην συνέχεια απεικονίζεται η τελική μορφή του δοκιμίου μετά την διεργασία της διέλασης:



Εικόνα 28: Δοκίμιο Cu-Al 6 μετά την κατεργασία της διέλασης (μετά την εξόλκευση)

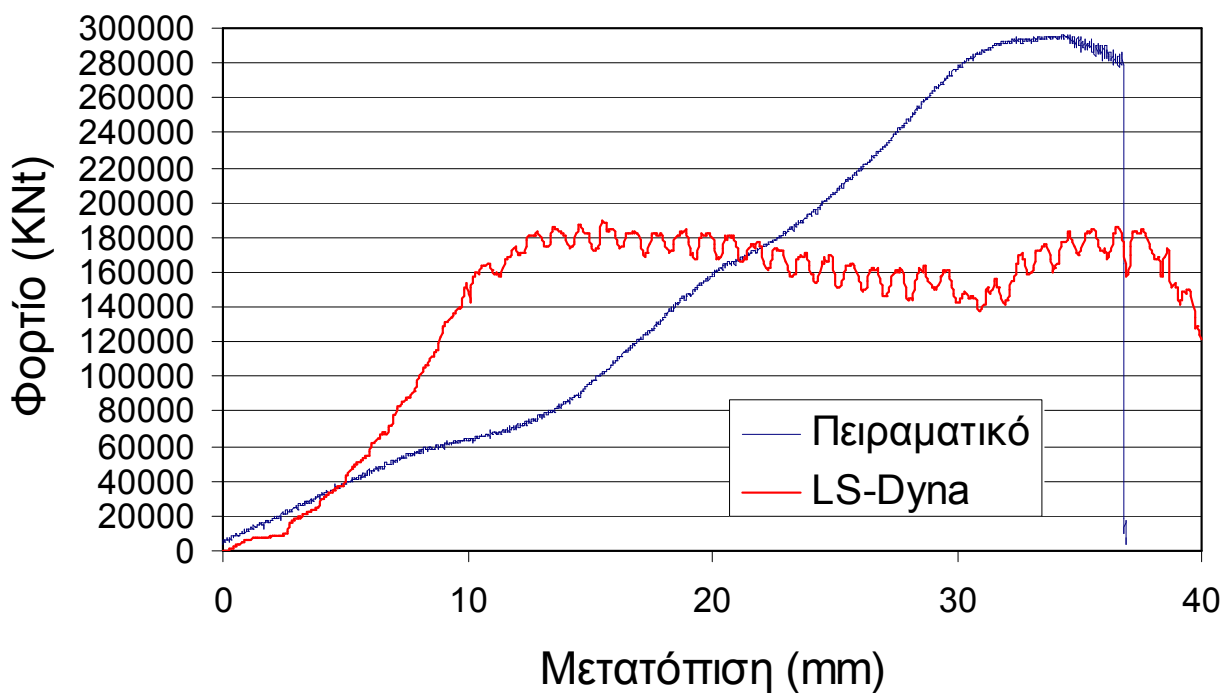
Η τελική μορφή του δοκιμίου, όπως προέκυψε κατά την προσομοίωση του πειράματος στο LS-Dyna, παρουσιάζεται στο Σχήμα 24.



Σχήμα 24: Δοκίμιο προσομοίωσης Cu-Al 6 μετά το πέρας της διέλασης σε πλάγια και ισομετρική όψη

Παρατηρείται ελαφρώς εντονότερη ροή του εσωτερικού στρώματος του αλουμινίου, σε σχέση με την αντίστοιχη ροή του χαλκού.

Στο **Διάγραμμα 6** που ακολουθεί δίνεται η καμπύλη φορτίου-μετατόπισης όπως προέκυψε από την πειραματική διαδικασία και την διαδικασία προσομοίωσης στο πρόγραμμα LS-Dyna για το δοκίμιο Cu-Al 6.



Διάγραμμα 6: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης (πειραματική και LS-Dyna) για την κατεργασία διέλασης του δοκιμίου Cu-Al 6

Η διαδρομή του εμβόλου ήταν 37 mm και το μέγιστο φορτίο 290000 kNt. Στην καμπύλη της προσομοίωσης με το LS-Dyna το μέγιστο φορτίο ανήλθε στα 189000 kNt, δηλαδή με απόκλιση 34,8 % από το πειραματικό. Αυτό υποδηλώνει ότι το μέγιστο φορτίο της προσομοίωσης δεν συμπίπτει καθόλου με το πειραματικό. Ο λόγος είναι ότι υπήρξε σφήνωμα του εξωτερικού τοιχώματος του χαλκού κατά τη διεργασία της διέλασης, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 29**. Η μορφή των καμπυλών δεν είναι παρόμοια.



Εικόνα 29: Άποψη δοκιμίου πριν την εξόλκευση

Η μεταβατική φάση της διέλασης υφίσταται περίπου ως τα 29 mm, η ευσταθής φάση περίπου ως τα 36mm και η φάση αστάθειας μέχρι τέλους. Στην καμπύλη του LS-Dyna η μεταβατική μπορεί να θεωρηθεί ότι τελειώνει στα 10 mm και η ευσταθής στα 30 mm.

Δοκίμιο Cu-Al 7

Στην **Εικόνα 30** παρουσιάζεται η μορφή του δοκιμίου πριν την κατεργασία της διέλασης. Η διάμετρος του Al είναι 20 mm και η συνολική του δοκιμίου 25mm.



Εικόνα 30: Δοκίμιο Cu-Al 7 πριν την κατεργασία της διέλασης

Οι διαστάσεις που προέκυψαν μετά τη διέλαση, πριν την εξόλκευση είναι:

Τελικό Μήκος L: 57.4 mm (+ 43.5%)

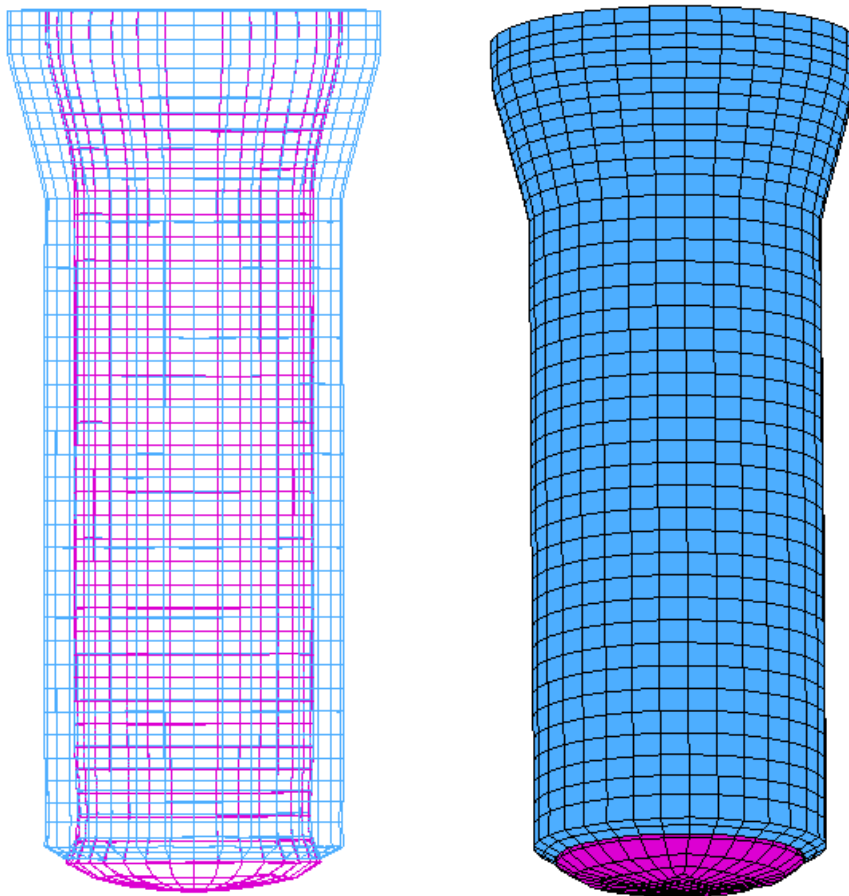
Τελικό Μήκος l : 52.4 – 54.0 mm

Στην συνέχεια απεικονίζεται η τελική μορφή του δοκιμίου μετά την διεργασία της διέλασης:



Εικόνα 31: Δοκίμιο Cu-Al 7 μετά την κατεργασία της διέλασης (μετά την εξόλκευση)

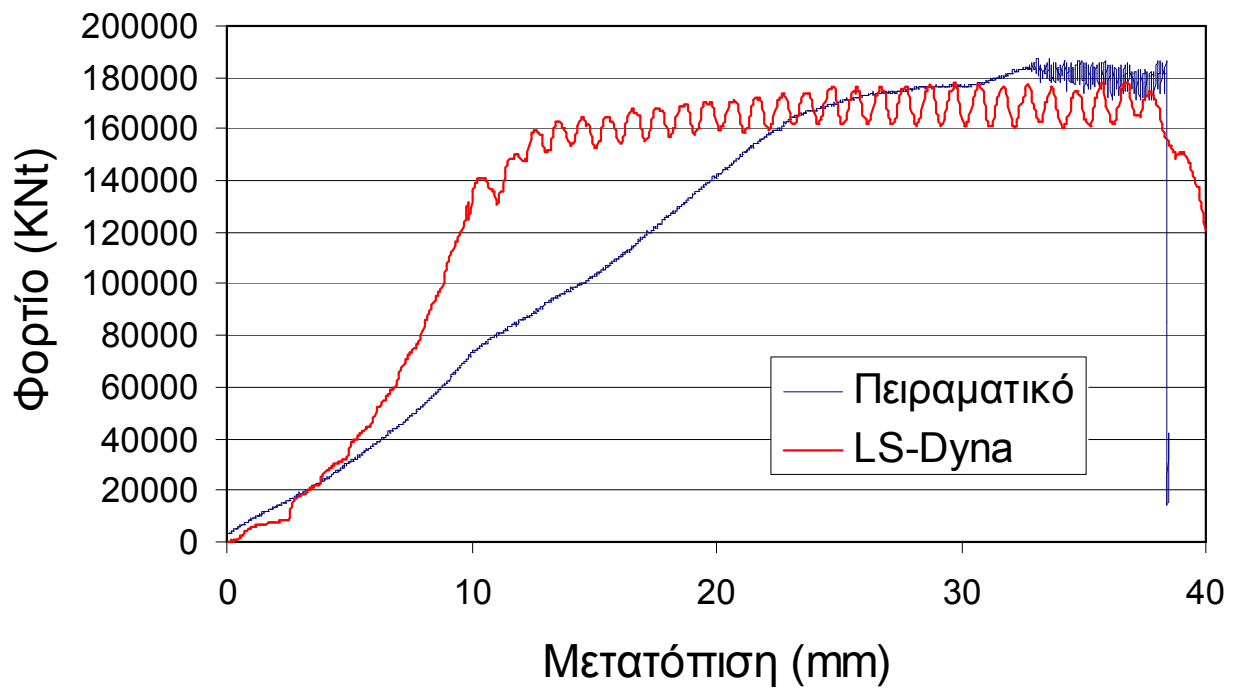
Η τελική μορφή του δοκιμίου, όπως προέκυψε κατά την προσομοίωση του πειράματος στο LS-Dyna, παρουσιάζεται στο **Σχήμα 25**.



Σχήμα 25: Δοκίμιο προσομοίωσης Cu-Al 7 μετά το πέρας της διέλευσης σε πλάγια και ισομετρική όψη

Παρατηρείται ελαφρώς εντονότερη ροή του εσωτερικού στρώματος του αλουμινίου, σε σχέση με την αντίστοιχη ροή του χαλκού. Προτού πραγματοποιηθεί η εξόλιευση του δοκιμίου, η ροή του αλουμινίου παρατηρείται ελαφρώς μεγαλύτερη σε σύγκριση με αυτή της προσομοίωσης, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 32**.

Στο **Διάγραμμα 7** που ακολουθεί δίνεται η καμπύλη φορτίου-μετατόπισης όπως προέκυψε από την πειραματική διαδικασία και την διαδικασία προσομοίωσης στο πρόγραμμα LS-Dyna για το δοκίμιο Cu-Al 7.



Διάγραμμα 7: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης (πειραματική και LS-Dyna) για την κατεργασία διέλασης του δοκιμίου Cu-Al 7

Η διαδρομή του εμβόλου ήταν 38 mm και το μέγιστο φορτίο 186000 kNt. Στην καμπύλη της προσομοίωσης με το LS-Dyna το μέγιστο φορτίο ανήλθε στα 177000 kNt, δηλαδή με απόκλιση 4,8 %. Η προσέγγιση του πειράματος και της προσομοίωσης είναι αρκετά ικανοποιητική.

Η μεταβατική φάση της διέλασης υφίσταται περίπου ως τα 24 mm, η ευσταθής φάση περίπου ως τα 37 mm και η φάση αστάθειας μέχρι τέλους. Στην καμπύλη του LS-Dyna η μεταβατική μπορεί να θεωρηθεί ότι τελειώνει στα 10 mm και η ευσταθής στα 38 mm.



Εικόνα 32: Άποψη δοκιμίου πριν την εξόλκευση

Δοκίμιο Cu-Al 8

Στην **Εικόνα 33** παρουσιάζεται η μορφή του δοκιμίου πριν την κατεργασία της διέλασης. Η διάμετρος του Al είναι 17.7 mm και η συνολική του δοκιμίου 25mm.



Εικόνα 33: Δοκίμιο Cu-Al 8 πριν την κατεργασία της διέλασης

Οι διαστάσεις που προέκυψαν μετά τη διέλαση, πριν την εξόλκευση είναι:

Τελικό Μήκος L: 57.9 mm (+ 44.8%)

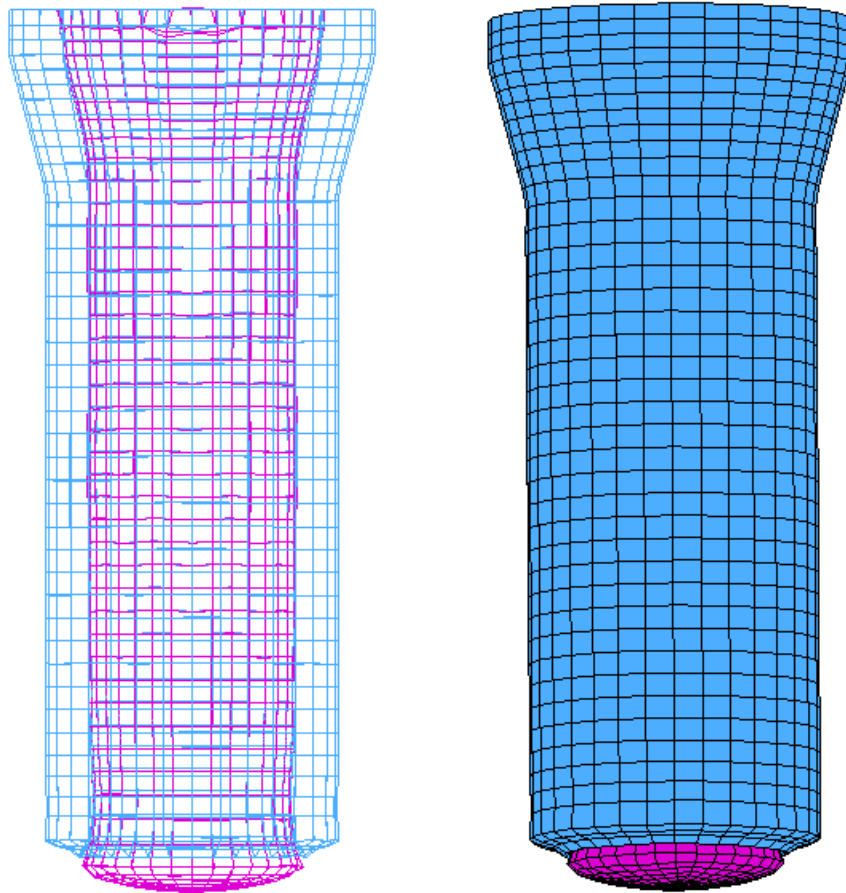
Τελικό Μήκος l : 52.6 – 53.7 mm

Στην συνέχεια απεικονίζεται η τελική μορφή του δοκιμίου μετά την διεργασία της διέλασης:



Εικόνα 34: Δοκίμιο Cu-Al 8 μετά την κατεργασία της διέλασης (μετά την εξόλκευση)

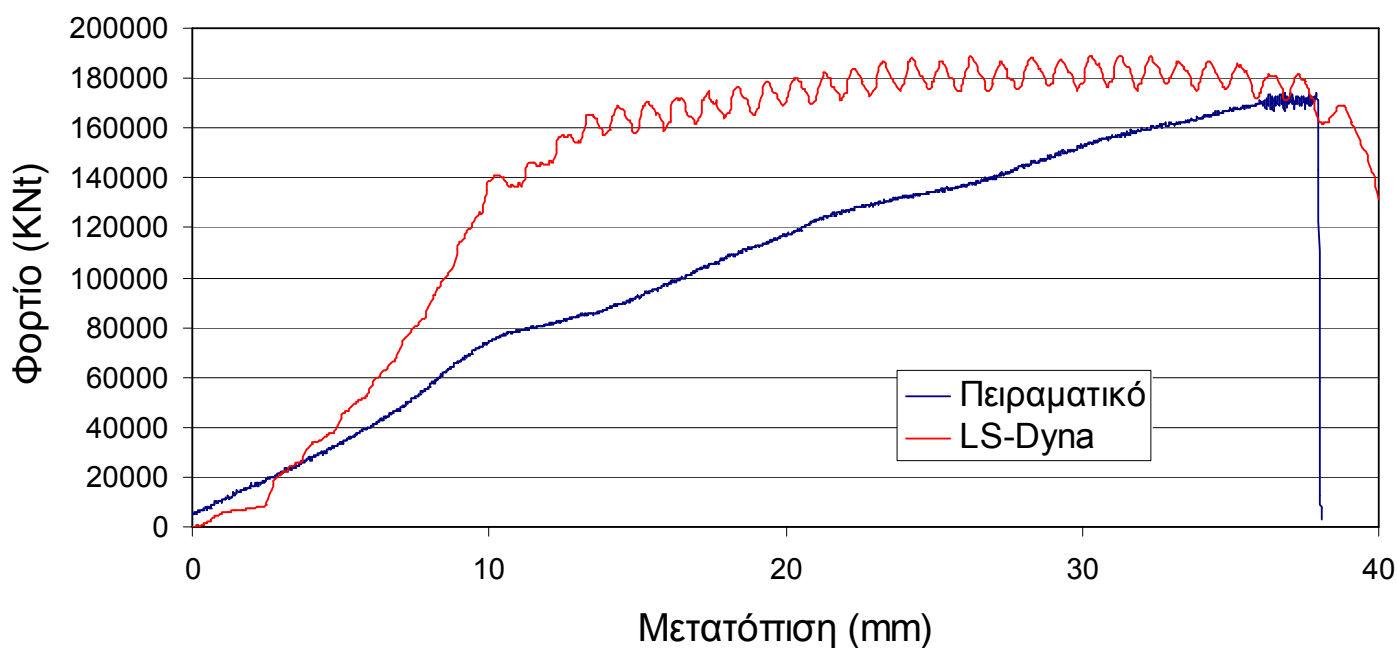
Η τελική μορφή του δοκιμίου, όπως προέκυψε κατά την προσομοίωση του πειράματος στο LS-Dyna, παρουσιάζεται στο Σχήμα 26.



Σχήμα 26: Δοκίμιο προσομοίωσης Cu-Al 8 μετά το πέρας της διέλασης σε πλάγια και ισομετρική όψη

Παρατηρείται ελαφρώς εντονότερη ροή του εσωτερικού στρώματος του αλουμινίου, σε σχέση με την αντίστοιχη ροή του χαλκού. Προτού πραγματοποιηθεί η εξόλκευση του δοκιμίου, η ροή του αλουμινίου παρατηρείται ελαφρώς μεγαλύτερη σε σύγκριση με αυτή της προσομοίωσης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 35.

Στο Διάγραμμα 8 που ακολουθεί δίνεται η καμπύλη φορτίου-μετατόπισης όπως προέκυψε από την πειραματική διαδικασία και την διαδικασία προσομοίωσης στο πρόγραμμα LS-Dyna για το δοκίμιο Cu-Al 8.



Διάγραμμα 8: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης (πειραματική και LS-Dyna) για την κατεργασία διέλασης του δοκιμίου Cu-Al 8

Η διαδρομή του εμβόλου ήταν 38 mm και το μέγιστο φορτίο 171000 kNt. Στην καμπύλη της προσομοίωσης με το LS-Dyna το μέγιστο φορτίο ανήλθε στα 185000 kNt, δηλαδή με απόκλιση 8,2 %. Η προσέγγιση του πειράματος και της προσομοίωσης είναι αρκετά ικανοποιητική. Παρόλη την σύγκλιση ως προς το μέγιστο φορτίο η μορφή των δύο καμπυλών είναι διαφορετική.



Εικόνα 35: Άποψη δοκιμίου πριν την εξόλκευση

Η μεταβατική φάση της διέλασης υφίσταται περίπου ως τα 35 mm, η ευσταθής φάση περίπου ως τα 37 mm και η φάση αστάθειας μέχρι τέλους. Στην καμπύλη του LS-Dyna η μεταβατική μπορεί να θεωρηθεί ότι τελειώνει στα 10 mm και η ευσταθής στα 38 mm.

Δοκίμιο Cu-Al 9

Στην **Εικόνα 36** παρουσιάζεται η μορφή του δοκιμίου πριν την κατεργασία της διέλασης. Η διάμετρος του Al είναι 15 mm και η συνολική του δοκιμίου 25mm.



Εικόνα 36: Δοκίμιο Cu-Al 9 πριν την κατεργασία της διέλασης

Οι διαστάσεις που προέκυψαν μετά τη διέλαση, πριν την εξόλκευση είναι:

Τελικό Μήκος L: 80.5 mm (+ 101.3%) –εξέχον τμήμα αλουμινίου=34.7 mm

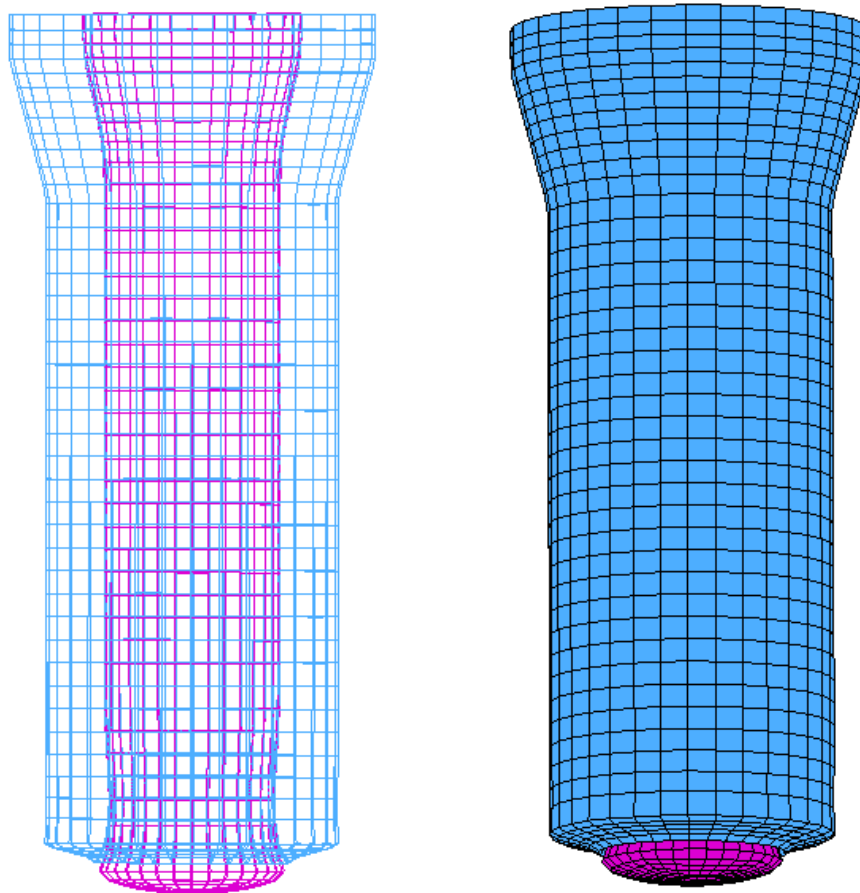
Τελικό Μήκος l : 44.2 mm

Στην συνέχεια απεικονίζεται η τελική μορφή του δοκιμίου μετά την διεργασία της διέλασης:



Εικόνα 37: Δοκίμιο Cu-Al 9 μετά την κατεργασία της διέλασης (μετά την εξόλκευση)

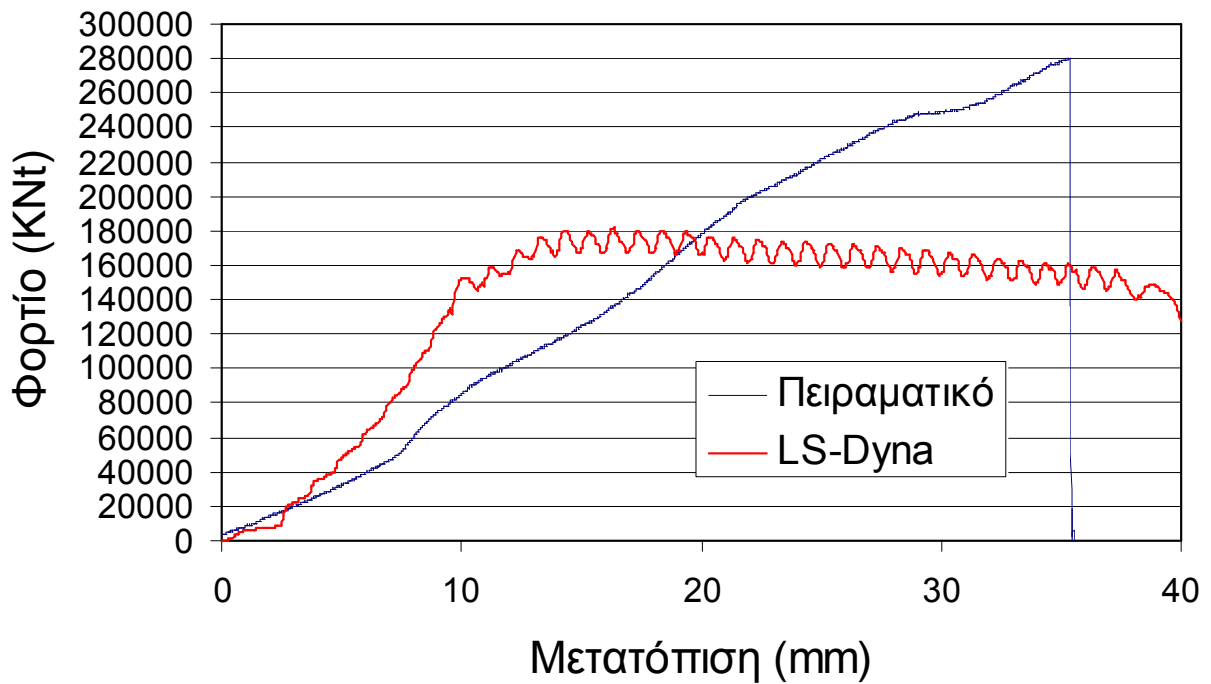
Η τελική μορφή του δοκιμίου, όπως προέκυψε κατά την προσομοίωση του πειράματος στο LS-Dyna, παρουσιάζεται στο Σχήμα 27.



Σχήμα 27: Δοκίμιο προσομοίωσης Cu-Al 9 μετά το πέρας της διέλευσης σε πλάγια και ισομετρική όψη

Στο πειραματικό δοκίμιο παρατηρείται αρκετά εντονότερη ροή του εσωτερικού στρώματος του αλουμινίου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 37, σε σχέση με την αντίστοιχη ροή του χαλκού, κάτι που δεν ισχύει στο δοκίμιο της προσομοίωσης.

Στο Διάγραμμα 9 που ακολουθεί δίνεται η καμπύλη φορτίου-μετατόπισης όπως προέκυψε από την πειραματική διαδικασία και την διαδικασία προσομοίωσης στο πρόγραμμα LS-Dyna για το δοκίμιο Cu-Al 9.



Διάγραμμα 9: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης (πειραματική και LS-Dyna) για την κατεργασία διέλασης του δοκιμίου Cu-Al 9

Η καμπύλη του LS-Dyna δεν προσεγγίζει καθόλου την πειραματική καμπύλη ούτε σαν μορφή, αλλά ούτε ως προς το μέγιστο φορτίο.

Η διαδρομή του εμβόλου ήταν 35 mm και το μέγιστο φορτίο 280000 kNt. Στην καμπύλη της προσομοίωσης με το LS-Dyna το μέγιστο φορτίο ανήλθε στα 180000 kNt, δηλαδή με απόκλιση 35,7 %. Αυτό υποδηλώνει ότι το μέγιστο φορτίο της προσομοίωσης δεν συμπίπτει καθόλου με το πειραματικό. Ο λόγος είναι ότι υπήρξε εκτεταμένο σφήνωμα του εξωτερικού τοιχώματος του χαλκού κατά τη διεργασία της διέλασης, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 38**.



Εικόνα 38: Άποψη δοκιμίου πριν την εξόλκευση

Οι φάσεις της διέλασης δεν είναι διακριτές καθώς η μορφή της καμπύλης δεν είναι τυπική μορφή διαγράμματος διέλασης. Αυτό είναι πιθανό να οφείλεται και στο έντονο σφήνωμα που παρουσιάστηκε κατά την διεργασία της διέλασης. Στην καμπύλη του LS-Dyna η μεταβατική μπορεί να θεωρηθεί ότι τελειώνει στα 10 mm και η ευσταθής στα 38 mm.

Δοκίμιο Cu-Al 10

Στην **Εικόνα 39** παρουσιάζεται η μορφή του δοκιμίου πριν την κατεργασία της διέλασης. Η διάμετρος του Al είναι 12.5 mm και η συνολική του δοκιμίου 25mm.



Εικόνα 39: Δοκίμιο Cu-Al 10 πριν την κατεργασία της διέλασης

Οι διαστάσεις που προέκυψαν μετά τη διέλαση, πριν την εξόλκευση είναι:

Τελικό Μήκος L: 55.6 – 56.7 mm (+ 39.0 – 41.8%)

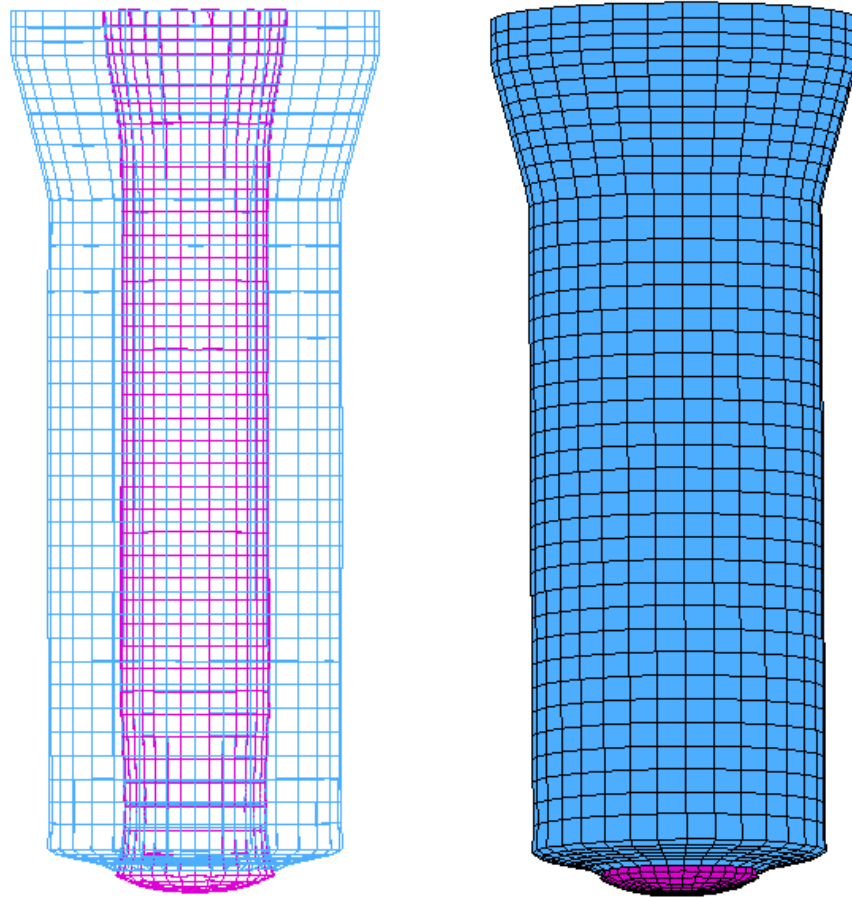
Τελικό Μήκος l : 49.1 – 50.0 mm

Στην συνέχεια απεικονίζεται η τελική μορφή του δοκιμίου μετά την διεργασία της διέλασης:



Εικόνα 40: Δοκίμιο Cu-Al 10 μετά την κατεργασία της διέλασης (μετά την εξόλκευση)

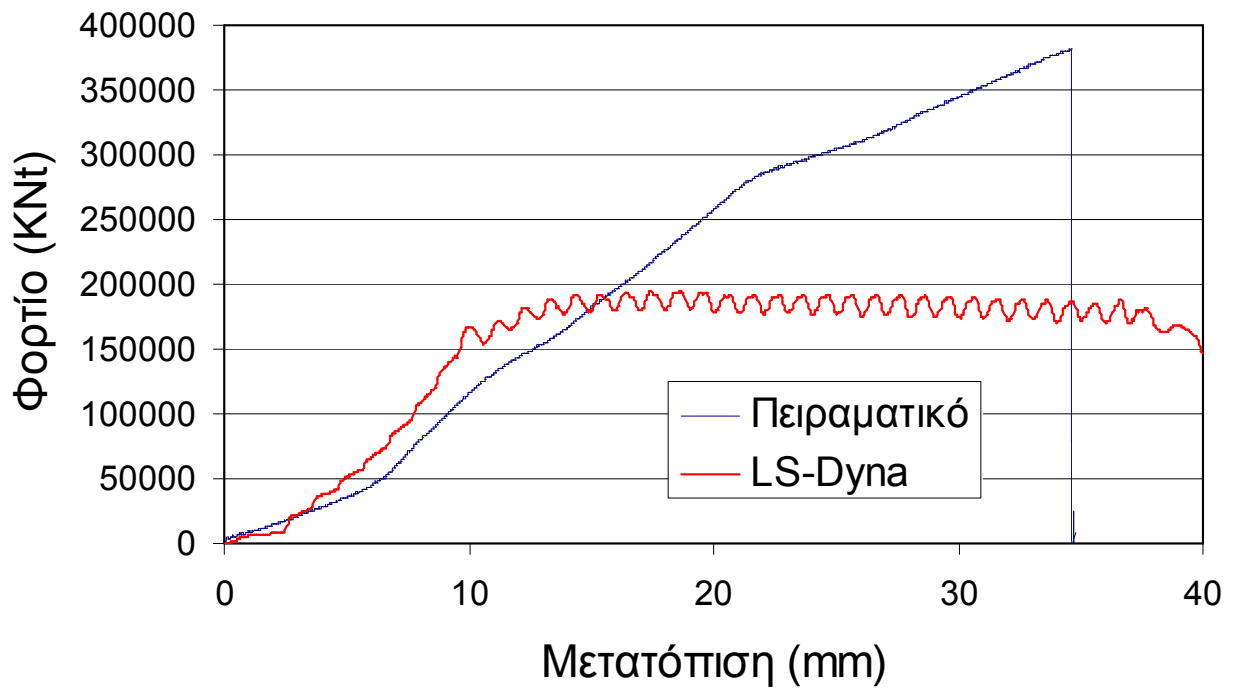
Η τελική μορφή του δοκιμίου, όπως προέκυψε κατά την προσομοίωση του πειράματος στο LS-Dyna, παρουσιάζεται στο Σχήμα 28.



Σχήμα 28: Δοκίμιο προσομοίωσης Cu-Al 10 μετά το πέρας της διέλασης σε πλάγια και ισομετρική όψη

Παρατηρείται ελαφρώς εντονότερη ροή του εσωτερικού στρώματος του αλουμινίου, σε σχέση με την αντίστοιχη ροή του χαλκού.

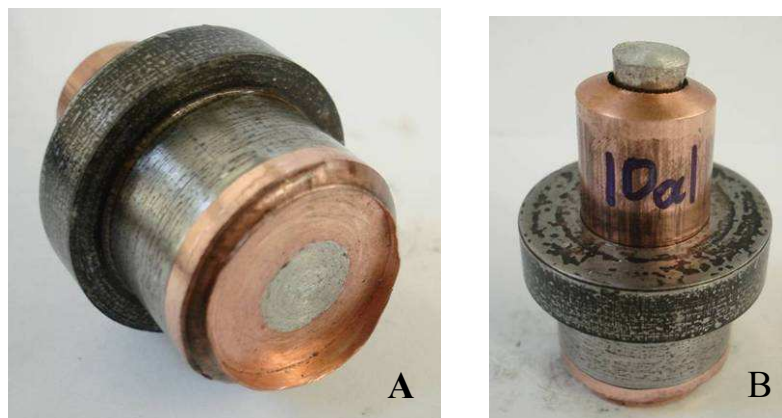
Στο Διάγραμμα 10 που ακολουθεί δίνεται η καμπύλη φορτίου-μετατόπισης όπως προέκυψε από την πειραματική διαδικασία και την διαδικασία προσομοίωσης στο πρόγραμμα LS-Dyna για το δοκίμιο Cu-Al 10.



Διάγραμμα 10: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης (πειραματική και LS-Dyna) για την κατεργασία διέλασης του δοκιμίου Cu-Al 10

Η καμπύλη του LS-Dyna δεν προσεγγίζει καθόλου την πειραματική καμπύλη ούτε σαν μορφή, αλλά ούτε ως προς το μέγιστο φορτίο.

Η διαδρομή του εμβόλου ήταν 35 mm και το μέγιστο φορτίο 381000 kNt. Στην καμπύλη της προσομοίωσης με το LS-Dyna το μέγιστο φορτίο ανήλθε στα 188000 kNt, δηλαδή με απόκλιση 50,7 %. Αυτό υποδηλώνει ότι το μέγιστο φορτίο της προσομοίωσης δεν συμπίπτει καθόλου με το πειραματικό. Ο λόγος είναι ότι υπήρξε εκτεταμένο σφήνωμα του εξωτερικού τοιχώματος του χαλκού κατά τη διεργασία της διέλασης, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 41**.



Εικόνα 41 (A και B): Απόψεις δοκιμίου πριν την εξόλκωση

Οι φάσεις της διέλασης δεν είναι διακριτές καθώς η μορφή της καμπύλης δεν είναι τυπική μορφή διαγράμματος διέλασης. Αυτό είναι πιθανό να οφείλεται και στο έντονο σφήνωμα που παρουσιάστηκε κατά την διεργασία της διέλασης. Στην καμπύλη του **LS-Dyna** η μεταβατική μπορεί να θεωρηθεί ότι τελειώνει στα **10 mm** και η ευσταθής στα **38 mm**.

Δοκίμιο Cu-Pb 1

Στην **Εικόνα 42** παρουσιάζεται η μορφή του δοκιμίου πριν την κατεργασία της διέλασης. Η διάμετρος του Pb είναι 22 mm και η συνολική του δοκιμίου 25mm.



Εικόνα 42: Δοκίμιο Cu-Pb 1 πριν την κατεργασία της διέλασης

Οι διαστάσεις που προέκυψαν μετά τη διέλαση, πριν την εξόλκευση είναι:

Τελικό Μήκος L: 58.6 mm (+ 46.5%)

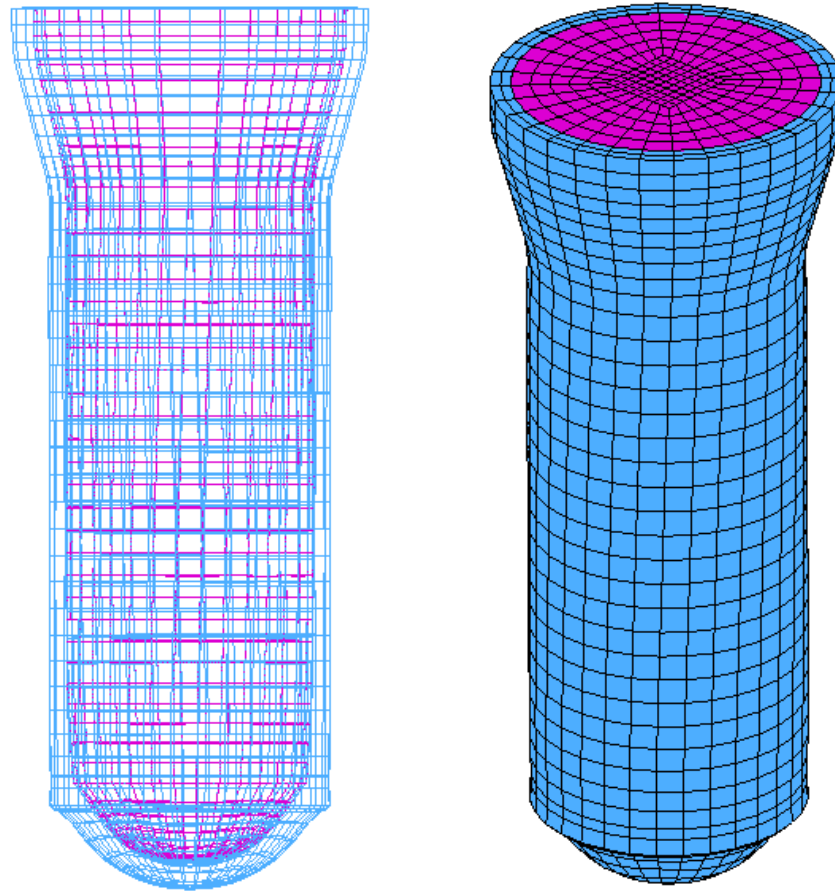
Τελικό Μήκος l : 52.6 mm

Στην συνέχεια απεικονίζεται η τελική μορφή του δοκιμίου μετά την διεργασία της διέλασης:



Εικόνα 43: Δοκίμιο Cu-Pb 1 μετά την κατεργασία της διέλασης (μετά την εξόλκευση)

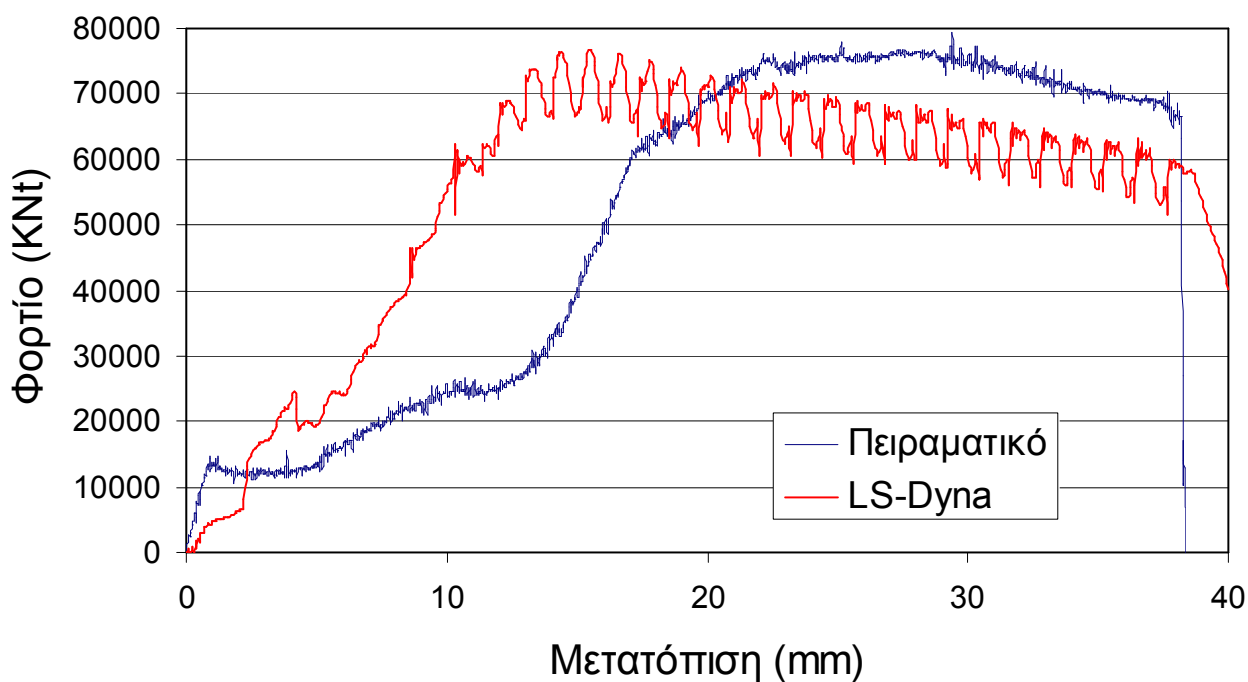
Η τελική μορφή του δοκιμίου, όπως προέκυψε κατά την προσομοίωση του πειράματος στο LS-Dyna, παρουσιάζεται στο Σχήμα 29.



Σχήμα 29: Δοκίμιο προσομοίωσης Cu-Pb 1 μετά το πέρας της διέλευσης σε πλάγια και ισομετρική όψη

Παρατηρείται αρκετά πιο έντονη ροή του εσωτερικού στρώματος του μολύβδου, σε σχέση με την αντίστοιχη ροή του χαλκού.

Στο Διάγραμμα 11 που ακολουθεί δίνεται η καμπύλη φορτίου-μετατόπισης όπως προέκυψε από την πειραματική διαδικασία και την διαδικασία προσομοίωσης στο πρόγραμμα LS-Dyna για το δοκίμιο Cu-Pb 1.



Διάγραμμα 11: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης (πειραματική και LS-Dyna) για την κατεργασία διέλασης του δοκιμίου Cu-Pb 1

Η διαδρομή του εμβόλου ήταν 38 mm και το μέγιστο φορτίο 79000 kNt. Στην καμπύλη της προσομοίωσης με το LS-Dyna το μέγιστο φορτίο ανήλθε στα 76000 kNt, δηλαδή με απόκλιση 3,8 %. Η προσέγγιση του πειράματος και της προσομοίωσης είναι αρκετά ικανοποιητική.

Η μεταβατική φάση της διέλασης υφίσταται περίπου ως τα 19 mm, η ευσταθής φάση περίπου ως τα 37 mm και η φάση αστάθειας μέχρι τέλους. Στην καμπύλη του LS-Dyna η μεταβατική μπορεί να θεωρηθεί ότι τελειώνει στα 10 mm και η ευσταθής στα 38 mm.

Δοκίμιο Cu-Pb 2

Στην **Εικόνα 44** παρουσιάζεται η μορφή του δοκιμίου πριν την κατεργασία της διέλασης. Η διάμετρος του Pb είναι 20 mm και η συνολική του δοκιμίου 25mm.



Εικόνα 44: Δοκίμιο Cu-Pb 2 πριν την κατεργασία της διέλασης

Οι διαστάσεις που προέκυψαν μετά τη διέλαση, πριν την εξόλκευση είναι:

Τελικό Μήκος L: 58.9 mm (+ 47.3%)

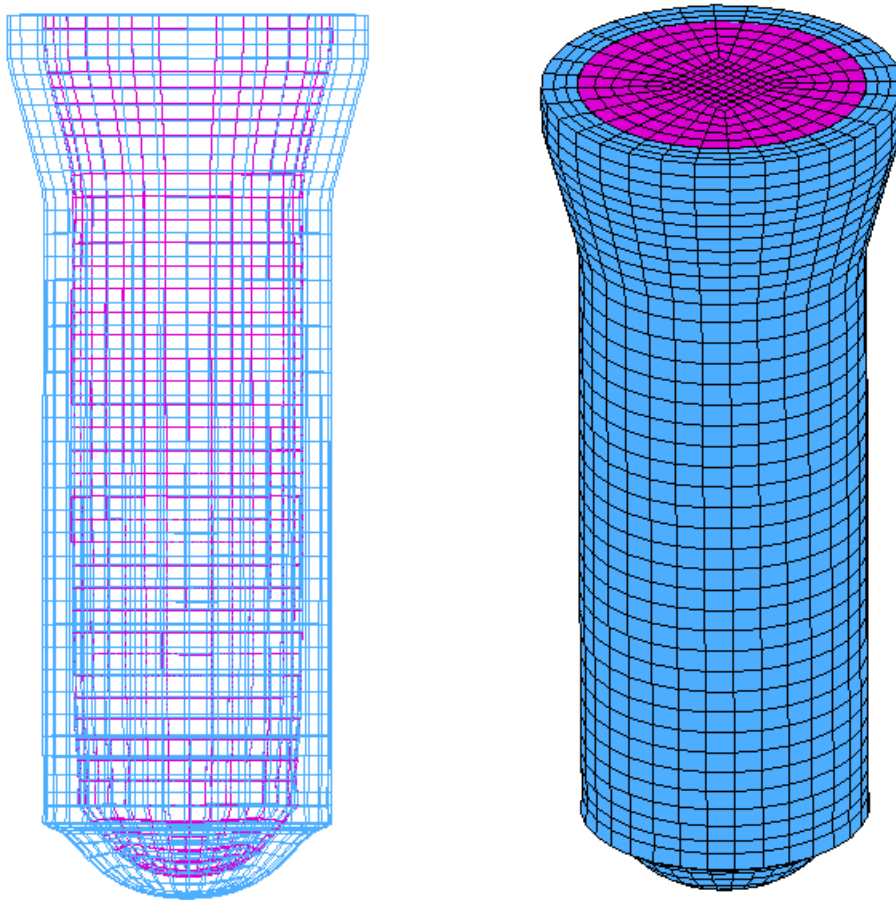
Τελικό Μήκος l : 52.8 mm

Στην συνέχεια απεικονίζεται η τελική μορφή του δοκιμίου μετά την διεργασία της διέλασης:



Εικόνα 46: Δοκίμιο Cu-Pb 2 μετά την κατεργασία της διέλασης (μετά την εξόλκευση)

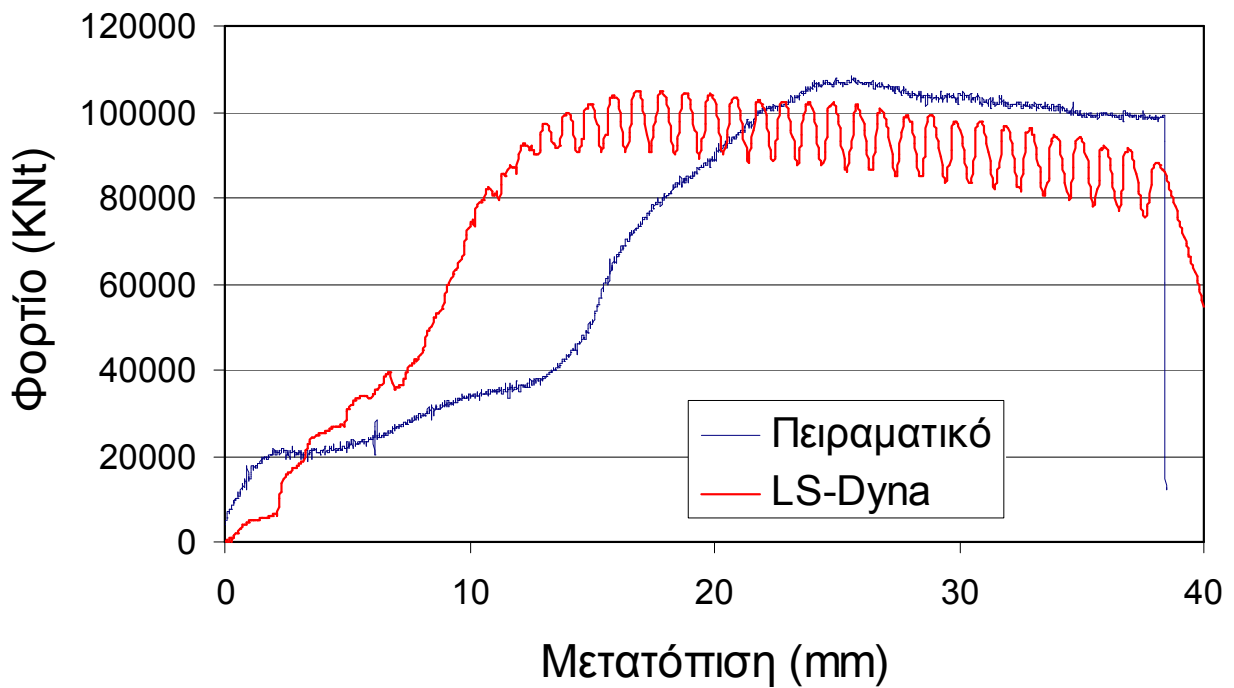
Η τελική μορφή του δοκιμίου, όπως προέκυψε κατά την προσομοίωση του πειράματος στο LS-Dyna, παρουσιάζεται στο Σχήμα 30.



Σχήμα 30: Δοκίμιο προσομοίωσης Cu-Pb 2 μετά το πέρας της διέλασης σε πλάγια και ισομετρική όψη

Παρατηρείται αρκετά πιο έντονη ροή του εσωτερικού στρώματος του μολύβδου, σε σχέση με την αντίστοιχη ροή του χαλκού.

Στο Διάγραμμα 12 που ακολουθεί δίνεται η καμπύλη φορτίου-μετατόπισης όπως προέκυψε από την πειραματική διαδικασία και την διαδικασία προσομοίωσης στο πρόγραμμα LS-Dyna για το δοκίμιο Cu-Pb 2.



Διάγραμμα 12: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης (πειραματική και LS-Dyna) για την κατεργασία διέλασης του δοκιμίου Cu-Pb 2

Η διαδρομή του εμβόλου ήταν 38 mm και το μέγιστο φορτίο 107000 kNt. Στην καμπύλη της προσομοίωσης με το LS-Dyna το μέγιστο φορτίο ανήλθε στα 103000 kNt, δηλαδή με απόκλιση 3,7 %. Η προσέγγιση του πειράματος και της προσομοίωσης είναι αρκετά ικανοποιητική.

Η μεταβατική φάση της διέλασης υφίσταται περίπου ως τα 19 mm, η ευσταθής φάση περίπου ως τα 37 mm και η φάση αστάθειας μέχρι τέλους. Στην καμπύλη του LS-Dyna η μεταβατική μπορεί να θεωρηθεί ότι τελειώνει στα 10 mm και η ευσταθής στα 38 mm.

Δοκίμιο Cu-Pb 3

Στην **Εικόνα 46** παρουσιάζεται η μορφή του δοκιμίου πριν την κατεργασία της διέλασης. Η διάμετρος του Pb είναι 17.7 mm και η συνολική του δοκιμίου 25mm.



Εικόνα 46: Δοκίμιο Cu-Pb 3 πριν την κατεργασία της διέλασης

Οι διαστάσεις που προέκυψαν μετά τη διέλαση, πριν την εξόλκευση είναι:

Τελικό Μήκος L: 66.9 mm (+ 67.3%)

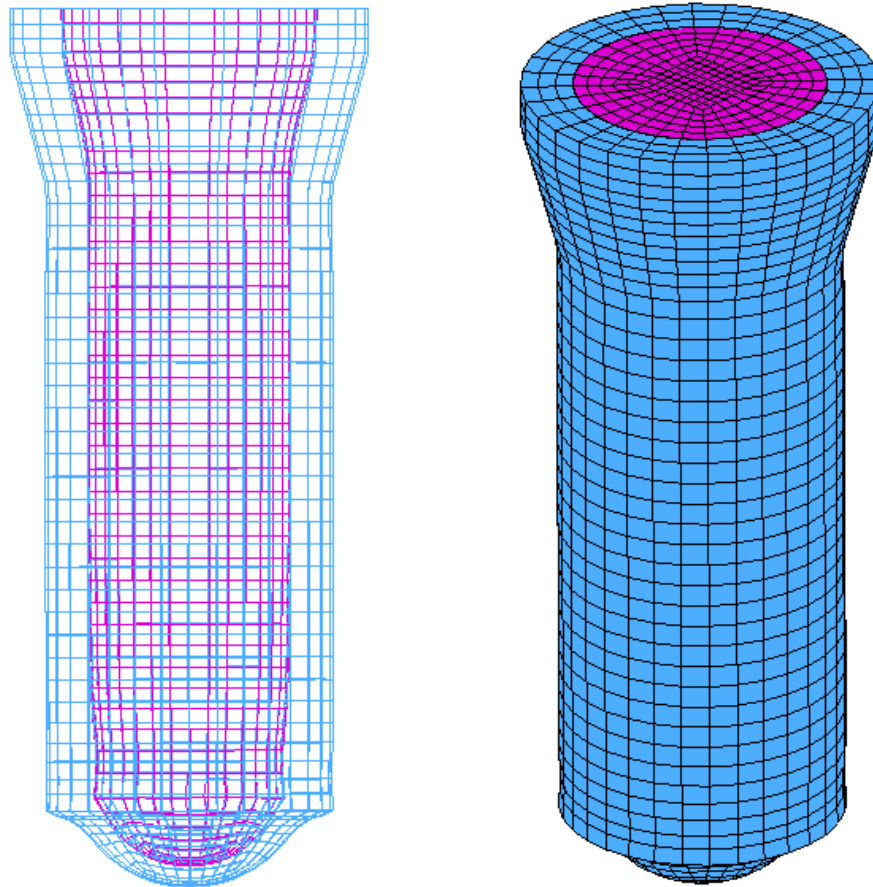
Τελικό Μήκος l : 48.6 mm

Στην συνέχεια απεικονίζεται η τελική μορφή του δοκιμίου μετά την διεργασία της διέλασης:



Εικόνα 47: Δοκίμιο Cu-Pb 3 μετά την κατεργασία της διέλασης (μετά την εξόλκευση)

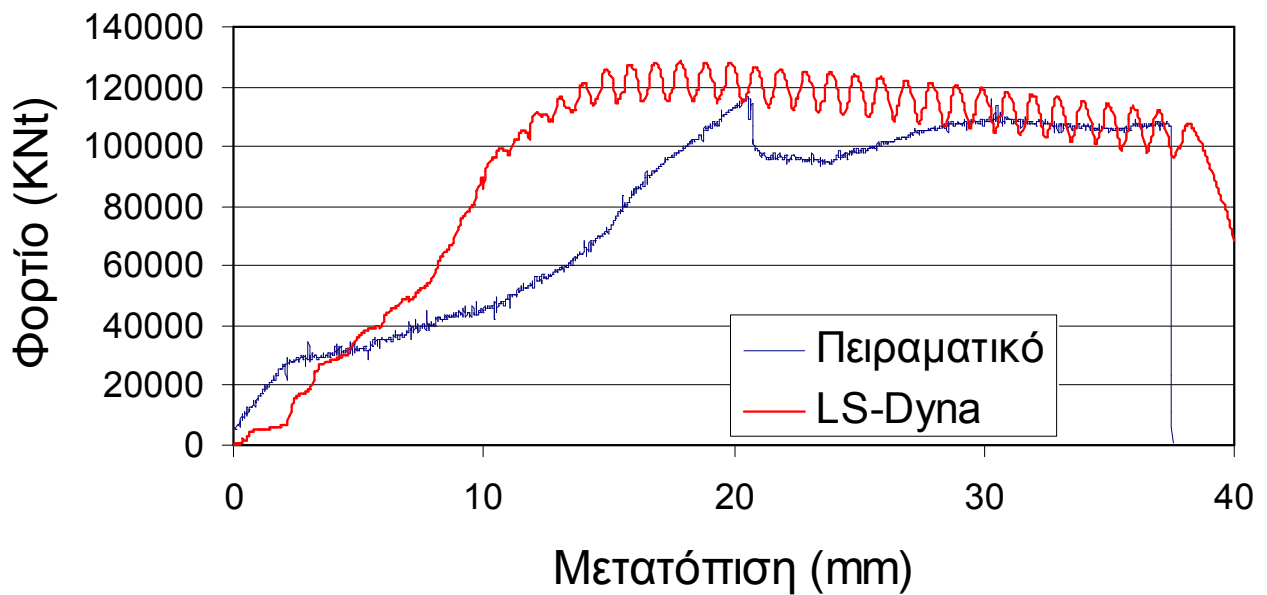
Η τελική μορφή του δοκιμίου, όπως προέκυψε κατά την προσομοίωση του πειράματος στο LS-Dyna, παρουσιάζεται στο Σχήμα 31.



Σχήμα 31: Δοκίμιο προσομοίωσης Cu-Pb 3 μετά το πέρας της διέλασης σε πλάγια και ισομετρική όψη

Παρατηρείται αρκετά πιο έντονη ροή του εσωτερικού στρώματος του μολύβδου, σε σχέση με την αντίστοιχη ροή του χαλκού.

Στο Διάγραμμα 13 που ακολουθεί δίνεται η καμπύλη φορτίου-μετατόπισης όπως προέκυψε από την πειραματική διαδικασία και την διαδικασία προσομοίωσης στο πρόγραμμα LS-Dyna για το δοκίμιο Cu-Pb 3.



Διάγραμμα 13: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης (πειραματική και LS-Dyna) για την κατεργασία διέλασης του δοκιμίου Cu-Pb 3

Η διαδρομή του εμβόλου ήταν 37 mm και το μέγιστο φορτίο 114000 kNt. Στην καμπύλη της προσομοίωσης με το LS-Dyna το μέγιστο φορτίο ανήλθε στα 125000 kNt, δηλαδή με απόκλιση 9,6 %. Η προσέγγιση του πειράματος και της προσομοίωσης είναι αρκετά ικανοποιητική.

Η μεταβατική φάση της διέλασης υφίσταται περίπου ως τα 20 mm, η ευσταθής φάση περίπου ως τα 37 mm και η φάση αστάθειας μέχρι τέλους. Στην καμπύλη του LS-Dyna η μεταβατική μπορεί να θεωρηθεί ότι τελειώνει στα 10 mm και η ευσταθής στα 38 mm. Η μείωση που παρατηρείται στην πειραματική καμπύλη πιθανώς να οφείλεται στο άνοιγμα του πάτου του χαλκού το οποίο φαίνεται στην **Εικόνα 48**.



Εικόνα 48: Άποψη δοκιμίου πριν την εξόλκευση

Δοκίμιο Cu-Pb 4

Στην **Εικόνα 49** παρουσιάζεται η μορφή του δοκιμίου πριν την κατεργασία της διέλασης. Η διάμετρος του Pb είναι 15 mm και η συνολική του δοκιμίου 25mm.



Εικόνα 49: Δοκίμιο Cu-Pb 4 πριν την κατεργασία της διέλασης

Οι διαστάσεις που προέκυψαν μετά τη διέλαση, πριν την εξόλκευση είναι:

Τελικό Μήκος L: 54.3 mm (+ 35.8%) – εξέχον τμήμα αλουμινίου=66.0 mm

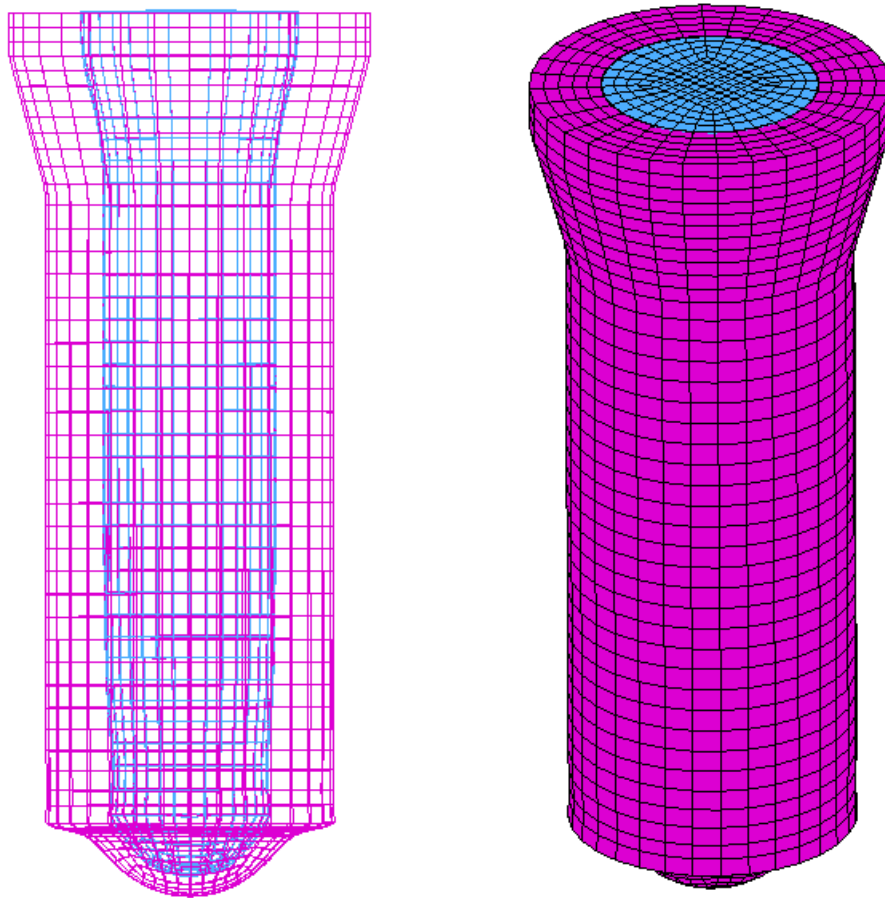
Τελικό Μήκος l : 49.9 mm

Στην συνέχεια απεικονίζεται η τελική μορφή του δοκιμίου μετά την διεργασία της διέλασης:



Εικόνα 50 (A και B): Δοκίμιο Cu-Pb 4 μετά την κατεργασία της διέλασης (μετά την εξόλκευση)

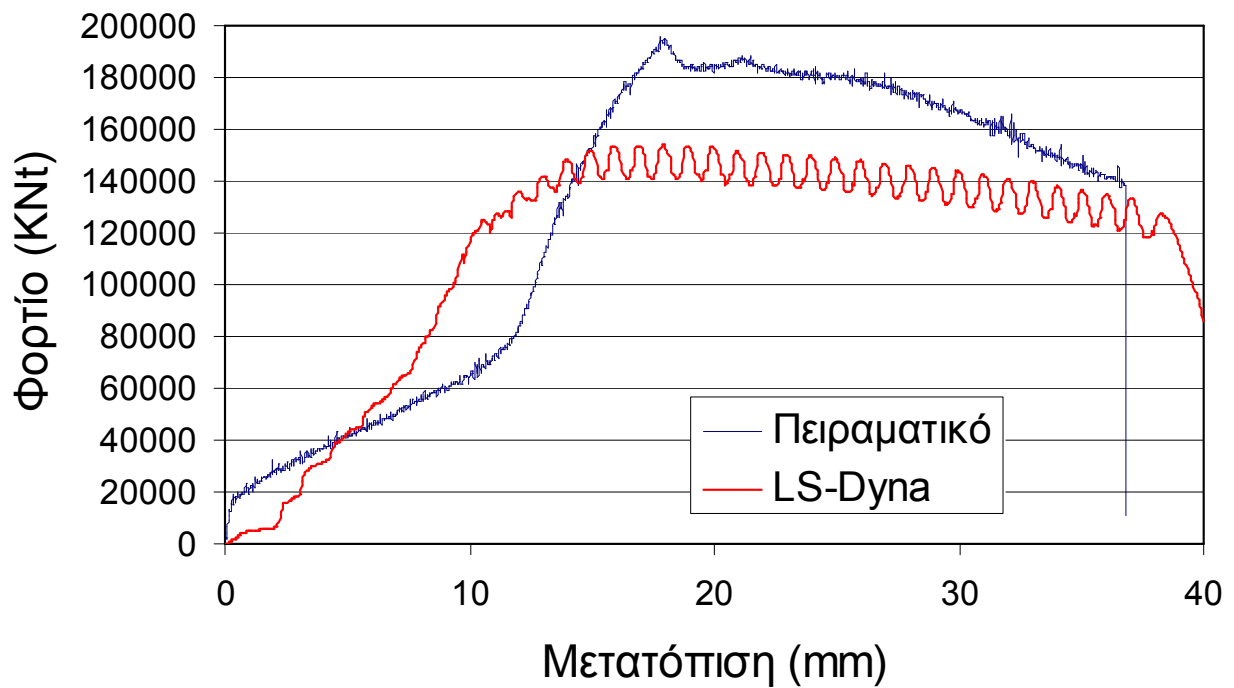
Η τελική μορφή του δοκιμίου, όπως προέκυψε κατά την προσομοίωση του πειράματος στο LS-Dyna, παρουσιάζεται στο Σχήμα 32.



Σχήμα 32: Δοκίμιο προσομοίωσης Cu-Pb 4 μετά το πέρας της διέλασης σε πλάγια και ισομετρική όψη

Παρατηρείται αρκετά πιο έντονη ροή του εσωτερικού στρώματος του μολύβδου, σε σχέση με την αντίστοιχη ροή του χαλκού.

Στο Διάγραμμα 14 που ακολουθεί δίνεται η καμπύλη φορτίου-μετατόπισης όπως προέκυψε από την πειραματική διαδικασία και την διαδικασία προσομοίωσης στο πρόγραμμα LS-Dyna για το δοκίμιο Cu-Pb 4.



Διάγραμμα 14: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης (πειραματική και LS-Dyna) για την κατεργασία διέλασης του δοκιμίου Cu-Pb 4

Η διαδρομή του εμβόλου ήταν 37 mm και το μέγιστο φορτίο 192000 kNt. Στην καμπύλη της προσομοίωσης με το LS-Dyna το μέγιστο φορτίο ανήλθε στα 151000 kNt, δηλαδή με απόκλιση 21,4 %. Έτσι έχουμε μια σχετική προσέγγιση του πειράματος και της προσομοίωσης. Η μικρή απόκλιση που υπάρχει, πιθανώς να οφείλεται στο άνοιγμα του χαλκού στον πάτο του δοκιμίου κατά τη διεργασία της διέλασης, από όπου διέρρευσε ο μόλυβδος, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 48**.

Η μεταβατική φάση της διέλασης υφίσταται περίπου ως τα 19 mm, η ευσταθής φάση περίπου ως τα 36 mm και η φάση αστάθειας μέχρι τέλους. Στην καμπύλη του LS-Dyna η μεταβατική μπορεί να θεωρηθεί ότι τελειώνει στα 10 mm και η ευσταθής στα 38 mm.

Δοκίμιο Cu-Pb 5

Στην **Εικόνα 51** παρουσιάζεται η μορφή του δοκιμίου πριν την κατεργασία της διέλασης. Η διάμετρος του Pb είναι 12.5 mm και η συνολική του δοκιμίου 25mm.



Εικόνα 51: Δοκίμιο Cu-Pb 5 πριν την κατεργασία της διέλασης

Οι διαστάσεις που προέκυψαν μετά τη διέλαση, πριν την εξόλκευση είναι:

Τελικό Μήκος L: 59.5 mm (+ 48.8%)

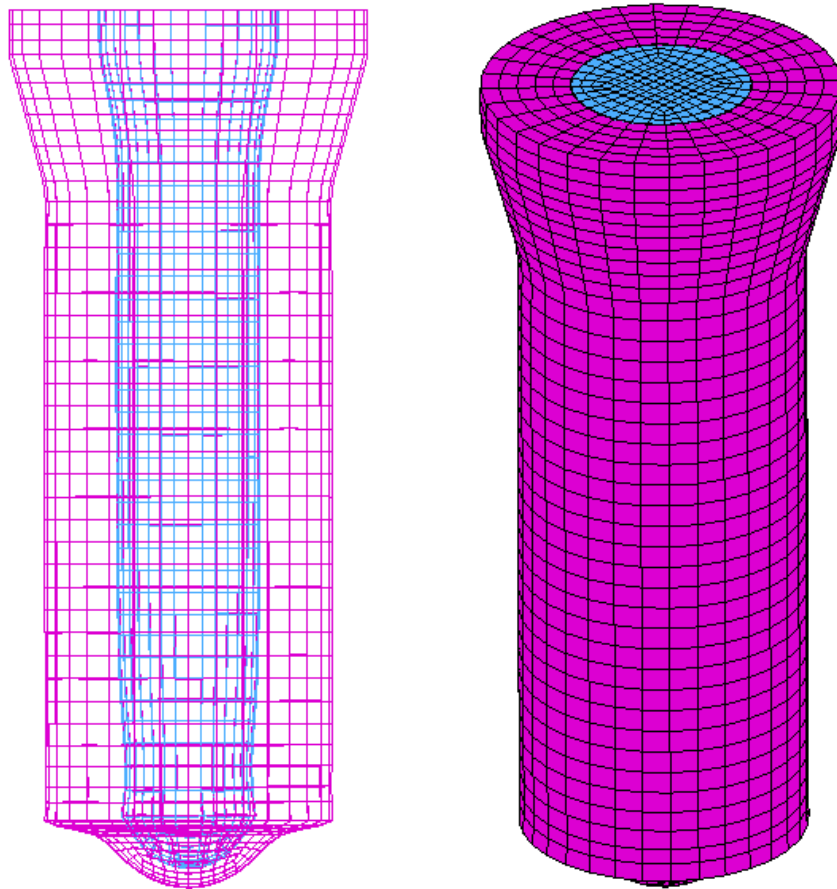
Τελικό Μήκος l : 54.9 - 55.6 mm

Στην συνέχεια απεικονίζεται η τελική μορφή του δοκιμίου μετά την διεργασία της διέλασης:



Εικόνα 52: Δοκίμιο Cu-Pb 5 μετά την κατεργασία της διέλασης (μετά την εξόλκευση)

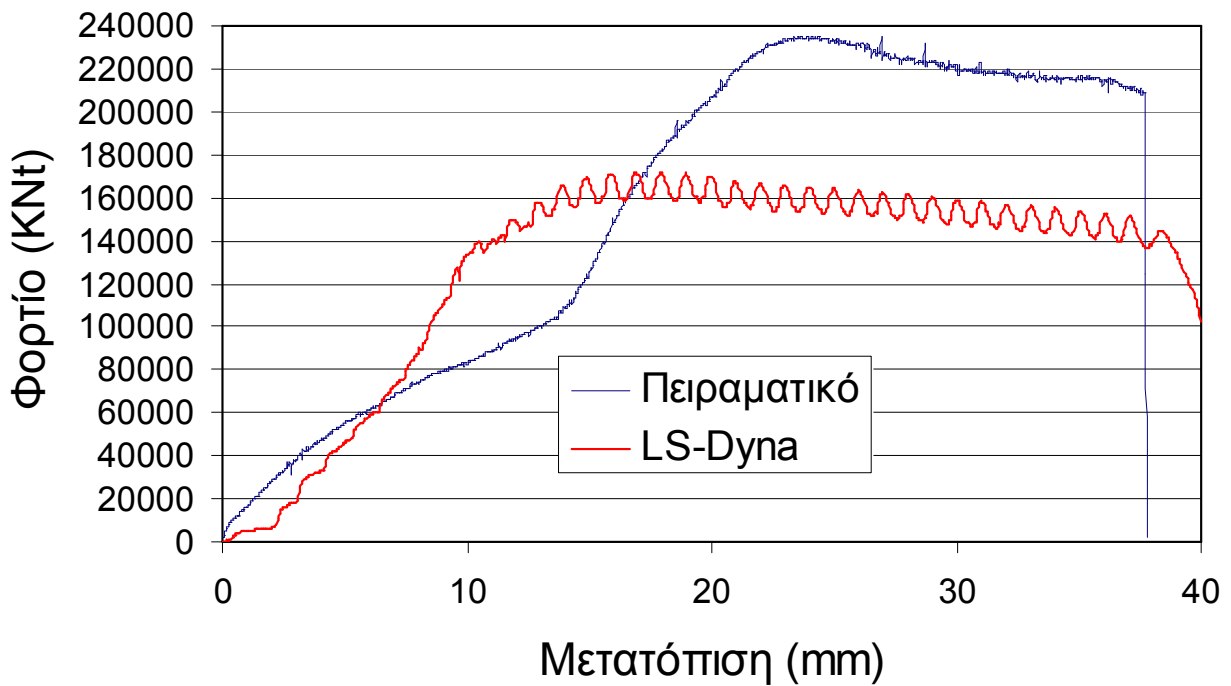
Η τελική μορφή του δοκιμίου, όπως προέκυψε κατά την προσομοίωση του πειράματος στο LS-Dyna, παρουσιάζεται στο Σχήμα 33.



Σχήμα 33: Δοκίμιο προσομοίωσης Cu-Pb 5 μετά το πέρας της διέλασης σε πλάγια και ισομετρική όψη

Παρατηρείται αρκετά πιο έντονη ροή του εσωτερικού στρώματος του μολύβδου, σε σχέση με την αντίστοιχη ροή του χαλκού.

Στο Διάγραμμα 15 που ακολουθεί δίνεται η καμπύλη φορτίου-μετατόπισης όπως προέκυψε από την πειραματική διαδικασία και την διαδικασία προσομοίωσης στο πρόγραμμα LS-Dyna για το δοκίμιο Cu-Pb 5.



Διάγραμμα 15: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης (πειραματική και LS-Dyna) για την κατεργασία διέλασης του δοκιμίου Cu-Pb 5

Η διαδρομή του εμβόλου ήταν 38 mm και το μέγιστο φορτίο 234000 kNt. Στην καμπύλη της προσομοίωσης με το LS-Dyna το μέγιστο φορτίο ανήλθε στα 167000 kNt, δηλαδή με απόκλιση 28,6 %. Αυτό υποδηλώνει ότι το μέγιστο φορτίο της προσομοίωσης δεν συμπίπτει με το πειραματικό. Ο λόγος είναι ότι υπήρξε σφήνωμα του εξωτερικού τοιχώματος του χαλκού κατά τη διεργασία της διέλασης, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 53**.



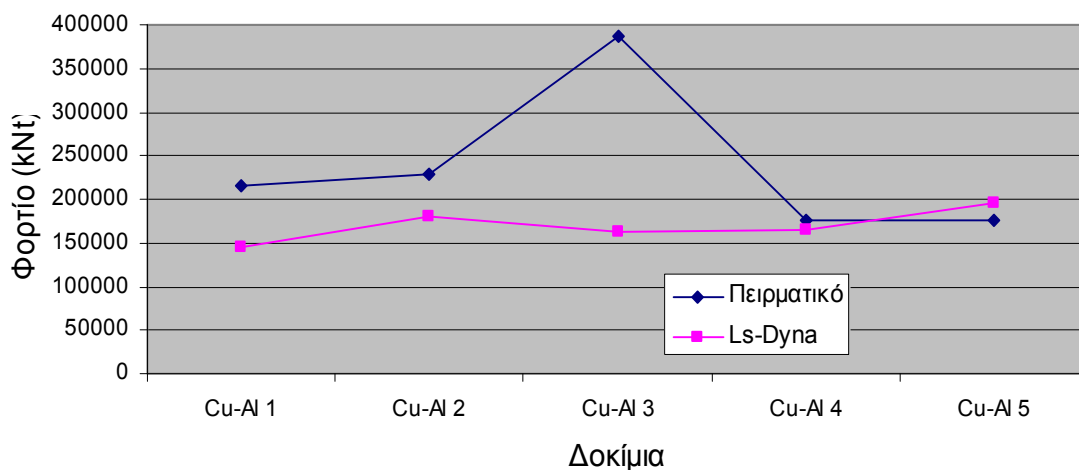
Εικόνα 53: Άποψη δοκιμίου πριν την εξόλκευση

Η μεταβατική φάση της διέλασης υφίσταται περίπου ως τα 20 mm, η ευσταθής φάση περίπου ως τα 37 mm και η φάση αστάθειας μέχρι τέλους. Στην καμπύλη του LS-Dyna η μεταβατική μπορεί να θεωρηθεί ότι τελειώνει στα 10 mm και η ευσταθής στα 38 mm.

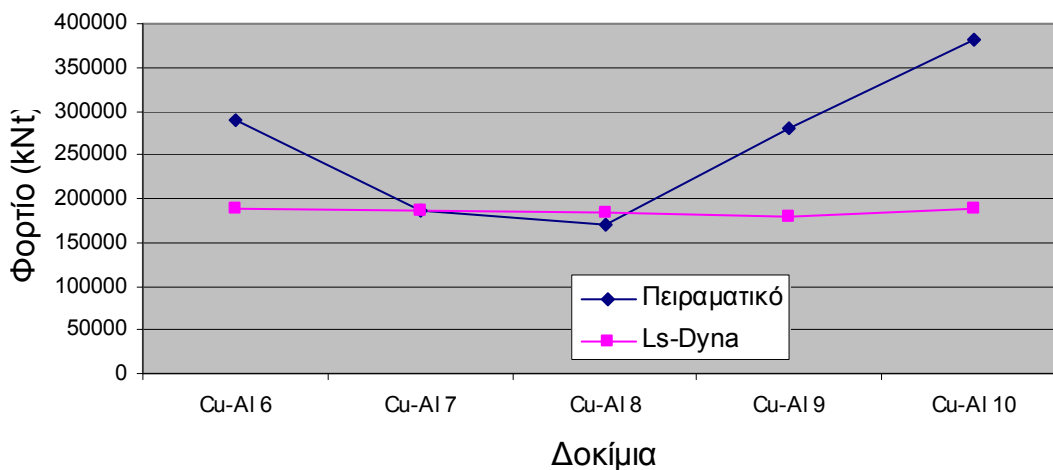
6. Συμπεράσματα

➤ Στις καμπύλες φορτίου-μετατόπισης των δοκιμίων Cu-Al παρατηρούμε πιο γραμμική αύξηση του φορτίου όσο κινείται το έμβολο, ενώ στα δοκίμια Cu-Pb έχουμε σταθεροποίηση του φορτίου στα 20 mm της διαδρομής του εμβόλου περίπου.

➤ Στα δοκίμια Cu-Al έχουμε σχετικά σταθερό μέγιστο φορτίο ασχέτως εσωτερικής διαμέτρου του αλουμινίου (Διαγράμματα 16 και 17). Αυτό ισχύει και στα πειραματικά αποτελέσματα και σε εκείνα της προσομοίωσης. Θεωρείται αυτονόητο ότι εξαιρούνται τα πειραματικά αποτελέσματα, στα δοκίμια των οποίων υπήρξε σφήνωμα. Τα δύο μέταλλα, δηλαδή ο χαλκός και το αλουμίνιο, εμφανίζουν παραπλήσια χαρακτηριστικά ροής, κάτι το οποίο είναι ιδιαίτερα σημαντικό για διμεταλλικά υλικά που υφίστανται την κατεργασία της διέλασης.

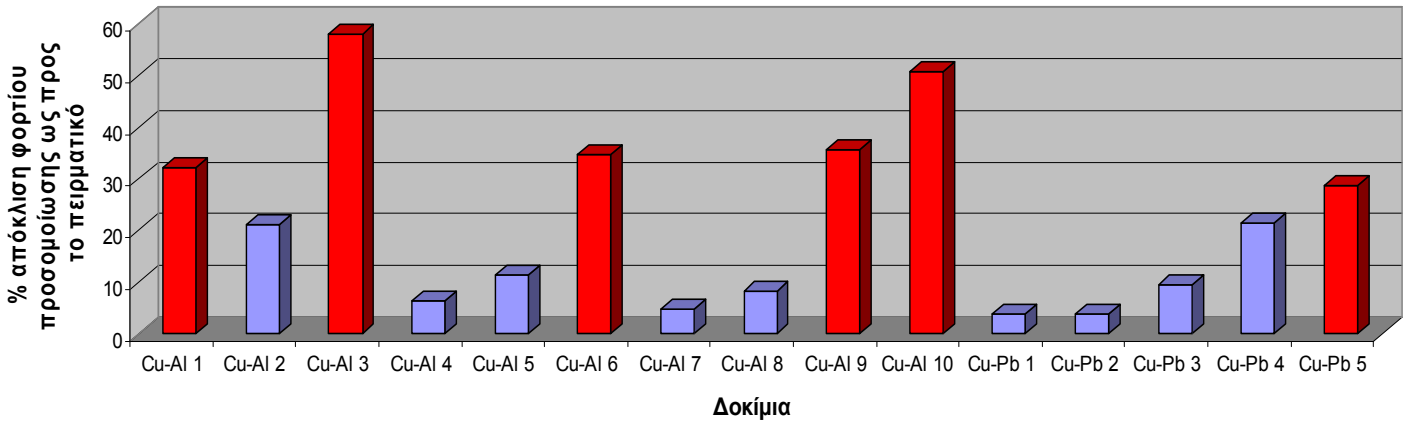


Διάγραμμα 16: Μέγιστο φορτίο δοκιμίων Cu-Al με πάτο για την πειραματική διεργασία και την διεργασία προσομοίωσης



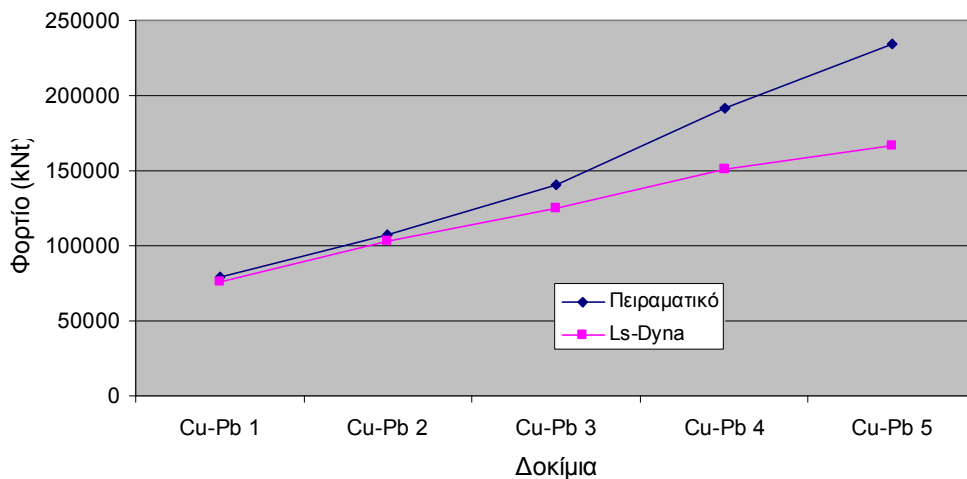
Διάγραμμα 17: Μέγιστο φορτίο δοκιμίων Cu-Al χωρίς πάτο για την πειραματική διεργασία και την διεργασία προσομοίωσης

➤ Εξαιρουμένων των δοκιμών στα οποία υπήρξε σφήνωμα (με κόκκινο στο Διάγραμμα 18) κατά τη διεργασία της διέλασης, υπήρξε ικανοποιητική προσέγγιση των πειραματικών αποτελεσμάτων και των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης.



Διάγραμμα 18: Απόκλιση (%) μέγιστου φορτίου της διεργασίας προσομοίωσης, ως προς την πειραματική διεργασία.

➤ Στα δοκίμια Cu-Pb παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται το πάχος του εξωτερικού υλικού και μειώνεται η ακτίνα του εσωτερικού αυξάνεται το φορτίο της διέλασης, λόγω του ότι έχουμε αύξηση της διατομής του σκληρότερου υλικού (χαλκού), το οποίο έχει μεγαλύτερη τάση διαρροής από το μόλυβδο (Διάγραμμα 19).

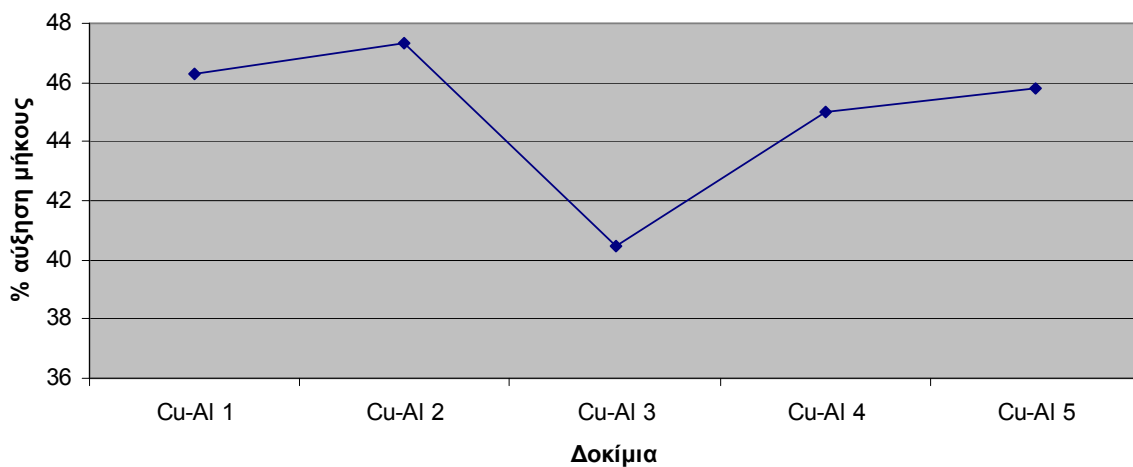


Διάγραμμα 19: : Μέγιστο φορτίο δοκιμών Cu-Pb για την πειραματική διεργασία και την διεργασία προσομοίωσης

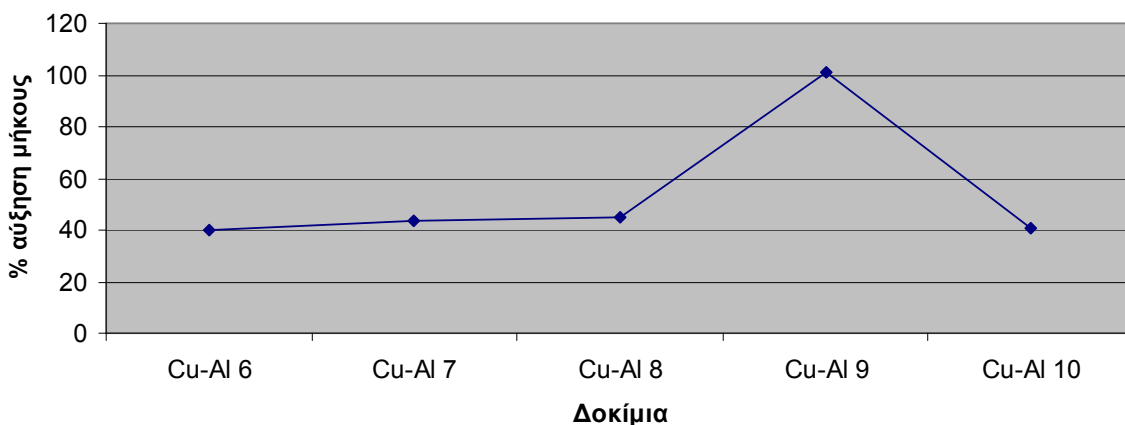
➤ Στα δοκίμια Cu-Pb υπήρξε πιο έντονη ροή (αξονική παραμόρφωση) του εσωτερικού υλικού σε σύγκριση με τα δοκίμια Cu-Al. Και στις δύο κατηγορίες δοκιμών η επιμήκυνση του εξωτερικού υλικού (χαλκού) υπήρξε μικρότερη από την επιμήκυνση του εσωτερικού (μόλυβδος ή αλουμίνιο).

- Η αύξηση του μήκους των δοκιμίων (προτού εξολκευθούν) κυμάνθηκε:
 - A) στο 45% στα δοκίμια Cu-Al με πάτο (Διάγραμμα 20)
 - B) στο 40% στα δοκίμια Cu-Al χωρίς πάτο (Διάγραμμα 21)
 - Γ) στο 50% στα δοκίμια Cu-Pb (Διάγραμμα 22)

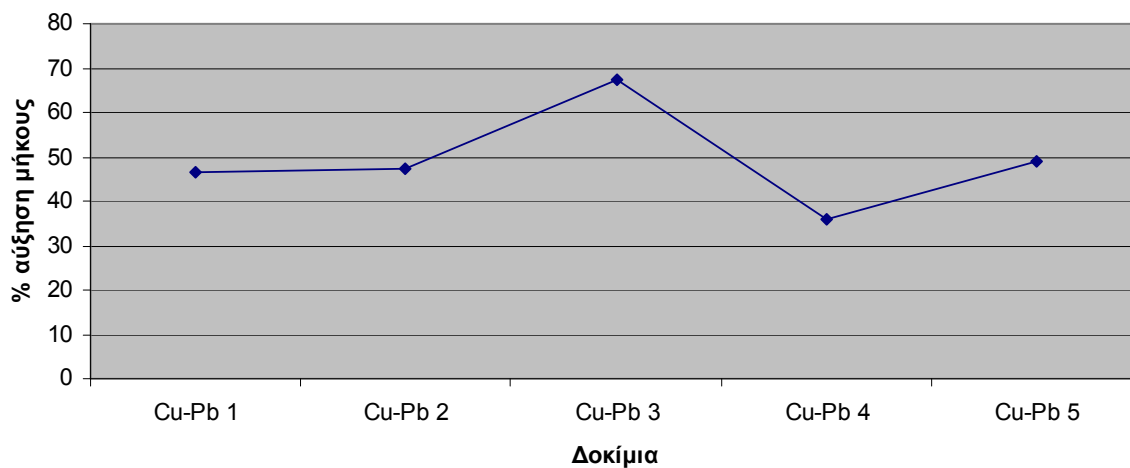
Εξαιρούνται από την σύγκριση τα δοκίμια Cu-Al 9, Cu-Pb 3 και Cu-Pb 4 λόγω ανοίγματος του πάτου του χαλκού. Για το δοκίμιο Cu-Al 3, η απόκλιση είναι πιθανό να οφείλεται στο ειτεταμένο σφήνωμα που υπήρξε κατά μήκος του εμβόλου.



Διάγραμμα 20: Αύξηση μήκους μη εξολκευμένων δοκιμίων Cu-Al χωρίς πάτο



Διάγραμμα 21: Αύξηση μήκους μη εξολκευμένων δοκιμίων Cu-Al με πάτο



Διάγραμμα 22: Αύξηση μήκους μη εξολκωμένων δοκιμίων Cu-Pb

➤ Από την διερεύνηση των παραμέτρων της μοντελοποίησης έγινε φανερό ότι ο συντελεστής τριβής μεταξύ της μεταλλικής μήτρας και της εικάστοτε διμεταλλικής ράβδου επηρεάζει την καμπύλη φορτίου – μετατόπισης και ειδικά τις τιμές του φορτίου που αναπτύσσεται στο δοκίμιο. Αύξηση του συντελεστή προφανώς οδηγεί σε αύξηση του φορτίου.

7. Παράρτημα

Παρακάτω παρουσιάζονται οι εντολές που χρησιμοποιήθηκαν στο LS-Dyna ώστε να προσομοιωθεί και να επιλυθεί το πείραμα (Pre-Processor - Post-Processor και Solver). Ενδεικτικά αναφέρεται στο δοκίμιο Cu-Al 1.

Pre-Processor

Σχεδίαση

Μήτρα

Δημιουργία μέρους: **-Part -Create Part -Name: Mitra -OK -OK**

Σχεδίαση τεταρτημορίου

Τμήμα εισόδου: (εξωτερικό μέρος) **-Line -Create -Arc - About a centrer -Global -45,0,90,0**

(εσωτερικό μέρος) **-Line -Create -Arc - About a centrer -Global -2.5,0,90,0**

Ένωση με γραμμές: **-Line -Create -Lines** και ενώνουμε τα σημεία και πατάμε **-Create** για κάθε γραμμή που δημιουργούμε.

Αντιγραφή σε άνω επιφάνεια: **-Copy -Translate -Current Part - Translate -Global -0,0,42,1**

Ένωση με γραμμές: **-Line -Create -Lines** και ενώνουμε τα σημεία και πατάμε **-Create** για κάθε γραμμή που δημιουργούμε.

Κωνικό τμήμα: (κάτω εσωτερικό μέρος): **-Line -Create -Arc - About a centrer -Global -10,0,90,0**

Αντιγραφή σε κάτω επιφάνεια: **-Copy -Translate** (επιλογή κάτω μέρους και νέου μέρους) **- Translate -Global -0,0,-9.26,1**

Διαγραφή αρχικού μέρους: **-Delete** επιλογή **-Delete**

Ένωση με γραμμές: **-Line -Create -Lines** και ενώνουμε τα σημεία και πατάμε **-Create** για κάθε γραμμή που δημιουργούμε.

Τμήμα εξόδου 1: Αντιγραφή κατώτερης επιφάνειας υπάρχοντος τμήματος:
-Copy –Translate επιλογή 4 γραμμών – Translate –Global -0,0,-24.71,1

Ένωση με γραμμές: -Line –Create –Lines και ενώνουμε τα σημεία και πατάμε –Create για κάθε γραμμή που δημιουργούμε.

Τμήμα εξόδου 2: -Line –Create –Arc – About a centrer –Global
-45,0,90,0

Αντιγραφή σε κάτω επιφάνεια: -Copy –Translate (επιλογή κάτω μέρους και νέου μέρους) – Translate –Global -0,0,-60,1

Διαγραφή αρχικού μέρους: -Delete επιλογή –Delete

Αντιγραφή κάτω εξωτερικής επιφάνειας: -Copy –Translate επιλογή
– Translate –Global -0,0,-35.29,1

Ένωση με γραμμές: -Line –Create –Lines και ενώνουμε τα σημεία και πατάμε –Create για κάθε γραμμή που δημιουργούμε.

Αντικατοπτρισμός τεταρτημορίου

-Mirror –Current Part –Mirror –Global –Global xz-Plane

Αντικατοπτρισμός μισού

-Mirror –Current Part –Mirror –Global –Global yz-Plane

Μοντελοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία: -Element –Plate/Solid Mesh -
12-Line (Solid) επιλογή γραμμών και

Τμήμα εισόδου: -2,8,20

Κωνικό τμήμα: -2,8,20

Τμήμα εξόδου 1: -2,8,20

Τμήμα εξόδου 2: -2,8,20

Σε κάθε μέρος: -Accept Yes

Αντικατοπτρισμός τεταρτημορίου

-Mirror –Current Part –Mirror –Global –Global xz-Plane

Αντικατοπτρισμός μισού

-Mirror –Current Part –Mirror –Global –Global yz-Plane

Με αντίστοιχο τρόπο σχεδιάστηκαν και τα άλλα 3 μέρη του πειράματος (Έμβολο, Χαλκός και Αλουμίνιο).

Έμβολο

Σχεδιάστηκε σε ύψος 40mm, δηλαδή πάνω από το δοκίμιο. Το τεταρτημόριό του αποτελείται από ένα τετράγωνο με πλευρές 6mm και πεπερασμένα στοιχεία 4,4,2 και δύο άλλα μέρη με πεπερασμένα στοιχεία 3,2,4 έκαστο.

Χαλκός

Ο πάτος σχεδιάστηκε όπως και το έμβολο με το τετράγωνο να έχει πλευρές 3mm και πεπερασμένα στοιχεία 4,4,2 και τα άλλα δύο μέρη με πεπερασμένα στοιχεία 5,4,2, ενώ το μέρος του σωλήνα 2,8,40.

Αλουμίνιο

Η σχεδίαση είναι όμοια με τον πάτο του Χαλκού.

Για να διαγράψουμε τους περιττούς-κοινούς κόμβους που σχεδιάσαμε για κάθε μέρος: **-Node Check Coincident –Ok –Current Part –Check –Merge and Delete**

Σε όλα τα μέρη ξεχωριστά κάνουμε: **-Check –Auto Orient**. Και γράφει κάτω **Pass Check** με την δεύτερη φορά που το πατήσουμε. Με αυτόν τον τρόπο θέτουμε ότι τα τρισδιάστατα μέρη έχουν μαζί εσωτερικά και εξωτερικά κενό.

Καθορισμός Φυσικών Ιδιοτήτων

Μήτρα και Έμβολο

-Property –Create –Solids –Element Formulation→

Constant stress solid element (1)

-Ok -Assign επιλογή Mitra και Emvolo -Apply

Χαλκός και Αλουμίνιο

-Property -Create -Solids -Element Formulation →

Fully intergrated S/R solid (2)

-Ok -Assign επιλογή Mitra και Emvolo -Apply

Επιλογή Υλικών

Μήτρα

-Create -Structural -20.1 Mat. Rigid

1.1 Mass Density 0.00783

Young's Modulus 207000

Poisson's Ratio 0.30

2.1 CMO: Constraints in global direstions (1)

CON 1: Constrained x,y and z displacement (7)

CON 2: Constrained x,y and z displacement (7)

-Apply -Assign -Mitra -Apply

Έμβολο

-Create -Structural -20.1 Mat. Rigid

1.1 Mass Density 0.00783

Young's Modulus 207000

Poisson's Ratio 0.30

2.1 CMO: Constraints in global direstions (1)

CON 1: Constrained x and y displacement (4)

CON 2: Constrained x,y and z displacement (7)

-Apply -Assign -Mitra -Apply

Χαλκός

-Create –Structural -24.1 Mat. Piecewise Linear Plasticity

1.1 Mass Density 0.0089

Young's Modulus 120000

Poisson's Ratio 0.34

Yield Stress 266

Βάζουμε τις τιμές Effective Plastic Strain και Stress Value από τον Πίνακα 2

-Apply –Assign –Mitra -Apply

Αλουμίνιο

-Create –Structural -24.1 Mat. Piecewise Linear Plasticity

1.1 Mass Density 0.0027

Young's Modulus 70000

Poisson's Ratio 0.34

Yield Stress 43.8

Βάζουμε τις τιμές Effective Plastic Strain και Stress Value από τον Πίνακα 3

-Apply –Assign –Mitra -Apply

Ορισμός Επιφανειών

Επιφάνεια εμβόλου: -Set – Segments –Create –Set Name: Emvolo
-By Elements επιλογή των κατώτερων στοιχείων του εμβόλου -Apply

Επιφάνεια μήτρας: -Set – Segments –Create –Set Name: Mitra
-By Elements επιλογή των εσωτερικών στοιχείων της μήτρας -Apply

Επιφάνεια Χαλκού: -Set – Segments –Create –Set Name: Cu
-By Elements επιλογή των εξωτερικών, ανώτερων και κατώτερων στοιχείων του χαλκού -Apply

Επιφάνεια Χαλκού-Αλουμινίου: -Set – Segments –Create –Set Name:
Cu-Al -By Elements επιλογή των ανώτερων στοιχείων του χαλκού και του

αλουμινίου -Apply

Καθορισμός Συνθηκών Επαφής

Επαφή μήτρας με χαλκό: -Contact -Create -3 Dimension -Surface to Surface -Contact 1: Mitra-Cu

2.1 Slave ID: Cu (3)

Master ID: Mitra (2)

Slave Type: Seg. Set ID for Surf-Surf (0)

Master Type: Segment Set ID (0)

3.1 Static Coefficient: 0.07

Dynamic Coefficient: 0.03

Επαφή εμβόλου με χαλκό και αλουμίνιο: -Contact -Create -3 Dimension -Surface to Surface -Contact 2: Emvolo-Cu-Al

2.1 Slave ID: Cu-Al (4)

Master ID: Emvolo (1)

Slave Type: Seg. Set ID for Surf-Surf (0)

Master Type: Segment Set ID (0)

3.1 Static Coefficient: 0.3

Dynamic Coefficient: 0.2

Επαφή χαλκού με αλουμίνιο: -Contact -Create -3 Dimension -Tiebreak_Surface to Surface -Contact 3: Cu-Al

2.1 Slave ID: Al (4)

Master ID: Cu (3)

Slave Type: Seg. Part ID (3)

Master Type: Part ID (3)

3.1 Static Coefficient: 0.9

Dynamic Coefficient: 0.8

5.1 Normal Failure Force: 50

Shear Failure Force: 50

Παράμετροι Σχεδίασης

Διάγραμμα ταχύτητας-χρόνου: **-DynaMisc –Load Curve –Create –OK
-Apply –OK –x-y –Insert –Key-in**

χρόνος x value 0.0 3.0 37.0 40.0

ταχύτητα y value 0.0 -1.0 -1.0 0.0

-OK

Επιβαλλόμενη Δεσμική Κίνηση: **-BC –Boundary –Prescribed Motion
–Create –Rigit**

1.1 1

2.1 Part ID: Emvolo

DOF: z-translation (3)

VAD: Velocity (0)

LCID: καμπύλη (Curve) από DynaMisc

-Apply

Χρόνος λήξης της διαδικασίας: **-DynaMisc –Control –Termination –
Define –Termination time: 40 –Apply –OK**

Επιλογή πλήθους φάσεων που θα καταγραφούν κατά το πείραμα:
**-DynaMisc –Database –Binary –D3PLOT –Define –DT /Cycl 1.0 –Apply
–OK**

Έκβαση πιέσεων επαφής: **-DynaMisc –Database –ASCII –RCFORC –
Define –DT 0.05 –Apply –OK**

Στη συνέχεια κάνουμε **Export** σε αρχείο **.dyn**. Για να τρέξει το πείραμα ανοίγουμε το **Solver**, εισάγουμε το **.dyn** αρχείο και πατάμε **Run**. Το αρχείο **.d3plot** που θα πάρουμε, το τρέχουμε από τον **Post-Processor** και από εκεί εξάγουμε τις φάσεις του πειράματος και το διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης.

Post-Processor

Αφού ανοίξουμε το **d3plot** αρχείο που επιθυμούμε να τρέξουμε, μπορούμε να δούμε το πείραμα σε όλες τις φάσεις κινηματογραφικά ή κάθε μία φάση που έχει εξαχθεί ξεχωριστά.

Με το κουμπί **Graph** κάνουμε **LOAD** το αρχείο **rcforc** που αντιστοιχεί στο δοκίμιο που επεξεργαζόμαστε. Επιλέγουμε ως επαφή (**Contact**) την **2**, η οποία αντιστοιχεί σε εκείνη του εμβόλου με το δοκίμιό μας, όπου και έχουμε την κίνηση του πειράματος. **Type** επιλέγουμε **master**, δηλαδή του εμβόλου, και **component Z-force**. Επειδή η κίνηση είναι προς τα κάτω και είναι αρνητική, έχουμε ήδη επιλέξει αρνητικά νούμερα για την καμπύλη (**Curve**) ώστε το διάγραμμα να είναι στην θετική περιοχή. Πατώντας **PLOT** βλέπουμε το διάγραμμα το οποίο το εξάγουμε και το επεξεργαζόμαστε περαιτέρω.

8. Βιβλιογραφία

- [1] Μανωλάκος Δ.: Σημειώσεις μαθήματος μεταπτυχιακού
- [2] 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)
- [3] 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)
- [4] 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
- [5] 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)
- [6] http://www.self-lubricating-bearings.com/bearings-bimetallic_bearing.htm
- [7] Ι. Γ. Τσαμασφύρος, Ε. Ε. Θεοτόκογλου: Η Μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων, Εκδόσεις Συμμετρία
- [8] Α. Κανάραχος, Χρ. Προβατίδης: Πεπερασμένα στοιχεία στη μηχανολογία, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα 2000.
- [9] Ειρήνη Μαρέ: Διπλωματική Εργασία με τίτλο: □Διέλαση Διμεταλλικών Ράβδων: Πειραματική και Θεωρητική Μελέτη□

[10] Μαργαρίτα Μπέη: Διπλωματική Εργασία με τίτλο: Πειραματική και Αριθμητική Προσομοίωση της Κατεργασίας Διέλασης Διμεταλλικών Σωλήνων.