



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ, ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ Ε. ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΑΚΡΟΥ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΩΝ ΚΕΛΥΦΩΝ
ΛΕΠΤΟΥ ΠΑΧΟΥΣ ΣΤΗΝ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ
ΑΞΟΝΙΚΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

ΓΕΩΡΓΙΟΣ Ε. ΔΙΑΛΕΚΤΟΣ

ΑΘΗΝΑ 2008

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

➤ ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η διπλωματική μου εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ, την περίοδο Οκτωβρίου/07 ως τον Ιανουάριο/08, με σκοπό την απόκτηση του διπλώματος του Μηχανολόγου Μηχανικού του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Η εργασία αυτή αναφέρεται στην πειραματική και αριθμητική προσομοίωση της αξονικής κατάρρευσης σωλήνων κυκλικής διατομής με τοιχώματα λεπτού πάχους, με εγκοπές στο πάνω μέτωπο των δοκιμίων καθώς και διάφορων μορφών triggering που προσδίνουμε στην κάτω πλάκα της πρέσας.

Στο πρώτο κεφάλαιο, γίνεται μια γενική αναφορά περί των θεωριών που εφαρμόζονται για τα δοκίμια κυκλικής διατομής με λεπτά τοιχώματα σχετικά με την αξονική τους κατάρρευση, καθώς επίσης εξηγούνται και διάφοροι βασικοί όροι.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, παρουσιάζονται θεωρητικά στοιχεία για τις τάσεις που αναπτύσσονται γύρω από οπές οι οποίες υπάρχουν σε μια μεταλλική επιφάνεια, και πραγματευόμαστε στο τέλος του κεφαλαίου με το πρόβλημα που εμφανίζεται σε αεροσκάφη, και μια λύση που δίνει η εταιρεία Boeing την οποία και εφαρμόζει στα αεροσκάφη της.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται θεωρητικά στοιχεία για την τεχνολογία των Πεπερασμένων Στοιχείων και γενικότερα για το CAE. Γίνονται αναφορές σε μεθόδους επίλυσης με πεπερασμένα στοιχεία και την χρήση υπολογιστικών πακέτων FEA.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, ξεκινά το πειραματικό μέρος της διπλωματικής αυτής εργασίας. Αναφέρονται όλα τα απαραίτητα στοιχεία τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στο υπολογιστικό πακέτο FEA: LS-DYNA 3D, ώστε να επιτύχουμε την προσομοίωση της αξονικής κατάρρευσης των δοκιμίων μας, και να εξάγουμε τα ουσιαστικά συμπεράσματα για να κάνουμε τις συγκρίσεις μας με τα αντίστοιχα πειραματικά στοιχεία από την κατάρρευση των δοκιμίων στην πρέσα Instron.

Στη συνέχεια στο κεφάλαιο πέντε και συγκεκριμένα στις ενότητες 5.1 ως 5.9 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα από τις προσομοιώσεις των δοκιμίων μας με τη χρήση του LS-DYNA 3D.

Στο τέλος της παρούσας εργασίας υπάρχουν κάποια γενικά συμπεράσματα και σχόλια, και ακολουθεί η βιβλιογραφία με τις πηγές και το γνωστικό υλικό του αντικειμένου μας.

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

Ιδιαίτερες ευχαριστίες εκφράζονται επίσης προς τον καθηγητή και διευθυντή του τομέα Δρ. Αθανάσιο Μάμαλη για την διάθεση των υπολογιστών του εργαστηρίου (LS-DYNA 3D), με σκοπό την εκπόνηση της διπλωματικής αυτής εργασίας, καθώς επίσης προς τον υποψήφιο

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

διδάκτορα και μέλος Ε.Ε.ΔΙ.Π. του εργαστηρίου κ. Πρωτεσίλαο Κωστάζο, ο οποίος επέδειξε σε όλο το παραπάνω χρονικό διάστημα την απεριόριστη συμπαράστασή του σε θέματα χρήσης του προγράμματος LS-DYNA3D και τέλος στους τεχνίτες του εργαστηρίου που βοήθησαν στην διαμόρφωση των δοκιμών.

Αθήνα, Ιανουάριος 2008

Διαλεκτός

Γεώργιος Ε.

*«Αφιερωμένο στην οικογένειά μου
Τους φίλους μου
Και σε όσους με στήριζαν όλον
Τον καιρό των σπουδών μου
Στο Ε.Μ.Π. των Αθηνών και όχι μόνο»*

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο: ΘΕΩΡΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΑΞΟΝΙΚΗΣ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗΣ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΩΝ ΣΩΛΗΝΩΝ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην εποχή μας, το ενδιαφέρον για ασφαλή και οικονομικά μεταφορικά μέσα είναι έντονο. Και αυτό γιατί τα οχήματα εκτός από εξυπηρέτηση που προσφέρουν στον χρήστη, μπορούν να προκαλέσουν και μεγάλα ατυχήματα, αλλά και μεγάλες καταναλώσεις ενέργειας από τις οποίες επιβαρύνεται και ο χρήστης, αλλά πολύ περισσότερο το περιβάλλον. Οι έρευνες που γίνονται κυρίως από τις αυτοκινητοβιομηχανίες, αποβλέπουν στη βελτίωση προϊόντων όσον αφορά την μείωση βάρους, την ανάγκη για αντίσταση σε διάβρωση και την ικανότητα όσον το δυνατόν μεγαλύτερης απορρόφησης ενέργειας σε στατικές και δυναμικές καταπονήσεις. Τα σημερινά κράματα αλουμινίου έχουν άμεσο ενδιαφέρον λόγω της χαμηλής πυκνότητας τους 2.76g/cm και καλή αντίσταση διάβρωσης. Το μειονέκτημα των κραμάτων αλουμινίου είναι η μικρή παραμορφωσιμότητα σε σύγκριση με το χάλυβα. Για να δημιουργήσουμε πολύπλοκα μέρη χρησιμοποιούμε διαδικασίες όπως άσκηση θλιπτικών φορτιών και αξονική συμπίεση σωλήνα, ώστε να επιτευχθεί η μορφή του τελικού συστατικού μέρους. Με ακριβείς υπολογισμούς και ελέγχους μπορούμε να επιτύχουμε ελαφριές και σύνθετες μορφές αλουμινένιων μερών. Η κατεργασία αλουμινίου λόγω των δυνατοτήτων σε σχηματοποίηση και μορφοποίηση χρησιμοποιείται στην αυτοκινητοβιομηχανία περισσότερο από 10 χρόνια για την παραγωγή μονάδων σύνθετων κατασκευών όπως αναφέρεται στην βιβλιογραφία στο [12]. Οι ανάγκες π.χ. για σύνθετες διαμορφώσεις και επίτευξη γεωμετριών, η σχέση επιμήκυνσης, όπως και η δυνατότητα για μέγιστη παραμόρφωση έχουν αυξηθεί συνεχώς τα τελευταία χρόνια, όπου υπάρχει αναλυτική αναφορά στην βιβλιογραφία [13],[14],[17].

Σε μία δοκιμή αξονικής καταπόνησης η ενέργεια η οποία απορροφάται από το δοκίμιο κατά την διαδικασία αστοχίας και κατάρρευσής του μπορεί να υπολογιστεί με εμβαδομέτρηση του χωρίου κάτω από την αντίστοιχη καμπύλη φορτίου – βράχυνσης δοκιμίου(μετατόπισης). Αρχικά το κέλυφος παραμορφώνεται ελαστικά ενώ το φορτίο αυξάνεται με σταθερό ρυθμό, σχεδόν γραμμικά, μέχρι μία μέγιστη τιμή P_{max} . Το μέγεθος της μέγιστης αυτής τιμής εξαρτάται από την γεωμετρία του κελύφους και τα χαρακτηριστικά του υλικού. Με την προσέγγιση της τιμής αυτής το φορτίο εμφανίζει

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

απότομη πτώση. Καθώς συνεχίζεται η παραμόρφωση, η μορφή της καμπύλης φορτίου-μετατόπισης εξαρτάται από τον τρόπο κατάρρευσης της κατασκευής και τις συνθήκες φόρτισης.

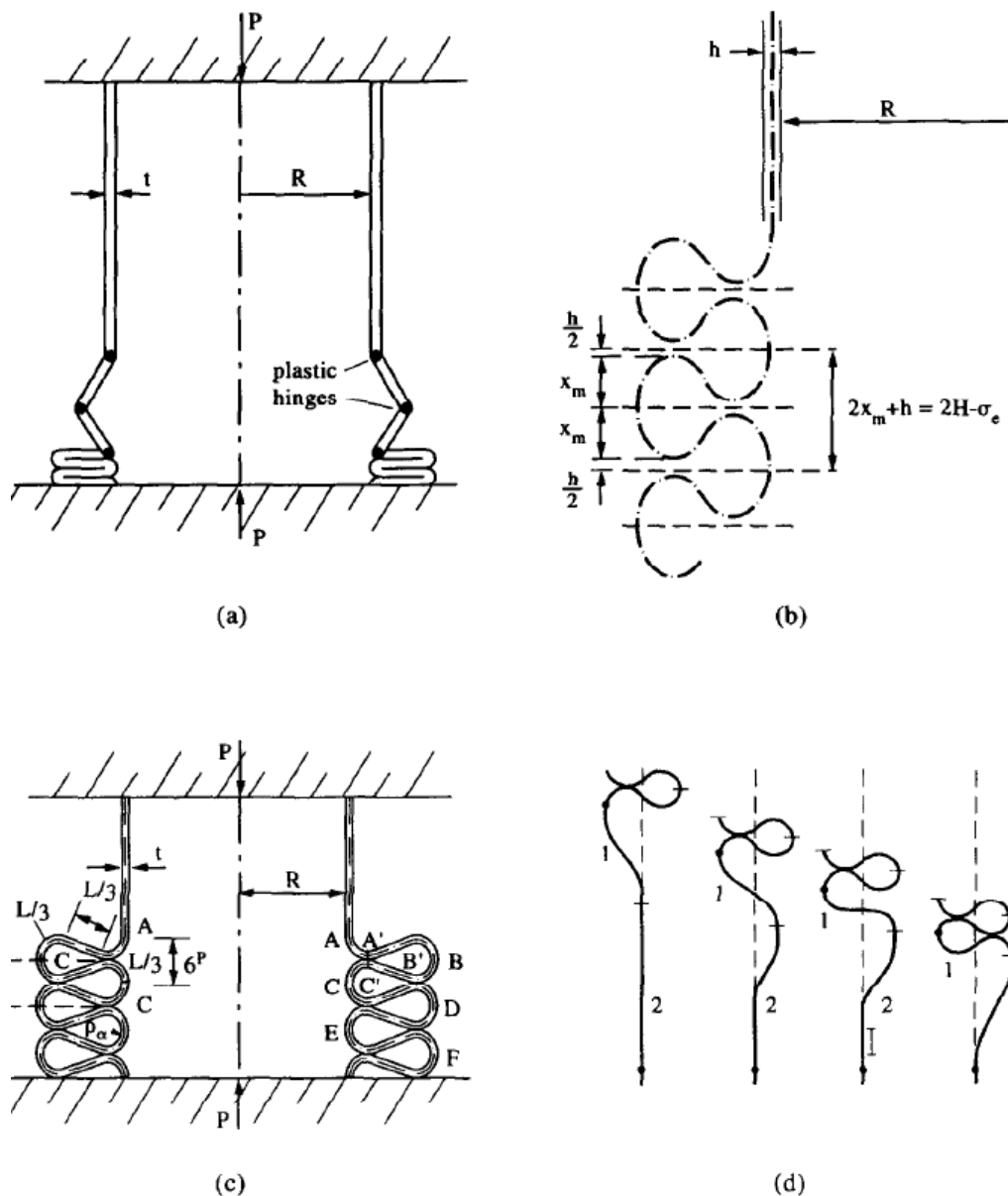
Γενικώς, για την καταγραφή της ικανότητας προς απορρόφηση ενέργειας ενός αξονικά καταπονούμενου κελύφους λαμβάνεται ως μέγεθος μέτρησης και σύγκρισης η ειδική ενέργεια απορρόφησης W_s . Αυτή ορίζεται σαν ο λόγος της ενέργειας που απορροφά το κέλυφος κατά την κατάρρευση του W , προς τη μάζα του υλικού που έχει αστοχήσει m_c η οποία υπολογίζεται από τον αντίστοιχο όγκο V_c πολλαπλασιαζόμενο με την πυκνότητα του υλικού ρ .

Προσεγγιστικές θεωρητικές υποθέσεις έχουν αναπτυχθεί για στατικές και δυναμικές κάμψεις. Μεγάλη ομοιότητα μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων επιτυγχάνεται εάν ληφθεί υπόψη η επιρροή της παραμόρφωσης υλικού, η επίδραση της απόστασης θλίψης και η ευαισθησία στις δυναμικές φορτίσεις.

Θα εξετάσουμε πειραματικά δεδομένα και θεωρητικές υποθέσεις για αξονική συμπίεση σε λεπτότοιχους κυλινδρικούς σωλήνες. Αυτό το φαινόμενο είναι γνωστό ως δυναμική προοδευτική κάμψη για να ξεχωρίζει από την δυναμική πλαστική κάμψη που αναπτύσσει υψηλότερες ταχύτητες σύγκρουσης έχοντας σχέση με εγκάρσιες αδρανείς επιπτώσεις. Η αξονική προοδευτική θλίψη σωλήνων έχει πρόσφατα κερδίσει περισσότερη προσοχή όσον αφορά τη χρήση στο σχεδιασμό κρουστικών συσκευών απορρόφησης ενέργειας όπως αναφέρεται στη βιβλιογραφία στο [13]. Οι σωλήνες που δέχονται αξονικά φορτία μορφοποιούνται είτε αξονοσυμμετρικά (αρμονικά ή δακτυλίδι) τύπου πτυχής ή μη- αξονοσυμμετρικά (διαμάντι ή λοβού) τύπου πτυχής εξαρτώμενα κυρίως από την διάμετρο του σωλήνα και το πάχος του τοιχώματος δηλ. από το λόγο D/t όπως αναφέρεται στη βιβλιογραφία βλ. [20],[2],[3],[4]. Για αυτή την επίδραση έχουν γράψει ο Mallock 1908, Forpl 1926, Geckeler 1928, Horton 1966, Allan 1968, Johnson 1977, Sobel και Newman 1980, Andrews 1983, Abramowicz και Jones 1984, 1986. Επίδραση του μήκους σωλήνα και του πάχους L/t και του λόγου D/t κατά τον τρόπο θλίψης ερευνήθηκε από τον Andrew 1983 και παρουσίασε ένα κεφάλαιο ταξινόμησης σχετίζοντας αυτές τις μεταβλητές. Σχετικά λεπτοί σωλήνες κανονικά επιδεικνύουν πτυχές τύπου διαμαντιού(καρό) και παχύτεροι σωλήνες γενικά μορφοποιούνται με ομαλό τρόπο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

Σε κάποιες περιπτώσεις λεπτοί σωλήνες αρχικά μορφοποιούνται σε ομαλό τύπο πτυχής πριν μετατραπούν σε τύπο διαμαντιού(καρό) όπως αναφέρονται αναλυτικά [7],[8],[9],[10],[11]. Μετά την προσπάθεια του Alexander 1960 να εκτιμήσει αναλυτικά το μέσο θλιπτικό φορτίο ενός αξονικά θλιβόμενου σωλήνα που μορφοποιείται με ομαλό τρόπο όπως αναφέρεται στο [6]. Κάποιοι ερευνητές εργάστηκαν με τον μηχανισμό κινηματικής θλίψης του Alexander και επικεντρώθηκαν στον επαναπροσδιορισμό κάποιων παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή του μέσου θλιπτικού φορτίου (Johnson 1972, Andronicou και Walker 1981, Amdahl και Soreide 1981). Άλλοι προσπάθησαν να βελτιώσουν το μοντέλο του Alexander σε μια προσπάθεια να παράγουν μια πιο ρεαλιστική πύχωση όπως αναφέρεται στο [5].(Wierzbicki και Bhat 1984, Abramowicz και Jones 1986,Grzebieta 1990).

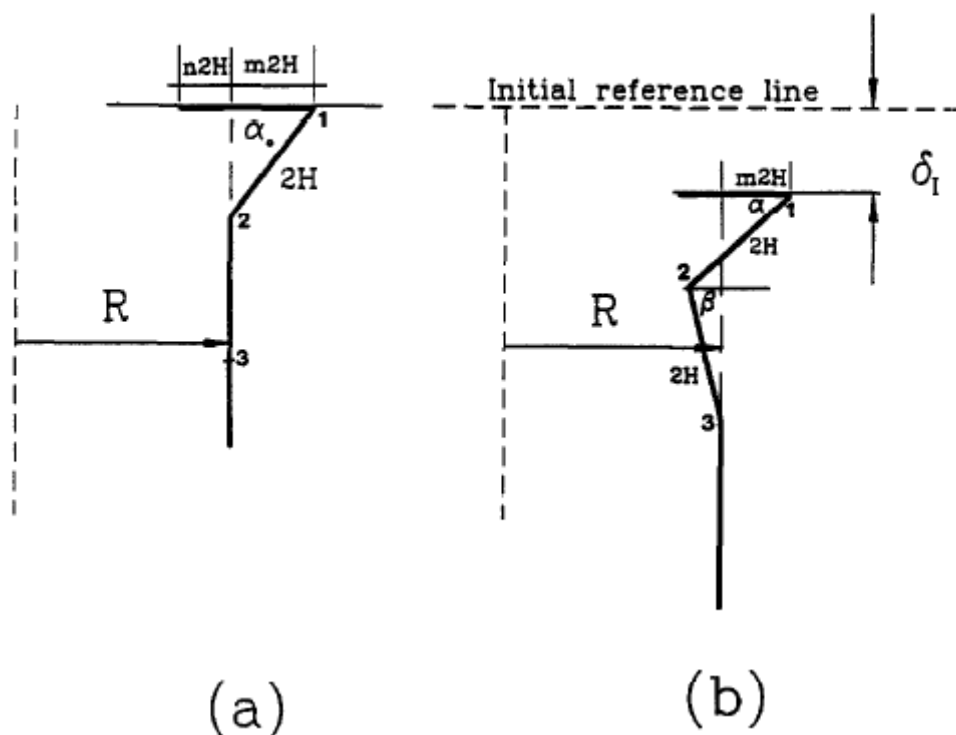


Σχήμα 1α. Διαφορετικοί μηχανισμοί αστοχίας που προταθήκαν για μοντελοποίηση του κανονικού τρόπου θλίψης σύμφωνα με τον α) Alexander(1960) b) Abramowicz και Jones(1986) c) Grzebieta(1990) d) Wierzbicki(1992).

Όλα αυτά τα μοντέλα θεωρούν μόνο ακτινική εκτόπιση του τοιχώματος του σωλήνα προσπαθώντας να επιτύχουν ένα πιο ρεαλιστικό μοντέλο πτύχωσης. Αναφορά για αναλυτικά μοντέλα για συμπεριφορά πλαστικής θλίψης έχουν παρουσιάσει μεταξύ άλλων ο Jones 1989 [11] και Singace 1994. Πειράματα έχουν δείξει πως το τοίχωμα σωλήνα σε αξονοσυμμετρική μορφοποίηση απλώνεται μερικά εσωτερικά και εξωτερικά από την γενέτειρα του σωλήνα, το σύνολο του οποίου

προσδιορίζεται από το μήκος πτύχωσης όπως αναφέρεται στην βιβλιογραφία [18] .

A. A. Singace and H. ElSobky



Σχημα1β.Η μορφοποίηση μιας εσωτερικής πτυχής: α)κρίσιμη θέση μιας εξωτερικής πτυχής β)η πρώτη φάση της επακόλουθης εσωτερικής πτυχής

- Είδη παραμορφώσεων και δημιουργία λοβών βλ.[6],[8],[9]:

Μη εκτατοί λοβοί:

Σύμφωνα με αυτό το είδος παραμόρφωσης, το δοκίμιο που καταρρέει περιέχει δυο είδη αρμών τους 3D και 2D μη εκτατούς λοβούς. Σε τριγωνική μορφή όπου η κάθε άρθρωση διαφέρει κατά $\pi/3$ ενώ υπάρχει και η καρό μορφή σε (diamond) σχήμα όπου η κάθε άρθρωση διαφέρει κατά $\pi/4$.

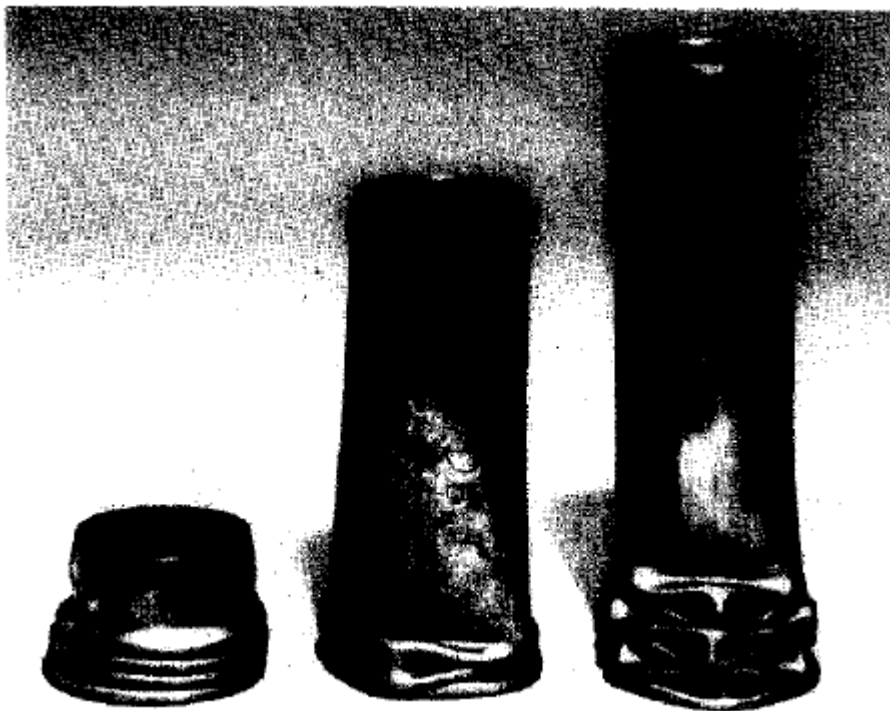
Εκτατοί λοβοί:

Αυτό το είδος παραμόρφωσης χαρακτηρίζεται από το σχηματισμό κυκλικού τύπου αναδίπλωσης συμμετρικό ως προς κάθετο άξονα συμμετρίας περιστροφής του δοκιμίου με αποτέλεσμα τους κυλινδρικούς δακτυλίους (rings) που σχηματίζονται κατά την εκτατή κατάρρευση των κυλινδρικών δοκιμίων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

Ανάμικτου τύπου λοβοί:

Αυτός ο τύπος κατάρρευσης, αποτελεί συνδυασμό ενός ή περισσότερων αρχικά σχηματισμένων αξονοσυμμετρικών λοβών, οι οποίοι ακολουθούνται από μη εκτατούς λοβούς καθώς προχωράει η κατάρρευση του δοκιμίου. Αν συνδυαστούν κατάλληλα οι δυο προηγούμενοι τύποι θα επιφέρουν το αποτέλεσμα των ανάμικτων λοβών.

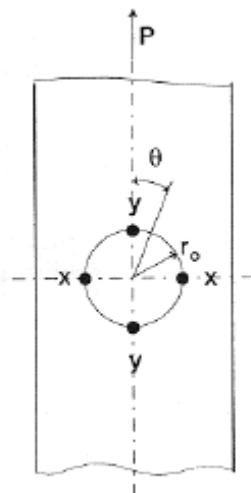


Σχήμα 2. Μοντέλα 1,2,3 που απεικονίζουν εκτατό, ανάμεικτο και μη εκτατό τρόπο κατάρρευσης των δοκιμίων αντίστοιχα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο: ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΤΑΣΕΩΝ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΕΓΚΟΠΕΣ**ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΤΑΣΕΩΝ ΣΕ ΕΓΚΟΠΕΣ - ΟΠΕΣ:**

Σε όλες τις μηχανολογικές κατασκευές έχουμε να αντιμετωπίσουμε το φαινόμενο, εγκοπές, οπές και άλλες διαμορφώσεις να επηρεάζουν σημαντικά την λειτουργική συμπεριφορά του κομματιού, τις εμφανιζόμενες τάσεις αλλά και την αντοχή του. Παρακάτω θα εξετάσουμε πως οι οπές επιδρούν στο σημείο αστοχίας του κομματιού όπως και την κατανομή τάσεων στην περιοχή των οπών όπως αναφέρεται στην βιβλιογραφία στο [19].

Αρχικά θα εξετάσουμε πως μια κυκλική οπή εμφανίζει συγκέντρωση τάσεων γύρω της π.χ σε ένα έλασμα με οπή που φορτίζεται μονοαξονικά εφελκυστικά ή θλιπτικά με ομοιόμορφο φορτίο P . Καταστρώνουμε τις εξισώσεις ισορροπίας των τάσεων όπου καταλήγουμε στο συμπέρασμα πως εξαρτάται από το λόγο (r_0/r) όπου το r_0 είναι η ακτίνα της οπής, ενώ το r είναι η απόσταση από το κέντρο της οπής, όπου $r > r_0$. Η γωνία θ , είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του άξονα της φόρτισης και της διεύθυνσης των τάσεων κατά φορά τέτοια όπως δηλώνεται στο επόμενο σχήμα:



Οι τάσεις αποδεικνύεται ότι μειώνονται δραστικά πέρα από την περιφέρεια της οπής, και πιο συγκεκριμένα κατά τη σχέση (r_0^2/r^2) ή (a^2/r^2) .

Πολύ σημαντικό είναι για την περιφέρεια της οπής, ότι οι τάσεις εκεί γίνονται μέγιστες με κατανομή:

$$\sigma = \sigma_{\theta\theta} = p(1 - 2\cos 2\theta)$$

Οι τιμές στις οποίες περιορίζονται οι τάσεις γύρω από την οπή είναι:

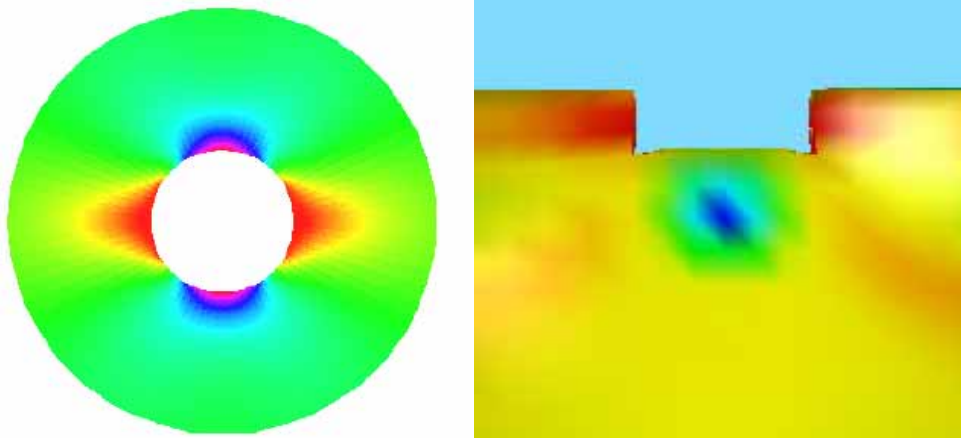
$\sigma = 3p$, για $\theta=\pi/2$, και για $\theta=3\pi/2$ (σε διεύθυνση κάθετη προς την αξονική διεύθυνση της φόρτισης),

$\sigma = -p$, για $\theta=0$, και για $\theta=\pi$ (κατά τη διεύθυνση της αξονικής φόρτισης).

Το παραπάνω φαινόμενο ονομάζεται *συγκέντρωση τάσεων* (ένεκα των ρωγμών που ενδεχομένως θα εμφανιστούν στο δοκίμιο στην περιοχή της οπής), και οι μεγαλύτερες τάσεις σε σχέση με τη μέση τιμή τάσεων p , είναι αυτές που θα οδηγήσουν το δοκίμιο στην κατάρρευσή του.

Στο σχήμα της προηγούμενης σελίδας, τα σημεία X , X' , στα τεταρτημόρια της οπής είναι τα πλέον ευάλωτα για ρωγμάτωση σε εφελκυσμό του ελάσματος, διότι οι τάσεις που αναπτύσσονται εκεί είναι τρεις φορές μεγαλύτερες από την τιμή της μέσης τάσης p .

Αντίθετα, αν ο εφελκυσμός του ελάσματος που φέρει την οπή, μετατραπεί σε θλίψη του ελάσματος (όπως και στην περίπτωση των δοκιμίων μας), οπότε η μέση τιμή τάσης είναι $-p$, τότε η μέγιστη τάση θα εφαρμοστεί στα σημεία X , X' , τα οποία είναι τα πλέον ευάλωτα για να προκαλέσουν την ρωγμάτωση του ελάσματος.



Σχήμα 3. Εμφάνιση τάσεων γύρω από κυκλική οπή και εγκοπή στο πάνω μέτωπο δοκιμίου.

ΠΕΡΙ ΡΩΓΜΩΝ ΣΕ ΜΕΤΑΛΛΙΚΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ ΜΕ ΟΠΕΣ – ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ: Boeing 737.

Η εμφάνιση ρωγμών σε μεταλλικές επιφάνειες αναμφίβολα ξεκινάει από την περιοχή όπου η μεταλλική επιφάνεια παρουσιάζει την μικρότερη αντοχή και το υλικό γίνεται ασθενές. Αν εφαρμοστεί ικανή τάση στην περιοχή αυτή, ακόμα και το ισχυρότερο μέταλλο θα καταρρεύσει. Αυτό το φαινόμενο αυξάνεται έως και δέκα φορές περισσότερο, όταν στην μεταλλική επιφάνεια υπάρχουν μία ή και περισσότερες οπές.

Αν η οπή έχει κατασκευαστεί με κανονικό τρόπο, δεν θα εμφανιστεί κανένα πρόβλημα στην μεταλλική επιφάνεια που την περιέχει, παρά μόνο όταν μια ικανή δύναμη ή τάση εφαρμοστεί στην επιφάνεια αυτή, και αναπτυχθεί συγκέντρωση τάσεων στην περιφέρεια και γύρω από την οπή.

Ένα πρόβλημα που αντιμετωπίζει και η εταιρεία Boeing για τα αεροσκάφη της τύπου Boeing 737, είναι ότι τα αεροσκάφη της γενικά αποτελούνται από εξαιρετικά μεγάλο αριθμό οπών στα διάφορα μέρη τους, όχι μόνο στα συνδεδεμένα σημεία των διαφορετικών τμημάτων και μερών του αεροσκάφους, αλλά και σε άλλες θέσεις, ώστε να μετατρέπεται το αεροσκάφος σε ελαφρύτερη κατασκευή. Όμως σε ένα τέτοιου τύπου αεροσκάφος που υπάρχουν σχεδόν περισσότερες από

ένα εκατομμύριο οπές, η κάθε μια από αυτές αποτελεί και ένα επικίνδυνο σημείο εμφάνισης ρωγμών στο αεροσκάφος, εάν εφαρμοστούν ικανές τάσεις στην περιφέρειά της.

Αφού, σήμερα τα αεροσκάφη πρέπει να έχουν οπές παντού στα διάφορα μέρη τους, παρόλο που με τον τρόπο αυτό καθιστούν τις μεταλλικές τους επιφάνειες επιρρεπείς σε ρωγματώσεις και ασθενείς σε συγκεντρώσεις τάσεων γύρω από τις οπές, θα πρέπει να επινοηθούν τρόποι ώστε να αυξηθεί η αντοχή του υλικού στα σημεία αυτά.

Μια ενδιαφέρουσα άποψη της εταιρείας είναι η εξής: Όταν δημιουργούμε με κανονικό τρόπο μια οπή συνήθως καθαρίζουμε την επιφάνεια και το εσωτερικό της οπής από τμήματα υλικού που έχουν απομείνει ή που προεξέχουν. Αν όμως επιπλέον δημιουργούσαμε την οπή στην μεταλλική επιφάνεια με τα χείλη προς τα έξω, αυτό που θα πετυχαίναμε είναι ότι θα είχαμε είκοσι φορές μεγαλύτερη αντοχή του υλικού από την κανονική, στην περιοχή της οπής. Έτσι, προδιαμορφώνουμε την δομή της οπής, ώστε τα άτομα που την αποτελούν να πιέζονται διαρκώς κοντά το ένα στο άλλο, και έτσι να ισχυροποιείται η συνοχή του υλικού. Υπάρχει μια μόνιμη τάση που κρατάει τα άτομα σταθερά το ένα κοντά στο άλλο. Έτσι όταν θα εφαρμοστούν εξωτερικά φορτία, αυτά θα προσπαθήσουν να διαχωρίσουν τα άτομα και να δημιουργήσουν ρωγμή στο υλικό, αλλά όμως τώρα θα πρέπει να υπερνικήσουν πρώτα τη σημαντική σε μέγεθος μόνιμη τάση του υλικού στην περιοχή της οπής, πράγμα δύσκολο και δείχνει ότι αυξήθηκε η αντοχή του υλικού στην περιοχή της οπής.

Επίσης, η εταιρεία Boeing θεωρεί ότι έχει αναπτύξει την ιδανικότερη πατέντα για το παραπάνω πρόβλημα, κατά την οποία χρησιμοποιείται ένα ειδικό μεταλλικό χιτώνιο το οποίο τοποθετείται και εφαρμόζει απολύτως εσωτερικά σε κάθε οπή, και την καθιστά απολύτως ασφαλή σε εξωτερικές φορτίσεις.

Στα επόμενα κεφάλαια της παρούσας εργασίας, θα ασχοληθούμε με τις τάσεις που αναπτύσσονται γύρω από τις οπές που έχουμε κάνει στα δοκίμιά μας, και το

πως αυτές συντελούν στην εκάστοτε κατάρρευση από αξονική θλίψη για το κάθε δοκίμιο χωριστά.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο: ΓΕΝΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΜΕΘΟΔΟΥ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ (FINITE ELEMENT METHOD - FEM).➤ Διατυπώσεις περί των Πεπερασμένων Στοιχείων - Μοντελοποίηση:

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 είναι ο βαθμός του πολυωνύμου της συνάρτησης μορφής (στην *p version*), τόσο ακριβέστερη είναι η επίλυση των πεπερασμένων στοιχείων, αλλά από την άλλη μεριά τόσο πιο δαπανηρή γίνεται η επίλυση. 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 εργατοώρες και είναι επιρρεπής σε σφάλματα. Γίνονται πολλές προσπάθειες αυτόματης γένεσης πλεγμάτων που να συνδέονται με συστήματα μοντελοποίησης όγκου (*solid modeling*).

Στην κλασσική 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.

1. Στην κλασσική μορφή των πεπερασμένων στοιχείων που ονομάζεται *h version*, χρησιμοποιούνται πολυώνυμα ορισμένου βαθμού οπότε η αύξηση της ακρίβειας επιτυγχάνεται με μείωση της μέσης διάστασης (π.χ. της ακτίνας, h , του περιγεγραμμένου κύκλου) των στοιχείων, με άλλα λόγια με αύξηση του πλήθους αυτών (πύκνωση πλέγματος).
2. Στην λεγόμενη *p version*, χρησιμοποιείται ένα σταθερό πλέγμα αλλά επιτρέπεται η αύξηση του πολυωνυμικού βαθμού p της συνάρτησης μορφής (MacNeal 1994, Szabo & Babuska 1991). Στην *p version*, οι συντελεστές του εν λόγω υψηλού βαθμού πολυωνύμου είναι επίσης άγνωστοι που υπολογίζονται σαν τμήμα της διαδικασίας επίλυσης.

Το σύνολο των απαραίτητων διαδικασιών για την ανάπτυξη ενός πλήρους μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων, δηλ. 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 προ-

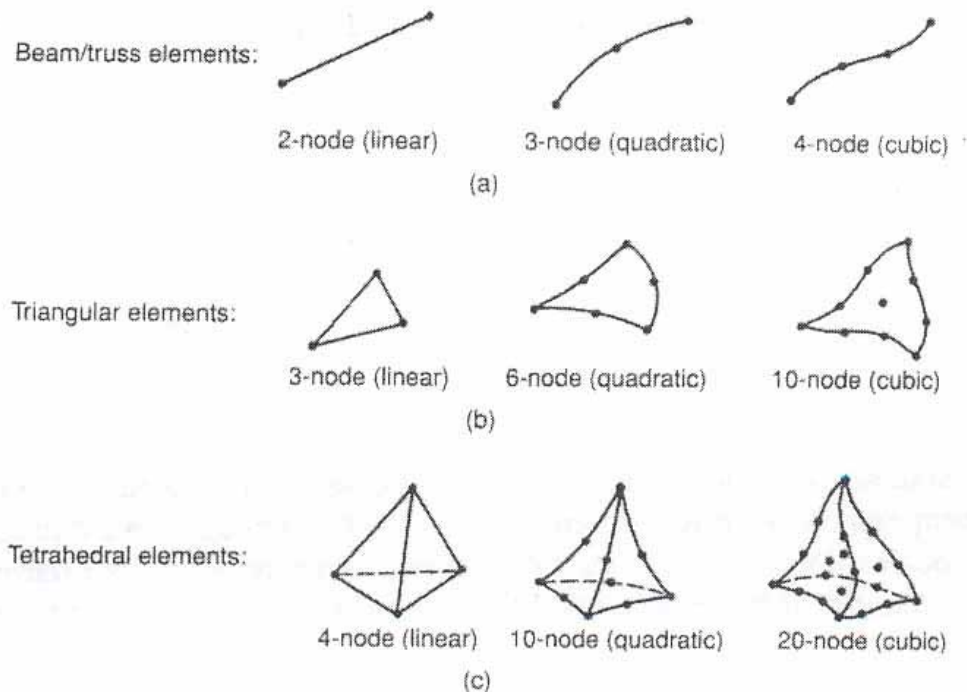
επεξεργαστή. Πολύ παλαιότερα, η εισαγωγή των δεδομένων δινόταν με γραμμές εντολών με τη βοήθεια ενός αυτόνομου αρχείου δεδομένων (batch file).

Ο προεπεξεργαστής (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)[Mills 1997]. 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 την 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 λεπτομέρειες του, οπότε μερικές από αυτές (π.χ. ένα fillet) θα μπορούσαν να απαλειφθούν. Μερικά συστήματα διαθέτουν τέτοιες αυτόματες δυνατότητες απενεργοποίησης γεωμετρικών οντοτήτων [Arms 1995].

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. Το παρακάτω σχήμα δείχνει τυπικά πεπερασμένα στοιχεία που υποστηρίζονται από τους περισσότερους κώδικες. Πρέπει να σημειωθεί ότι το ίδιο πλέγμα μπορεί να αντιστοιχεί σε διαφορετικά πεπερασμένα στοιχεία ανάλογα

με τον αριθμό των 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.



Σχ.1, Τύποι πεπερασμένων στοιχείων για (α) μονοδιάστατα, (β) δισδιάστατα και (γ) τρισδιάστατα προβλήματα

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 PEA, δύο προγράμματα (PTC's Pro-MECHANICA και CADSI's PolyFEM) σχεδιάστηκαν ειδικά για ανάλυση τύπου *p version*. Εκτός 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 του 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 (E), και ο λόγος του Poisson (ν), 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, ιξωδοελαστικότητα, κλπ), για άλλου τύπου προβλήματα. Γίνεται μόνο μια απλή παραδοχή: σε διαφορετικές περιοχές στοιχείων, αποδίδονται διαφορετικές ιδιότητες υλικών. Αυτό για παράδειγμα, δίδει 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 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 *μετα-επεξεργαστής* (postprocessor). Τα περισσότερα πακέτα προσφέρουν ποικίλους τρόπους κατηγοριοποίησης, εκτίμησης και απεικόνισης των αποτελεσμάτων, τα οποία τυπικά περιλαμβάνουν τάσεις, παραμορφώσεις, και παραμορφωμένο σχήμα της κατασκευής. Ο παραδοσιακός τρόπος είναι υπό μορφή ζωνών *ισοτασικών* επιφανειών κυρίως με χρήση χρωματικής κλίμακας. Στην περίπτωση δυναμικής ανάλυσης, όλα τα πακέτα διαθέτουν animation, τόσο για την εποπτεία των ιδιομορφών ταλάντωσης όσον και για την προσφερόμενη χρονική ολοκλήρωση που είναι το μοναδικό εργαλείο στην περίπτωση μη-γραμμικών αναλύσεων. Επίσης, πολλά συστήματα διαθέτουν τη δυνατότητα εξαγωγής αποτελεσμάτων σε μορφή που μπορούν να αξιοποιηθούν περαιτέρω, σαν κείμενα, παρουσιάσεις, ή αποστολή στο διαδίκτυο.

➤ Καθορισμός του είδους ανάλυσης:

Παρόλο που δεν είναι δυνατόν να κωδικοποιήσουμε τον τρόπο ανάλυσης, στη συνέχεια θα δώσουμε κάποιες γενικές κατευθύνσεις.

Η πλέον αρχική επιλογή είναι ο καθορισμός του φυσικού φαινομένου, το οποίο καλείται ο μελετητής να προσομοιώσει. Παράδειγμα, *ελαστική ανάλυση* (ELASTIC ANALYSIS), ή *πρόβλημα δυναμικού* (POTENTIAL PROBLEM). Τα προβλήματα δυναμικού, αφορούν την επίλυση των εξισώσεων LAPLACE και POISSON που διέπουν τη μηχανική ατρίβους ρευστού, μετάδοσης θερμότητας, κοκ.

Μια δεύτερη επιλογή του μελετητή είναι ο καθορισμός του προβλήματος :

1. *Στατικό πρόβλημα* (STATIC ANALYSIS), δηλαδή μη-εξαρτημένο από το χρόνο, ή
2. *Δυναμικό πρόβλημα*, (DYNAMIC ANALYSIS), δηλαδή χρονικά εξαρτώμενο. Παραδείγματα είναι η ταλάντωση μιας μηχανής, ο ερπυσμός και η χαλάρωση, η διάδοση ήχου στον αέρα ή σε άλλο μέσο, κλπ.

Μια άλλη κατάταξη αφορά στο εάν το πρόβλημα είναι γραμμικό (linear), ή μη-γραμμικό (nonlinear):

- *Γραμμικό*, λέγεται ένα πρόβλημα στο οποίο εάν διπλασιασθεί το μέγεθος των εξωτερικών δράσεων (π.χ. δυνάμεων) τότε διπλασιάζεται το μέγεθος του αποτελέσματος (π.χ. μετατοπίσεων). Τα περισσότερα προβλήματα της πράξης είναι (ή μάλλον θεωρούνται) γραμμικά.
- *Μη-γραμμικό*, λέγεται ένα πρόβλημα στο οποίο δεν ισχύει η αναλογία που αναφέρθηκε προηγούμενα. Σε *ελαστικά* προβλήματα η μη-γραμμικότητα μπορεί να οφείλεται στο ελαστοπλαστικό υλικό (material nonlinearity), ή στην μεταβαλλόμενη επαφή μεταξύ δύο ή περισσότερων σωμάτων (geometrical nonlinearity). Και στις δύο αυτές περιπτώσεις, το μητρώο δυσκαμψίας δεν είναι σταθερό αλλά είναι συνάρτηση των μετατοπίσεων. Μη γραμμικότητες υπάρχουν και σε προβλήματα δυναμικού, π.χ. όταν ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας.

Σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις, η μητρική διατύπωση του προβλήματος καταλήγει στην γνωστή μορφή,

$$[\mathbf{M}] \{ \ddot{\bar{u}}(t) \} + [\mathbf{C}] \{ \dot{\bar{u}}(t) \} + [\mathbf{K}] \{ \bar{u}(t) \} = \{ \mathbf{f}(t) \}$$

όπου,

$[\mathbf{M}]$ είναι το μητρώο μάζας,

$[\mathbf{C}]$ είναι το μητρώο απόσβεσης,

$[\mathbf{K}]$ είναι το μητρώο δυσκαμψίας,

$\{ \ddot{\bar{u}}(t) \}$ είναι το διάνυσμα της επιτάχυνσης,

$\{ \dot{\bar{u}}(t) \}$ είναι το διάνυσμα της ταχύτητας,

$\{ \bar{u}(t) \}$ είναι το διάνυσμα της μετατόπισης,

$\{ \mathbf{f}(t) \}$ είναι το διάνυσμα των φορτίσεων.

Προφανώς, εάν το πρόβλημα είναι στατικό, τόσο η ταχύτητα, $\{ \dot{\bar{u}}(t) \}$, όσον και η επιτάχυνση, $\{ \ddot{\bar{u}}(t) \}$, μηδενίζονται.

Τέλος, πρέπει να γίνει κατανοητό ότι, φαινόμενα *λογισμού* θλιβόμενων δοκών, καθώς και *πτύχωσης* θλιβόμενων πλακών και κελύφων, δεν είναι δυνατόν να αντιμετωπισθούν από τη συνήθη γραμμική ανάλυση που περιγράφεται από την πιο πάνω σχέση, αλλά απαιτούν ιδιαίτερη επίλυση (BUCKLING ANALYSIS). Πιο συγκεκριμένα, εκτός από το γνωστό μητρώο δυσκαμψίας $[\mathbf{K}]$ που οφείλεται στις μικρές παραμορφώσεις, εμφανίζεται και ένα δεύτερο μητρώο $[\mathbf{K}_G]$ που οφείλεται στις μεγάλες παραμορφώσεις του λυγισμού, ή της πτύχωσης. Η αριθμητική επίλυση του προβλήματος εξάγεται από την επίλυση ενός προβλήματος ιδιοτιμών της μορφής,

$$([\mathbf{K}] - \lambda_i [\mathbf{K}_G]) \cdot \{ \bar{u} \} = \{ 0 \}$$

του οποίου οι *ιδιοτιμές* λ αντιστοιχούν στα *κρίσιμα φορτία* λυγισμού, ενώ τα *ιδιοδιανύσματα* \bar{u} αντιστοιχούν στη *μορφή* που θα λάβει ο λυγισμένος φορέας όταν δέχεται το αντίστοιχο κρίσιμο φορτίο.

Πιο συγκεκριμένα, μετά τον σχηματισμό των δύο παραπάνω μητρώων και την επιβολή των στηρίξεων της κατασκευής (διαγραφή αντίστοιχων γραμμών και στηλών), οι ιδιοτιμές υπολογίζονται από τη σχέση,

$$\det \|[\mathbf{K}] - \lambda_i [\mathbf{K}_G] \| = 0, \quad i=1,2,3,4,\dots$$

όπου ο δείκτης i αντιστοιχεί στο πρώτο, δεύτερο, κλπ, φορτίο λυγισμού ή πτύχωσης.

➤ Είδη πεπερασμένων στοιχείων:

Τα βασικά πεπερασμένα στοιχεία είναι:

- Ράβδος (δύο κόμβοι),
- Σύρμα-σχοινί,
- Δοκός (δύο κόμβοι),
- Επίπεδη εντατική κατάσταση (3 μέχρι 9 κόμβοι),
- Επίπεδη παραμορφωσιακή κατάσταση (3 μέχρι 9 κόμβοι),
- Αξονοσυμμετρικό με αξονοσυμμετρική φόρτιση (3 μέχρι 9 κόμβοι),
- Αξονοσυμμετρικό με τυχαία φόρτιση (που αναλύεται σε αρμονικές),
- Πλάκα (3 μέχρι 9 κόμβοι),
- Μembrάνη,
- Κέλυφος,
- Ορθοτροπικό-πολυστρωματικό υλικό,
- Τετράεδρο (3 κόμβοι),
- Πρίσμα (π.χ. 6 κόμβοι),
- Εξάεδρο (8 κόμβοι),

Ανάλογα με το είδος του προβλήματος, το πλήθος των βαθμών ελευθερίας ανά κόμβο ποικίλλει.

➤ Περιγραφή Φυσικών Ιδιοτήτων:

Οι φυσικές ιδιότητες ενός τρισδιάστατου 3D συνεχούς μέσου περιγράφονται κατά κανόνα σε ένα καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων x, y, z .

Εάν "F" είναι μία συγκεκριμένη ιδιότητα του συνεχούς μέσου (π.χ. μετατόπιση, θερμοκρασία, πίεση, κλπ.), τότε η συνάρτηση F είναι *βαθμωτή* και ίση με:

$$F = F(x,y,z)$$

Εάν η ιδιότητα μεταβάλλεται και χρονικά, τότε:

$$F = F(x,y,z,t)$$

όπου t είναι ο χρόνος.

Εάν η φυσική ιδιότητα έχει διανυσματικό χαρακτήρα, π.χ. αντιστοιχεί στις μετατοπίσεις u, v , και w ενός σημείου " p " στις κατευθύνσεις των αξόνων x, y, z του καρτεσιανού συστήματος, τότε ισχύει:

$$\vec{u} = \begin{Bmatrix} u(x, y, z, t) \\ v(x, y, z, t) \\ w(x, y, z, t) \end{Bmatrix}$$

όπου \vec{u} είναι το σχετικό διάνυσμα.

Τέλος, εάν οι φυσικές ιδιότητες του σημείου "p" είναι περισσότερες από τον αριθμό των καρτεσιανών συντεταγμένων, όπως π.χ. οι παραμορφώσεις ενός ελαστικού σώματος $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xz}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$, τότε αυτές περιγράφονται μέσω ενός αντίστοιχου διανύσματος $\vec{\varepsilon}$,

$$\vec{\varepsilon} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x(x, y, z, t) \\ \varepsilon_y(x, y, z, t) \\ \varepsilon_z(x, y, z, t) \\ \gamma_{xy}(x, y, z, t) \\ \gamma_{yz}(x, y, z, t) \\ \gamma_{zx}(x, y, z, t) \end{Bmatrix}$$

Η περιγραφή του φυσικού φαινομένου γίνεται, για όλα τα προβλήματα συνεχών μέσων, με βάση τις ακόλουθες 3 εξισώσεις:

- A. Εξίσωση Συνέχειας**
- B. Καταστατική Εξίσωση, και**
- C. Εξίσωση Ισορροπίας.**

➤ **EXPLICIT – IMPLICIT FEM:**

Το LS-DYNA, είναι ένας explicit κώδικας πεπερασμένων στοιχείων, που χρησιμοποιεί την μέθοδο της κεντρικής διαφοράς, η οποία απαιτεί για την μετατόπιση U_t , την ταχύτητα \dot{U}_t , και την επιτάχυνση \ddot{U}_t , να ικανοποιούνται οι ακόλουθες σχέσεις:

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

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

Όπου το Δt , είναι ένα κατάλληλο χρονικό διάστημα που απαιτείται για την αριθμητική ολοκλήρωση.

Η μέθοδος αυτή λέγεται εξωτερική μέθοδος ολοκλήρωσης (explicit method), επειδή η λύση του $U_{t+\Delta t}$, υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την ισότητα των συνθηκών σε χρόνο t . Ακριβώς για το λόγο αυτό, αυτό το είδος ολοκλήρωσης δεν απαιτεί κανένα μετασχηματισμό των εξισώσεων, ούτε μετασχηματισμό του μητρώου δυσκαμψίας

$\hat{K} = K + a_0 M + a_1 C$, σε επίλυση για βήμα προς βήμα, αφού το μητρώο δυσκαμψίας K , δεν εμφανίζεται σαν παράγοντας για τις απαιτούμενες μετατοπίσεις $U_{t+\Delta t}$, και επομένως, δεν χρειάζεται κανένα ουσιαστικό μητρώο δυσκαμψίας να μετασχηματιστεί.

Αντίθετα, το μητρώο μάζας $\hat{M} = a_0 M + a_1 C$, θα διαμορφωθεί κατάλληλα, όπου τα $a_0 = 1/\Delta t^2$, και $a_1 = 1/2\Delta t$, είναι οι κατάλληλες σταθερές ολοκλήρωσης, και θα πρέπει να μεταβληθούν ώστε να υπάρξει λύση για την $U_{t+\Delta t}$.

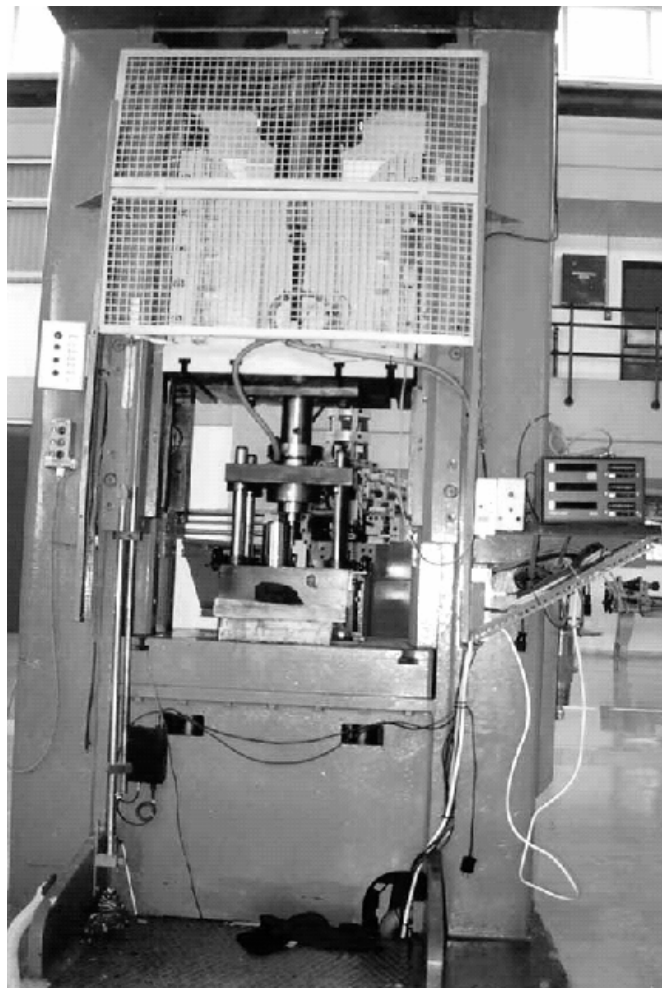
Από την άλλη πλευρά, η εσωτερική μέθοδος ολοκλήρωσης (implicit method), όπως είναι η Houbolt, η λύση του $U_{t+\Delta t}$, υπολογίζεται από την ισότητα των συνθηκών σε χρόνο $t+\Delta t$, και όχι μόνο την χρονική στιγμή t , όπως γίνεται με την μέθοδο της κεντρικής διαφοράς, που έχει σαν αποτέλεσμα, την διαμόρφωση και τον σχηματισμό

ενός ουσιαστικού μητρώου δυσκαμψίας $\hat{K} = K + a_0 M + a_1 C$, το οποίο εμφανίζεται σαν παράγοντας για τις απαιτούμενες μετατοπίσεις $U_{t+\Delta t}$. Έτσι, στην περίπτωση αυτή, ο μετασχηματισμός του ουσιαστικού μητρώου δυσκαμψίας, είναι προφανής έτσι ώστε να υπάρξει λύση για το $U_{t+\Delta t}$.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ – ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Η αξονική θλίψη των ευθειών σωλήνων κυκλικής διατομής λεπτού πάχους, διεξήχθη με την Υδραυλική πρέσα του εργαστηρίου Μ του Τομέα, ονομαστικού φορτίου 100 tn. Όλα τα τεστ πραγματοποιήθηκαν με σταθερή ταχύτητα πρόωσης του εμβόλου 10 mm/min.

Πρόκειται για πρέσα INSTRON διπλής ενεργείας και ονομαστικού φορτίου 100 tn. Κατασκευάστηκε από την εταιρεία SMG στην Γερμανία. Είναι πρέσα ορθού πλαισίου (ή τύπου Ο). Το κύριο έμβολο στηρίζεται στην κεφαλή της εργαλειομηχανής (κινείται από επάνω προς τα κάτω) και έχει μέγιστη διαδρομή 600 mm. Το σερόντι της εργαλειομηχανής οδηγείται από ειδικές πρισματικές γλίστρες και διαθέτει μηχανικό εξολκέα.



Σχ.4. Πρέσα INSTRON ονομαστικού φορτίου 100 tn.

Η ελάττωση του μεγέθους των δοκιμίων (το πόσο αναδιπλώθηκαν κατά αξονική διεύθυνση με εμφάνιση εκτατών και μη εκτατών λοβών), μετρήθηκε και καταγράφηκε σε Η/Υ από ειδική συνδεδεμένη με την πρέσα συσκευή καταγραφής και ανάλυσης δεδομένων.

Επιπλέον, πάρθηκαν μια σειρά από φωτογραφίες, στοιχείων για τις ιδιότητες του υλικού και η καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης από την διεξαγωγή του πειράματος στο εργαστήριο για την περαιτέρω μοντελοποίηση των δοκιμίων με το LS-DYNA 971 με στοιχεία από την βιβλιογραφία [16], για την επίλυση με πεπερασμένα στοιχεία, και τη δημιουργία θεωρητικής προσομοίωσης αυτών, και την καταγραφή των συγκριτικών αποτελεσμάτων για το κάθε στάδιο της θλίψης σε όλα τα δοκίμια, καθόλη τη διάρκεια της φόρτισης. Το υλικό των δοκιμίων ήταν από κράμα αλουμινίου 6063-F25 για το οποίο πάρθηκαν τα ακόλουθα ζεύγη τιμών τάσεων – παραμορφώσεων στην πλαστική περιοχή (όριο διαρροής 220 MPa, και όριο αντοχής σε εφελκυσμό 240 MPa):

Stress (MPa)	strain
220	0.0
240	0.1

Σημειώνουμε βέβαια ότι το διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων για τη θλίψη των δοκιμίων μας είναι το ακριβώς συμμετρικό, ως προς την αρχή των αξόνων, με το διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων σε εφελκυσμό για κράμα αλουμινίου 6063 – F25 (για την πλαστική περιοχή από το όριο διαρροής έως το όριο αντοχής), επομένως τα ζεύγη τιμών τάσεων – παραμορφώσεων είναι αυτά που αναγράφονται ακριβώς παραπάνω.

Στο LS-Dyna 971, δίνουμε τα παραπάνω ζεύγη τιμών κατά απόλυτη τιμή και ορίζουμε σταθερή ταχύτητα πρόωσης του εμβόλου: $v = -10\text{mm/min}$, με φορά προς τα κάτω στα αρνητικά του Z axis.

Πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων LS-DYNA 3D:

➤ Γενικά περί προγραμμάτων πεπερασμένων στοιχείων:

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

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

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

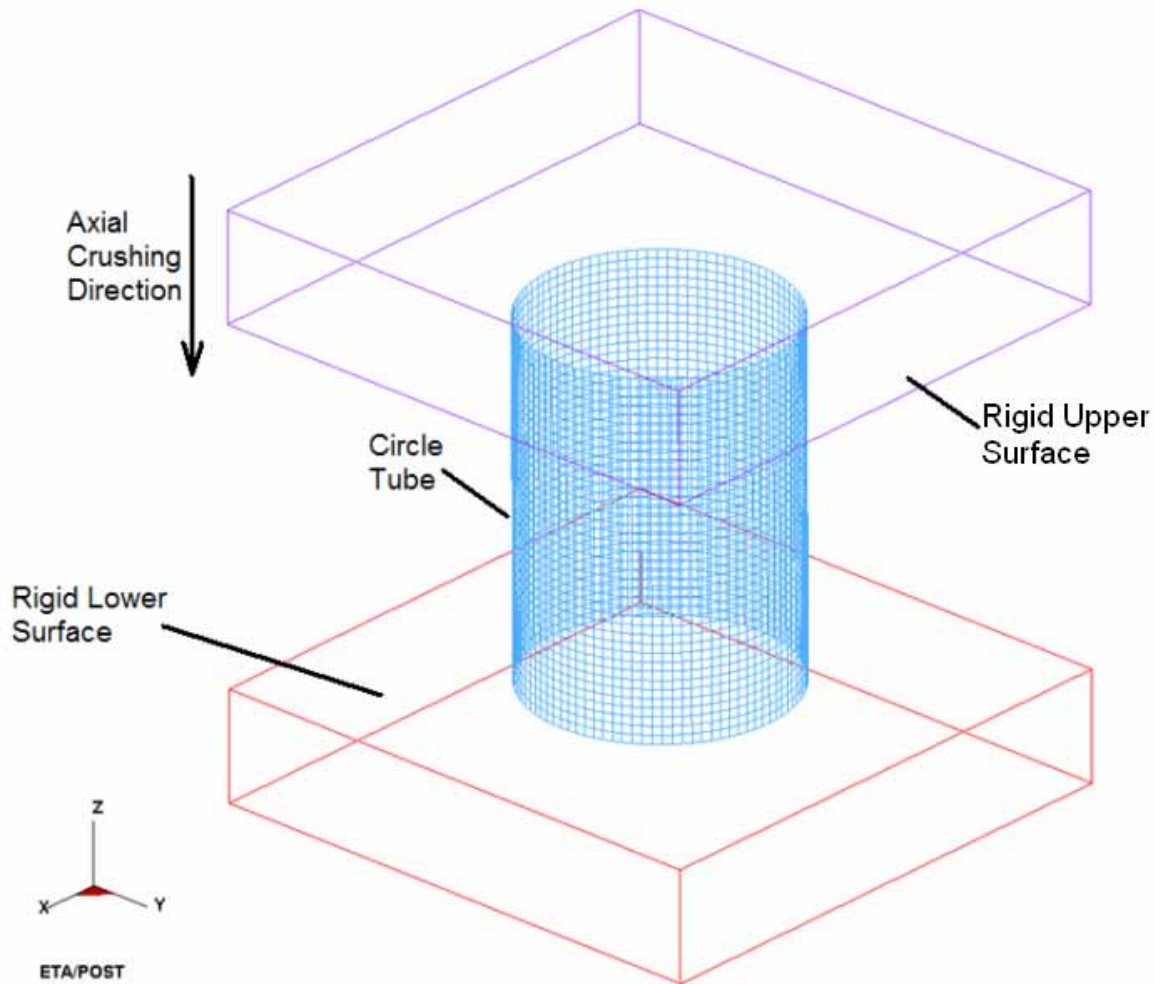
Εξειδικευμένα προγράμματα για συνδυασμένη κινηματική και ελαστική ανάλυση μηχανισμών είναι: ADAMS, DADS.

Για την προσομοίωση των πειραματικών δοκιμών χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα LS DYNA3D, το οποίο διαθέτει το εργαστήριο του τομέα τεχνολογίας των κατεργασιών, στο Κτίριο Μ. Πρόκειται για ένα λογισμικό που χρησιμοποιεί EXPLICIT κώδικα και ειδικεύεται στην ανάλυση μη γραμμικών δυναμικών τρισδιάστατων προβλημάτων (προβλήματα πλαστικής παραμόρφωσης). Η Εταιρεία κατασκευής είναι η LIVERMORE SOFTWARE TECHNOLOGY CORPORATION, και η τρέχουσα έκδοση, η οποία και χρησιμοποιήθηκε ήταν η 971.

➤ Χρήση του προγράμματος:

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

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



Σχ.10, Απεικόνιση πλέγματος και διεπιφανειών επαφής στο LS-DYNA 3D, για κυκλικής διατομής λεπτότοιχο σωλήνα.

Επιλέξαμε τα δοκίμιά μας να έχουν ονομαστικές (εξωτερικές) διαστάσεις $D=60$ $L=80$ mm και πάχος τοιχώματος 2mm, ενώ η προσομοίωση στο LS-Dyna 971, έγινε με διαστάσεις $D=58$, $L=80$ mm, και κατόπιν ορίστηκε κοινό πάχος τοιχώματος 2mm, ώστε πλέον χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος επίλυσης με πεπερασμένα στοιχεία: *S/R Hughes-Liu*, και πάρθηκαν αποτελέσματα για το κάθε msec έως τα 45msec σε όλα τα δοκίμια (άρα έως τα 45.0mm από την πάνω επιφάνεια του κάθε δοκιμίου την οποία θα πιέζει θλιπτικά το έμβολο της πρέσας). Τα πεπερασμένα στοιχεία που επιλέξαμε για το πλέγμα στα μοντέλα των δοκιμίων είναι *Shell Element* (γι' αυτόν ακριβώς το λόγο τα δοκίμια σχεδιάστηκαν με βάση τις παραπάνω διαστάσεις). Επίσης σε δύο από τα δοκίμιά μας χρησιμοποιήσαμε *Brick Elements* για να πετύχουμε καλύτερη προσομοίωση με το πρόγραμμά μας. Αυτό έγινε στα δύο δοκίμια που έχουν μεγαλύτερες εγκοπές, οι οποίες, όπως θα δούμε και στο 5^ο Κεφάλαιο, επηρεάζουν πολύ τον τρόπο κατάρρευσης τους.

Ακόμα, στο LS-Dyna 971, δίνουμε τα ζεύγη τιμών σελίδας 24, κατά απόλυτη τιμή και ορίζουμε σταθερή ταχύτητα πρόωσης του εμβόλου: $v = -10$ mm/min, με φορά προς τα κάτω στα αρνητικά του Z axis.

Ο τύπος του υλικού με το οποίο μοντελοποιήσαμε το κράμα αλουμινίου ήταν, MAT PIECEWISE LINEAR PLASTICITY. Η ακίνητη πλάκα καθώς και το κινούμενο έμβολο (σε σχήμα πλάκας) μοντελοποιήθηκαν με απαραμόρφωτο υλικό MAT RIGID, και γι' αυτό δεν διακριτοποιήθηκαν, αλλά θεωρήθηκαν ότι αποτελούνται από ένα και μόνο οχτακομβικό στοιχείο solid element (επιλογή 12lines στο LS DYNA).

Ο συντελεστής δυναμικής τριβής δόθηκε ως **FD = 0.2**, ενώ ο συντελεστής στατικής τριβής δόθηκε ως **FS = 0.3**.

Ακόμα για το υλικό των δοκιμών μας, δώσαμε τα στοιχεία που λάβαμε από την ελληνική βιβλιογραφία [1].

Για την προσομοίωση του εκάστοτε μοντέλου ορίσαμε τις εξής τρεις διεπιφάνειες μεταξύ των τριών σωμάτων που επρόκειτο να έρθουν σε άμεση επαφή:

1. Διεπιφάνεια επαφής μεταξύ της κάτω επιφάνειας της άνω πλάκας και του κελύφους.
2. Διεπιφάνεια επαφής μεταξύ της άνω επιφάνειας της κάτω πλάκας και του κελύφους.
3. Διεπιφάνεια επαφής μεταξύ των διαφόρων τμημάτων του κελύφους με το ίδιο το κέλυφος (self contact)

Για την προσομοίωση των μοντέλων που έγιναν με πάτημα σε κυλινδρικό δοκίμιο (Dial-C) και σε παραλληλεπίπεδο τετραγωνικής διατομής (Dial-R) προστέθηκε μία τέταρτη διεπιφάνεια:

4. Διεπιφάνεια επαφής μεταξύ του κελύφους και των περιμετρικών πλευρών των δοκιμών που αναφέραμε παραπάνω.

Τα δεδομένα σώζονται από τον pre-processor σε μορφή ψηφιακού αρχείου τύπου *.fmb στο οποίο βασικά 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 εκ νέου στη γεωμετρία και στα υπολογιστικά στοιχεία για τον κώδικα του προγράμματος. Επίσης εκτός από το αρχείο *.fmb μπορεί να τα εξάγει και σαν αρχείο κειμένου τύπου *.dyn. Το αρχείο αυτό μπορεί να ανοιχτεί από οποιονδήποτε editor (πχ Notepad), και ως εκ τούτου να τροποποιηθεί από τον χρήστη, και περιέχει σε μορφή ASCII όλα όσα στοιχεία και μόνο αυτά χρειάζεται ο κώδικας του LSDYNA για να προσομοιώσει την αξονική κατάρρευση του κάθε δοκιμίου. Αυτή η δυνατότητα είναι ιδιαίτερα χρήσιμη γιατί γλιτώνει τον χρήστη από επίπονη διαδικασία όταν οι αλλαγές που επιθυμεί να πραγματοποιήσει είναι σχετικά απλές και μπορούν να πραγματοποιηθούν μέσα από τον editor, δίχως να χρειαστεί να ξαναεργαστεί στο περιβάλλον του pre-processor μέσα από το αντίστοιχο αρχείο *.fmb.

Το αρχείο *.dyn είναι αυτό που στην συνέχεια επεξεργάζεται το πρόγραμμα για την επίλυση του προβλήματος. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιείται ο SOLVER του LS DYNA που αποτελεί και τον κυρίως κώδικα του προγράμματος. 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

(εταιρείας ETA) αντίστοιχα, για να γίνει η παρουσίαση των αποτελεσμάτων στον χρήστη με μορφή γραφημάτων για τις δυνάμεις και τάσεις κατά την κατάρρευση των δοκιμίων, αλλά και τα ίδια τα animation, για την ακριβή προσομοίωση της θεωρητικής κατάρρευσης των μοντέλων μας.

Με τα αποτελέσματα που εξάγονται φτιάχνεται το *διάγραμμα φορτίου P-μετατόπισης s*, στον graph-processor, και υπολογίζεται η συνολική απορροφούμενη ενέργεια W , η οποία προκύπτει από το διάγραμμα με ολοκλήρωση:

$$W = \int Pds$$

Ενώ το *μέσο μεταελαστικό φορτίο* \bar{P} , προκύπτει από τη σχέση:

$$\bar{P} = \frac{W}{s}$$

Επίσης, μπορούμε να υπολογίσουμε και την *ομοιομορφία φορτίου* (Load Uniformity), που είναι ο λόγος της μέγιστης τιμής του φορτίου κατά την ελαστική παραμόρφωση του δοκιμίου πριν αρχίσει η κατάρρευση του υλικού, προς το μέσο φορτίο που σημειώνεται κατά τα στάδια κατάρρευσης του υλικού:

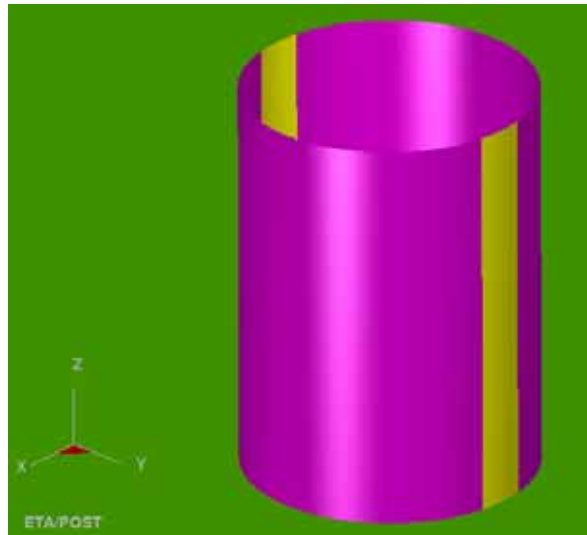
$$LU = \frac{P_{\max}}{\bar{P}}$$

όπου P_{\max} , η μέγιστη τιμή του φορτίου (αρχικό μέγιστο peak του φορτίου) που επιτυγχάνεται κατά την ελαστική παραμόρφωση του δοκιμίου πριν αρχίσει η κατάρρευση του υλικού.

ΕΝΟΤΗΤΑ 5-0 : ΠΡΟΒΟΛΗ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ ΤΟΥ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΚΑΤΑ ΤΟ ΠΕΙΡΑΜΑ ΣΕ ΑΝΤΙΠΑΡΑΘΕΣΗ ΜΕ ΤΙΣ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΕΣ ΦΑΣΕΙΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΤΟΥ LS-DYNA.

Σ' αυτή την ενότητα αναφέρονται κάποιες ιδιαιτερότητες (παραλλαγές) που εφαρμόσαμε σε κάποια απ' τα δοκίμιά μας για να προσομοιώσουμε καλύτερα τον τρόπο κατάρρευσής τους.

- Όπως αναφέραμε και στο Κεφάλαιο 4, τα πεπερασμένα στοιχεία που επιλέξαμε για το πλέγμα στα μοντέλα των δοκιμίων είναι *Shell Elements*. Παρόλα αυτά σε δύο δοκίμια (Dial-3 και Dial-4) έγινε επιλογή των *Brick Elements*. Αυτό έγινε γιατί σε σχετικά αυξημένα πάχη τοιχώματος κελυφών και με χρήση *Shell Elements* για την μοντελοποίησή τους υποτιμάται η εγκάρσια διατμητική παραμόρφωση (transverse shear deformation), μηχανισμός που μπορεί να αποτυπωθεί αποτελεσματικότερα με τη χρήση των *Solid Brick Elements*.
- Λόγω της ύπαρξης εγκοπών ή πρισματικών και κυλινδρικών διεισδυτών στα δοκίμια στις επιφάνειες συμπίεσης με τις πλάκες έχουμε έντονη τοπικά παραμόρφωση/στρέβλωση (distortion) στα κελύφη. Για το λόγο αυτό επιλέχθηκαν *fully integrated shell* ή *solid elements* (element form= 2 για τα *solid elements* και element form= 16 για τα *shell elements* βλ.[21], και όχι οι αντίστοιχες “by default” επιλογές του κώδικα, προκειμένου να αποδοθούν αποτελεσματικότερα οι τρόποι παραμόρφωσης κατάρρευσης των κελυφών. Οι “by default” επιλογές του κώδικα οδηγούν σε έντονη μη φυσική απόδοση της παραμόρφωσης (hourglassing).
- Η μοντελοποίηση της αστοχίας(σκισίματος) του δοκιμίου έγινε μόνο για το Dial-R και όχι για το Dial-C, λόγω του ότι το φαινόμενο είναι πιο έντονο λόγω του πρισματικού σχήματος της διατομής (ύπαρξη ακμών που λειτουργούν ως κοπτικές) (Contact tie-break) βλ.[22]. Κατά την μοντελοποίηση χωρίσαμε το κέλυφος σε τέσσερα κομμάτια όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Εκεί έχουμε “a priori” καθορισμό των γραμμών αστοχίας, ενώ στο πραγματικό δοκίμιο η αστοχία, ναί μεν είναι σχεδόν στα όρια των ακμών του πρισματικού διεισδυτή, αλλά πιο τυχαία. Χρησιμοποιήσαμε (Contact_Single_Edge) επειδή εμπλέκονται το κέλυφος(μωβ) με την λωρίδα(κίτρινο) και για να έχουμε καλύτερη ανάλυση τυχόν επαφών των ακμών των *shell elements* των δύο τμημάτων (για να αποφευχθεί αλληλοεπίδραση των ακμών των *shell elements*).

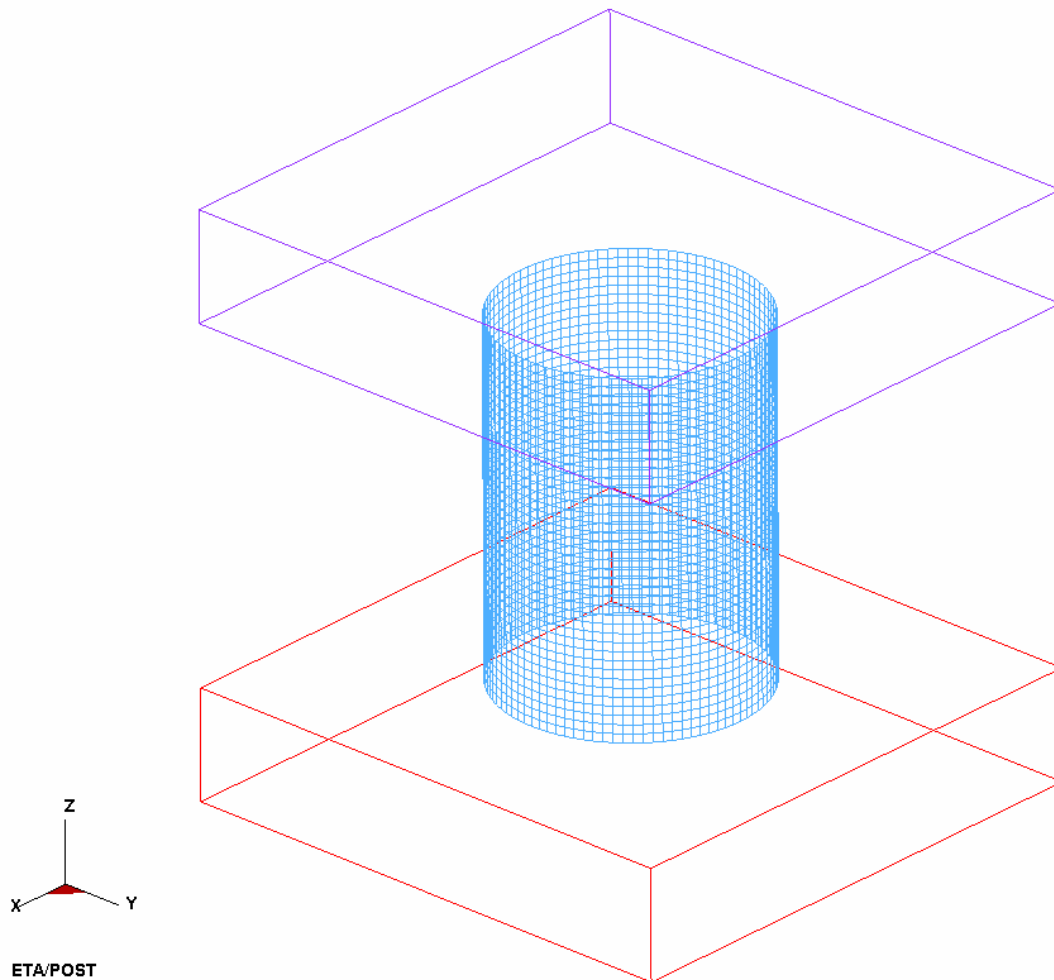


- Η τιμή που έχει επιλεγεί, και είναι διαφορετική απ' την αντίστοιχη “by default” επιλογή του κώδικα, για το NIP(number of integration parts theory thickness) είναι μεγαλύτερη ή ίση με ≥ 3 , τιμή κατάλληλη για πλαστική παραμόρφωση.

Στις επόμενες ενότητες έχουμε την κατάρρευση των δοκιμίων για κάθε περίπτωση που αναφέρθηκε, κατά το πείραμα και τις αντίστοιχες φάσεις από την μοντελοποίηση στο LS-Dyna.

ΕΝΟΤΗΤΑ 5-1: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΑΝΕΥ ΕΓΚΟΠΩΝ (Dial-S).

Το μοντέλο του δοκιμίου κυκλικής διατομής άνευ εγκοπών (Dial-S) και με πάχος τοιχώματος 2mm, παρουσιάζεται στην ακόλουθη εικόνα :



Σχ.1 Απεικόνιση πλέγματος στο LS_DYNA 3D, κυκλικής διατομής δοκιμίου άνευ εγκοπών.

Οι αντίστοιχες φάσεις προσομοίωσης της κατάρρευσης του δοκιμίου αυτού, που κατέγραψα με τη χρήση του LS-DYNA παρουσιάζονται στις επόμενες σελίδες:



Στην παραπάνω φωτογραφία φαίνεται η έναρξη της προσομοίωσης του μοντέλου μας στο LS-DYNA.



1^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην προσομοίωση με το LS-Dyna. Δημιουργία αρχικού εκτατού λοβού. Παρατηρούμε ότι το μοντέλο του δοκιμίου στο LS-Dyna αρχίζει να καταρρέει στο κάτω μέρος περίπου στα 2mm του ύψους του ενώ το ίδιο συμβαίνει και κατά την πειραματική φάση. Πάτημα της πρέσας στα 4mm.



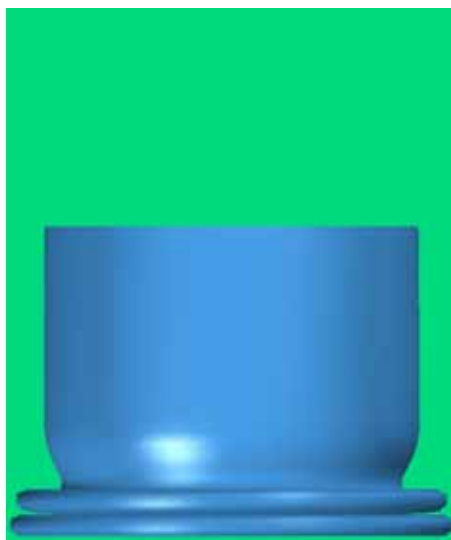
2η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-Dyna. Συνέχιση αρχικού εκτατού λοβού, και αρχή δημιουργίας δεύτερου λοβού στο παράλληλο επίπεδο ως προς τον προηγούμενο λοβό. Πάτημα της πρέσας στα 14mm.



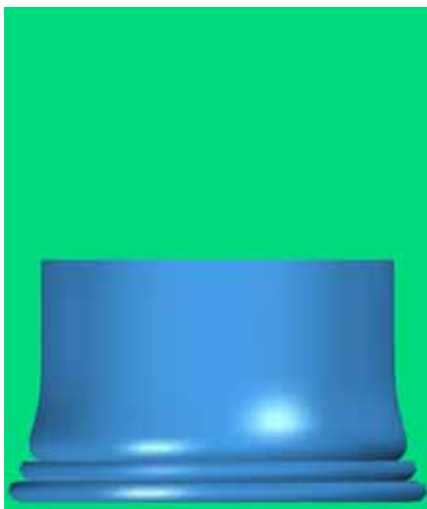
3η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-Dyna. Παρατηρούμε ολοκλήρωση του πρώτου εκτατού λοβού και αρχή δημιουργίας του δεύτερου λοβού. Πάτημα της πρέσας στα 19 mm.



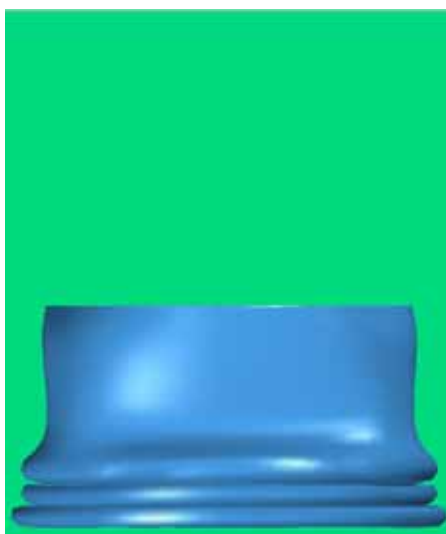
4η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-Dyna. Συνέχιση δεύτερου εκτατού λοβού, σε επίπεδο παράλληλο ως προς το επίπεδο του προηγούμενου εκτατού λοβού. Παρατηρούμε ότι στο μοντέλο στο LS-DYNA η κατάρρευση συνεχίζεται από κάτω προς το μέσο του δοκιμίου, με διεύθυνση προς την κινητή πλάκα συγκράτησης, ενώ το πάνω μισό μέρος του δοκιμίου, φαίνεται σχεδόν ανεπηρέαστο. Στο δοκίμιο στην πρέσα η κατάρρευση συνεχίζεται κατά τον ίδιο τρόπο προς τα πάνω. Πάτημα της πρέσας στα 24 mm.



5η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-Dyna. Ολοκλήρωση δεύτερου λοβού και ξεκίνημα δημιουργίας τρίτου μη εκτατού λοβού σε παράλληλο επίπεδο. Πάτημα της πρέσας στα 32 mm.



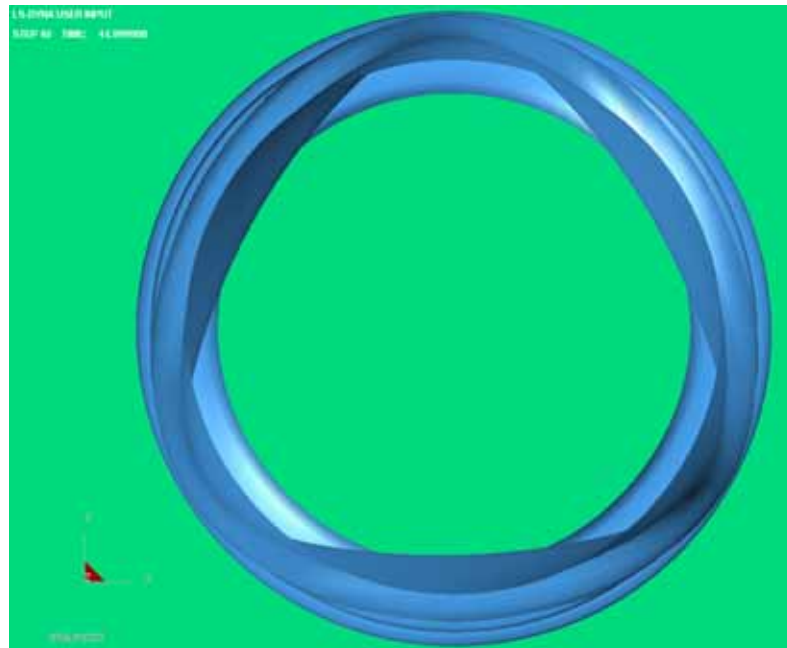
6η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA. Συνέχιση δημιουργίας του τρίτου μη εκτατού λοβού σε επίπεδο παράλληλο προς τον δεύτερο λοβό. Πάτημα της πρέσας στα 40mm.



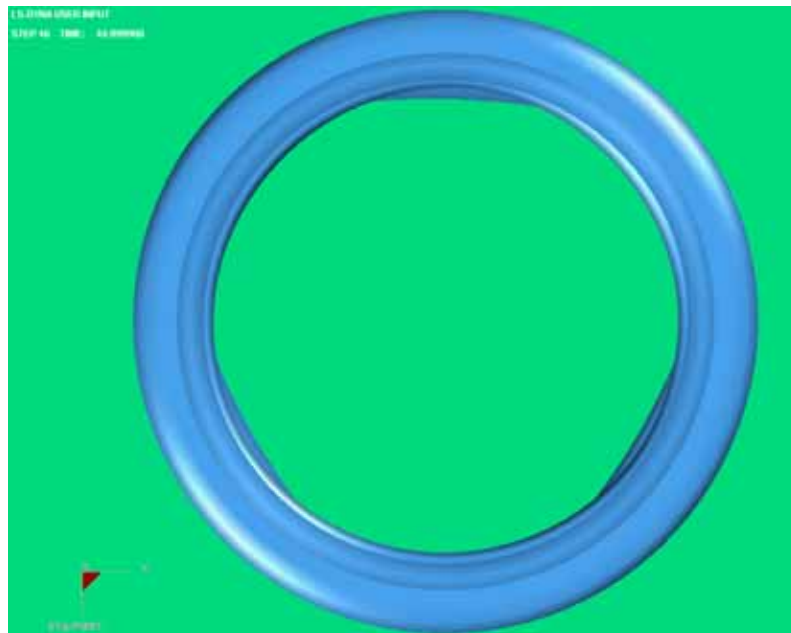
Τελική μορφή δοκιμίου αμέσως μετά το τέλος της διαδικασίας αξονικής κατάρρευσης στο μοντέλο προσομοίωσης του LS-Dyna. Παρατηρούμε δύο ολοκληρωμένους εκτατούς λοβούς σε επίπεδα παράλληλα μεταξύ τους. Ακόμα, παρατηρούμε την ύπαρξη και τρίτου μη εκτατού λοβού στο κάτω μισό μέρος του δοκιμίου, ο οποίος όμως δεν έχει ολοκληρωθεί, ενώ το πάνω μέρος του φαίνεται να επιρραάζεται και αυτό ελαφρώς. Τελικό πάτημα της πρέσας στα 45 mm.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο

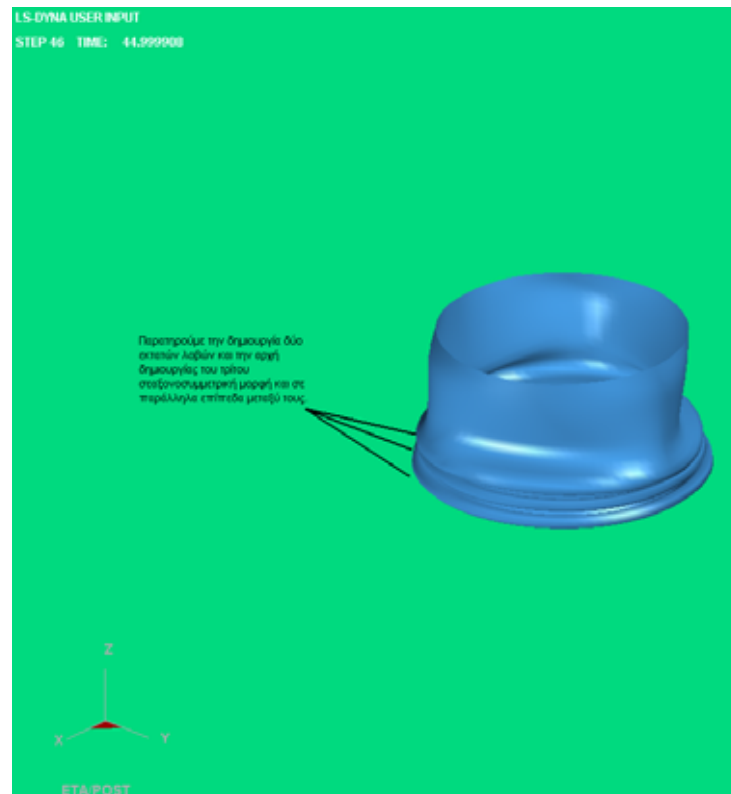
Το μοντέλο μας κατά την κάτοψη φαίνεται παρακάτω στην τελική φάση της προσομοίωσης:



Σε αντιστραμμένη όψη έχουμε:



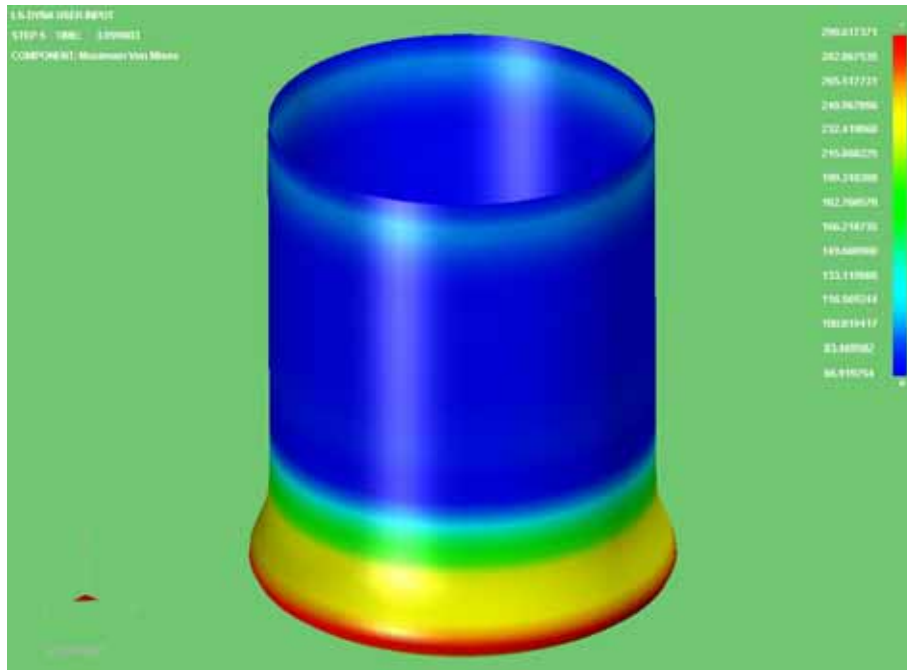
Σε τρισδιάστατη ισομετρική όψη, παρουσιάζεται στην επόμενη σελίδα, η τελική μορφή του δοκιμίου όπως προσομοιάστηκε στο LS-Dyna, με κατάρρευση του δοκιμίου έως τα 45 mm:



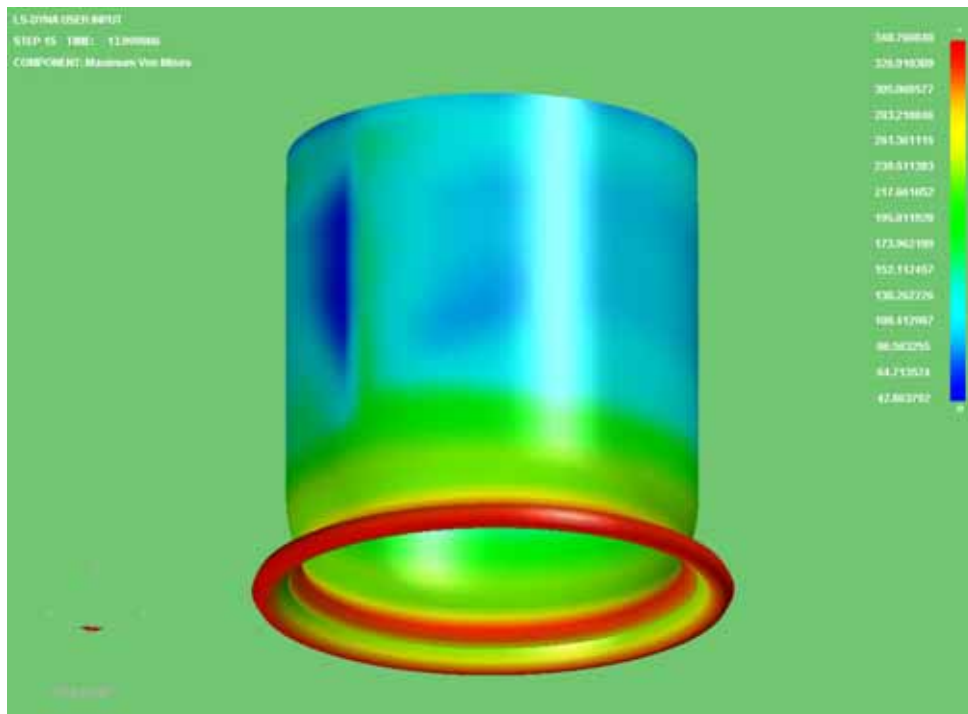
Ακολουθούν εικόνες από την κατανομή των τάσεων σε όλη την επιφάνεια του δοκιμίου κατά τα διάφορα στάδια της κατάρρευσής του:

Επιλέγοντας στον ETA POSTGL:

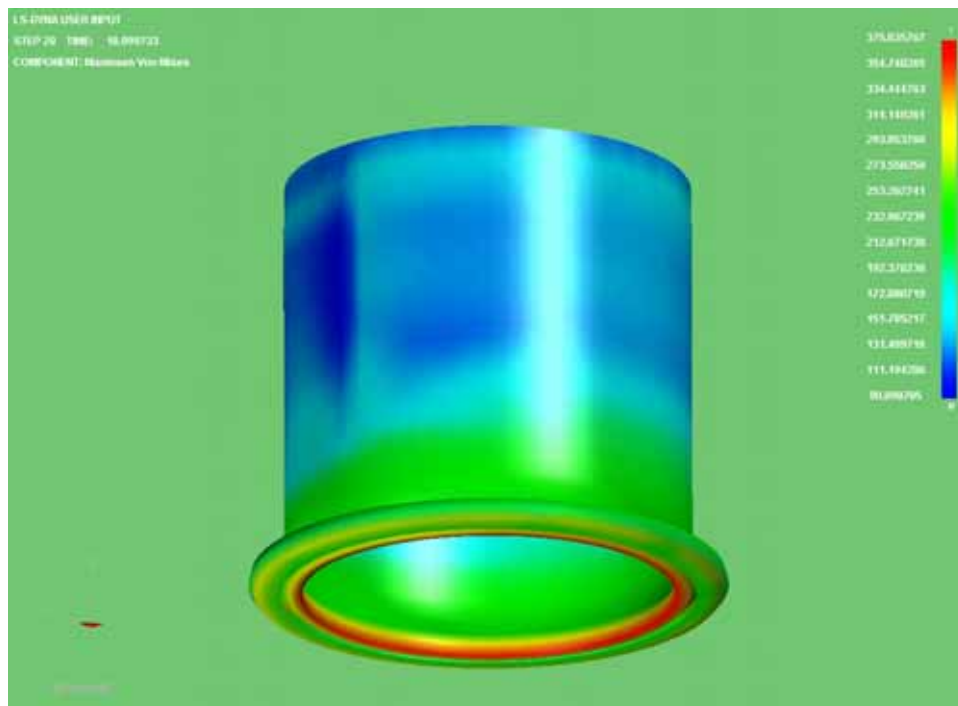
CONTOUR -> STRESS/STRAIN -> MAXIMUM VON MISES STRESSES:



Κατανομή των τάσεων στα 4mm. Έχουμε μέγιστες τάσεις σε όλη την περιοχή του δοκιμίου κατά την περιφέρεια του λοβού. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή **298,6 MPa** στην περιοχή με κόκκινο χρώμα, η οποία είναι μεγαλύτερη από το όριο διαρροής του υλικού ($\sigma_A=220 \text{ MPa}$), οπότε ξεκινάει η πλαστική παραμόρφωση του δοκιμίου, με εμφάνιση μονίμων παραμορφώσεων σε αυτό. Στο σημείο της εικόνας που φαίνεται η μπλε περιοχή(στο κάτω μέρος του δοκιμίου), είναι η θέση που έχουμε την ελάχιστη τιμή τάσεων.Στο υπόλοιπο μέρος του δοκιμίου παρατηρούνται μέσες τάσεις της τάξεως των **11,8 MPa**.



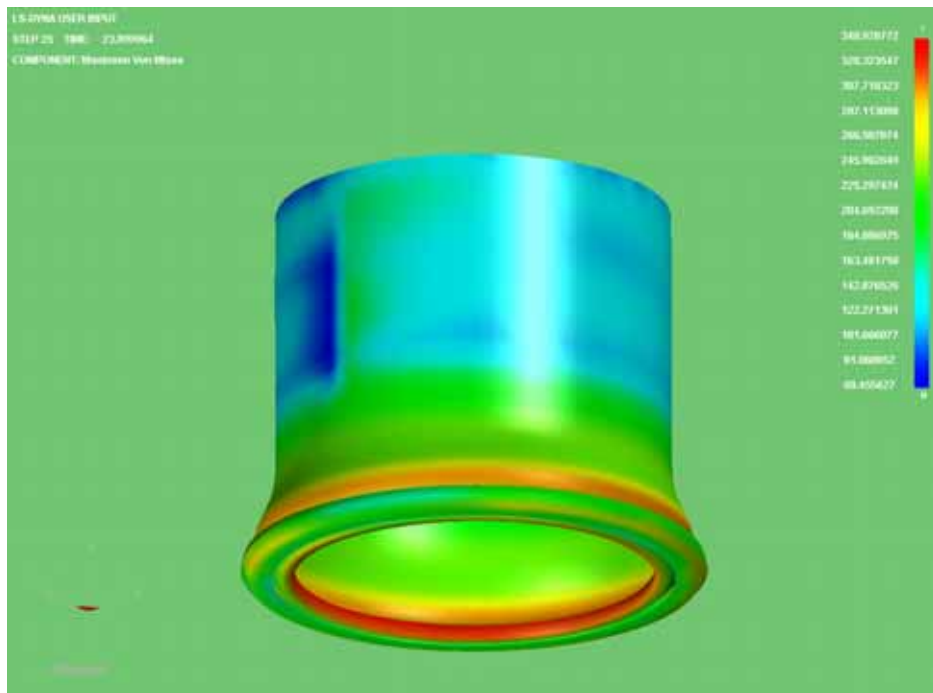
Κατανομή των τάσεων στο 14 mm. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή **244,7 MPa** στην περιοχή με κόκκινο χρώμα. Στην μπλε περιοχή που αντιστοιχεί στο πάνω μέρος του δοκιμίου έχουμε την ελάχιστη τιμή των τάσεων που φαίνεται στην εικόνα με τον αριθμό **130 MPa**. Παρατηρούμε την δημιουργία του πρώτου λοβού στο κάτω μέρος του δοκιμίου.



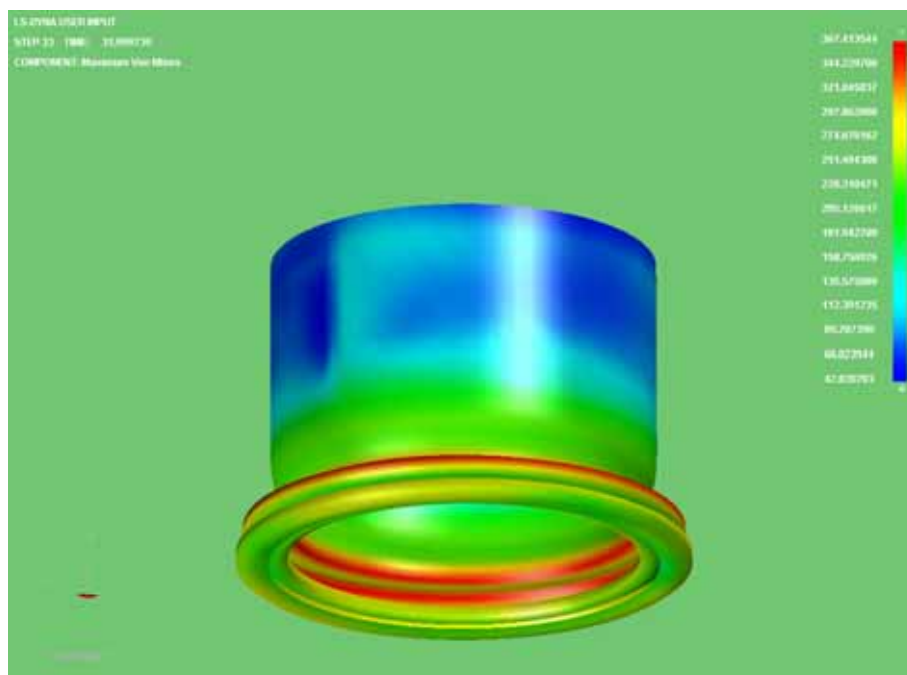
Κατανομή των τάσεων στο 19mm. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή **375,0 MPa** που είναι μεγαλύτερη από την τάση αντοχής ($\sigma_A=240\text{MPa}$)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο

στην κόκκινη περιοχή όπου αναδιπλώνεται το υλικό για τον σχηματισμό του πρώτου λοβού.

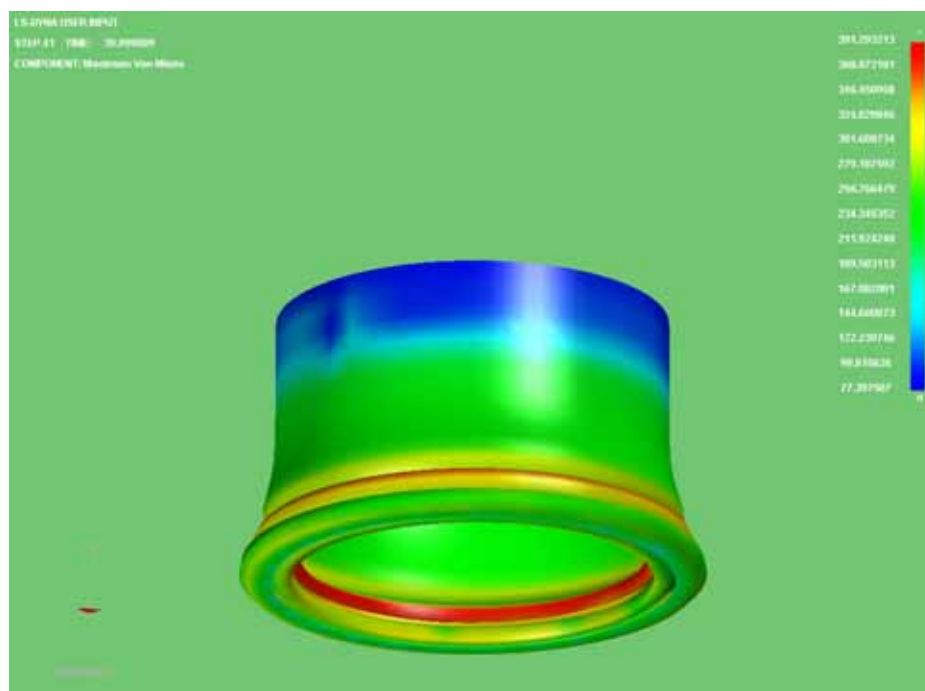


Κατανομή των τάσεων στο 24 mm. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή 348,9 MPa που είναι μικρότερη από την τάση αντοχής ($\sigma_A=240\text{MPa}$). Στο πάνω μέρος του δοκιμίου έχουμε εμφάνιση μικρών τάσεων ίσες με 140 MPa.

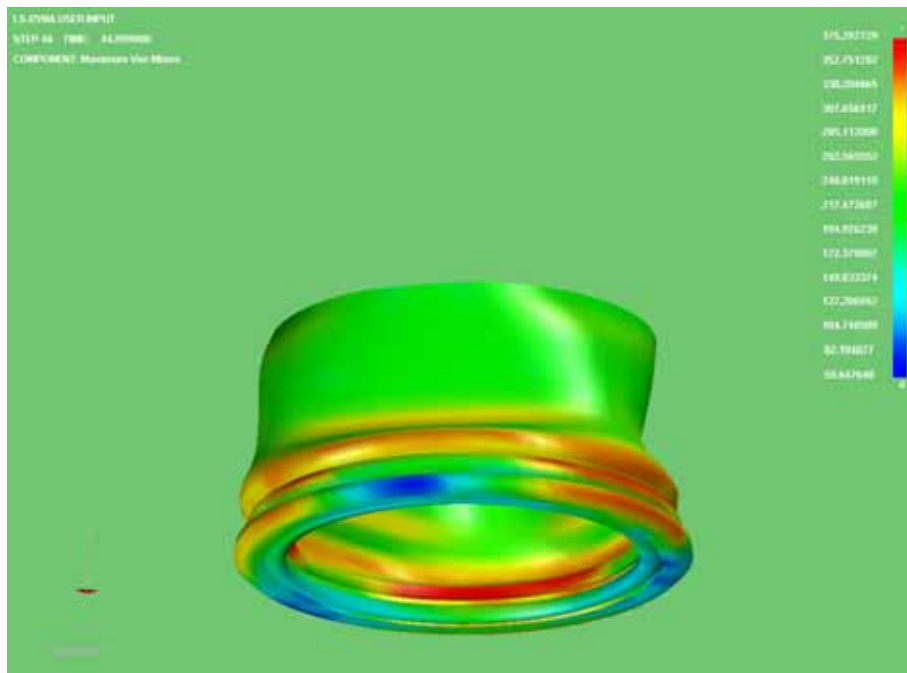


ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο

Κατανομή των τάσεων στο 32 mm. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή **367,4 MPa** στις περιοχές με κόκκινο χρώμα. Έχουν σχηματιστεί και οι δύο εκατοί λοβοί, και αρχίζει η δημιουργία «λαιμού» για την δημιουργία του δεύτερου και τρίτου εκατού λοβού. Οι μέγιστες τάσεις εμφανίζονται στις περιοχές αναδίπλωσης του υλικού για την δημιουργία του δεύτερου και του τρίτου. Έχουμε εμφάνιση ελάχιστων τάσεων στην μπλε περιοχή που αντιστοιχεί στο πάνω μέρος του δοκιμίου ίσες με 80 MPa.

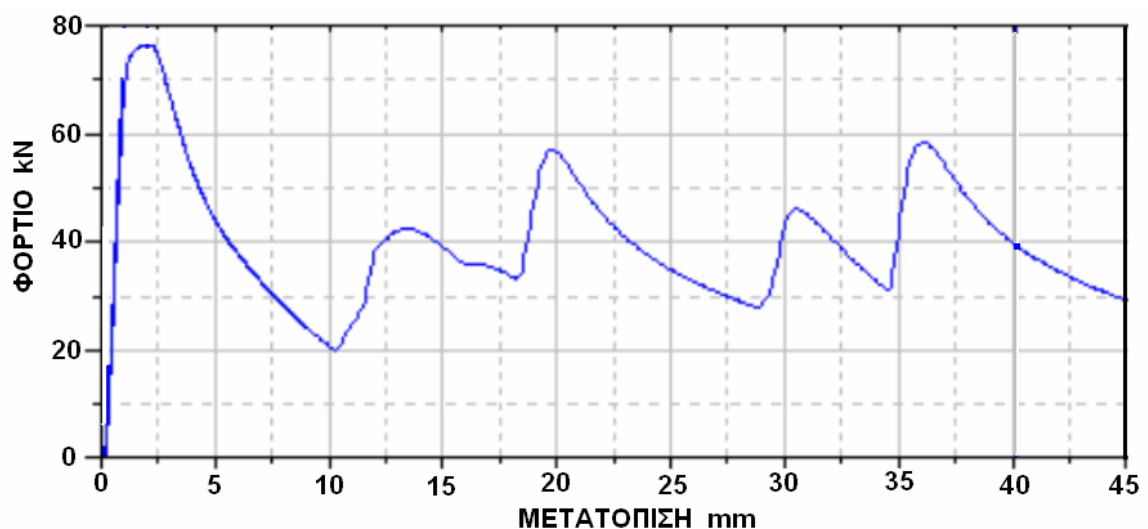


Κατανομή των τάσεων στο 40 mm. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή 391,3 MPa στις επιφάνειες του πρώτου και τρίτου λοβού, που είναι μεγαλύτερη από την τάση αντοχής ($\sigma_A=240\text{MPa}$). Στο πάνω μισό του δοκιμίου και στην επιφάνεια επαφής του δοκιμίου με την πάνω πλάκα έχουμε εμφάνιση ελάχιστων τάσεων ίσες με 100 MPa.



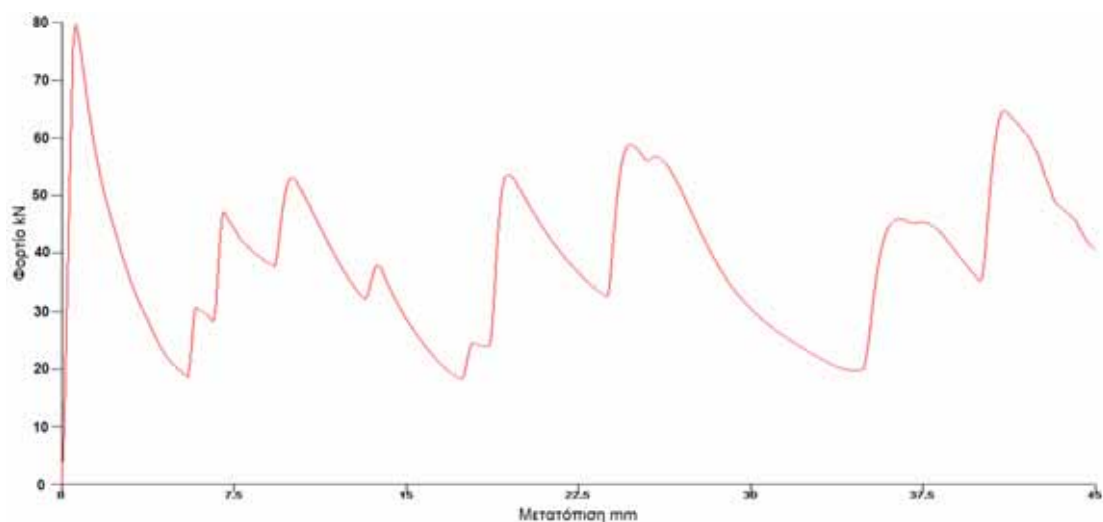
Κατανομή των τάσεων στα 45.0 mm. Οι τελικές τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή 375,3 MPa. Η περιοχή με τις ελάχιστες τάσεις εμφανίζεται στον πρώτο λοβό του δοκιμίου με μπλέ χρώμα. Η κατάρρευση του δοκιμίου έχει πλέον ολοκληρωθεί, και οι δύο τελικοί εκτατοί λοβοί έχουν σχηματιστεί πλήρως ενώ ο τρίτος εκτατός λοβός είναι σχεδόν ολοκληρωμένος.

Ακόμα, το διάγραμμα των δυνάμεων μετά την επεξεργασία των στοιχείων που πάρθηκαν από την πρέσα, και με την χρήση του Excel, είναι αυτό που παρουσιάζεται στην επόμενη σελίδα, με τον κατακόρυφο άξονα να δείχνει τις **δυνάμεις σε kN**, και με τον οριζόντιο άξονα να δείχνει τις **μετατοπίσεις** (βραχύνσεις του θλιβόμενου δοκιμίου) **σε mm**:



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο

Το διάγραμμα των δυνάμεων μετά την επεξεργασία των στοιχείων που πάρθηκαν από την προσομοίωση στο LS-Dyna, και με την χρήση του Excel, είναι αυτό που παρουσιάζεται στην επόμενη σελίδα, με τον κατακόρυφο άξονα να δείχνει τις **δυνάμεις σε kN**, και με τον οριζόντιο άξονα να δείχνει τις **μετατοπίσεις (βραχύνσεις του θλιβόμενου δοκιμίου) σε mm**:



- Από τα στοιχεία που πάρθηκαν από το πάτημα στην πρέσα, βρέθηκε:

Διαδρομή εμβόλου: **45.0 mm**

Μέγιστο φορτίο $P_{max}=76.46 \text{ kN}$ στα 1.83mm

Το μέσο φορτίο $P_{mean}=39 \text{ kN}$

Η ομοιομορφία φορτίου $P_{max}/P_{mean} = 1.96$

Ενέργεια παραμόρφωσης $E=1642 \text{ kN mm}$

- Από τα στοιχεία που πάρθηκαν από την προσομοίωση στο LS-DYNA, βρέθηκε:

Διαδρομή εμβόλου: **45.0mm**

Το μέγιστο φορτίο $P_{max} = 79.9 \text{ KN}$,

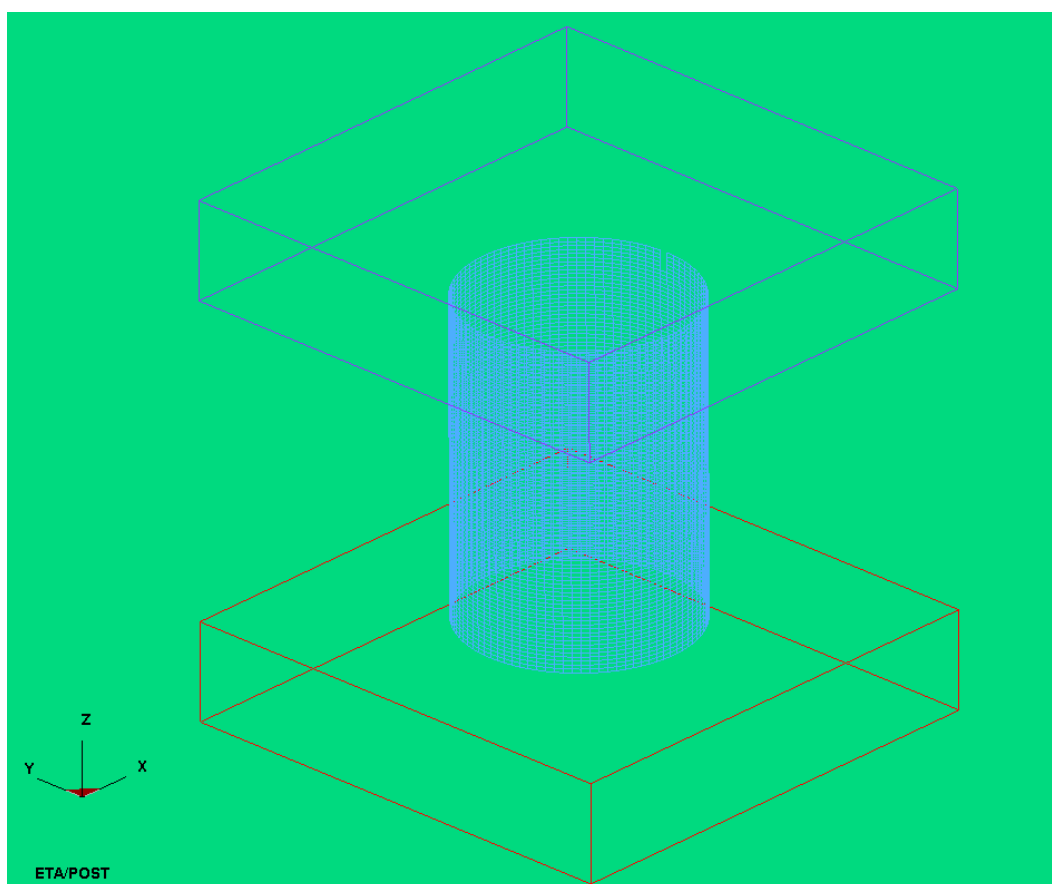
Το μέσο φορτίο $P_{mean}=38.88 \text{ KN}$

Η ομοιομορφία φορτίου $P_{max}/P_{mean} = 2.06$

Η συνολική ενέργεια που δαπανήθηκε για την αξονική κατάρρευση του δοκιμίου είναι $E = 1749.6 \text{ kN mm}$

ΕΝΟΤΗΤΑ 5-2 : ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΙΑΣ(1) ΕΓΚΟΠΗΣ ΣΤΟ ΠΑΝΩ ΜΕΤΩΠΟ ΤΟΥ ΚΕΛΥΦΟΥΣ ΠΑΧΟΥΣ $t = 2\text{mm}$ ΚΑΙ ΒΑΘΟΥΣ $h = 5\text{mm}$ (Dial5-1).

Το μοντέλο του δοκιμίου κυκλικής διατομής με μια εγκοπή στο πάνω μέτωπο του κελύφους, με πάχος $t=2\text{mm}$ και με βάθος $h=5\text{mm}$, παρουσιάζεται στην ακόλουθη εικόνα:



Σχ.1, Απεικόνιση πλέγματος στο LS-DYNA 3D, για κυκλικής διατομής δοκίμιο με μια εγκοπή στο πάνω μέτωπό του, με πάχος $t=2\text{mm}$ και με βάθος $h=5\text{mm}$.

Οι αντίστοιχες φάσεις προσομοίωσης της κατάρρευσης του δοκιμίου αυτού, που κατέγραψα με τη χρήση του LS-DYNA, παρουσιάζονται στις επόμενες σελίδες:



Η έναρξη της προσομοίωσης του μοντέλου μας στο Is-dyna.



1^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην φάση της προσομοίωσης με το Is-dyna. Ξεκίνημα σχηματισμού εκτατού λοβού στην περιοχή της οπής. Πάτημα της πρέσας στα 2 mm.



2^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA. Δημιουργία αρχικού εκτατού λοβού. Παρατηρούμε ότι το μοντέλο του LS-Dyna, αρχίζει να καταρρέει περίπου στην κάτω πλευρά της εγκοπής. Αυτό συμβαίνει λόγω του ότι η εγκοπή έχει

πολύ μικρές διαστάσεις οπότε δεν επηρεάζει την αρχική κατάρρευση του μοντέλου και είναι το σημείο όπου εκεί αναγνωρίζεται αρχικά από τον κώδικα η ανωμαλία στο δοκίμιο. Πάτημα της πρέσας στα 10 mm.



3η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το ls-dyna. Τελείωμα αρχικού εκτατού λοβού, και ξεκίνημα δημιουργίας επόμενου εκτατού λοβού σε αξονοσυμμετρική μορφή στο παράλληλο επίπεδο ως προς τον προηγούμενο λοβό. Πάτημα της πρέσας στα 19 mm.



4η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το ls-dyna. Συνέχεια δημιουργίας δεύτερου εκτατού λοβού στο παράλληλο επίπεδο προς τα κάτω, ως προς τον προηγούμενο λοβό. Η μορφή όπως . Πάτημα της πρέσας στα 25 mm.



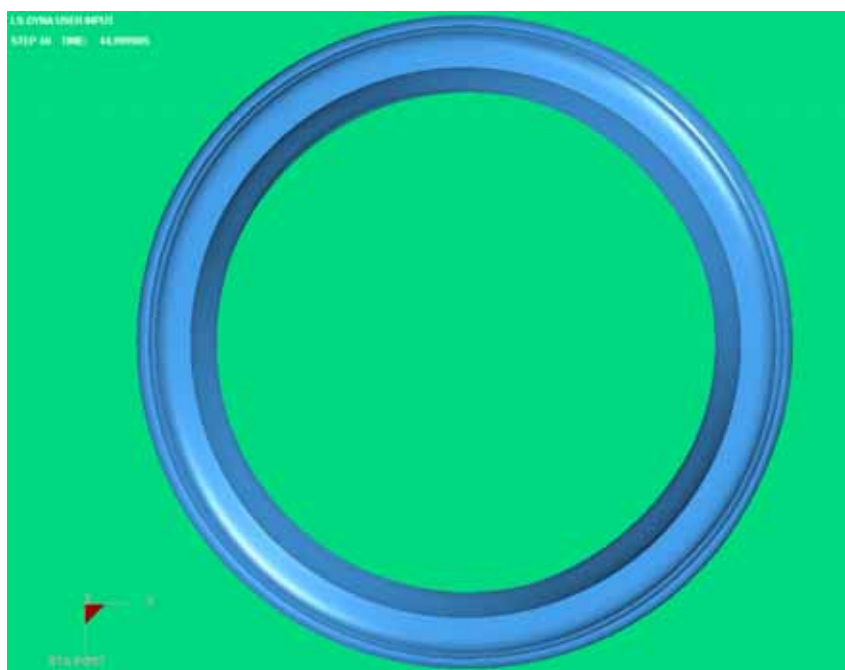
5η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA. Τελείωμα δεύτερου εκτατού λοβού, και αρχή δημιουργίας επόμενου πάλι εκτατού λοβού, στο επόμενο παράλληλο επίπεδο προς τα κάτω, ως προς τον προηγούμενο εκτατό λοβό. Πάτημα της πρέσας στα 34 mm.



6η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA. Συνέχιση επόμενου εκτατού λοβού σε επίπεδο παράλληλο ως προς τα προηγούμενα. Πάτημα της πρέσας στα 39 mm.



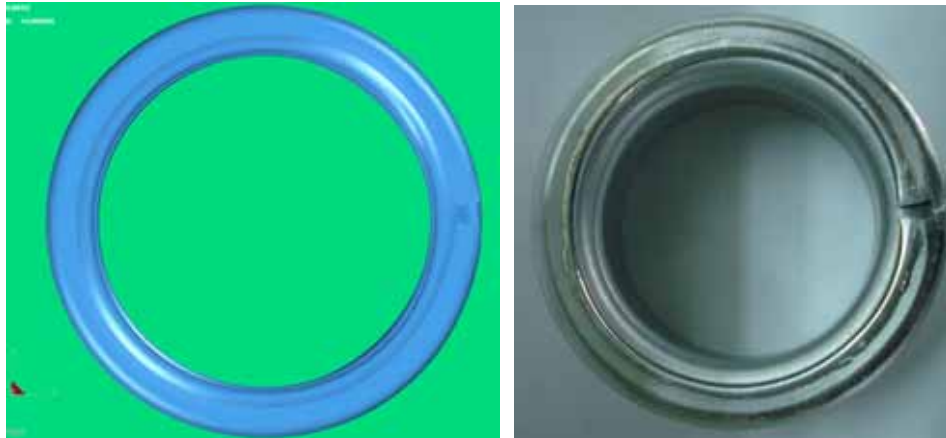
7η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA. Πλήρεις δημιουργία δύο εκτατών λοβών σε παράλληλα επίπεδα και ένας τρίτος λίγο πριν την τελική του μορφή. Το μοντέλο μας στο LS-Dyna με το αντίστοιχο δοκίμιο του πειράματος δεν παρουσιάζει διαφορές στην δημιουργία των λοβών κατά την κατάρρευσή του. Πάτημα της πρέσας στα 45mm.



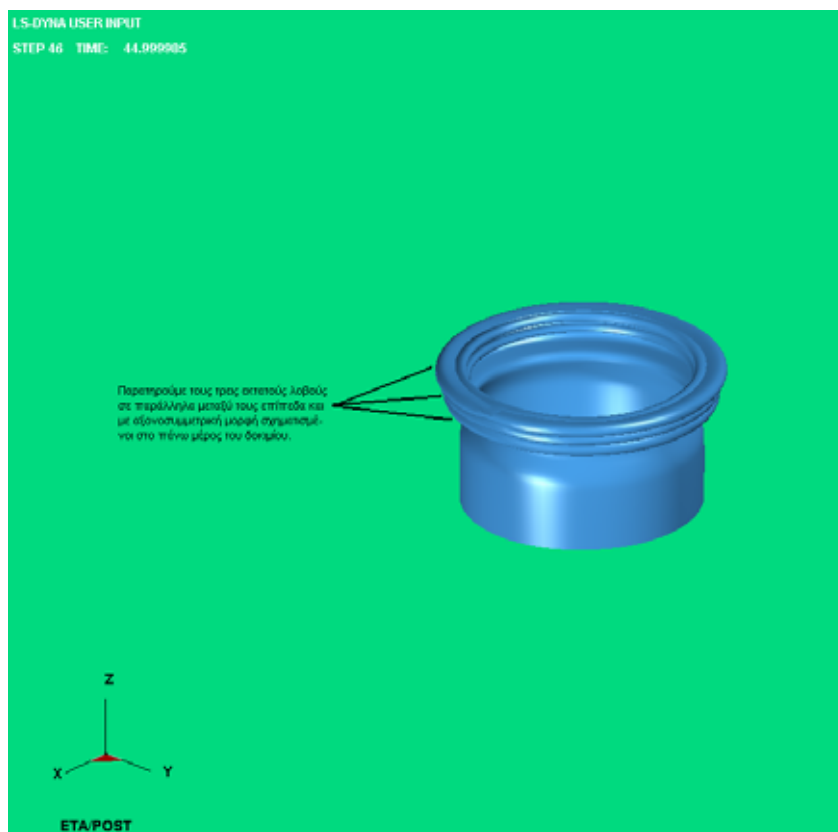
Τελική μορφή δοκιμίου αμέσως μετά το τέλος της διαδικασίας αξονικής κατάρρευση στην προσομοίωση από το LS-DYNA. Παρατηρούμε τρεις εκτατούς λοβούς οι οποίοι βρίσκονται σε παράλληλα επίπεδα στραμμένα μεταξύ τους. Ο μηχανισμός κατάρρευσης του δοκιμίου Dial5-1 έχει αξονοσυμμετρική μορφή. Τελικό πάτημα της πρέσας στα 45.0 mm.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο

Σε αντιστραμμένη όψη έχουμε:



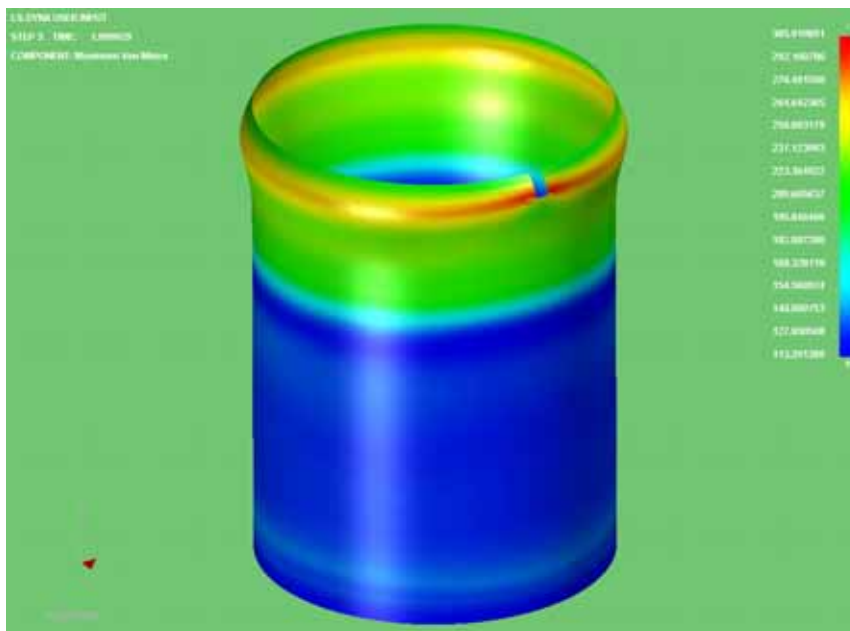
Ακόμα, σε τρισδιάστατη ισομετρική όψη, παρουσιάζεται παρακάτω η τελική μορφή του δοκιμίου όπως προσομοιάστηκε στο LS-DYNA, με κατάρρευση του δοκιμίου έως τα 45.0 mm:



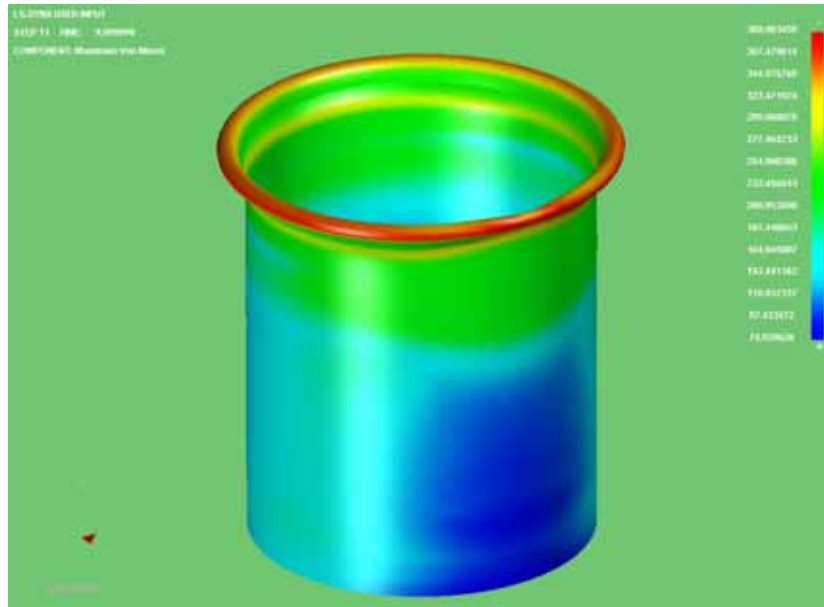
Ακολουθούν εικόνες από την κατανομή των τάσεων σε όλη την επιφάνεια του δοκιμίου κατά τα διάφορα στάδια της κατάρρευσής του:

Επιλέγοντας στον ETA POSTGL:

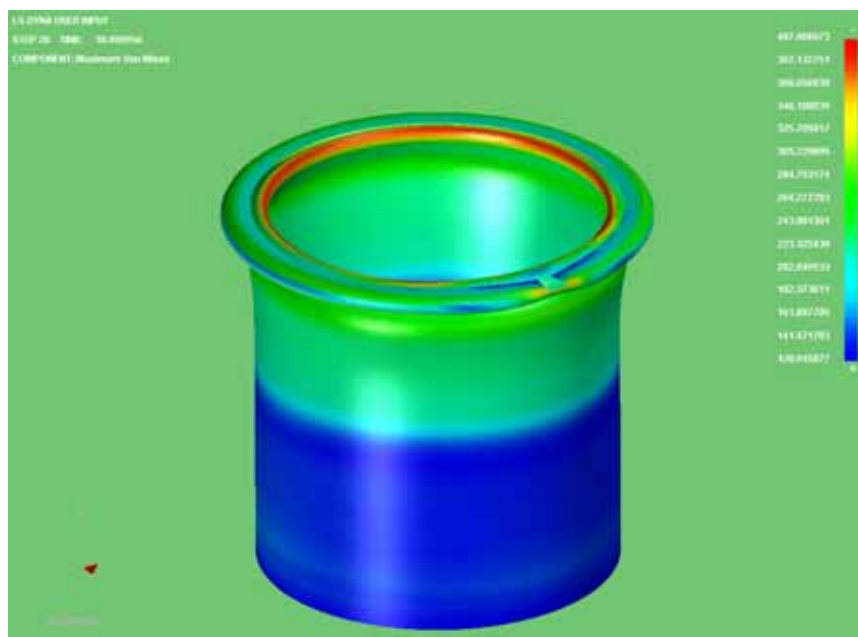
CONTOUR -> STRESS/STRAIN -> MAXIMUM VON MISES STRESSES:



Κατανομή των τάσεων στα 2mm. Έχουμε εμφάνιση τάσεων στην περιφερειακή περιοχή σχηματισμού του λοβού του δοκιμίου, που όπως αναφέρθηκε για την θεωρία των τάσεων γύρω από εγκοπές, βλέπουμε ότι γύρω από την εγκοπή του δοκιμίου και κατά την οριζόντια διεύθυνση που είναι κάθετη στη διεύθυνση της αξονικής θλίψης του δοκιμίου, έχουν αναπτυχθεί υψηλές τάσεις της τάξεως των $\sigma = 305,9 \text{ MPa}$. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή 305,9 MPa, η οποία είναι μεγαλύτερη από το όριο αντοχής του υλικού ($\sigma_A=240\text{MPa}$), οπότε ξεκινάει η πλαστική παραμόρφωση του δοκιμίου, με εμφάνιση μονίμων παραμορφώσεων σε αυτό.

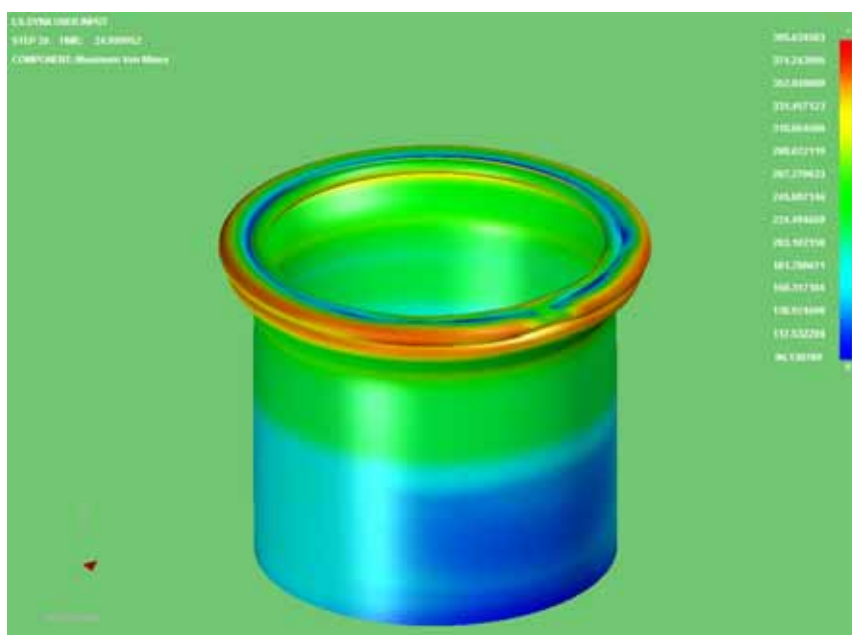


Κατανομή των τάσεων στα 10mm. Συνεχίζουμε να έχουμε εμφάνιση τάσεων στην περιφερειακή περιοχή σχηματισμού του λοβού του δοκιμίου, βλέπουμε ότι γύρω από την εγκοπή του δοκιμίου και κατά την οριζόντια διεύθυνση που είναι κάθετη στη διεύθυνση της αξονικής θλίψης του δοκιμίου, έχουν αναπτυχθεί υψηλές τάσεις της τάξεως των. Το κάτω μέρος του δοκιμίου έχει μικρότερες τάσεις από ότι συμβαίνει στο πάνω μέρος του δοκιμίου. Η μέγιστη τάση είναι ίση με $\sigma=309,9\text{MPa}$ η οποία είναι μεγαλύτερη από το όριο αντοχής του υλικού ($\sigma_A=240\text{MPa}$), την οποία συναντάμε περιμετρικά στο πάνω μέρος του δοκιμίου και σε μια μικρή περιοχή γύρω από την περιφέρεια της εγκοπής όπου έχουμε αναδίπλωση του υλικού για την δημιουργία του εκτατού λοβού.

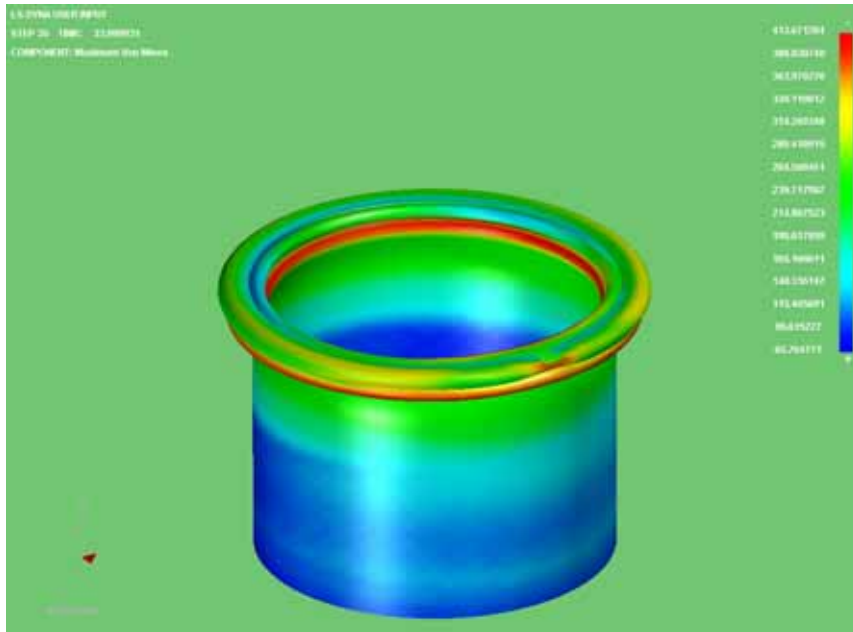


ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο

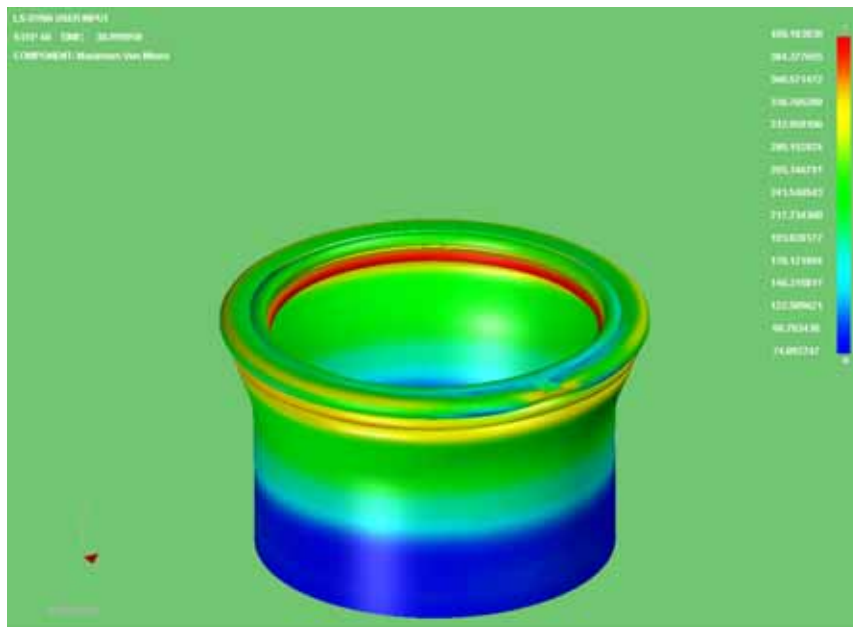
Κατανομή των τάσεων στο 19 mm. Έχουμε μέγιστες τάσεις στην περιοχή της κοιλότητας, η οποία έρχεται σε επαφή με την πάνω πλάκα και είναι αιτία για το ξεκίνη δημιουργίας του δεύτερου λοβού. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή 407,6 MPa. Στο υπόλοιπο μέρος του μοντέλου μας εξακολουθούμε να έχουμε εμφάνιση μικρότερων τάσεων στο κάτω μισό του δοκιμίου μας.



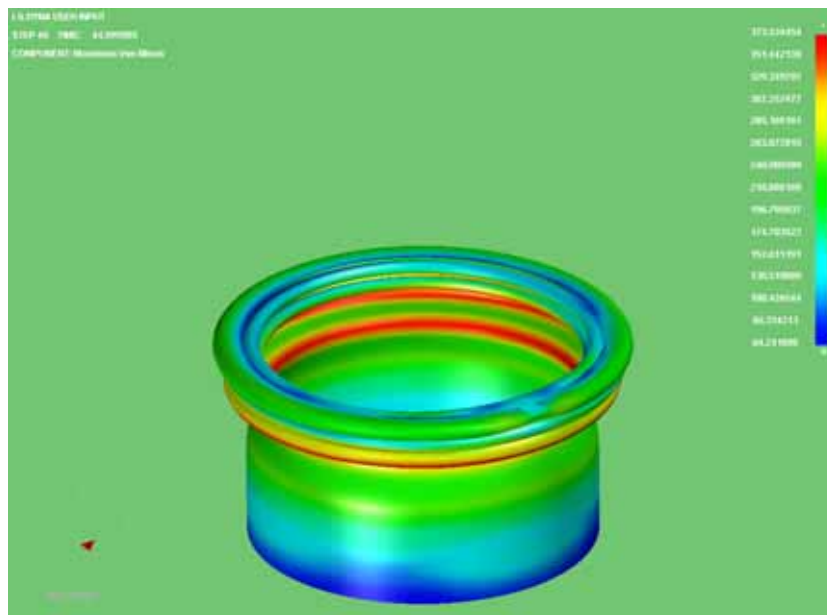
Κατανομή των τάσεων στα 25 mm. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή 395,6 MPa. Ο δεύτερος εκτατός λοβός συνεχίζει προς την ολοκλήρωση σε επίπεδο παράλληλο προς τα κάτω, ως προς το προηγούμενο επίπεδο του αρχικού λοβού. Τάσεις σημαντικής τιμής 260 MPa εμφανίζονται τώρα σχεδόν σε όλο το πάνω 1/2 του δοκιμίου. Στο κάτω 1/2 μέρος του δοκιμίου σημειώνονται μικρότερες τάσεις που φαίνονται και στο σχήμα, με τον αριθμό 180MPa.



Κατανομή των τάσεων στο 34 mm. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη εμφανιζόμενη τιμή 413,7 MPa. Έχουν σχηματιστεί και οι δύο εκατοί λοβοί σε παράλληλο επίπεδο και ήδη δημιουργείται και ο τρίτος εκατοός λοβός. Στο κάτω μέρος του δοκιμίου έχουμε μικρότερες τάσεις $\sigma = 140$ MPa.

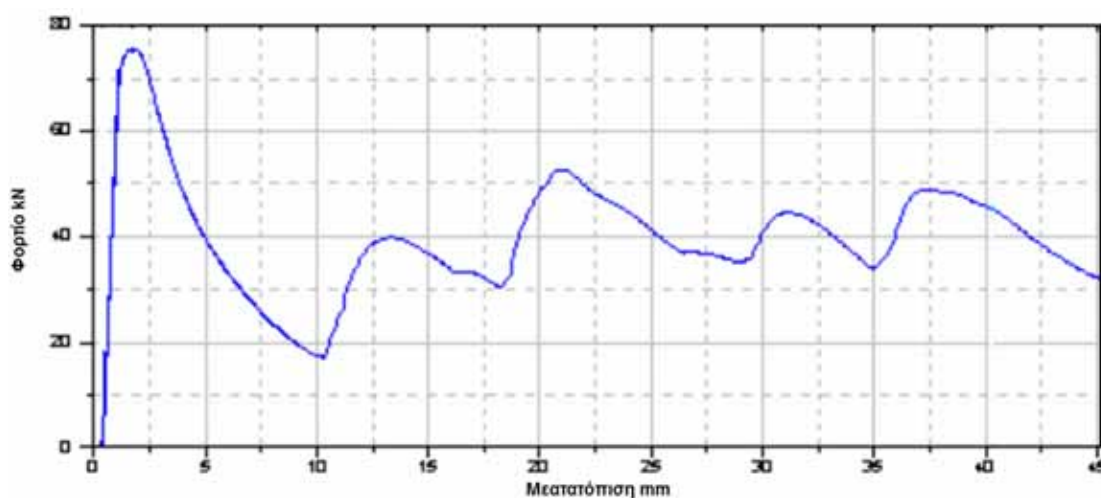


Κατανομή των τάσεων στο 39 mm. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη εμφανιζόμενη τιμή 408,2 MPa. Έχουν σχηματιστεί και οι δυο μη εκατοί λοβοί, και συνεχίζει να δημιουργείται ο τρίτος εκατοός λοβός σε παράλληλο επίπεδο σε σχέση με τον προηγούμενο λοβό. Στο κάτω μέρος του δοκιμίου έχουμε μικρότερες τάσεις $\sigma = 180$ MPa.



Κατανομή των τάσεων στο 45 mm. Οι τελικές τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη εμφανιζόμενη τιμή 373,5 MPa. Η κατάρρευση του δοκιμίου έχει πλέον ολοκληρωθεί, και οι τρεις τελικοί εκτατοί λοβοί έχουν σχηματιστεί πλήρως σε παράλληλα επίπεδα και σε αξονοσυμμετρική μορφή.

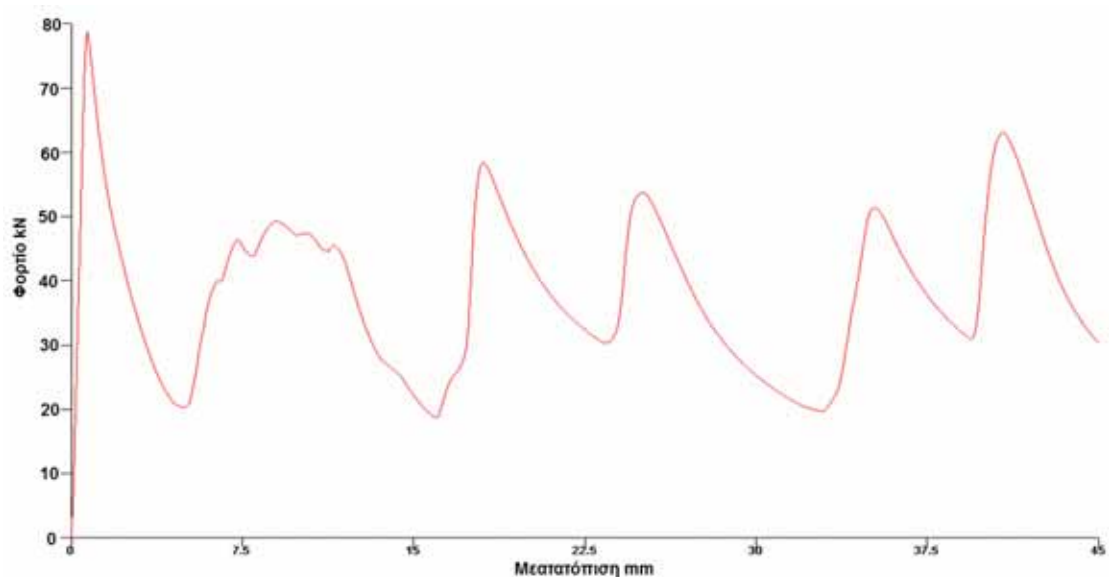
Ακόμα, το διάγραμμα των δυνάμεων μετά την επεξεργασία των στοιχείων που πάρθηκαν από την πρέσσα, και με την χρήση του Excel, είναι αυτό που παρουσιάζεται στην επόμενη σελίδα, με τον κατακόρυφο άξονα να δείχνει τις **δυνάμεις σε kN**, και με τον οριζόντιο άξονα να δείχνει τις **μετατοπίσεις** (βραχύνσεις του θλιβόμενου δοκιμίου) **σε mm**:



Το διάγραμμα των δυνάμεων μετά την επεξεργασία των στοιχείων που πάρθηκαν από την προσομοίωση στο Is-dyna, και με την χρήση του Excel, είναι αυτό που παρουσιάζεται στο επόμενο διάγραμμα, με τον κατακόρυφο άξονα να δείχνει τις

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο

δυνάμεις σε kN, και με τον οριζόντιο άξονα να δείχνει τις μετατοπίσεις (βραχύνσεις του θλιβόμενου δοκιμίου) σε mm:



- Από τα στοιχεία που πάρθηκαν από την θλίψη στην πρέσα, βρέθηκε:

Διαδρομή εμβόλου: **45.0 mm**

Μέγιστο φορτίο $P_{max}=76.46 \text{ kN}$ στα 1.93mm

Μέσο φορτίο $\bar{P} = 40 \text{ kN}$

Η ομοιομορφία φορτίου $P_{max}/P_{mean} = 1.91$

Ενέργεια παραμόρφωσης $E= 1705 \text{ kN mm}$

- Από τα στοιχεία που πάρθηκαν από την προσομοίωση στο LS-DYNA, βρέθηκε:

Διαδρομή εμβόλου: **45.0 mm**

Το μέγιστο φορτίο $P_{max} = 79.9 \text{ kN}$,

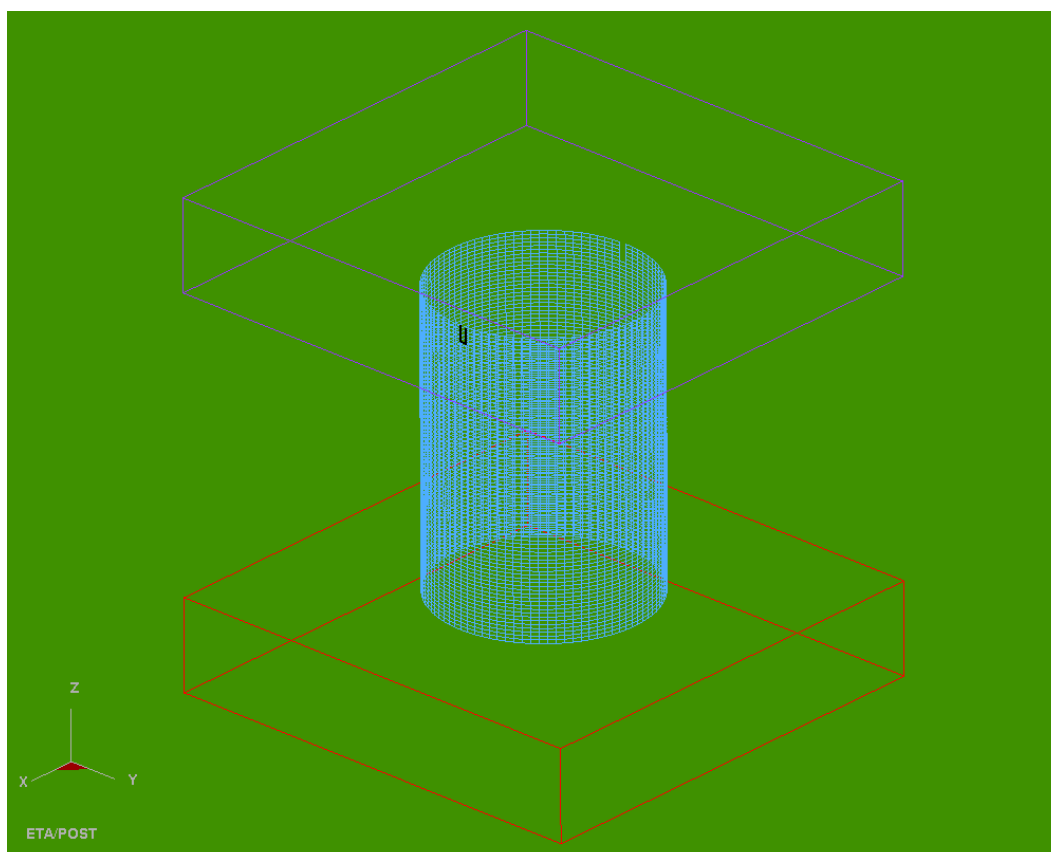
Το μέσο φορτίο $P_{mean} = 38.1 \text{ kN}$,

Η ομοιομορφία φορτίου $P_{max}/P_{mean} = 2.10$

Η συνολική ενέργεια που δαπανήθηκε για την αξονική κατάρρευση του δοκιμίου είναι $E = 1714.5 \text{ kN mm}$

ΕΝΟΤΗΤΑ 5-3 : ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ ΔΥΟ(2) ΕΓΚΟΠΕΣ ΣΤΟ ΠΑΝΩ ΜΕΤΩΠΟ ΤΟΥ ΚΕΛΥΦΟΥΣ ΠΑΧΟΥΣ $t = 2\text{mm}$ ΚΑΙ ΒΑΘΟΥΣ $h = 5\text{mm}$ (Dial5-2).

Το μοντέλο του δοκιμίου κυκλικής διατομής με δύο(2) εγκοπές στο πάνω μέτωπο του κελύφους πάχους $t = 2\text{mm}$ και βάθους $h = 5\text{mm}$, παρουσιάζεται στην ακόλουθη εικόνα:



Σχ.1. Απεικόνιση πλέγματος στο LS-DYNA 3D, για κυκλικής διατομής δοκίμιο με δύο(2) εγκοπές στο πάνω μέτωπο του κελύφους πάχους $t = 2\text{mm}$ και βάθους $h = 5\text{mm}$.

Οι αντίστοιχες φάσεις προσομοίωσης της κατάρρευσης του δοκιμίου αυτού, που κατέγραφα με τη χρήση του LS-DYNA, παρουσιάζονται στις επόμενες σελίδες:



Αρχική τοποθέτηση του δοκιμίου στην πρέσα και έναρξη της προσομοίωσης του μοντέλου μας στο LS-DYNA.



1^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA. Δημιουργία αρχικού εκτατού λοβού. Παρατηρούμε ότι στο μοντέλο του ls-dyna, η αρχική κατάρρευση σημειώνεται στην κάτω πλευρά των εγχοπών όπως συμβαίνει και στο πραγματικό μας δοκίμιο . Πάτημα της πρέσας στα 2 mm.



2^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA. Η δημιουργία του πρώτου εκτατού λοβού συνεχίζεται. Η περιοχή γύρω από τις εγχοπές παρατηρούμε ότι παραμένει ανεπηρέαστη. Πάτημα της πρέσας στα 11 mm.



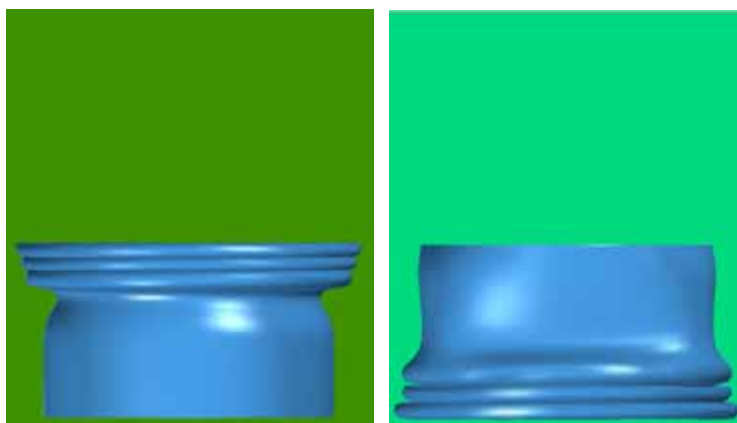
3^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA. Στο δοκίμιο του Is-dyna έχουμε συνέχιση της αξονοσυμμετρικής παραμόρφωσης (concertina) του υλικού για τελείωμα του πρώτου εκτατού λοβού και αρχή δημιουργίας του δεύτερου εκτατού λοβού. Η διαδικασία κατάρρευσης παραμένει ίδια με αυτή του πειράματος. Πάτημα της πρέσας στα 19 mm.



4^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA. Στο δοκίμιο του Is-dyna βλέπουμε δύο εκτατούς λοβούς σε αξονοσυμμετρική μορφή και σε παράλληλα επίπεδα μεταξύ τους. Οι εγχοπές φαίνεται να μην έχουν επηρεάσει την κατάρρευση του δοκιμίου μας. Πάτημα της πρέσας στα 26 mm.



5^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA. Στο δοκίμιο του ls-dyna έχουν ολοκληρωθεί πλήρως οι δύο εκτατοί λοβοί και ο τρίτος (εκτατός λοβός επίσης) αρχίζει να δημιουργείται σε παράλληλο επίπεδο προς τα κάτω. Πάτημα της πρέσας στα 35 mm.

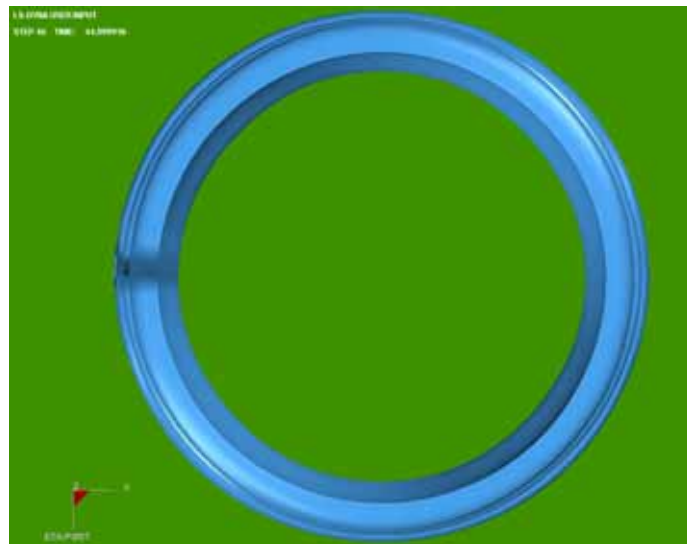


Δοκίμιο με εγκοπές (αριστερά) και χωρίς εγκοπές (δεξιά)

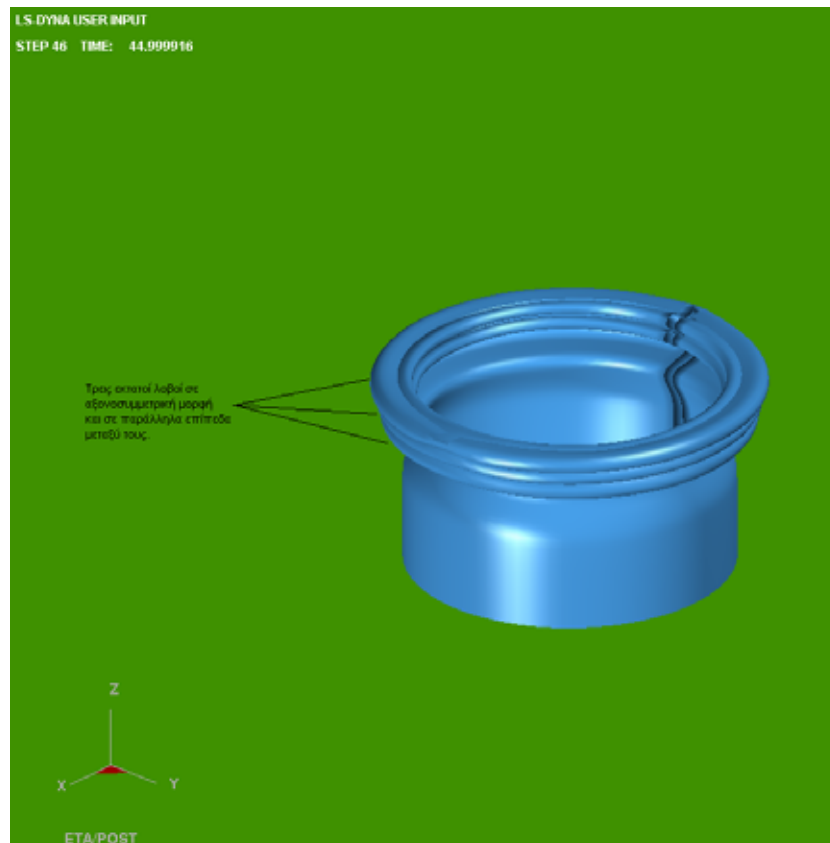
Τελική μορφή δοκιμίου αμέσως μετά το τέλος της διαδικασίας αξονικής κατάρρευσης στο μοντέλο προσομοίωσης του LS-Dyna. Είναι και ο τρίτος εκτατός λοβός σχεδόν ολοκληρωμένος. Οι λοβοί είναι σε αξονοσυμμετρική μορφή και σε παράλληλα επίπεδα ο ένας με τον άλλον. Στην αντιπαράθεση των φωτογραφιών που γίνεται το μόνο που έχει αλλάξει είναι ότι το δοκίμιο με τις εγκοπές έχει τους λοβούς στο πάνω μέτωπο το οποίο έρχεται σε επαφή με την κινούμενη πλάκα. Πάτημα της πρέσας στα 45 mm.



Τελική μορφή δοκιμίου αμέσως μετά το τέλος της προσομοίωσης από το LS-DYNA κατά την κάτοψη. Παρατηρούμε τους τρεις εκτατούς λοβούς στο πάνω μέρος του δοκιμίου. Τελικό πάτημα της πρέσας στα 45 mm. Σε αντιστραμμένη όψη έχουμε:



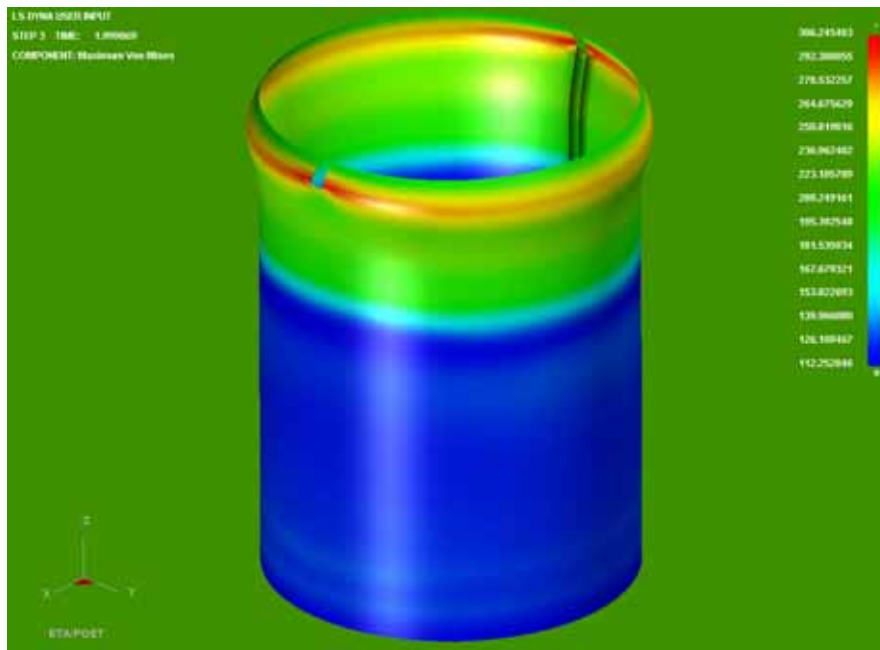
Ακόμα, σε τρισδιάστατη ισομετρική όψη, παρουσιάζεται παρακάτω η τελική μορφή του δοκιμίου όπως προσομοιώθηκε στο LS-DYNA, με κατάρρευση του δοκιμίου έως τα 45 mm:



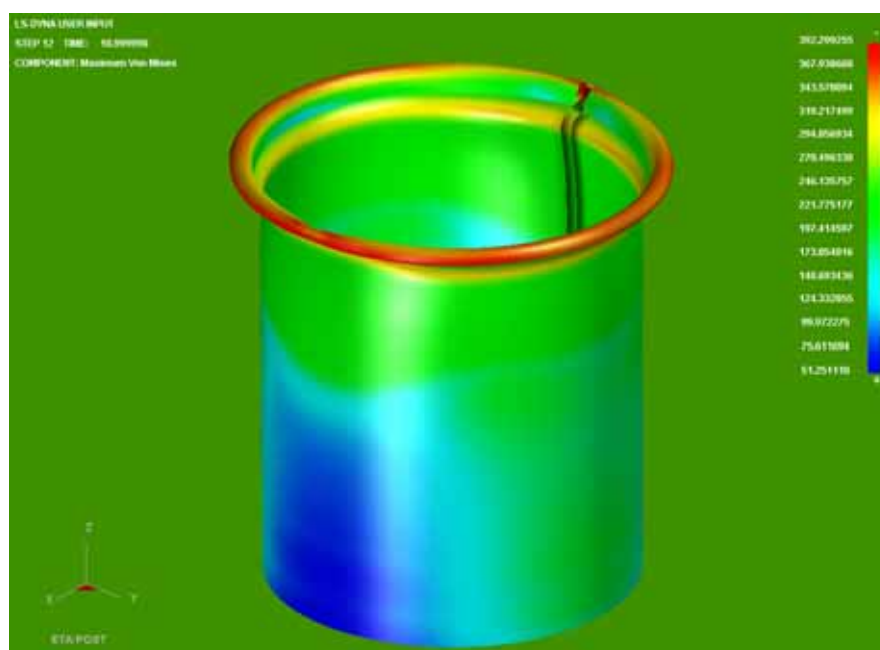
Ακολουθούν εικόνες από την κατανομή των τάσεων σε όλη την επιφάνεια του δοκιμίου κατά τα διάφορα στάδια της κατάρρευσής του:

Επιλέγοντας στον ETA POSTGL:

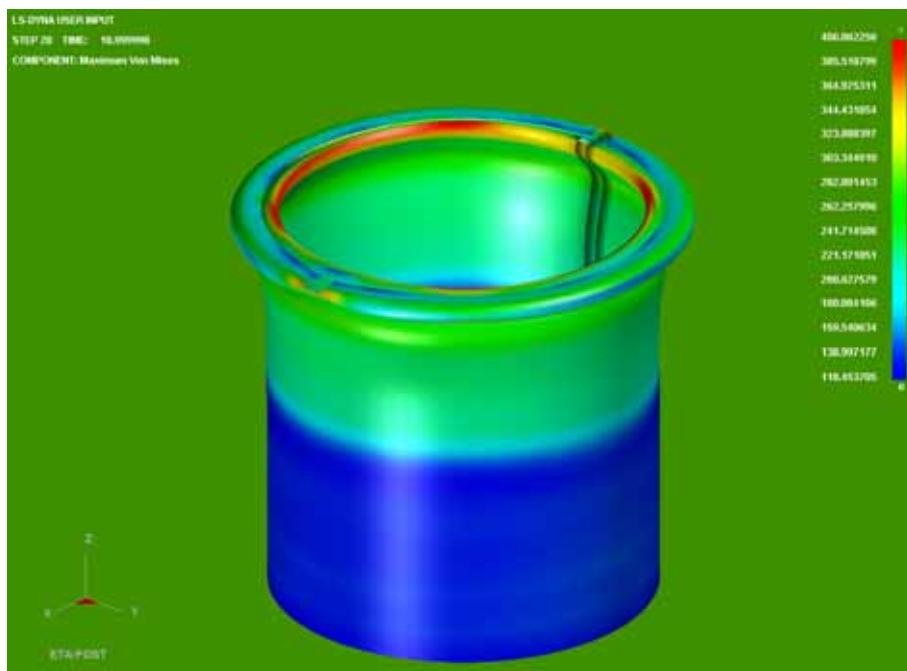
CONTOUR -> STRESS/STRAIN -> MAXIMUM VON MISES STRESSES:



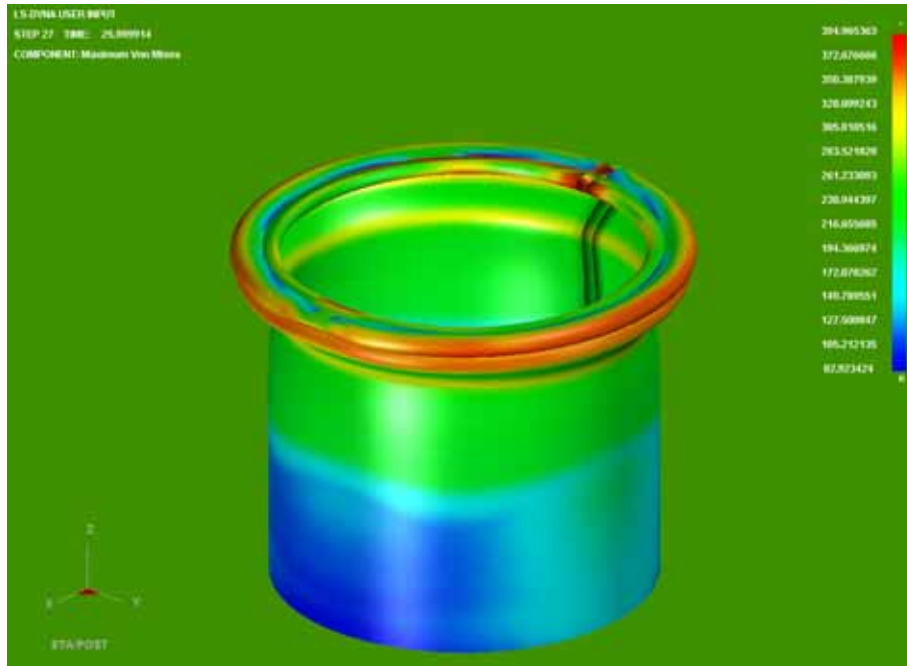
Κατανομή των τάσεων στα 2mm. Έχουμε εμφάνιση τάσεων στην περιοχή γύρω από τις εγκοπές του δοκιμίου, που όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 2, για την θεωρία των τάσεων γύρω από εγκοπές, βλέπουμε ότι γύρω από το οριζόντιο μεσοεπίπεδο των εγκοπών του δοκιμίου, έχουμε τάσεις ίσες με $\sigma = 306 \text{ MPa}$, που είναι μεγαλύτερες από το όριο διαρροής του υλικού ($\sigma_A = 220 \text{ MPa}$), οπότε ξεκινάει η πλαστική παραμόρφωση του δοκιμίου, με εμφάνιση μονίμων παραμορφώσεων σε αυτό.



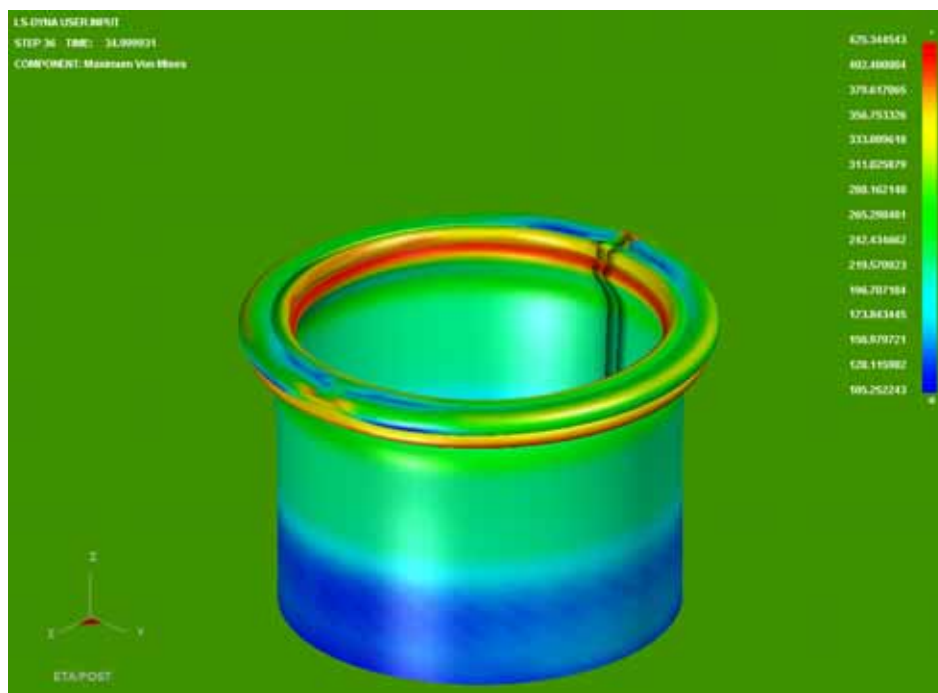
Κατανομή των τάσεων στο 11 mm. Έχουμε μέγιστες τάσεις στην περιοχή που δημιουργείται ο λοβός και έρχεται σε επαφή με το έμβολο της πρέσσας. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με **μέγιστη τιμή 392,3 MPa**, που βλέπουμε ότι είναι μεγαλύτερη τιμή από την τάση διαρροής του δοκιμίου ($\sigma_{\Delta} = 220 \text{ MPa}$), οπότε διαρρέει το υλικό στη θέση που παρουσιάζεται στο σχήμα και σχηματίζεται ο πρώτος εκτατός λοβός στο επίπεδο αυτό, και συνεχίζεται η κατάρρευση του δοκιμίου από την θέση αυτή και με διεύθυνση προς τα κάτω.



Κατανομή των τάσεων στα 19 mm. Έχουμε μέγιστες τάσεις στην περιοχή σχηματισμού του πρώτου λοβού στην περιοχή της εσωτερικής αναδίπλωσης, η οποία έρχεται σε επαφή με την άνω πλάκα. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με **μέγιστη τιμή 406,1MPa**. Στο υπόλοιπο μέρος του μοντέλου μας εξακολουθούμε να έχουμε εμφάνιση μικρότερων τάσεων στο κάτω μισό του δοκιμίου μας στα **120 MPa**.

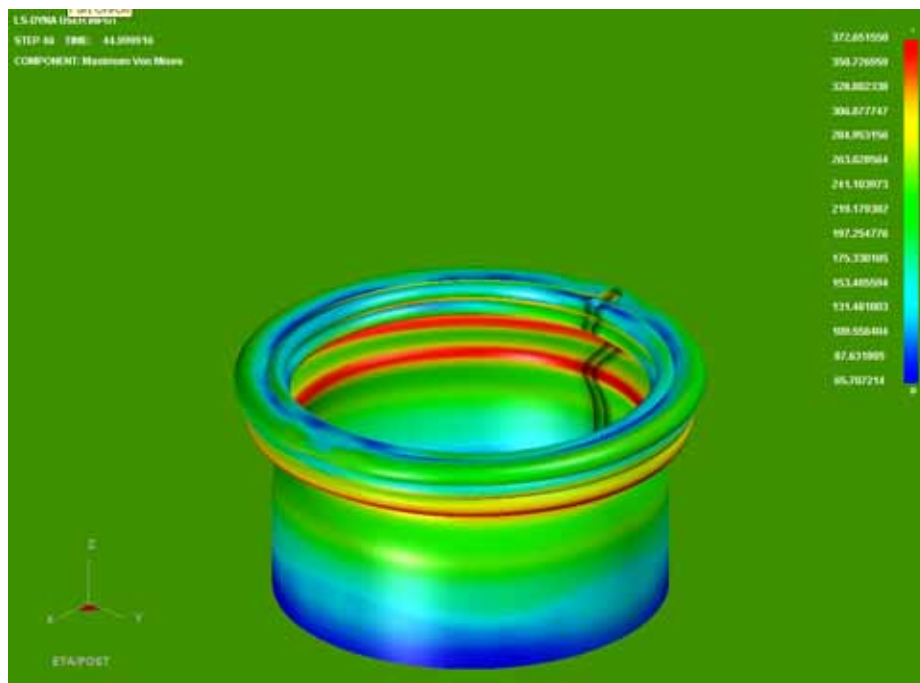


Κατανομή των τάσεων στα 26 mm. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με **μέγιστη τιμή 395 MPa**. Ο πρώτος εκτατός λοβός έχει σχηματιστεί πλήρως, και συνεχίζεται ο σχηματισμός του δεύτερου εκτατού λοβού σε επίπεδο παράλληλο προς τα κάτω, ως προς το προηγούμενο επίπεδο του αρχικού λοβού. Τάσεις σημαντικής τιμής της τάξης των **560 Mpa** εμφανίζονται τώρα στην περιοχή που ξεκινάει ο τρίτος λοβός. Στο κάτω μισό του δοκιμίου και στην κάτω διατομή του δοκιμίου σημειώνονται μικρότερες τάσεις ίσες με **150 Mpa** που φαίνονται και στο σχήμα.



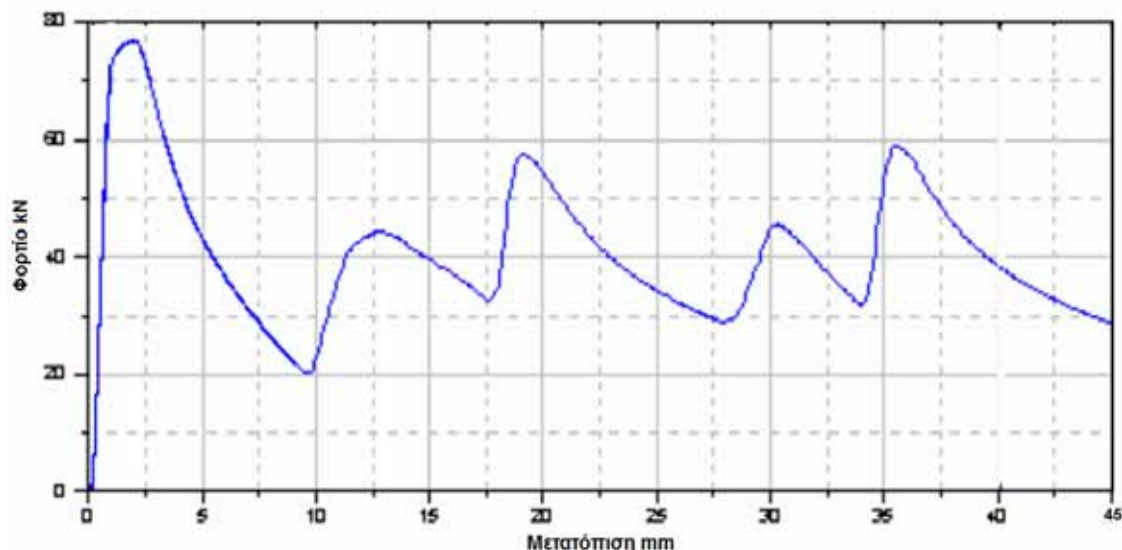
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο

Κατανομή των τάσεων στα 35 mm. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με **μέγιστη τιμή 425,3 MPa**. Στο κάτω χείλος του δοκιμίου έχουμε την ελάχιστη τιμή των τάσεων που φαίνεται στην εικόνα με μπλέ χρώμα. Μέγιστες τάσεις σημειώνονται στα σημεία αναδίπλωσης του υλικού.

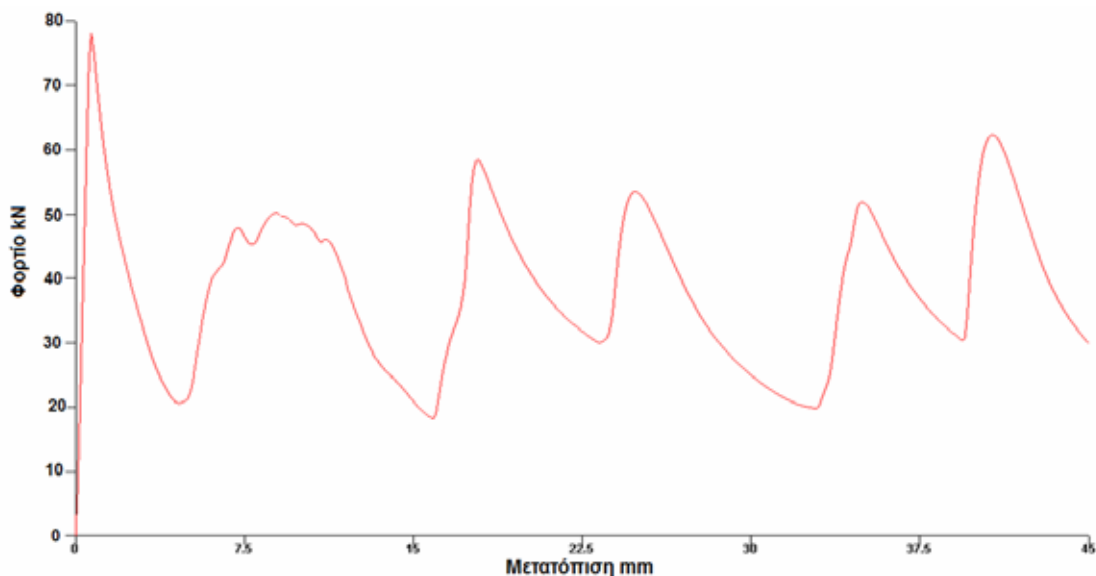


Κατανομή των τάσεων στα 45 mm. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη εμφανιζόμενη τιμή **372,7 MPa**. Έχει σχηματιστεί και ο τρίτος έκτατος λοβός. Στα κάτω χείλη του δοκιμίου έχουμε μικρότερες τάσεις $\sigma = 100 \text{ MPa}$.

Το διάγραμμα των δυνάμεων μετά την επεξεργασία των στοιχείων που πάρθηκαν από την πρέσσα, και με την χρήση του Excel, είναι αυτό που παρουσιάζεται στην επόμενη σελίδα, με τον κατακόρυφο άξονα να δείχνει τις **δυνάμεις σε kN**, και με τον οριζόντιο άξονα να δείχνει τις **μετατοπίσεις** (βραχύνσεις του θλιβόμενου δοκιμίου) **σε mm**:



Το διάγραμμα των δυνάμεων μετά την επεξεργασία των στοιχείων που πάρθηκαν από την προσομοίωση στο Is-dyna, και με την χρήση του Excel, είναι αυτό που παρουσιάζεται στο επόμενο διάγραμμα, με τον κατακόρυφο άξονα να δείχνει τις **δυνάμεις σε kN**, και με τον οριζόντιο άξονα να δείχνει τις **μετατοπίσεις** (βραχύνσεις του θλιβόμενου δοκιμίου) **σε mm**:



➤ Από τα στοιχεία που πάρθηκαν από την πρέσα, βρέθηκε:

Διαδρομή εμβόλου: 45.0mm

Το μέγιστο φορτίο $P_{max} = 76.67 \text{ kN}$,

Το μέσο φορτίο $P_{mean} = 39 \text{ kN}$,

Η ομοιομορφία φορτίου $P_{max}/P_{mean} = 1.97$

Η συνολική ενέργεια που δαπανήθηκε για την αξονική κατάρρευση του δοκιμίου είναι $E = 1669 \text{ kN mm}$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο

- Από τα στοιχεία που πάρθηκαν από την προσομοίωση στο LS-DYNA, βρέθηκε:

Διαδρομή εμβόλου: 45.0 mm

Το μέγιστο φορτίο $P_{max} = 79 \text{ kN}$,

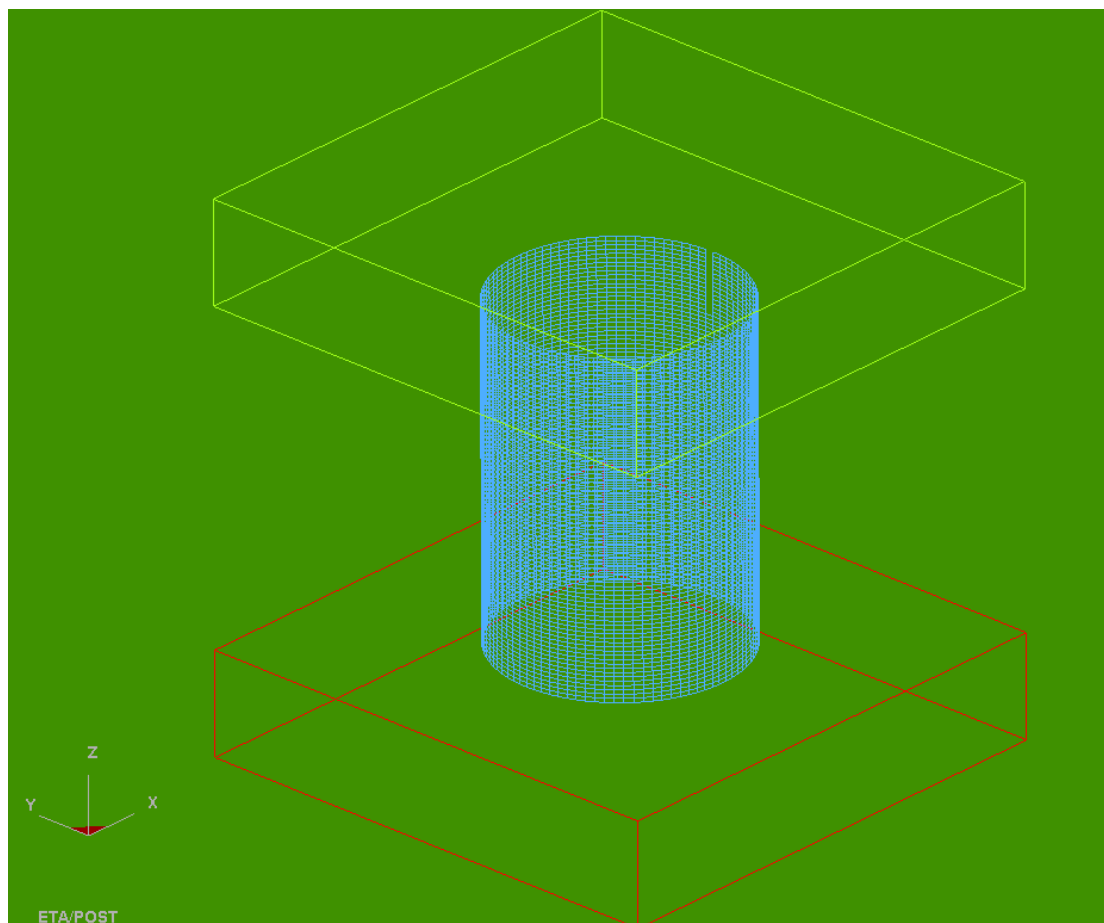
Το μέσο φορτίο $P_{mean} = 38.4 \text{ kN}$,

Η ομοιομορφία φορτίου $P_{max}/P_{mean} = 2.06$

Η συνολική ενέργεια που δαπανήθηκε για την αξονική κατάρρευση του δοκιμίου είναι $E = 1728 \text{ kN mm}$

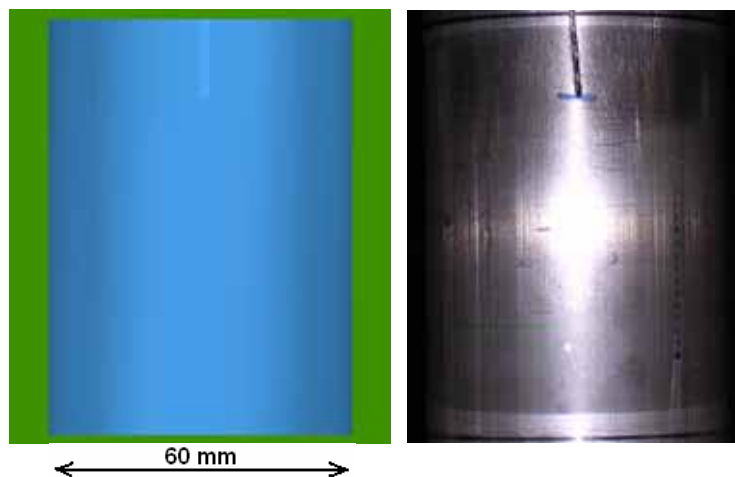
ΕΝΟΤΗΤΑ 5-4 : ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΙΑΣ(1) ΕΓΚΟΠΗΣ ΣΤΟ ΠΑΝΩ ΜΕΤΩΠΟ ΤΟΥ ΚΕΛΥΦΟΥΣ ΠΑΧΟΥΣ $t = 2\text{mm}$ ΚΑΙ ΒΑΘΟΥΣ $h = 15\text{mm}$ (Dial15-1)

Το μοντέλο του δοκιμίου κυκλικής διατομής με μια εγκοπή στο πάνω μέτωπο του κελύφους με πάχος $t=2\text{mm}$ και βάθος $h=15\text{mm}$, παρουσιάζεται στην ακόλουθη εικόνα. Εδώ αυξήσαμε το βάθος εγκοπής, αφού είδαμε ότι οι προηγούμενες διαστάσεις των εγκοπών δεν επηρέασαν την κατάρρευση του δοκιμίου:



Σχ.1, Απεικόνιση πλέγματος στο LS-DYNA 3D, για κυκλικής διατομής δοκίμιο με μια εγκοπή στο πάνω μέτωπο του κελύφους με πάχος $t=2\text{mm}$ και βάθος $h=15\text{mm}$.

Οι αντίστοιχες φάσεις προσομοίωσης της κατάρρευσης του δοκιμίου αυτού, που κατέγραψα με τη χρήση του LS-DYNA, σε σύγκριση με τις αντίστοιχες του πειράματος με την χρήση πρέσας Instron, παρουσιάζονται στις επόμενες σελίδες:



Αρχική τοποθέτηση του δοκιμίου στην πρέσα, και έναρξη της διαδικασίας αξονικής θλίψης του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά). Η έναρξη της προσομοίωσης του μοντέλου μας στο LS-DYNA (αριστερά).



1^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Δημιουργία αρχικού εκτατού λοβού. Παρατηρούμε ότι το πραγματικό δοκίμιο στην πρέσα, αρχίζει να καταρρέει στο μισό του ύψους της κάθετης πλευράς της εγκοπής, όπως επίσης και στο μοντέλο του LS-DYNA. Πάτημα της πρέσας στα 4mm.



2η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Συνέχιση αρχικού σχεδόν εκτατού λοβού στο πάνω μέρος του δοκιμίου και σκίσιμο του δοκιμίου κατά μήκος της εγκοπής. Το μοντέλο μας στο LS-Dyna δεν σκίζεται γιατί οι συνθήκες μας στη μοντελοποίηση είναι ιδανικές. Πάτημα της πρέσας στα 12mm.



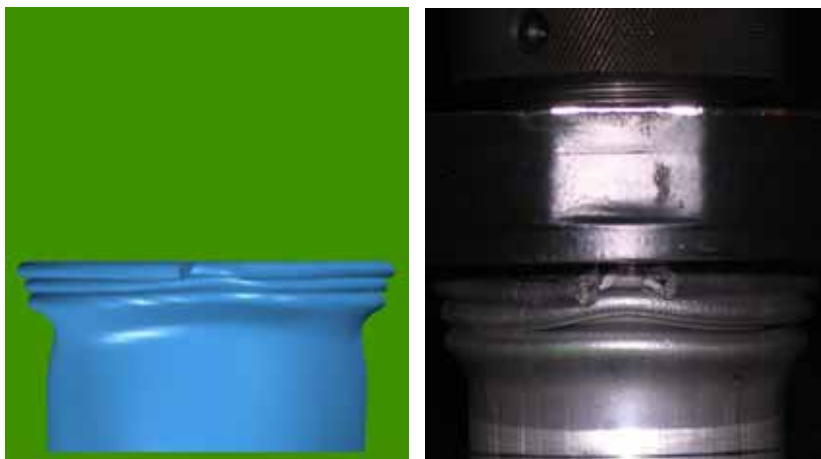
3η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερά εικόνα). Ολοκλήρωση του πρώτου εκτατού λοβού και αρχή δημιουργίας του δεύτερου. Όπως παρατηρούμε από τις φωτογραφίες στις προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης, και στο πραγματικό δοκίμο και στο μοντέλο του LS-Dyna, ο λοβός είναι συμμετρικός παρόλο που η εγκοπή μας είναι στην μία πλευρά του δοκιμίου. Πάτημα της πρέσας στα 11mm.



4η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερά εικόνα). Παρατηρούμε το δοκίμιο της προσομοίωσης πως ο δεύτερος λοβός επηρεάζεται περισσότερο απ' ότι στο πραγματικό. Παρόλα αυτά όμως οι διαφορές δεν είναι και τόσο σημαντικές. Η μορφή της κατάρρευσης επίσης προσεγγίζει λίγο τον λυγισμό κατά Euler. Πάτημα της πρέσας στα 30mm.



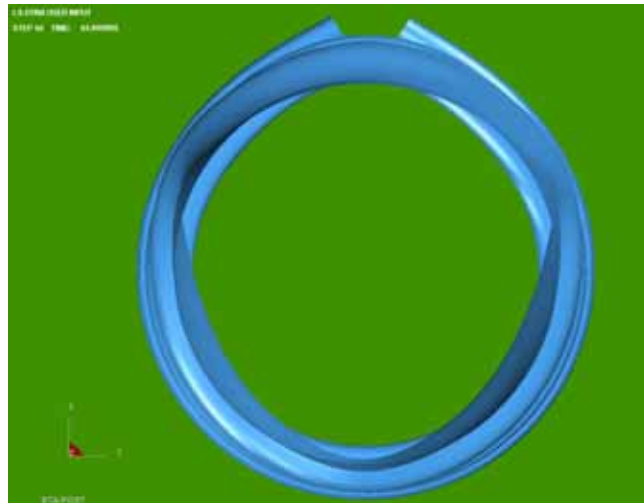
5η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερά εικόνα). Ο τρίτος λοβός έχει ξεκινήσει να δημιουργείται, ενώ έχουν ολοκληρωθεί οι δύο προηγούμενοι. Εδώ φαίνεται να έχει επηρεαστεί ο δεύτερος λοβός του πραγματικού δοκιμίου. Η καθυστέρηση αυτή οφείλεται στο ότι το πρόγραμμα του LS-Dyna αντιλαμβάνεται πιο γρήγορα την ατέλεια του υλικού. Πάτημα της πρέσας στα 39 mm.



6η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερά εικόνα). Έχουν ολοκληρωθεί τρεις σχεδόν λοβοί σε αξονοσυμμετρική μορφή και σε παράλληλα επίπεδα μεταξύ τους. Η εγκοπή στο δοκίμιο δεν φαίνεται να έχει επηρεάσει την κατάρρευση παρά μόνο στα σημεία που βρίσκονται στο κάθετο επίπεδο που βρίσκεται η εγκοπή να έχει χαθεί η παραλληλότητα των λοβών. Πάτημα της πρέσας στα 45 mm.

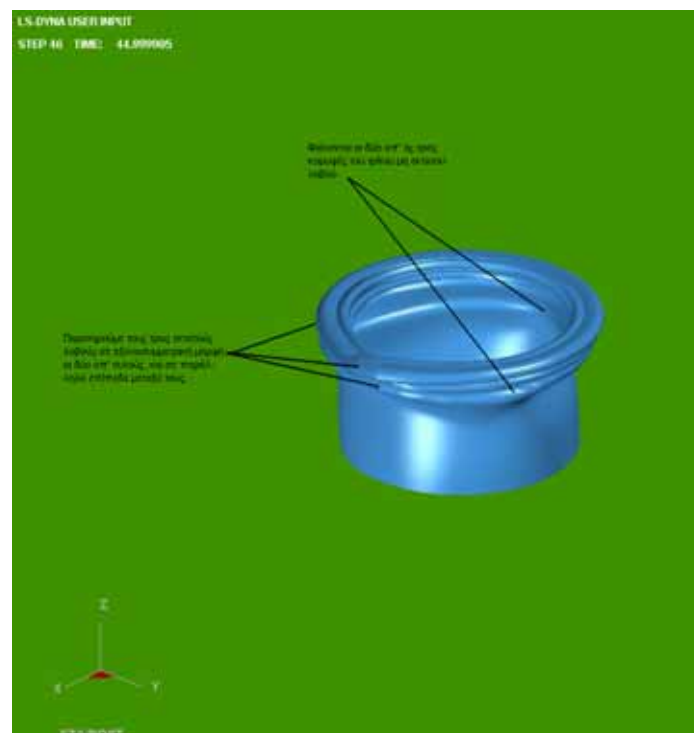


Τελική μορφή δοκιμίου αμέσως μετά το τέλος της διαδικασίας αξονικής κατάρρευσης στην πρέσα (δεξιά). Το ίδιο δοκίμιο μετά το τέλος της προσομοίωσης από το LS-DYNA, (αριστερά). Παρατηρούμε ότι έχει χαθεί λίγο η αξονοσυμμετρική μορφή του πρώτου λοβού γύρω από την περιοχή της εγκοπής, ενώ οι άλλοι δύο δεν έχουν επηρεαστεί. Τελικό πάτημα της πρέσας στα 45mm. Σε αντιστραμμένη όψη έχουμε:



Παρατηρούμε τον ελαφρύ σχηματισμό του τρίτου μη εκτατού 2D και 3D λοβού σε τριγωνική μορφή όμως το φαινόμενο δεν είναι έντονο. Παρόλα αυτά επειδή δεν έχει ολοκληρωθεί η δημιουργία του τρίτου λοβού μπορεί να φαινόνταν περισσότερο η τριγωνική μορφή του.

Ακόμα, σε τρισδιάστατη ισομετρική όψη, παρουσιάζεται παρακάτω η τελική μορφή του δοκιμίου όπως προσομοιώθηκε στο LS-DYNA, με κατάρρευση του δοκιμίου έως τα 45 mm:

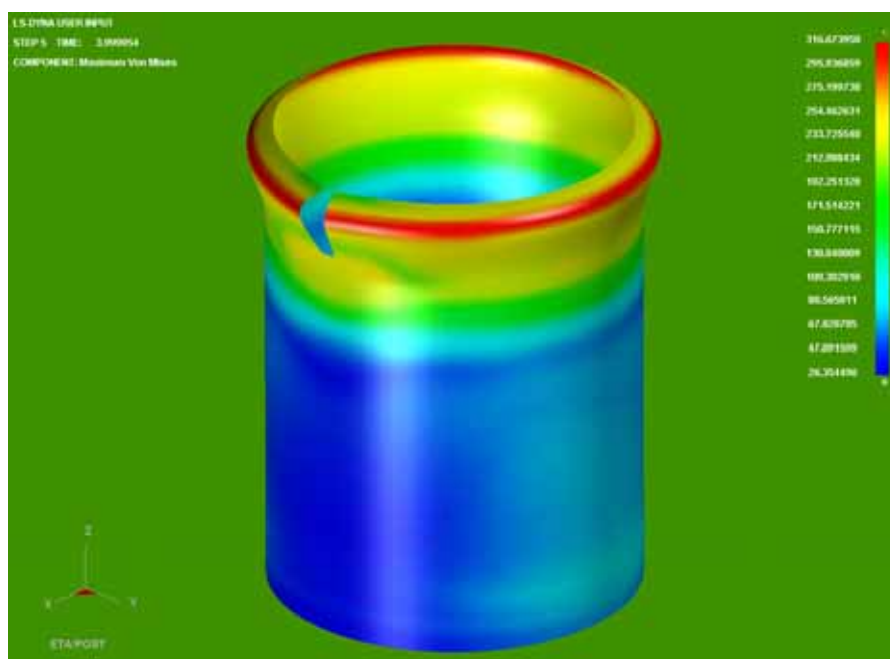


ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο

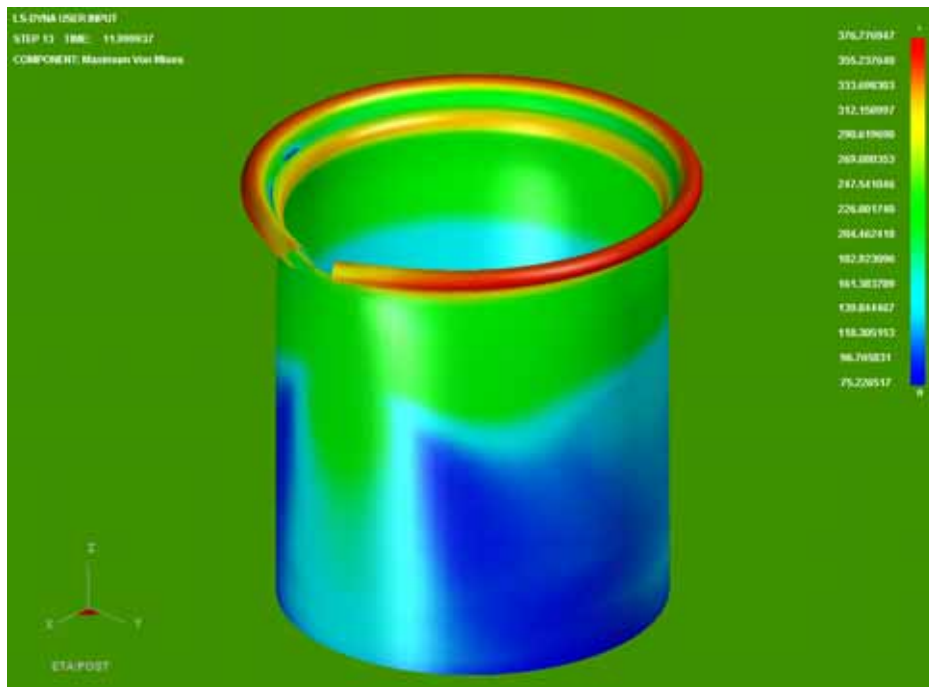
Ακολουθούν εικόνες από την κατανομή των τάσεων σε όλη την επιφάνεια του δοκιμίου κατά τα διάφορα στάδια της κατάρρευσής του:

Επιλέγοντας στον ETA POSTGL:

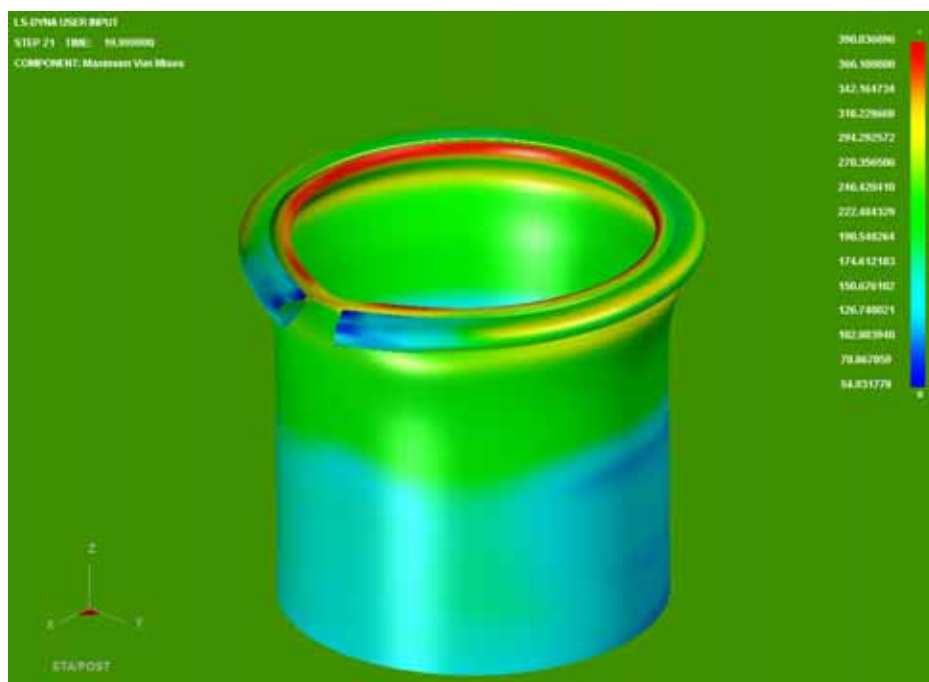
CONTOUR -> STRESS/STRAIN -> MAXIMUM VON MISES STRESSES:



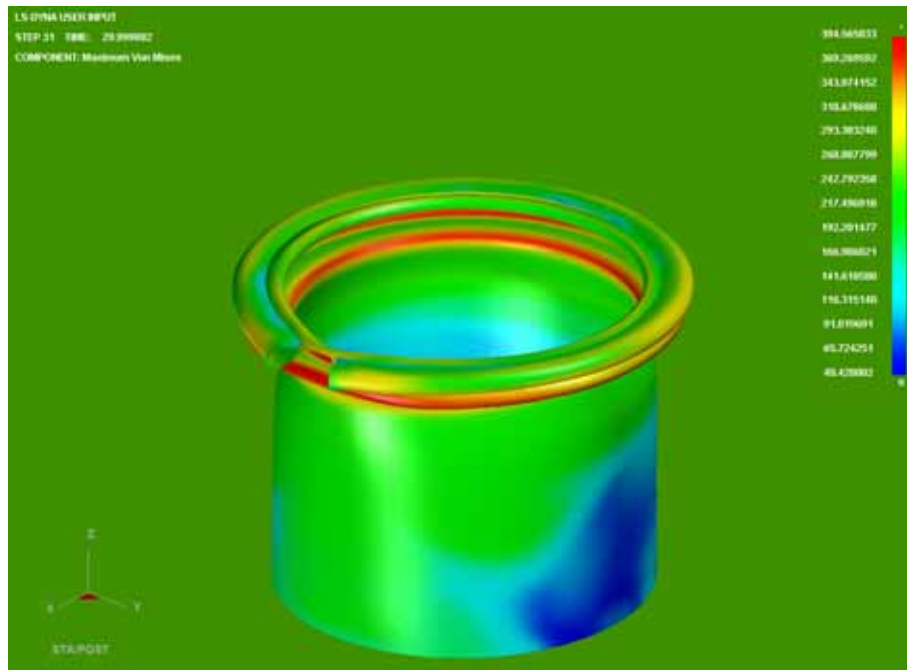
Κατανομή των τάσεων στα 4 mm. Έχουμε εμφάνιση τάσεων στην περιοχή γύρω από την εγκοπή περιφερειακά του δοκιμίου κατά την οριζόντια διεύθυνση που είναι κάθετη στην αξονική θλίψη του δοκιμίου. Οι τάσεις αυτές είναι ίσες με $\sigma=316,7 \text{ MPa}$, η οποία είναι μεγαλύτερη από το όριο διαρροής του υλικού ($\sigma_A=220 \text{ MPa}$), οπότε ξεκινάει η πλαστική παραμόρφωση του δοκιμίου, με εμφάνιση μονίμων παραμορφώσεων σε αυτό. Οι τιμές των τάσεων πάνω και κάτω του λοβού έχουν τιμή **240MPa**, ενώ στο κάτω μισό του δοκιμίου επικρατούν χαμηλές τιμές της τάξεως των **70MPa**.



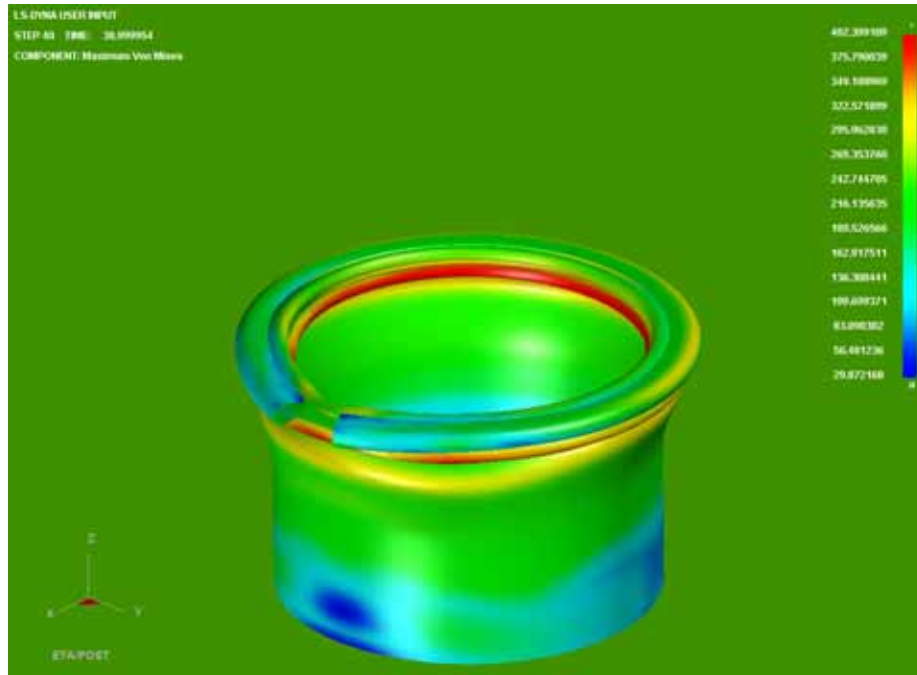
Κατανομή των τάσεων στα 12 mm. Έχουμε μέγιστες τάσεις στην περιοχή του λοβού του δοκιμίου, που το πιέζει το έμβολο της πρέσας. Οι τάσεις που εφαρμόζονται είναι $\sigma = 333,7 \text{ MPa}$, ενώ οι τάσεις που αναπτύσσονται ακριβώς κάτω από τον λοβό είναι $\sigma = 310 \text{ MPa}$, εκεί όπου θα εμφανιστεί ο δεύτερος λοβός. Οι τιμές των τάσεων είναι μεγαλύτερες από την τάση διαρροής του υλικού του δοκιμίου ($\sigma_{\Delta} = 220 \text{ MPa}$), οπότε οπότε ξεκινάει η πλαστική παραμόρφωση του δοκιμίου, με εμφάνιση μονίμων παραμορφώσεων. Συνεχίζεται η δημιουργία του δεύτερου εκατοστού λοβού και συνεχίζεται η κατάρρευση του δοκιμίου από την θέση αυτή και με διεύθυνση προς τα κάτω.



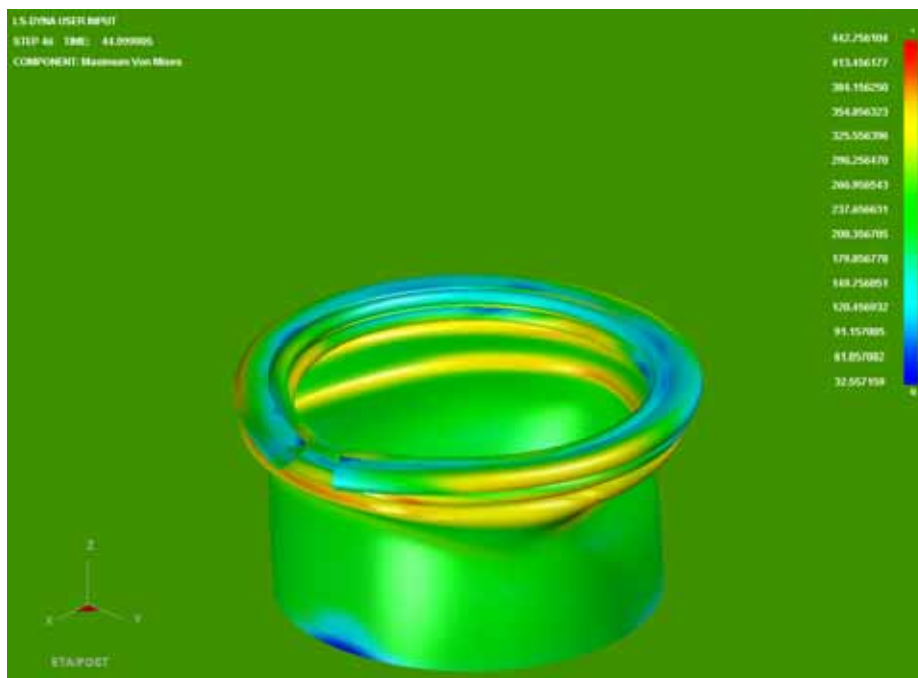
Κατανομή των τάσεων στα 20 mm. Έχουμε μέγιστες τάσεις στην περιοχή της κοιλότητας του πρώτου λοβού. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με **μέγιστη τιμή 390 MPa**. Στην περιοχή της εγκοπής έχουμε ελάχιστες τάσεις επειδή έχει μετακινηθεί προς τα κάτω το υλικό και δεν έρχεται σε έντονη επαφή με την άνω πλάκα. Στο υπόλοιπο μέρος του μοντέλου μαζεπικρατούν τάσεις της τάξεως των **160MPa**.



Κατανομή των τάσεων στα 30 mm. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με **μέγιστη τιμή 394,6 MPa** στις περιοχές που έχουμε πλαστική άρθρωση στον δεύτερο έκτατο λοβό. Τάσεις σημαντικής τιμής, εμφανίζονται τώρα κυρίως στο μέσο του δοκιμίου στα **240 MPa**. Ελάχιστες τιμές έχουμε στο κάτω πίσω μέρος του δοκιμίου.



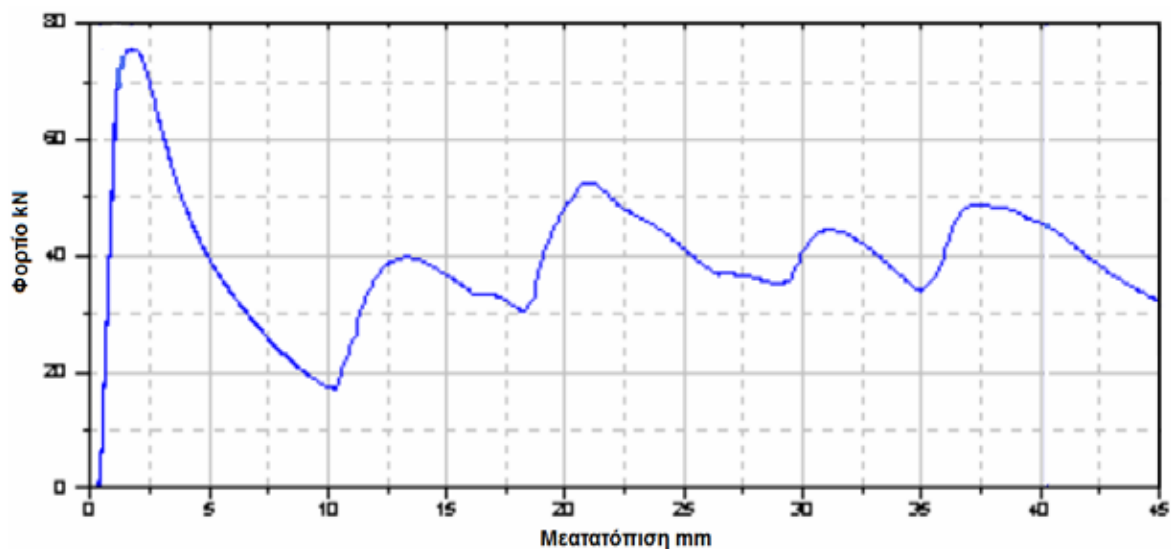
Κατανομή των τάσεων στο 39 mm. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη εμφανιζόμενη τιμή **402,4 MPa**. Στο κάτω μέρος του δοκιμίου που έρχεται σε επαφή με την σταθερή πλάκα έχουμε τις μικρότερες τάσεις που κυμαίνονται στα 60 MPa. Κάτω από τον δεύτερο λοβό έχουμε τάσεις που κυμαίνονται στα 300 MPa εκεί όπου ξεκινάει να εμφανίζεται ο τρίτος λοβός.



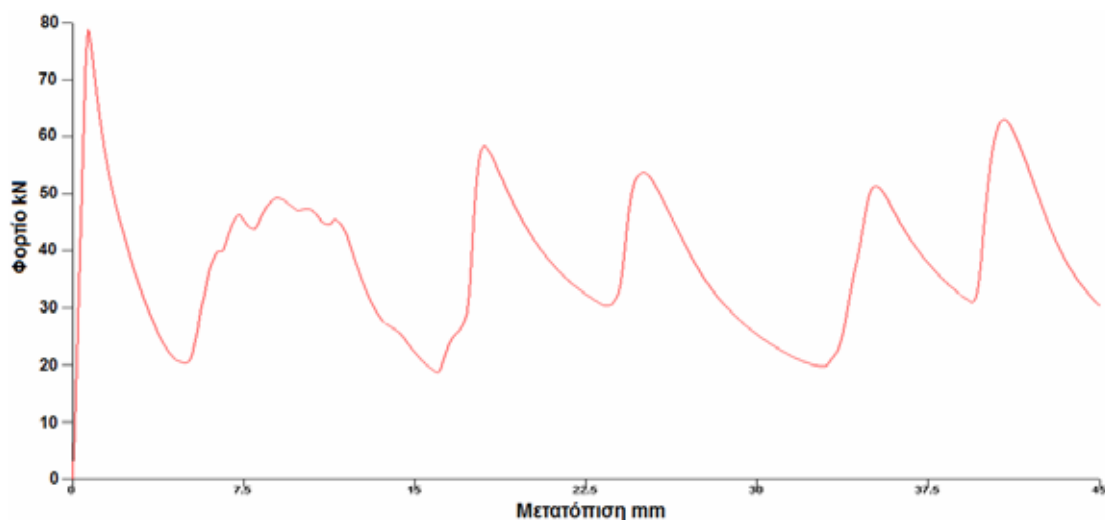
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο

Κατανομή των τάσεων στα 45.0mm. Οι τελικές τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη εμφανιζόμενη τιμή 442,8 MPa. Η κατάρρευση του δοκιμίου έχει πλέον ολοκληρωθεί.

Ακόμα, το διάγραμμα των δυνάμεων μετά την επεξεργασία των στοιχείων που πάρθηκαν από την πρέσα, και με την χρήση του Excel, είναι αυτό που παρουσιάζεται στην επόμενη σελίδα, με τον κατακόρυφο άξονα να δείχνει τις **δυνάμεις σε kN**, και με τον οριζόντιο άξονα να δείχνει τις **μετατοπίσεις** (βραχύνσεις του θλιβόμενου δοκιμίου) **σε mm**:



Το διάγραμμα των δυνάμεων μετά την επεξεργασία των στοιχείων που πάρθηκαν από την προσομοίωση στο Is-dyna, και με την χρήση του Excel, είναι αυτό που παρουσιάζεται στο επόμενο διάγραμμα, με τον κατακόρυφο άξονα να δείχνει τις **δυνάμεις σε kN**, και με τον οριζόντιο άξονα να δείχνει τις **μετατοπίσεις** (βραχύνσεις του θλιβόμενου δοκιμίου) **σε mm**:



- Από τα στοιχεία που πάρθηκαν από την πρέσα, βρέθηκε:

Διαδρομή εμβόλου: 45.8mm

Το μέγιστο φορτίο $P_{max} = 75.57kN$

Το μέσο φορτίο $P_{mean} = 39 kN$,

Η ομοιομορφία φορτίου $P_{max}/P_{mean} = 1.94$

Η συνολική ενέργεια που δαπανήθηκε για την αξονική κατάρρευση του δοκιμίου είναι $E = 1604 kN mm$

- Από τα στοιχεία που πάρθηκαν από την προσομοίωση στο LS-DYNA, βρέθηκε:

Διαδρομή εμβόλου: 45.0mm

Το μέγιστο φορτίο $P_{max} = 79 kN$,

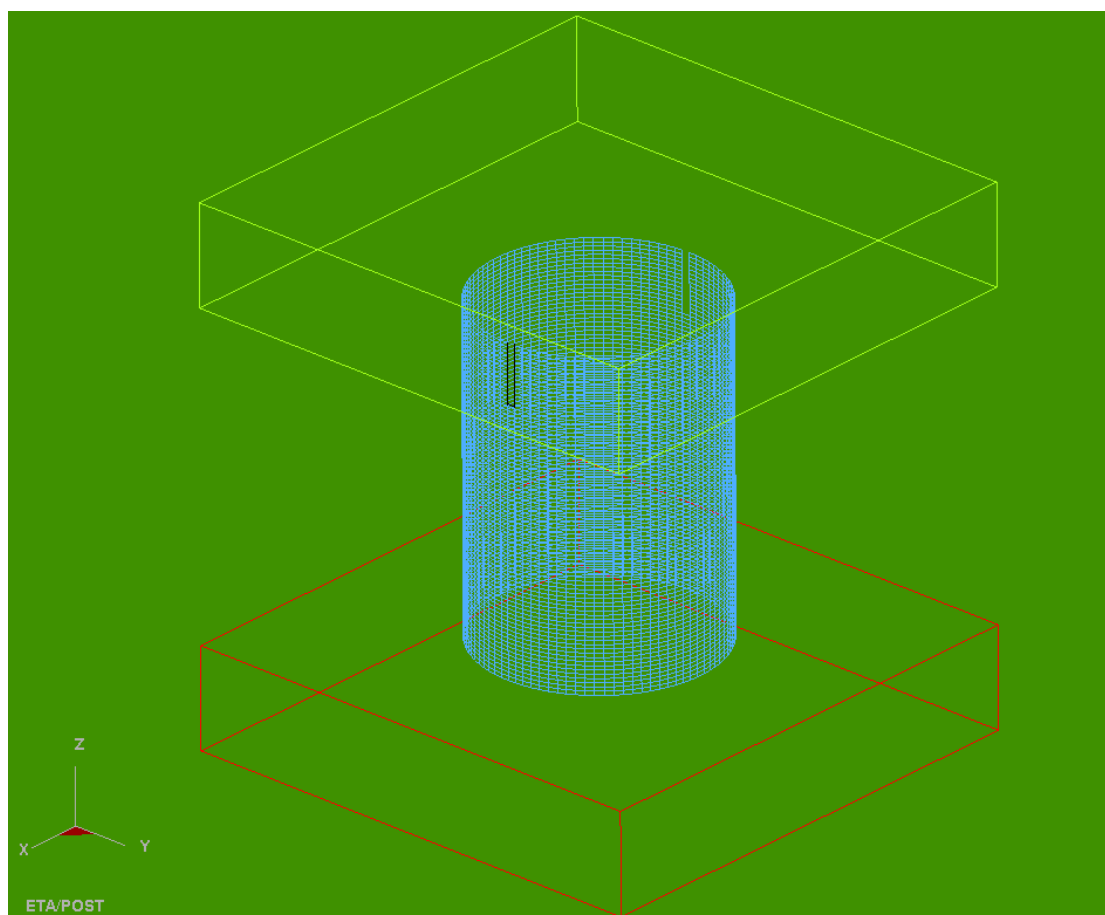
Το μέσο φορτίο $P_{mean} = 37.03 kN$,

Η ομοιομορφία φορτίου $P_{max}/P_{mean} = 2.13$

Η συνολική ενέργεια που δαπανήθηκε για την αξονική κατάρρευση του δοκιμίου είναι $E = 1666.4 kN mm$

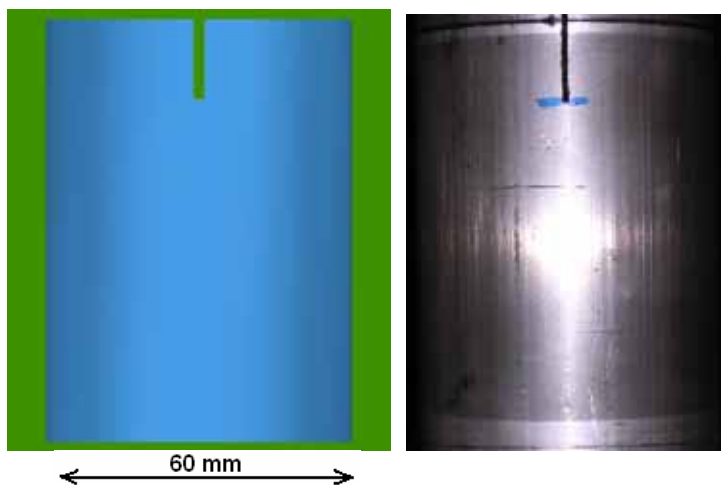
ΕΝΟΤΗΤΑ 5-5 : ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ ΔΥΟ(2) ΕΓΚΟΠΕΣ ΣΤΟ ΠΑΝΩ ΜΕΤΩΠΟ ΤΟΥ ΚΕΛΥΦΟΥΣ ΠΑΧΟΥΣ $t = 2\text{mm}$ ΚΑΙ ΒΑΘΟΥΣ $h = 15\text{mm}$ (Dial15-2).

Το μοντέλο του δοκιμίου κυκλικής διατομής με δύο(2) εγκοπές στο πάνω μέτωπο του κελύφους πάχους $t = 2\text{mm}$ και βάθους $h = 15\text{mm}$, παρουσιάζεται στην ακόλουθη εικόνα:



Σχ.1, Απεικόνιση πλέγματος στο LS-DYNA 3D, για κυκλικής διατομής δοκίμιο με δύο(2) εγκοπές στο πάνω μέτωπο του κελύφους πάχους $t = 2\text{mm}$ και βάθους $h = 15\text{mm}$.

Οι αντίστοιχες φάσεις προσομοίωσης της κατάρρευσης του δοκιμίου αυτού, που κατέγραψα με τη χρήση του LS-DYNA, σε σύγκριση με τις φάσεις που έλαβα κατά την διάρκεια του πειράματος με την χρήση πρέσας Instron, παρουσιάζονται στις επόμενες σελίδες:



Αρχική τοποθέτηση του δοκιμίου στην πρέσα, και έναρξη της διαδικασίας αξονικής θλίψης του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά). Η έναρξη της προσομοίωσης του μοντέλου μας στο LS-DYNA (αριστερά).



1^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Δημιουργία αρχικού εκτατού λοβού. *Παρατηρούμε ότι το πραγματικό δοκίμιο στην πρέσα αρχίζει να καταρρέει στο μισό του ύψους της κάθετης πλευράς της εγκοπής, όπως επίσης και στο μοντέλο του LS-DYNA.* Πάτημα της πρέσας στα 3 mm.



2η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Συνέχιση αρχικού εκτατού (αξονοσυμμετρικού) λοβού με σκίσιμο κατά το μήκος της εγκοπής(και των δύο). Πάτημα της πρέσας στα 17 mm.



3η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Αρχή δημιουργίας δεύτερου εκτατού λοβού σε επίπεδο παράλληλο ως προς τον προηγούμενο. Στο μοντέλο μας το φαινόμενο έχει προχωρήσει λίγο παραπάνω. Επίσης στο δοκίμιό μας ο πρώτος λοβός στην περιοχή των εγκοπών δεν ακουμπάει στην άνω πλάκα όπως συμβαίνει στο μοντέλο μας. Πάτημα της πρέσας στα 32mm.



4η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Ολοκλήρωση πρώτου και δεύτερου έκτατου λοβού, και αρχή δημιουργίας τρίτου μη εκτατού λοβού. Οι λοβοί στο πραγματικό δοκίμιο έχουν ελλειψοειδή μορφή που στον τρίτο λοβό οι άκρες πλησιάζουν περισσότερο σε γωνία και όχι σε καμπύλη, ενώ ένα μικρό μέρος του κάτω μετώπου αρχίζει να ξεκολλάει από την κάτω πλάκα. Φαίνεται καθαρά η επιρροή των εγχοπών. Πάτημα της πρέσας στα 41mm.

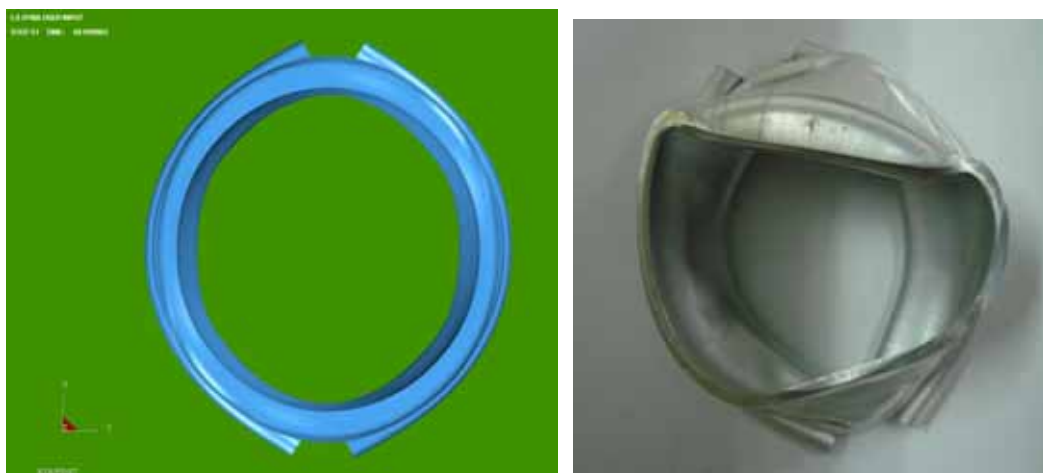


5η Φάση και τελευταία κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα , και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA. Ο τρίτος μη εκτατός λοβός στο δοκίμιο του ls-dyna έχει σχεδόν ολοκληρωθεί ενώ ο τρίτος μη εκτατός λοβός στο δοκίμιο του εργαστηρίου διακρίνεται με δυσκολία. Οι εγχοπές στο πειραματικό δοκίμιο φαίνεται να το επηρεάζουν περισσότερο απ' ότι στο μοντέλο μας. Επίσης ένα μέρος του κάτω μετώπου του δοκιμίου έχει λυγίσει προς το εσωτερικό τουόπως φαίνεται και στις παρακάτω φωτογραφίες. Τέλος αξονικής κατάρρευσης δοκιμίου στην πρέσα. Πάτημα της πρέσας στα 50 mm.

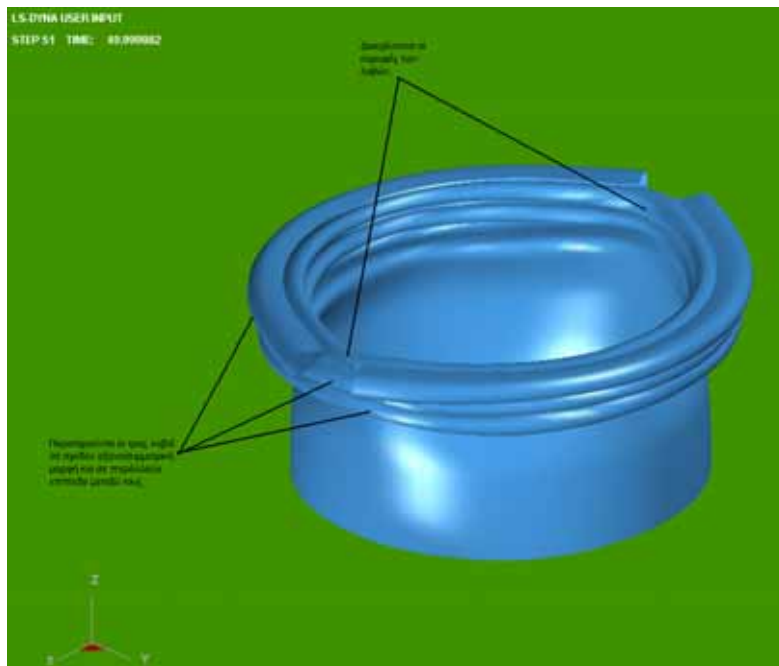


Τελική μορφή δοκιμίου αμέσως μετά το τέλος της διαδικασίας αξονικής κατάρρευσης στην πρέσα (δεξιά). Το ίδιο δοκίμιο μετά το τέλος της προσομοίωσης από το LS-DYNA, (αριστερά). Παρατηρούμε τον πρώτο μη εκτατό λοβό που έχει οβάλ μορφή, τον δεύτερο λοβό με πιο έντονες άκρες και τέλος τον τρίτο μη εκτατό λοβό με ακόμη πιο έντονες γωνίες. Και οι τρεις λοβοί είναι σε παράλληλα επίπεδα μεταξύ τους. Στο δοκίμιο της πρέσας βλέπουμε και την αναδίπλωσή του προς το εσωτερικό του. Στο μοντέλο του LS-Dyna η κατάρρευση πλησιάζει την αξονοσυμμετρική μορφή. Τελικό πάτημα της πρέσας στα 50 mm.

Σε αντιστραμμένη όψη έχουμε:



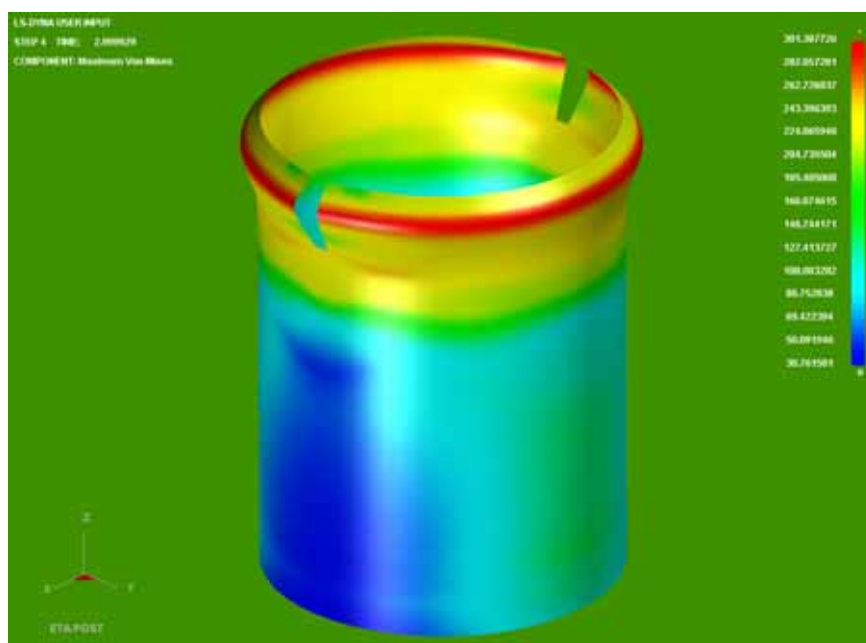
Ακόμα, σε τρισδιάστατη ισομετρική όψη, παρουσιάζεται παρακάτω η τελική μορφή του δοκιμίου όπως προσομοιώθηκε στο LS-DYNA, με κατάρρευση του δοκιμίου έως τα 50 mm:



Ακολουθούν εικόνες από την κατανομή των τάσεων σε όλη την επιφάνεια του δοκιμίου κατά τα διάφορα στάδια της κατάρρευσής του:

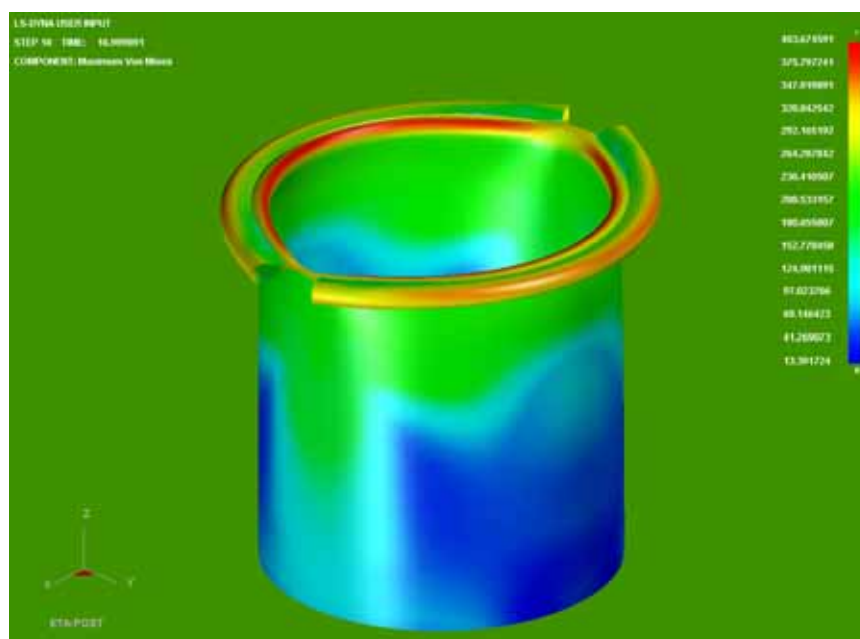
Επιλέγοντας στον ETA POSTGL:

CONTOUR -> STRESS/STRAIN -> MAXIMUM VON MISES STRESSES:

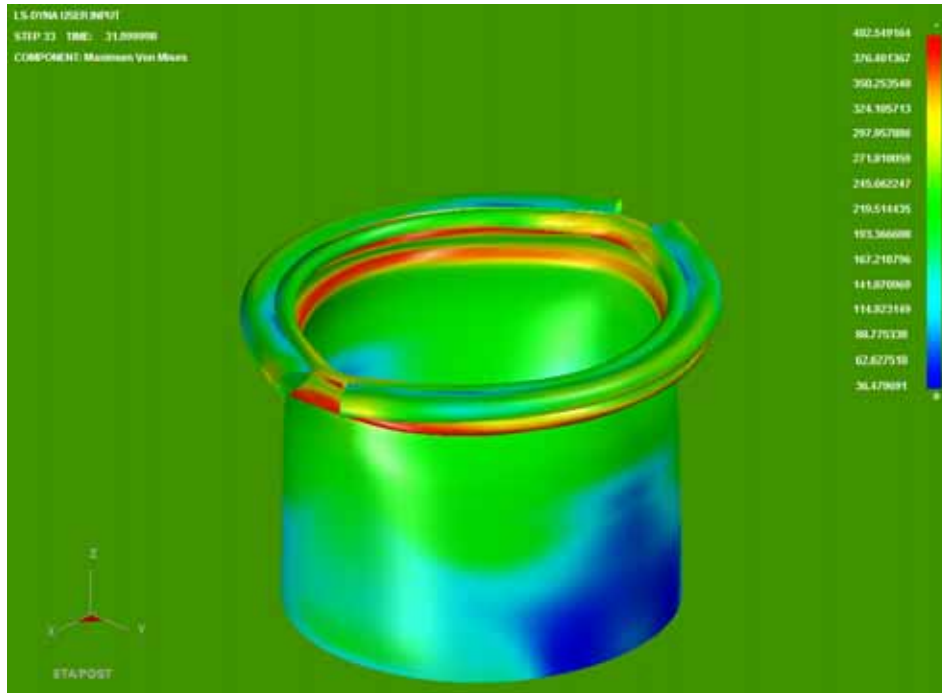


ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο

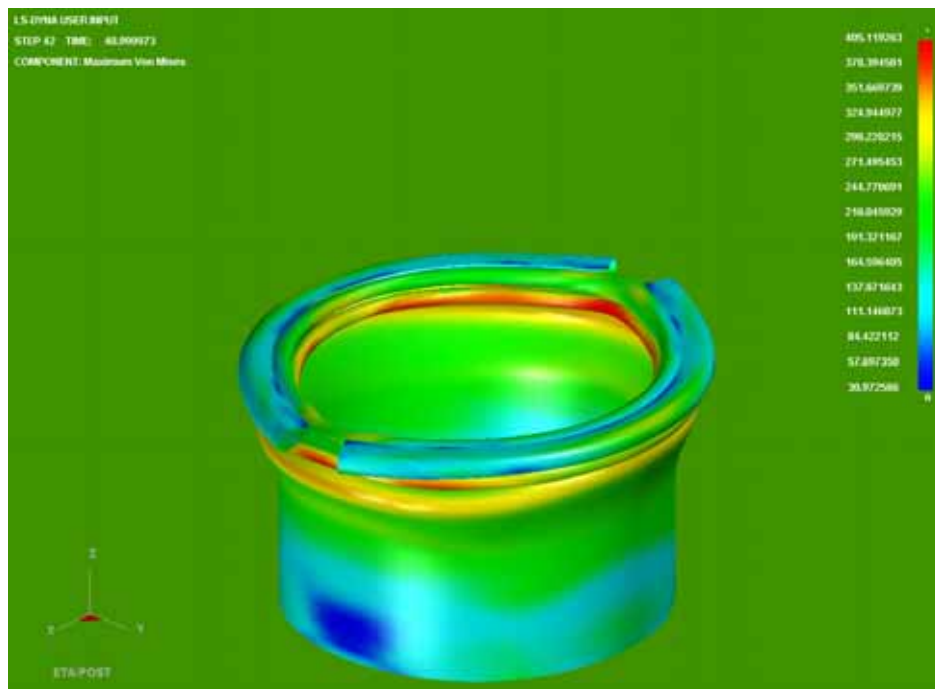
Κατανομή των τάσεων στα 3 mm. Έχουμε εμφάνιση τάσεων στην περιοχή γύρω από την εγκοπή στην περιφέρεια του δοκιμίου κατά το οριζόντιο μεσοεπίπεδο της εγκοπής που είναι κάθετο με την διεύθυνση της αξονικής θλίψης του δοκιμίου. Οι τάσεις είναι ίσες με $\sigma = 301,4 \text{ MPa}$, η οποία είναι μεγαλύτερη από το όριο αντοχής του υλικού ($\sigma_A=240 \text{ MPa}$), οπότε ξεκινάει η πλαστική παραμόρφωση του δοκιμίου, με εμφάνιση μονίμων παραμορφώσεων σε αυτό.



Κατανομή των τάσεων στα 17 mm. Έχουμε μέγιστες τάσεις στην περιφερειακή περιοχή του πρώτου λοβού του δοκιμίου που έρχεται σε επαφή με το έμβολο της πρέσας. Ιδιαίτερα, στην εσωτερική περιοχή (κοιλότητα) είναι μέγιστες και ίσες με $\sigma = 403,7 \text{ MPa}$. Το κάτω μέρος από τον λοβό έχει μικρότερες τάσεις από ότι συμβαίνει στο πάνω μέρος του δοκιμίου στην. Οι τιμές των τάσεων αυτών ίσες με 220 MPa. Στο κάτω μέρος επικρατούν χαμηλές τάσεις που δεν παραμορφώνουν το δοκίμιο και είναι ίσες με 80 MPa. Συνεχίζεται η κατάρρευση του δοκιμίου από την θέση αυτή και με διεύθυνση προς τα κάτω.



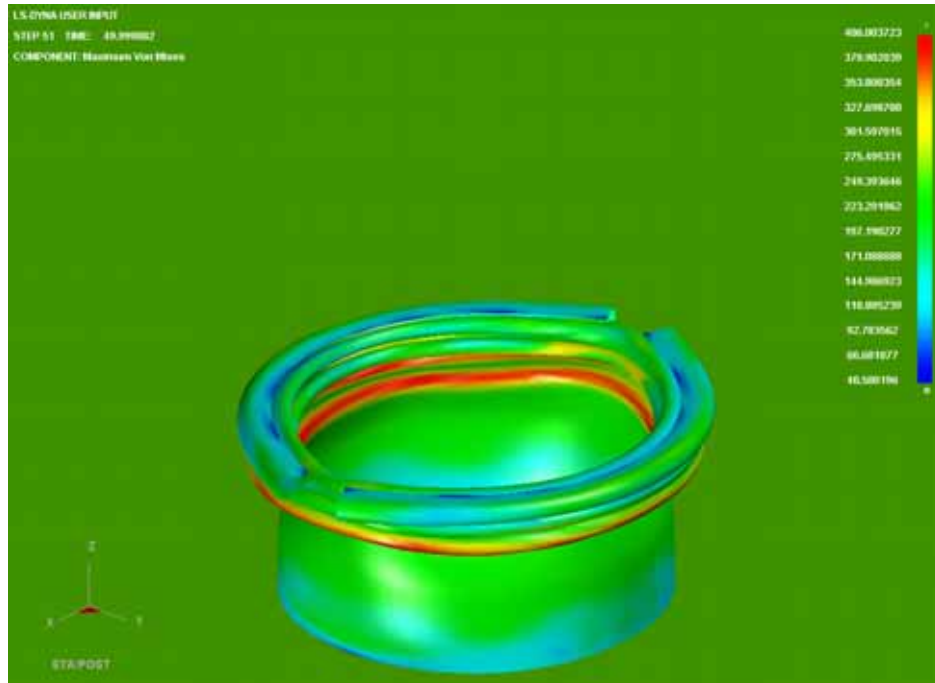
Κατανομή των τάσεων στα 32 mm. Έχουμε μέγιστες τάσεις στην περιοχή σχηματισμού του δεύτερου μη εκτατού λοβού στα σημεία αναδίπλωσης. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή 402,5 MPa. Στο υπόλοιπο μέρος του μοντέλου μας εξακολουθούμε να έχουμε εμφάνιση μικρότερων τάσεων στο κάτω μέρος του δοκιμίου μας μέχρι 150 MPa. Στο μέσω του δοκιμίου έχουν αναπτυχθεί τάσεις στα 230 MPa που θα βοηθήσουν στη δημιουργία του τρίτου λοβού.



Κατανομή των τάσεων στα 41 mm. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή 350,1 MPa. Ο πρώτος μη εκτατός λοβός έχει σχηματιστεί πλήρως,

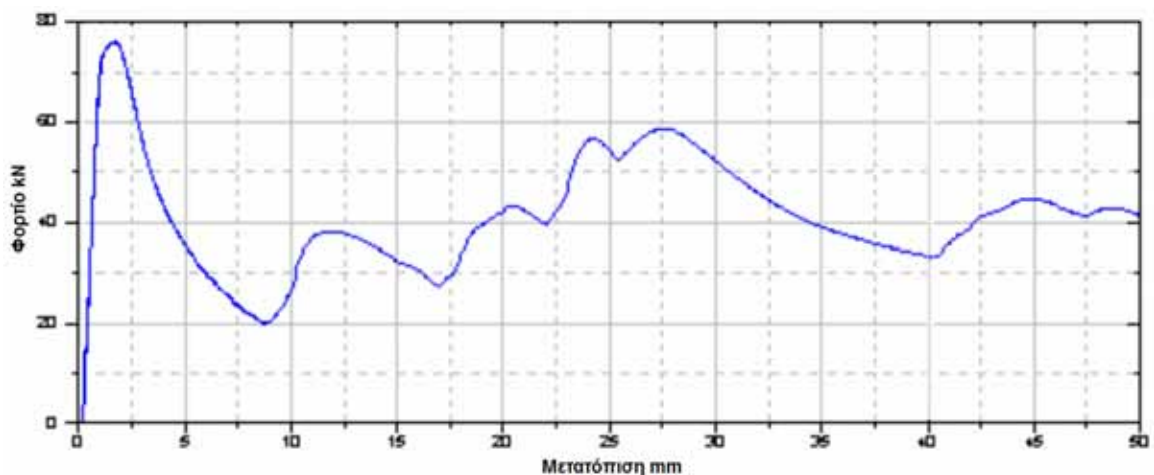
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο

καθώς επίσης και ο δεύτερος και ξεκινά ο σχηματισμός του τρίτου μη εκτατού λοβού, σε επίπεδο παράλληλο ως προς το προηγούμενο επίπεδο του αρχικού λοβού. Τάσεις σημαντικής τιμής 310 MPa εμφανίζονται στο κάτω μέρος του δοκιμίου.

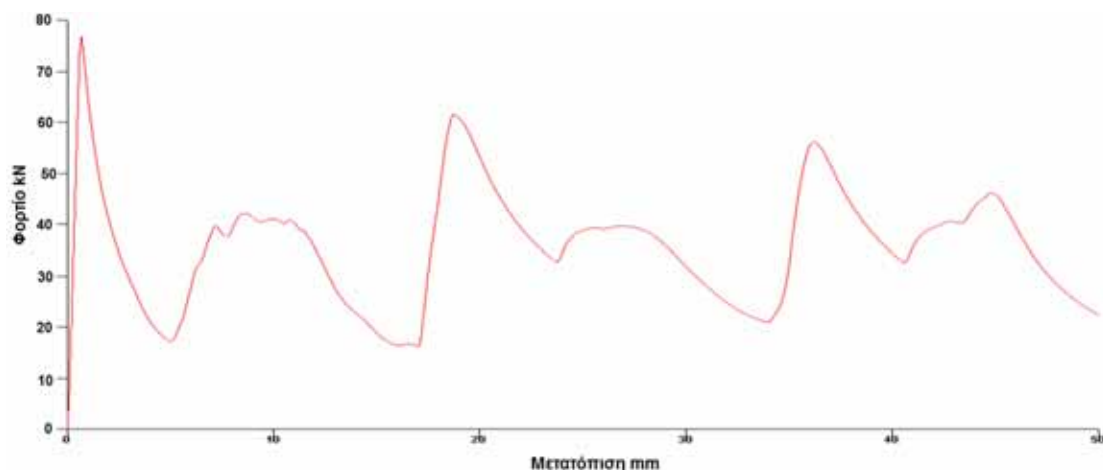


Κατανομή των τάσεων στα 45 mm. Οι τελικές τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη εμφανιζόμενη τιμή 452 MPa. Η κατάρρευση του δοκιμίου έχει πλέον ολοκληρωθεί, και οι τέσσερις τελικοί λοβοί έχουν σχηματιστεί πλήρως.

Ακόμα, το διάγραμμα των δυνάμεων μετά την επεξεργασία των στοιχείων που πάρθηκαν από την πρέσα, και με την χρήση του Excel, είναι αυτό που παρουσιάζεται στην επόμενη σελίδα, με τον κατακόρυφο άξονα να δείχνει τις **δυνάμεις σε kN**, και με τον οριζόντιο άξονα να δείχνει τις **μετατοπίσεις** (βραχύνσεις του θλιβόμενου δοκιμίου) **σε mm**:



Το διάγραμμα των δυνάμεων μετά την επεξεργασία των στοιχείων που πάρθηκαν από την προσομοίωση στο Is-dyna, και με την χρήση του Excel, είναι αυτό που παρουσιάζεται στην επόμενη σελίδα, με τον κατακόρυφο άξονα να δείχνει τις **δυνάμεις σε kN**, και με τον οριζόντιο άξονα να δείχνει τις **μετατοπίσεις** (βραχύνσεις του θλιβόμενου δοκιμίου) **σε mm**:



- Από τα στοιχεία που πάρθηκαν από την πρέσα, βρέθηκε:

Διαδρομή εμβόλου: 49,8 mm

Το μέγιστο φορτίο $P_{max} = 75.92 \text{ kN}$,

Το μέσο φορτίο $P_{mean} = 37 \text{ kN}$,

Η ομοιομορφία φορτίου $P_{max}/P_{mean} = 2.05$

Η συνολική ενέργεια που δαπανήθηκε για την αξονική κατάρρευση του δοκιμίου είναι $E = 1653 \text{ kN mm}$

- Από τα στοιχεία που πάρθηκαν από την προσομοίωση στο LS-DYNA, βρέθηκε:

Διαδρομή εμβόλου: 50 mm

Το μέγιστο φορτίο $P_{max} = 78.5 \text{ kN}$,

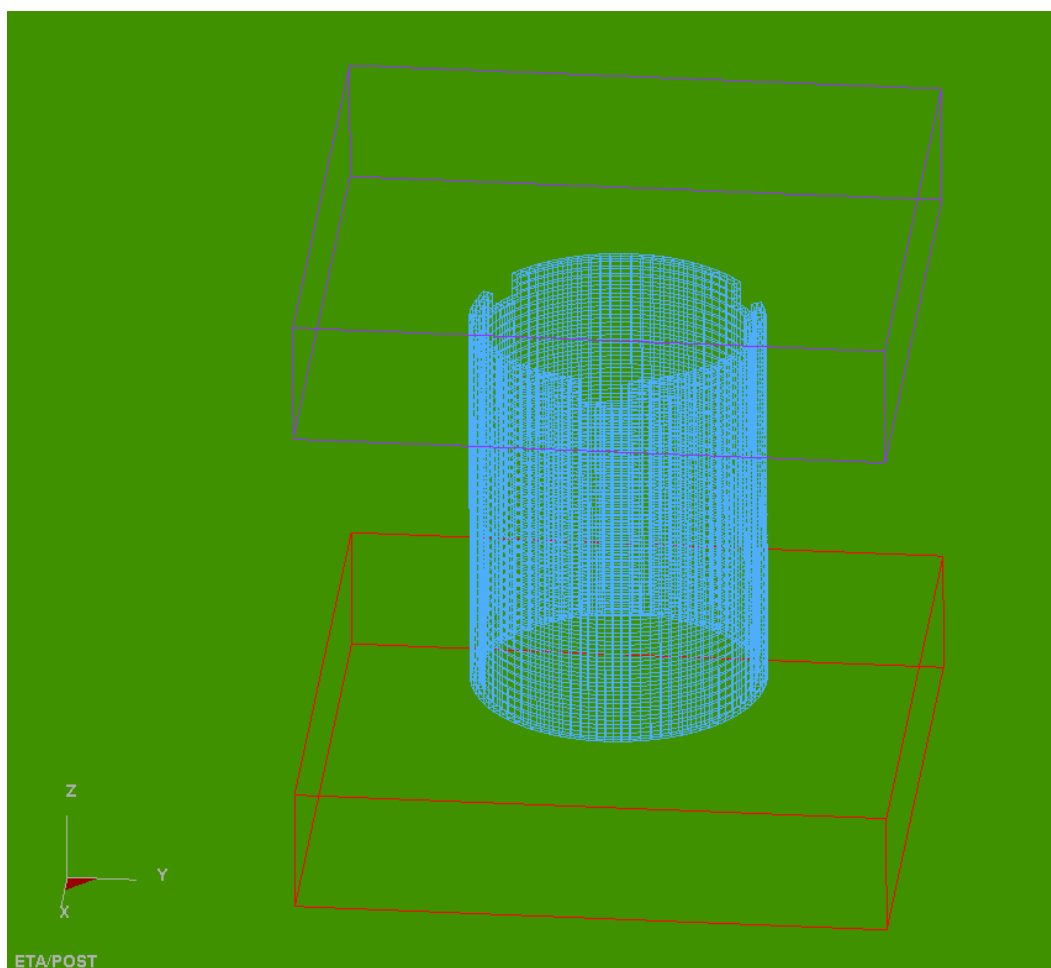
Το μέσο φορτίο $P_{mean} = 35.68 \text{ kN}$

Η ομοιομορφία φορτίου $P_{max}/P_{mean} = 2.20$

Η συνολική ενέργεια που δαπανήθηκε για την αξονική κατάρρευση του δοκιμίου είναι $E = 1784.8 \text{ kN mm}$

ΕΝΟΤΗΤΑ 5-6 : ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΤΡΙΩΝ(3) ΕΓΚΟΠΩΝ ΜΕ ΠΑΧΟΣ $t = 10\text{mm}$ ΚΑΙ ΒΑΘΟΣ $h = 5\text{mm}$ ΣΤΟ ΠΑΝΩ ΜΕΤΩΠΟ ΤΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ (Dial-3(BE)).

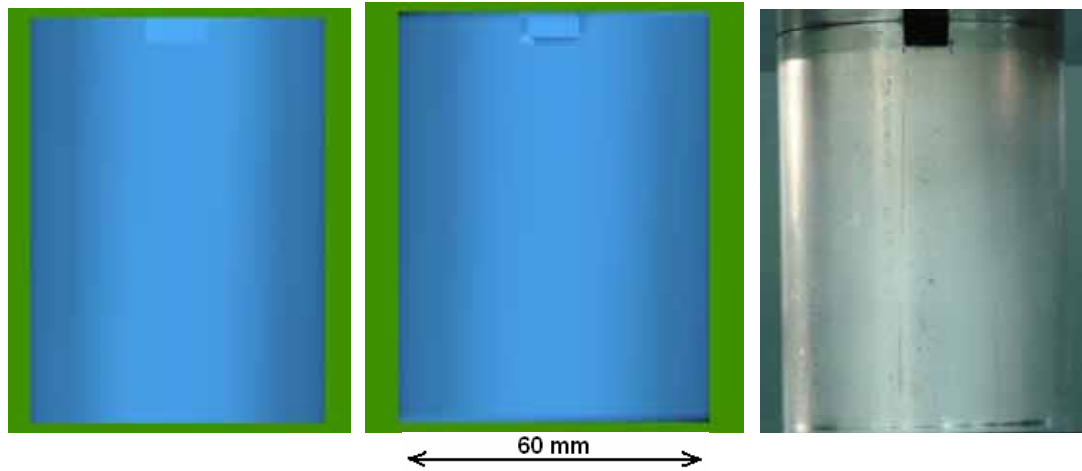
Το μοντέλο του δοκιμίου κυκλικής διατομής με τρεις εγκοπές στο πάνω μέτωπό του, πάχους $t = 10\text{mm}$ και βάθους $h = 5\text{mm}$, παρουσιάζεται στην ακόλουθη εικόνα:



Σχ.1, Απεικόνιση πλέγματος στο LS-DYNA 3D, για κυκλικής διατομής δοκίμιο με τρεις εγκοπές στο πάνω μέτωπό του, πάχους $t = 10\text{mm}$ και βάθους $h = 5\text{mm}$.

Σ' αυτό το δοκίμιο, όπως και στο επόμενο, έχουμε χρησιμοποιήσει τα brick elements, για τους λόγους που αναφέραμε στην αρχή του κεφαλαίου. Βέβαια έχουμε χρησιμοποιήσει και φάσεις από το μοντέλο με shell elements για να συγκρίνουμε τις διάφορες φάσεις και τις διαφορές που παρουσιάζουν κατά την κατάρρευση.

Οι αντίστοιχες φάσεις προσομοίωσης της κατάρρευσης του δοκιμίου αυτού, που κατέγραψα με τη χρήση του LS-DYNA, σε σύγκριση με τις φάσεις που έλαβα κατά την διάρκεια του πειράματος με την χρήση πρέσας Instron, παρουσιάζονται στις επόμενες σελίδες:



Αρχική τοποθέτηση του δοκιμίου στην πρέσα, και έναρξη της διαδικασίας αξονικής θλίψης του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά). Η έναρξη της προσομοίωσης του μοντέλου μας στο LS-DYNA (αριστερά) με shell και brick elements αντίστοιχα.





1^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (κάτω-δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA. Δημιουργία αρχικού εκτατού λοβού. *Παρατηρούμε ότι το φαινόμενο έχει προχωρήσει παραπάνω στο μοντέλο του LS-Dyna (με shell elements) και αυτό συμβαίνει λόγω των shell elements που έχουμε επιλέξει που προσδίδουν μια καμπυλότητα στην οριακή θέση του άνω μετώπου του δοκιμίου και έχει ως αποτέλεσμα ο κώδικας του Is-dyna να αναγνωρίζει ως μη επίπεδη την άνω διατομή και να δημιουργεί πιο γρήγορα τον λοβό, ενώ στο πραγματικό δοκίμιο και στο μοντέλο του LS-Dyna (με brick elements) η αξονική δύναμη ασκείται στο πάνω «επίπεδο» μέτωπο του δοκιμίου και δεν παίρνει αμέσως κλίση. Φαίνεται καθαρά η καλύτερη προσέγγιση της κατάρρευσης με brick elements. Πάτημα της πρέσας στα 5mm.*



2^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (brick elements - αριστερή εικόνα). Ο πρώτος εκτατός (αξονοσυμμετρικός) λοβός στο δοκίμιο έχει ολοκληρωθεί και ξεκινάει ο σχηματισμός του δεύτερου. Πάτημα της πρέσας στα 16 mm.



3η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (κάτω εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (shell-brick elements, πάνω εικόνες). Συνεχίζεται η δημιουργία του δεύτερου μη εκτατού λοβού που είναι σε επίπεδο παράλληλο και στραμμένο κατά $\pi/3$ ως προς τον προηγούμενο (shell elements). Στο μοντέλο αυτό το φαινόμενο της μη αξονοσυμμετρικής μορφής γίνεται πιο έντονο, ενώ τα άλλα δύο προσεγγίζουν την αξονοσυμμετρική παραμόρφωση(εκτατοί λοβοί). Πάτημα της πρέσας στα 25mm.

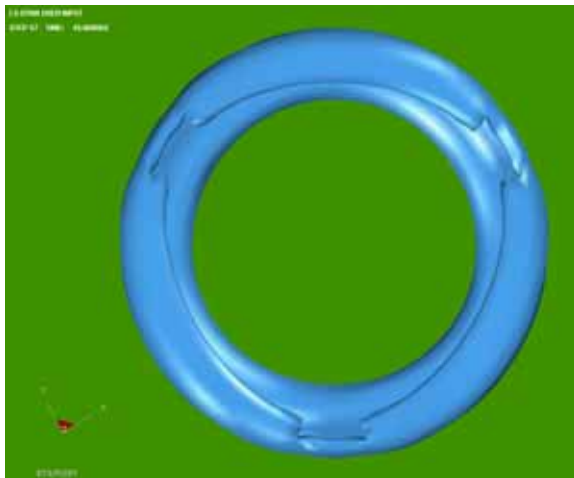
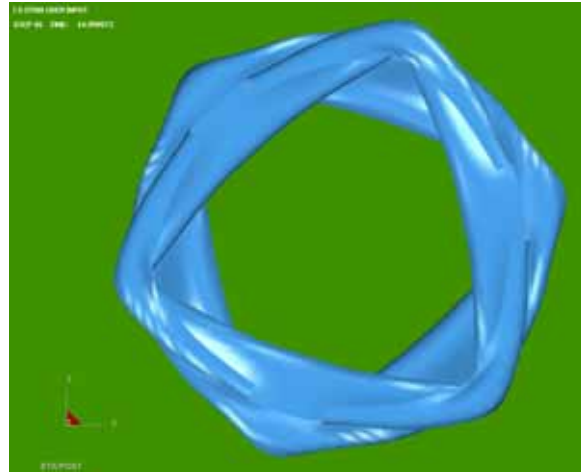


4η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Ολοκλήρωση και του δεύτερου μη έκτατου λοβού και αρχή δημιουργίας τρίτου

εκτατού λοβού στο πραγματικό δοκίμιο, ενώ στο μοντέλο μας υπάρχει μια μικρή καθυστέρηση του φαινομένου. Πάτημα της πρέσας στα 35 mm.

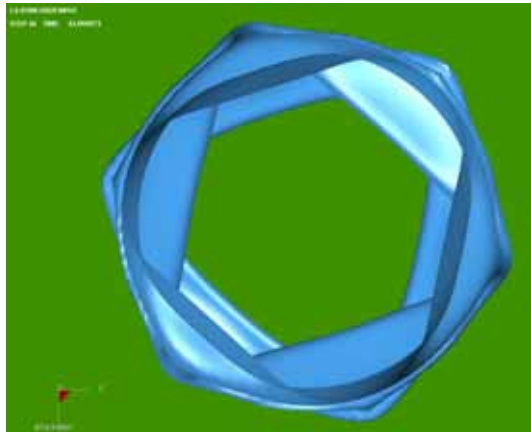


5η Φάση και τελευταία κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (κάτω-αριστερή εικόνα με brick elements). Έχουν ολοκληρωθεί πλήρως και οι δύο εκτατοί λοβοί, και συνεχίζεται ο σχηματισμός του τρίτου μη εκτατού λοβού ο οποίος είναι στραμμένος κατά $\pi/3$ σε σχέση με τον προηγούμενο μη εκτατό λοβό για τα shell elements, ενώ στα άλλα δύο συνεχίζεται η αξονοσυμμετρική παραμόρφωση. Τέλος αξονικής κατάρρευσης δοκιμίου στην πρέσα. Πάτημα της πρέσας στα 45 mm.

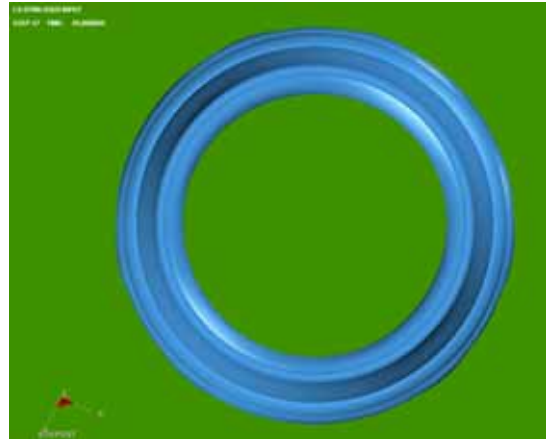


Τελική μορφή δοκιμίου αμέσως μετά το τέλος της διαδικασίας αξονικής κατάρρευσης στην πρέσα (κάτω δεξιά). Το ίδιο δοκίμιο μετά το τέλος της προσομοίωσης από το LS-DYNA, (κάτω αριστερά με brick elements). Παρατηρούμε στο μοντέλο μας με τα shell elements τους τρεις μη εκτατούς λοβούς που είναι στραμμένοι μεταξύ τους κατά $\pi/3$. Στο δοκίμιο της πρέσας βλέπουμε ότι το φαινόμενο δεν είναι τόσο έντονο και το μοντέλο μας με τα brick elements πλησιάζει αρκετά την αξονοσυμμετρική κατάρρευση.

Σε αντιστραμμένη όψη έχουμε:

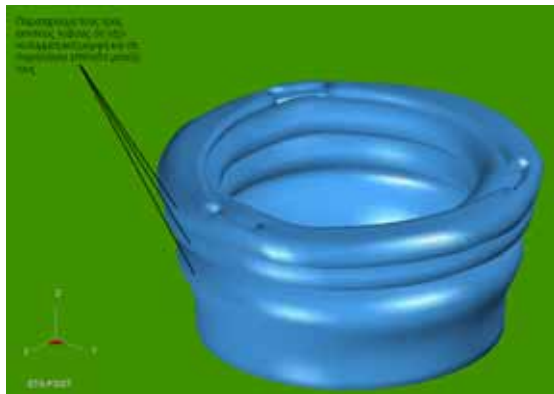


shell elements



brick elements

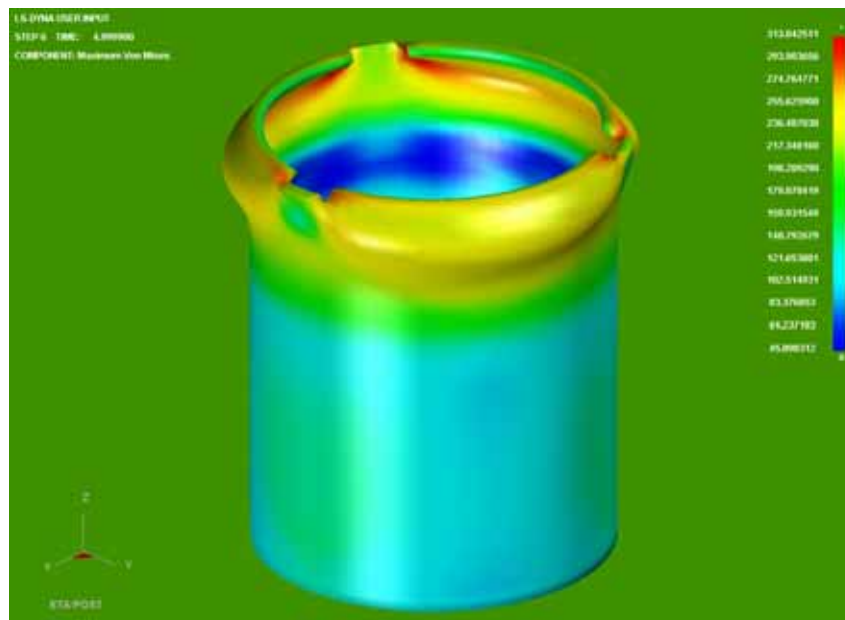
Ακόμα, σε τρισδιάστατη ισομετρική όψη, παρουσιάζεται παρακάτω η τελική μορφή του δοκιμίου όπως προσομοιώθηκε στο LS-DYNA με brick elements και όπως διαμορφώθηκε κατά την αξονική καταπόνηση στην πρέσα Istron, με κατάρρευση του δοκιμίου έως τα 45 mm:



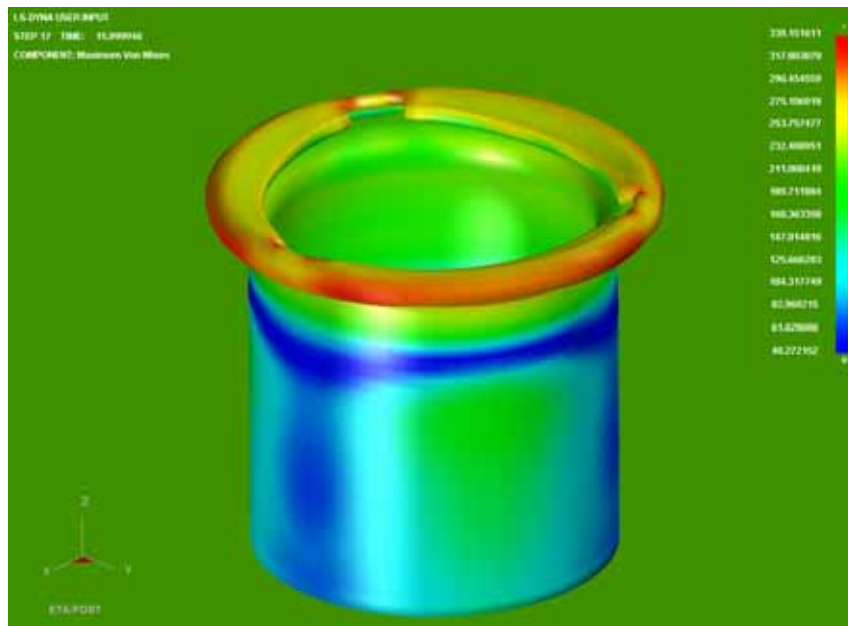
Ακολουθούν εικόνες από την κατανομή των τάσεων σε όλη την επιφάνεια του δοκιμίου κατά τα διάφορα στάδια της κατάρρευσής του (μοντέλο με brick elements):

Επιλέγοντας στον ETA POSTGL:

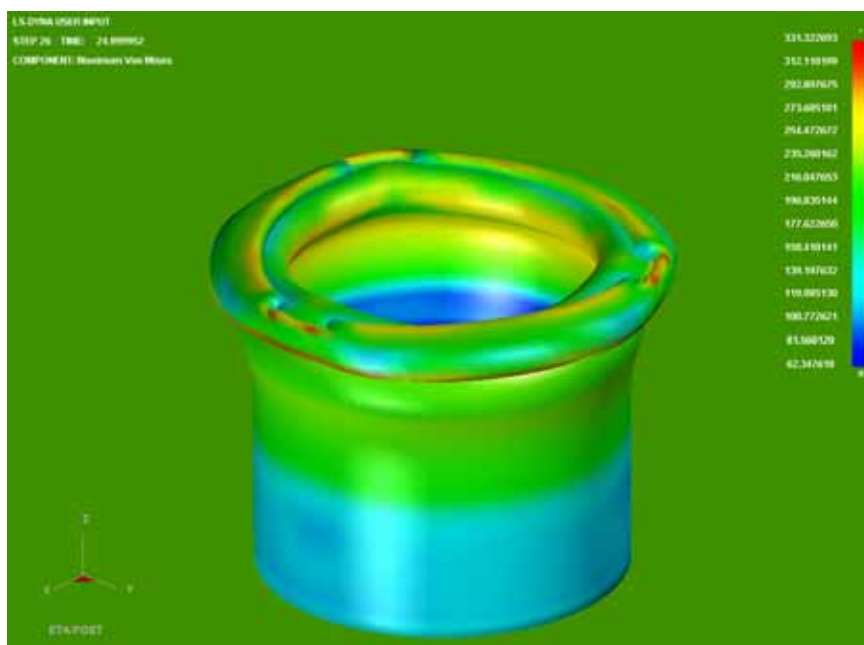
CONTOUR -> STRESS/STRAIN -> MAXIMUM VON MISES STRESSES:



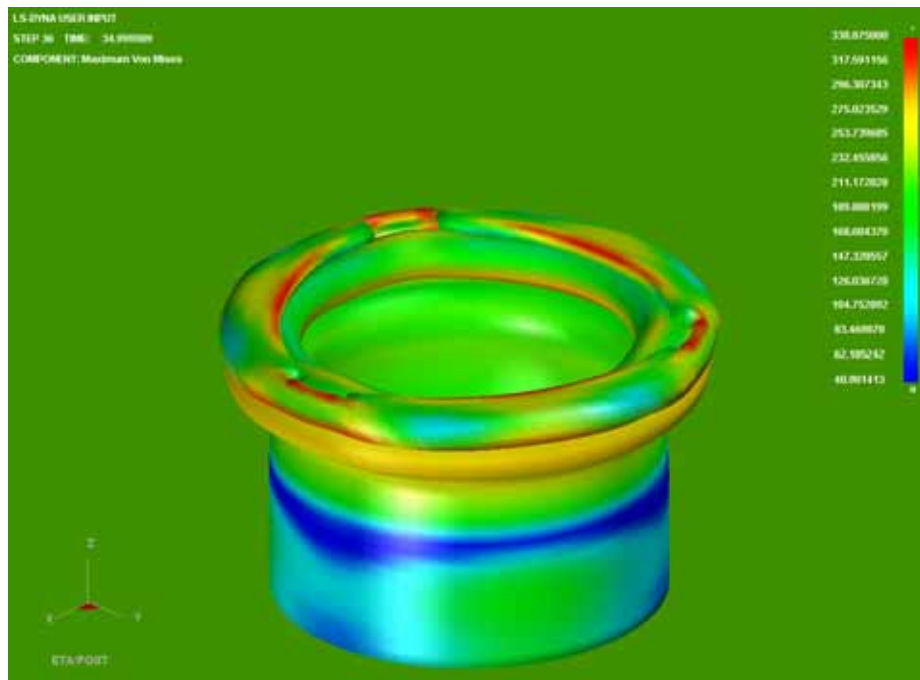
Κατανομή των τάσεων στα 5 mm. Έχουμε εμφάνιση τάσεων στην περιοχή γύρω από τις εγκοπές του δοκιμίου, που όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 2, για την θεωρία των τάσεων γύρω από εγκοπές, βλέπουμε ότι κατά την οριζόντια διεύθυνση που είναι κάθετη σε σχέση με την διεύθυνση της αξονικής θλίψης του δοκιμίου, έχουμε τάσεις ίσες με $\sigma = 260 \text{ MPa}$ στην περιοχή αναδίπλωσης του λοβού, ενώ στις περιοχές των εγκοπών έχουμε μέγιστες, ίσες με $\sigma = 313,0 \text{ MPa}$, η οποία είναι μεγαλύτερη από το όριο αντοχής του υλικού ($\sigma_A=240 \text{ MPa}$), οπότε ξεκινάει η πλαστική παραμόρφωση του δοκιμίου, με εμφάνιση μονίμων παραμορφώσεων σε αυτό.



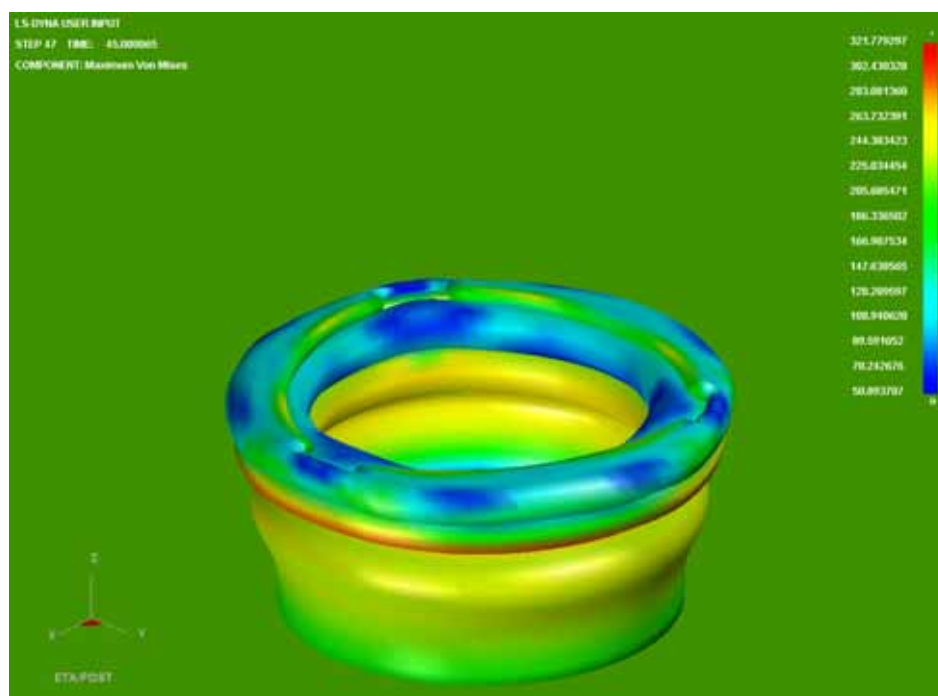
Κατανομή των τάσεων στα 16 mm. Έχουμε μέγιστες τάσεις στην περιοχή σχηματισμού του πρώτου λοβού που είναι ίσες με $\sigma = 339,2 \text{ MPa}$, που βλέπουμε ότι είναι μεγαλύτερη τιμή από την τάση διαρροής του δοκιμίου ($\sigma_A = 240 \text{ MPa}$), ενώ οι τάσεις που αναπτύσσονται στο πιο κάτω μέρος του δοκιμίου είναι μικρότερες της τάξεως των 120 MPa. Συνεχίζεται η κατάρρευση του δοκιμίου από την θέση αυτή και με διεύθυνση προς τα κάτω.



Κατανομή των τάσεων στα 25 mm. Έχουμε μέγιστες τάσεις στην περιοχή των εγχοπών. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή 331,3 MPa. Στην περιοχή σχηματισμού του δεύτερου λοβού επικρατούν τάσεις ίσες με 230 MPa. Στο κάτω μισό του μοντέλου μας εξακολουθούμε να έχουμε εμφάνιση μικρότερων τάσεων που κυμαίνονται στα 140 MPa.



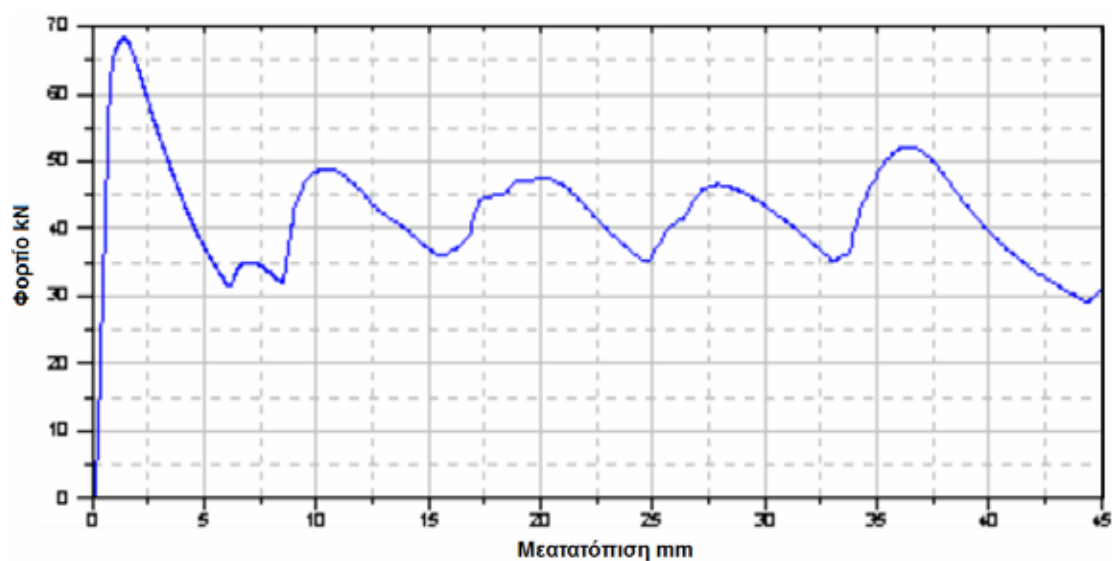
Κατανομή των τάσεων στα 35 mm. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή 338,9 MPa στην περιοχή των εγκοπών. Ο πρώτος και ο δεύτερος εκατοστός λοβός έχουν σχηματιστεί πλήρως σε επίπεδο παράλληλο μεταξύ τους. Στο κάτω μισό του δοκιμίου έχουμε μικρές τάσεις ίσες με 120 MPa.



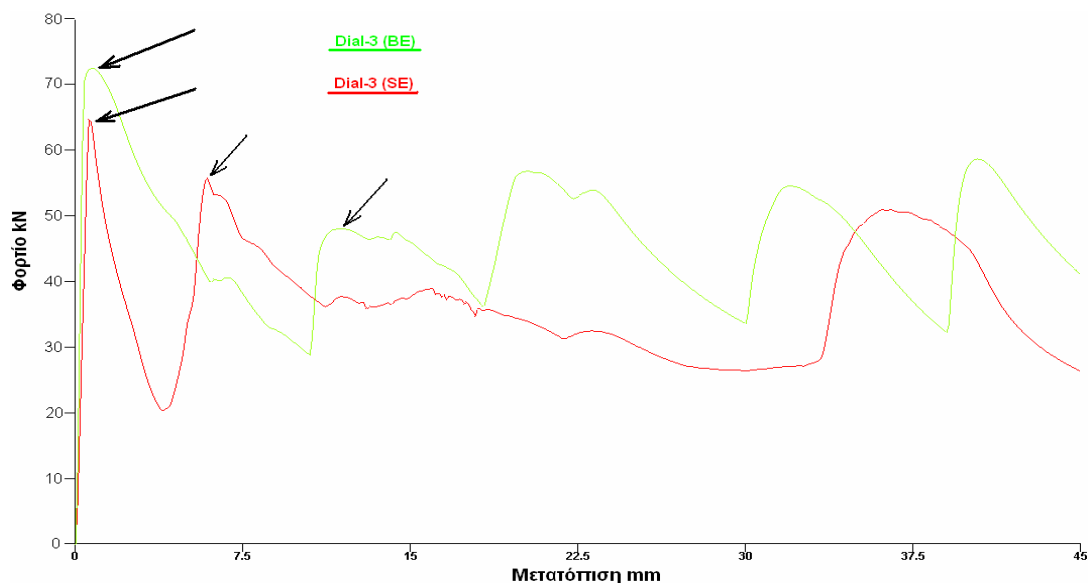
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο

Κατανομή των τάσεων στα 45 mm. Οι τελικές τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη εμφανιζόμενη τιμή 321,8 MPa στην περιοχή αναδίπλωσης του δευτέρου λοβού. Η κατάρρευση του δοκιμίου έχει πλέον ολοκληρωθεί, και οι τρεις τελικοί λοβοί έχουν σχηματιστεί σχεδόν πλήρως.

Ακόμα, το διάγραμμα των δυνάμεων μετά την επεξεργασία των στοιχείων που πάρθηκαν από την πρέσα, και με την χρήση του Excel, είναι αυτό που παρουσιάζεται στην επόμενη σελίδα, με τον κατακόρυφο άξονα να δείχνει τις **δυνάμεις σε kN**, και με τον οριζόντιο άξονα να δείχνει τις **μετατοπίσεις** (βραχύνσεις του θλιβόμενου δοκιμίου) **σε mm**:



Το διάγραμμα των δυνάμεων μετά την επεξεργασία των στοιχείων που πάρθηκαν από την προσομοίωση στο ls-dyna, και με την χρήση του Excel, είναι αυτό που παρουσιάζεται στην επόμενη σελίδα, με τον κατακόρυφο άξονα να δείχνει τις **δυνάμεις σε kN**, και με τον οριζόντιο άξονα να δείχνει τις **μετατοπίσεις** (βραχύνσεις του θλιβόμενου δοκιμίου) **σε mm**:



Από τα παραπάνω διαγράμματα φαίνεται και η ομαλότητα της καμπύλης των *brick elements* στις κορυφές που ταιριάζει με την πειραματική καμπύλη, ενώ με τα *shell elements* παρατηρούνται πιο οξείες καμπύλες, πράγμα που δηλώνει και την καλύτερη μοντελοποίηση του δοκιμίου μας.

- Από τα στοιχεία που πάρθηκαν από την πρέσα, βρέθηκε:

Διαδρομή εμβόλου: 45 mm

Το μέγιστο φορτίο $P_{max} = 68.29 \text{ kN}$,

Το μέσο φορτίο $P_{mean} = 40 \text{ kN}$,

Η ομοιομορφία φορτίου $P_{max}/P_{mean} = 1.70$

Η συνολική ενέργεια που δαπανήθηκε για την αξονική κατάρρευση του δοκιμίου είναι $E = 1734 \text{ kN mm}$

- Από τα στοιχεία που πάρθηκαν από την προσομοίωση στο LS-DYNA για *brick elements*, βρέθηκε:

Διαδρομή εμβόλου: 45.0mm

Το μέγιστο φορτίο $P_{max} = 72.5 \text{ kN}$,

Το μέσο φορτίο $P_{mean} = 46.22 \text{ kN}$

Η ομοιομορφία φορτίου $P_{max}/P_{mean} = 1.57$

Η συνολική ενέργεια που δαπανήθηκε για την αξονική κατάρρευση του δοκιμίου είναι $E = 2080.0 \text{ kN mm}$

- Από τα στοιχεία που πάρθηκαν από την προσομοίωση στο LS-DYNA για *shell elements*, βρέθηκε:

Διαδρομή εμβόλου: 45.0mm

Το μέγιστο φορτίο $P_{max} = 65.0 \text{ kN}$,

Το μέσο φορτίο $P_{mean} = 36.51 \text{ kN}$

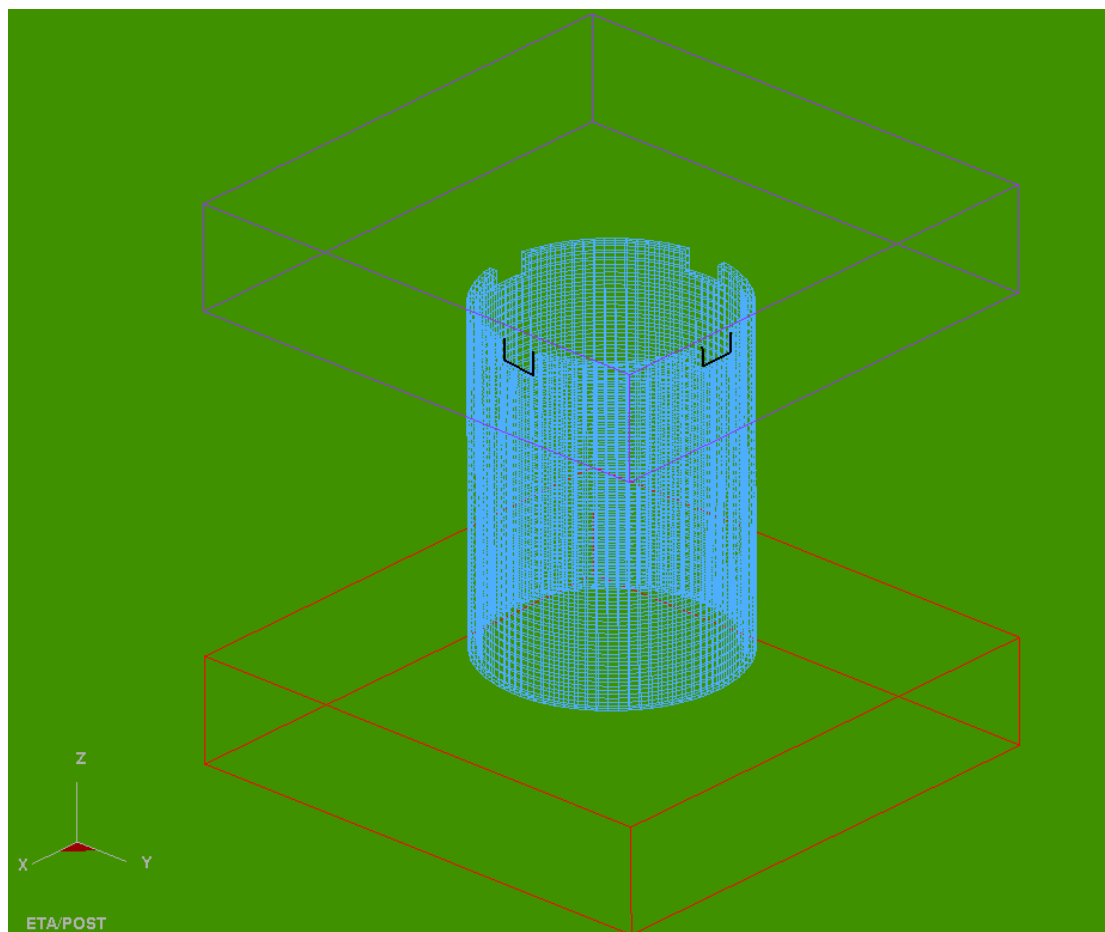
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο

Η ομοιομορφία φορτίου $P_{max}/P_{mean} = 1.78$

Η συνολική ενέργεια που δαπανήθηκε για την αξονική κατάρρευση του δοκιμίου είναι $E = 1643.9 \text{ kN mm}$

ΕΝΟΤΗΤΑ 5-7 :ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΤΕΣΣΑΡΩΝ(4) ΕΓΚΟΠΩΝ ΜΕ ΠΑΧΟΣ $t = 10\text{mm}$ ΚΑΙ ΒΑΘΟΣ $h = 5\text{mm}$, ΣΤΟ ΠΑΝΩ ΜΕΤΩΠΟ ΤΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ (Dial-4(BE)).

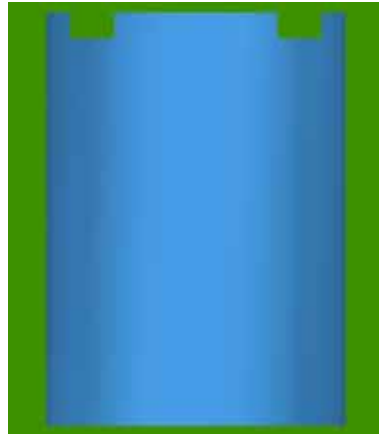
Το μοντέλο του δοκιμίου κυκλικής διατομής με τις τέσσερις εγκοπές πάχους $t=10\text{mm}$ και βάθους $h =5\text{mm}$ στο πάνω μέτωπό του, παρουσιάζεται στην ακόλουθη εικόνα:



Σχ.1, Απεικόνιση πλέγματος στο LS-DYNA 3D, για κυκλικής διατομής δοκίμιο με τέσσερις εγκοπές πάχους $t =10\text{mm}$ και βάθους $h =5\text{mm}$ στο πάνω μέτωπό του.

Σ' αυτό το δοκίμιο, όπως και στο προηγούμενο, έχουμε χρησιμοποιήσει τα brick elements, για τους λόγους που αναφέραμε στην αρχή του κεφαλαίου. Βέβαια έχουμε χρησιμοποιήσει και φάσεις από το μοντέλο με shell elements για να συγκρίνουμε τις διάφορες φάσεις και τις διαφορές που παρουσιάζουν κατά την κατάρρευση.

Οι αντίστοιχες φάσεις προσομοίωσης της κατάρρευσης του δοκιμίου αυτού, που κατέγραψα με τη χρήση του LS-DYNA, σε σύγκριση με τις φάσεις που έλαβα κατά την διάρκεια του πειράματος με την χρήση πρέσας Instron, παρουσιάζονται στις επόμενες σελίδες:



60 mm



Αρχική τοποθέτηση του δοκιμίου στην πρέσα, και έναρξη της διαδικασίας αξονικής θλίψης του δοκιμίου στην πρέσα (κάτω δεξιά). Η έναρξη της προσομοίωσης του μοντέλου μας στο LS-DYNA (στις άλλες δύο εικόνες).





1^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA με brick elements (αριστερή εικόνα). Στην πίσω εικόνα είναι το ίδιο, αλλά με shell elements. Δημιουργία αρχικού εκτατού λοβού. *Παρατηρούμε ότι το φαινόμενο έχει προχωρήσει παραπάνω στο μοντέλο του LS-Dyna με shell elements και αυτό συμβαίνει επειδή του προσδίδουν μια καμπυλότητα ακτίνας 1mm στην οριακή θέση του άνω μετώπου του δοκιμίου και έχει ως αποτέλεσμα ο κώδικας του ls-dyna να αναγνωρίζει ως μη επίπεδη την άνω διατομή και να δημιουργεί πιο γρήγορα τον λοβό, ενώ στο πραγματικό δοκίμιο και στο μοντέλο του LS-Dyna (με brick elements) η αξονική δύναμη ασκείται στο πάνω «επίπεδο» μέτωπο του δοκιμίου και δεν παίρνει αμέσως κλίση. Φαίνεται καθαρά η καλύτερη προσέγγιση της κατάρρευσης με brick elements. Πάτημα της πρέσας στα 6 mm.*



2^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (brick elements - αριστερή εικόνα). Ο πρώτος εκτατός (αξονοσυμμετρικός) λοβός στο δοκίμιο έχει ολοκληρωθεί και ξεκινάει ο σχηματισμός του δεύτερου. **Επίσης και στα δύο δοκίμια η άνω πλευρά του δοκιμίου γίνεται πιο επίπεδη με αποτέλεσμα να έρχεται σε επαφή μεγαλύτερο μέρος του υλικού με το άνω**

έμβολο. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε υψηλότερα φορτία και άρα υψηλότερη ενέργεια παραμόρφωσης. Πάτημα της πρέσας στα 16 mm.



3^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (κάτω δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα-brick elements,πάνω-shell elements). Συνεχίζεται η δημιουργία του δεύτερου μη εκτατού λοβού που είναι σε επίπεδο παράλληλο και στραμμένο κατά $\pi/3$ ως προς τον προηγούμενο. Στο μοντέλο αυτό το φαινόμενο της μη αξονοσυμμετρικής μορφής γίνεται πιο έντονο, ενώ τα άλλα δύο προσεγγίζουν την αξονοσυμμετρική παραμόρφωση(εκτατοί λοβοί). Στο πραγματικό δοκίμιο έχουμε αστοχία(σκίσιμο) του υλικού. Πάτημα της πρέσας στα 25 mm.



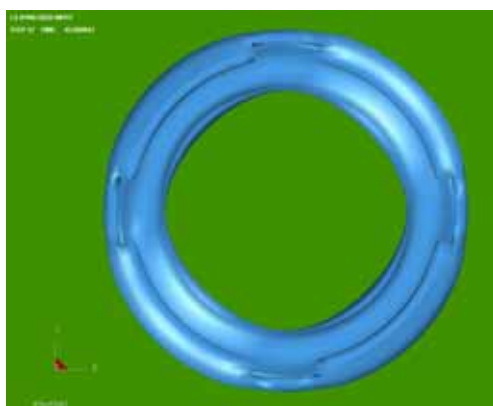
4η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Ολοκλήρωση και του δεύτερου μη έκτατου λοβού και αρχή δημιουργίας τρίτου εκτατού λοβού στο πραγματικό δοκίμιο, ενώ στο μοντέλο μας υπάρχει μια μικρή καθυστέρηση του φαινομένου. Πάτημα της πρέσας στα 35 mm.



5^η Φάση και τελευταία κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (κάτω-αριστερή εικόνα με brick elements). Έχουν ολοκληρωθεί πλήρως και οι δύο εκτατοί λοβοί, και συνεχίζεται ο σχηματισμός του τρίτου μη εκτατού λοβού

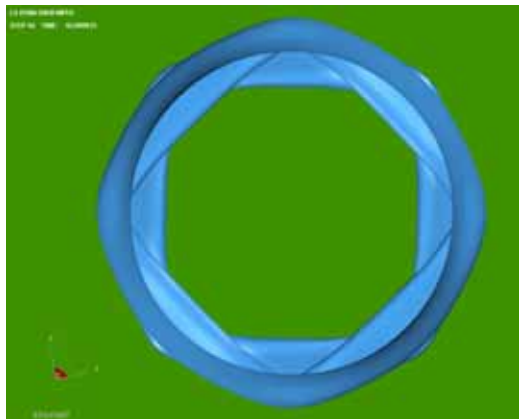
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο

για τα shell elements, ενώ στα άλλα δύο συνεχίζεται η αξονοσυμμετρική παραμόρφωση. Η κατάρρευση του δοκιμίου έχει πλέον ολοκληρωθεί, και οι δύο τελικοί λοβοί έχουν σχηματιστεί πλήρως, ενώ ο τρίτος λοβός παραμένει ημιτελής. Πάτημα της πρέσας στα 45 mm.

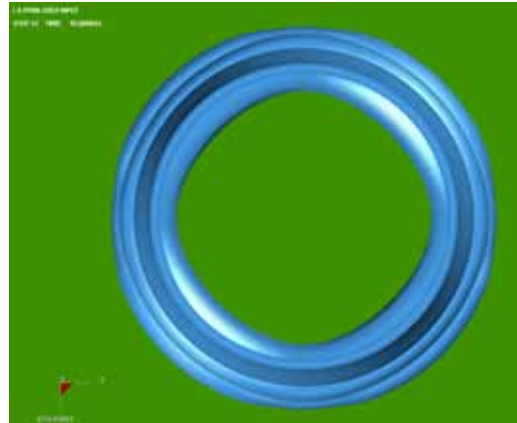


Τελική μορφή δοκιμίου αμέσως μετά το τέλος της διαδικασίας αξονικής κατάρρευσης στην πρέσα (κάτω δεξιά). Το ίδιο δοκίμιο μετά το τέλος της προσομοίωσης από το LS-DYNA, (κάτω αριστερά με brick elements). Παρατηρούμε στο μοντέλο μας με τα shell elements τους τρεις μη εκτατούς λοβούς που είναι στραμμένοι μεταξύ τους κατά $\pi/4$ (diamond). Στο δοκίμιο της πρέσας βλέπουμε ότι το φαινόμενο δεν είναι τόσο έντονο και το μοντέλο με τα brick elements πλησιάζει αρκετά την αξονοσυμμετρική κατάρρευση. Τελικό πάτημα της πρέσας στα 45 mm.

Σε αντιστραμμένη όψη έχουμε:

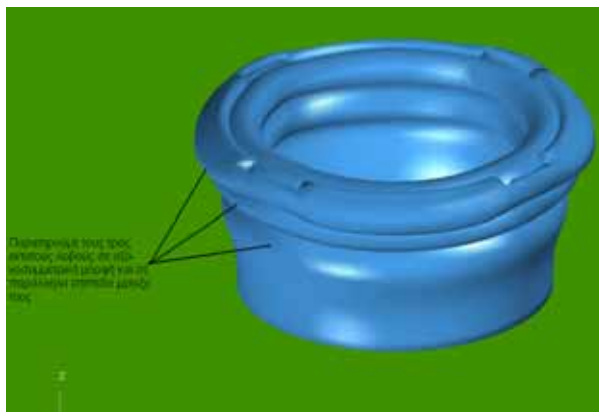


shell elements



brick elements

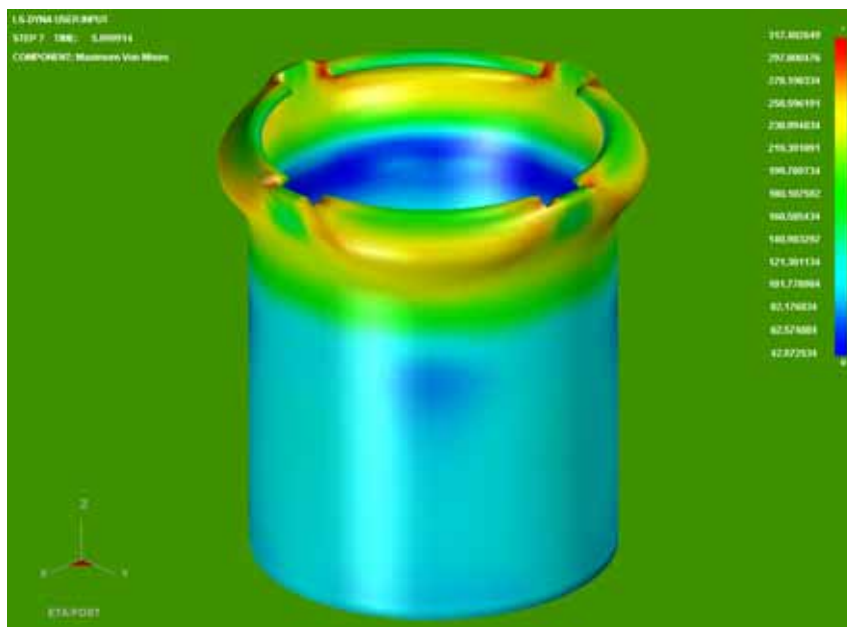
Ακόμα, σε τρισδιάστατη ισομετρική όψη, παρουσιάζεται παρακάτω η τελική μορφή του δοκιμίου όπως προσομοιώθηκε στο LS-DYNA με brick elements και όπως διαμορφώθηκε κατά την αξονική καταπόνηση στην πρέσα Iatron, με κατάρρευση του δοκιμίου έως τα 45 mm:



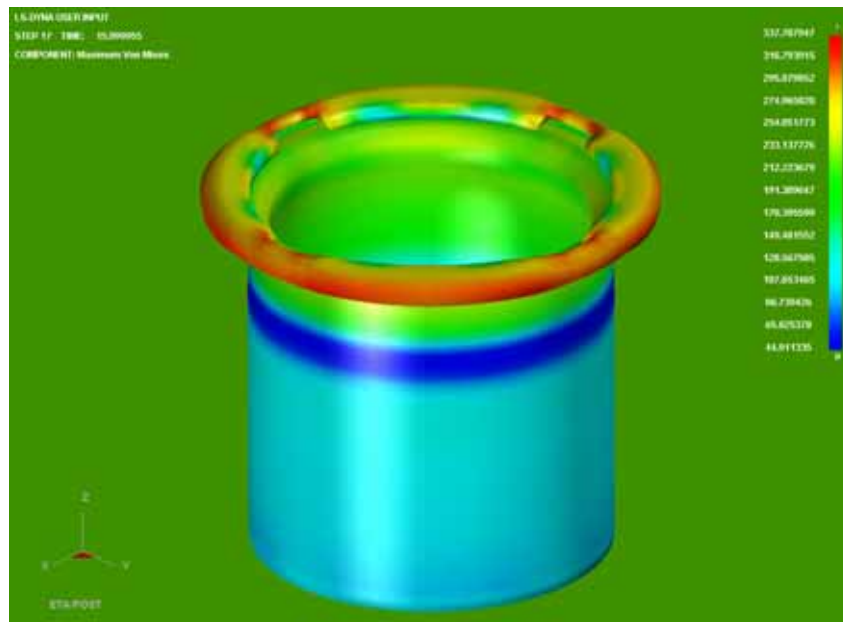
Ακολουθούν εικόνες από την κατανομή των τάσεων σε όλη την επιφάνεια του δοκιμίου κατά τα διάφορα στάδια της κατάρρευσής του(μοντέλο με brick elements):

Επιλέγοντας στον ETA POSTGL:

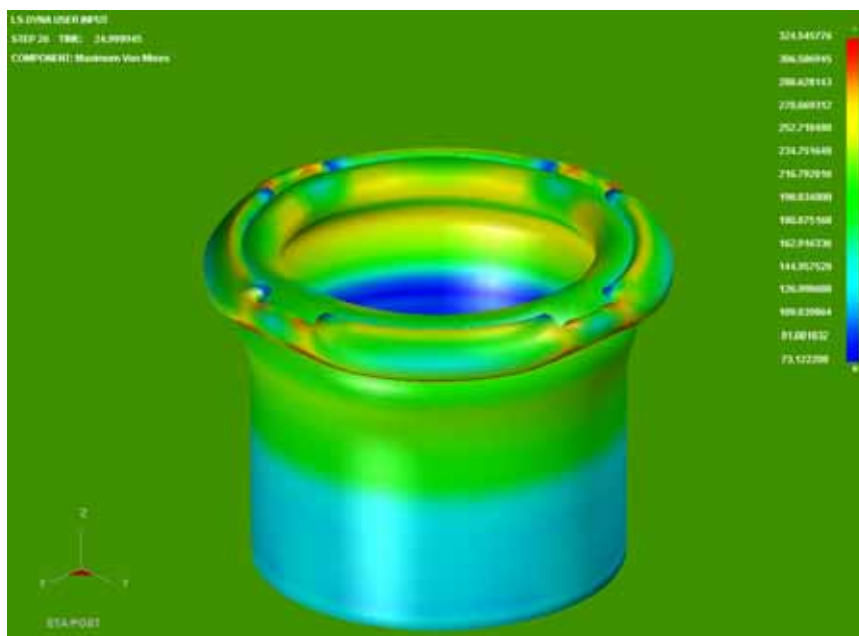
CONTOUR -> STRESS/STRAIN -> MAXIMUM VON MISES STRESSES:



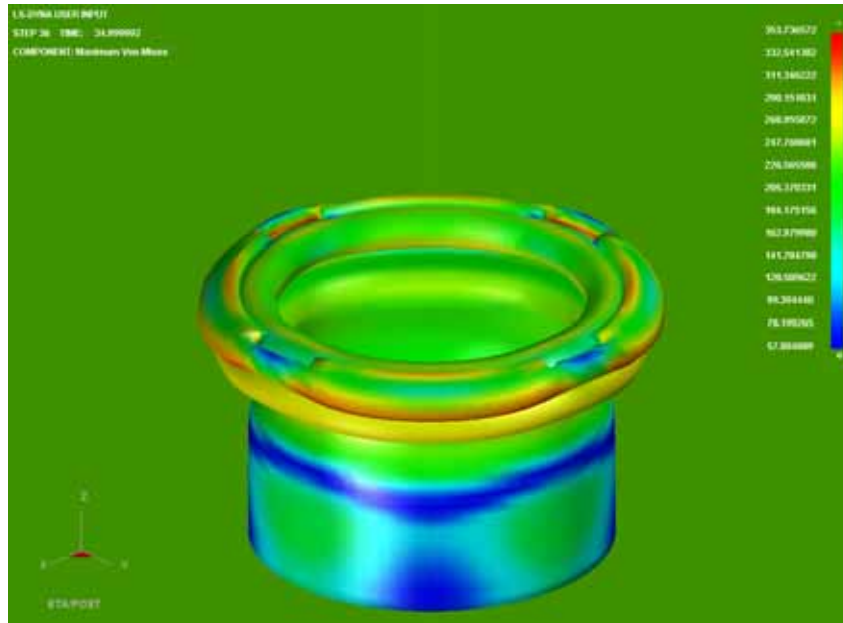
Κατανομή των τάσεων στα 6 mm Έχουμε εμφάνιση τάσεων στην περιοχή γύρω από τις εγκοπές του δοκιμίου, που όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 2, για την θεωρία των τάσεων γύρω από εγκοπές, βλέπουμε ότι κατά την οριζόντια διεύθυνση που είναι κάθετη σε σχέση με την διεύθυνση της αξονικής θλίψης του δοκιμίου, έχουμε τάσεις ίσες με $\sigma = 270 \text{ MPa}$ στην περιοχή αναδίπλωσης του λοβού, ενώ στις περιοχές των εγκοπών έχουμε μέγιστες, ίσες με $\sigma = 317,4 \text{ MPa}$, η οποία είναι μεγαλύτερη από το όριο αντοχής του υλικού ($\sigma_A=240 \text{ MPa}$), οπότε ξεκινάει η πλαστική παραμόρφωση του δοκιμίου, με εμφάνιση μονίμων παραμορφώσεων σε αυτό.



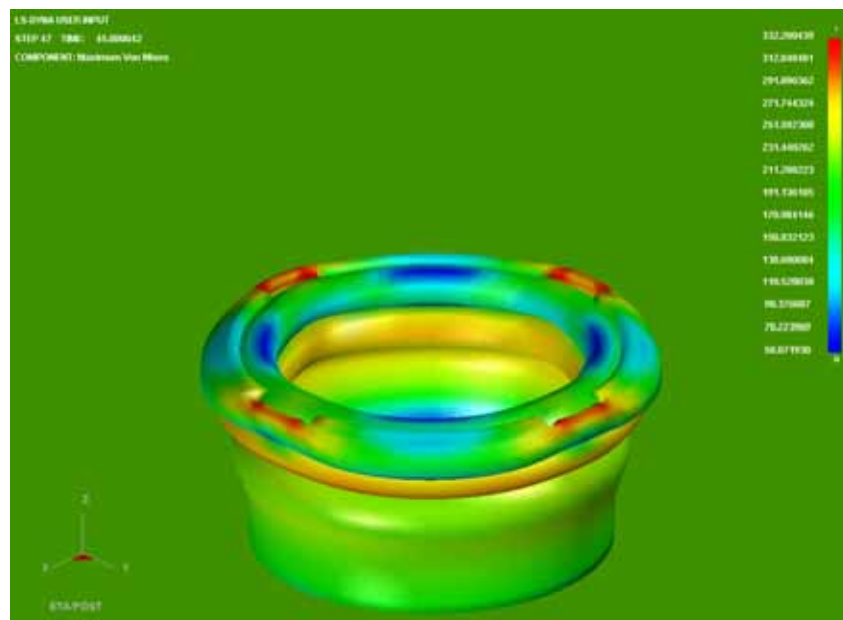
Κατανομή των τάσεων στα 16 mm. Έχουμε μέγιστες τάσεις στην περιοχή σχηματισμού του πρώτου λοβού που είναι ίσες με $\sigma = 337,8 \text{ MPa}$, που βλέπουμε ότι είναι μεγαλύτερη τιμή από την τάση διαρροής του δοκιμίου ($\sigma_A = 240 \text{ MPa}$), ενώ οι τάσεις που αναπτύσσονται στο πιο κάτω μέρος του δοκιμίου είναι μικρότερες της τάξεως των 130 MPa. Συνεχίζεται η κατάρρευση του δοκιμίου από την θέση αυτή και με διεύθυνση προς τα κάτω.



Κατανομή των τάσεων στα 25 mm. Έχουμε μέγιστες τάσεις στην περιοχή των εγχοπών. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή 324,5 MPa. Στην περιοχή σχηματισμού του δεύτερου λοβού επικρατούν τάσεις ίσες με 240 MPa. Στο κάτω μισό του μοντέλου μας εξακολουθούμε να έχουμε εμφάνιση μικρότερων τάσεων που κυμαίνονται στα 150 MPa.

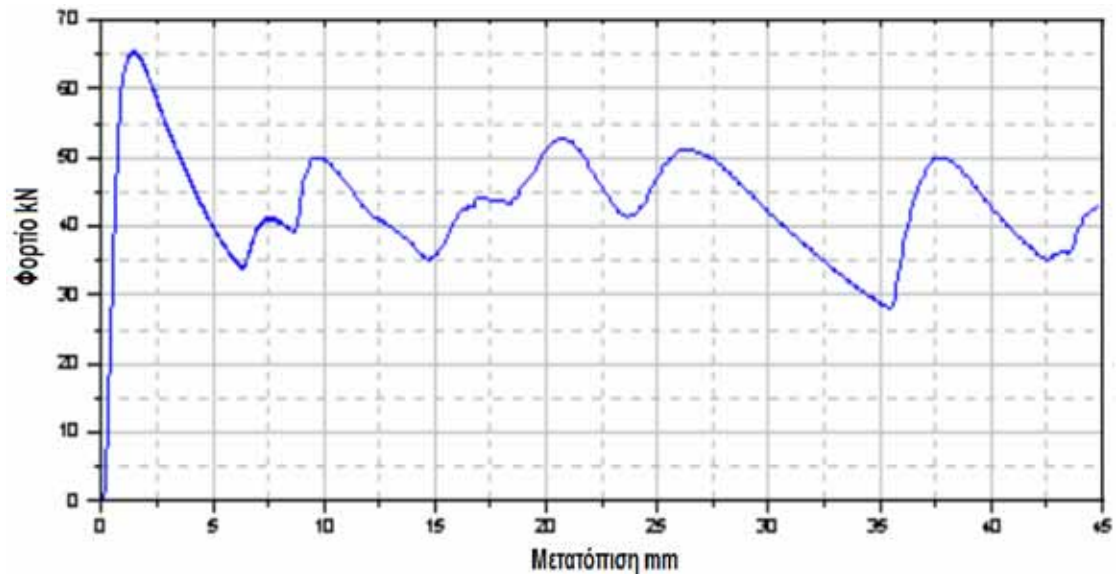


Κατανομή των τάσεων στα 35 mm. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή 353,7 MPa στην περιοχή των εγκοπών και αναδίπλωσης των εγκοπών. Ο πρώτος και ο δεύτερος εκτατός λοβός έχουν σχηματιστεί πλήρως σε επίπεδο παράλληλο μεταξύ τους. Στο κάτω μισό του δοκιμίου έχουμε μικρές τάσεις ίσες με 100 MPa.

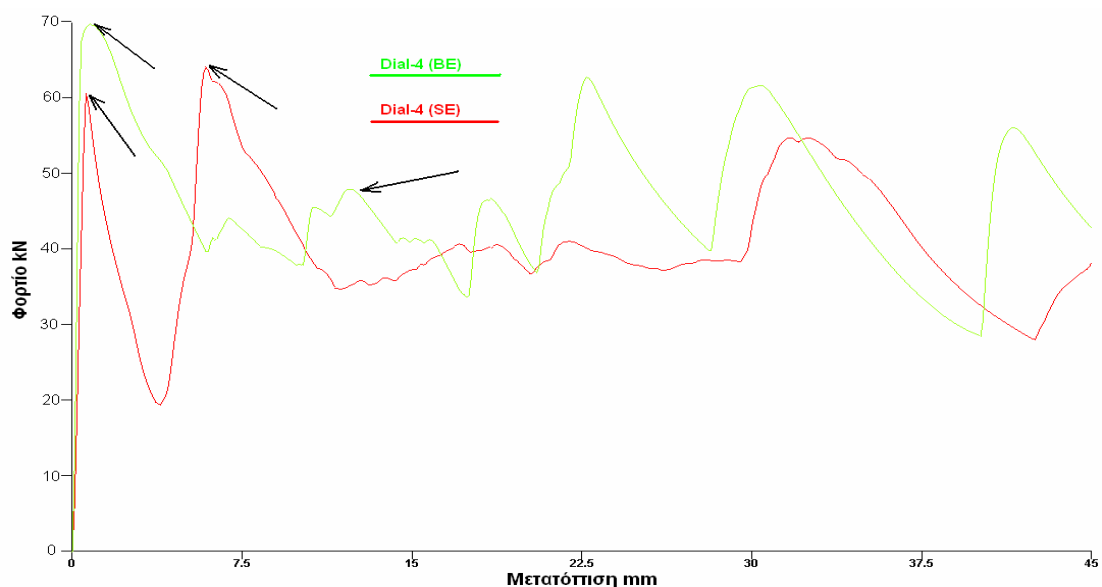


Κατανομή των τάσεων στα 45 mm. Οι τελικές τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη εμφανιζόμενη τιμή 332,2 MPa στην περιοχή εγκοπών και αναδίπλωσης του δεύτερου λοβού. Η κατάρρευση του δοκιμίου έχει πλέον ολοκληρωθεί και οι δύο τελικοί εκτατοί λοβοί έχουν σχηματιστεί πλήρως ενώ ο τρίτος λοβός παραμένει ημιτελής.

Ακόμα, το διάγραμμα των δυνάμεων μετά την επεξεργασία των στοιχείων που πάρθηκαν από την πρέσα, και με την χρήση του Excel, είναι αυτό που παρουσιάζεται στην επόμενη σελίδα, με τον κατακόρυφο άξονα να δείχνει τις **δυνάμεις σε kN**, και με τον οριζόντιο άξονα να δείχνει τις **μετατοπίσεις** (βραχύνσεις του θλιβόμενου δοκιμίου) **σε mm**:



Το διάγραμμα των δυνάμεων μετά την επεξεργασία των στοιχείων που πάρθηκαν από την προσομοίωση στο ls-dyna, και με την χρήση του Excel, είναι αυτό που παρουσιάζεται στο επόμενο διάγραμμα, με τον κατακόρυφο άξονα να δείχνει τις **δυνάμεις σε kN**, και με τον οριζόντιο άξονα να δείχνει τις **μετατοπίσεις** (βραχύνσεις του θλιβόμενου δοκιμίου) **σε mm**:



Από τα παραπάνω διαγράμματα φαίνεται και η ομαλότητα της καμπύλης των *brick elements* στις κορυφές που ταιριάζει με την πειραματική καμπύλη, ενώ με τα *shell elements* παρατηρούνται πιο οξείες καμπύλες, πράγμα που δηλώνει και την καλύτερη μοντελοποίηση του δοκιμίου μας.

- Από τα στοιχεία που πάρθηκαν από την πρέσα, βρέθηκε:

Διαδρομή εμβόλου: 44.8mm
Το μέγιστο φορτίο $P_{max} = 65.29 \text{ KN}$,
Το μέσο φορτίο $P_{mean} = 42 \text{ KN}$,
Η ομοιομορφία φορτίου $P_{max}/P_{mean} = 1.55$
Η συνολική ενέργεια που δαπανήθηκε για την αξονική κατάρρευση του δοκιμίου είναι $E = 1749 \text{ KN mm}$

- Από τα στοιχεία που πάρθηκαν από την προσομοίωση στο LS-DYNA για *brick elements*, βρέθηκε:

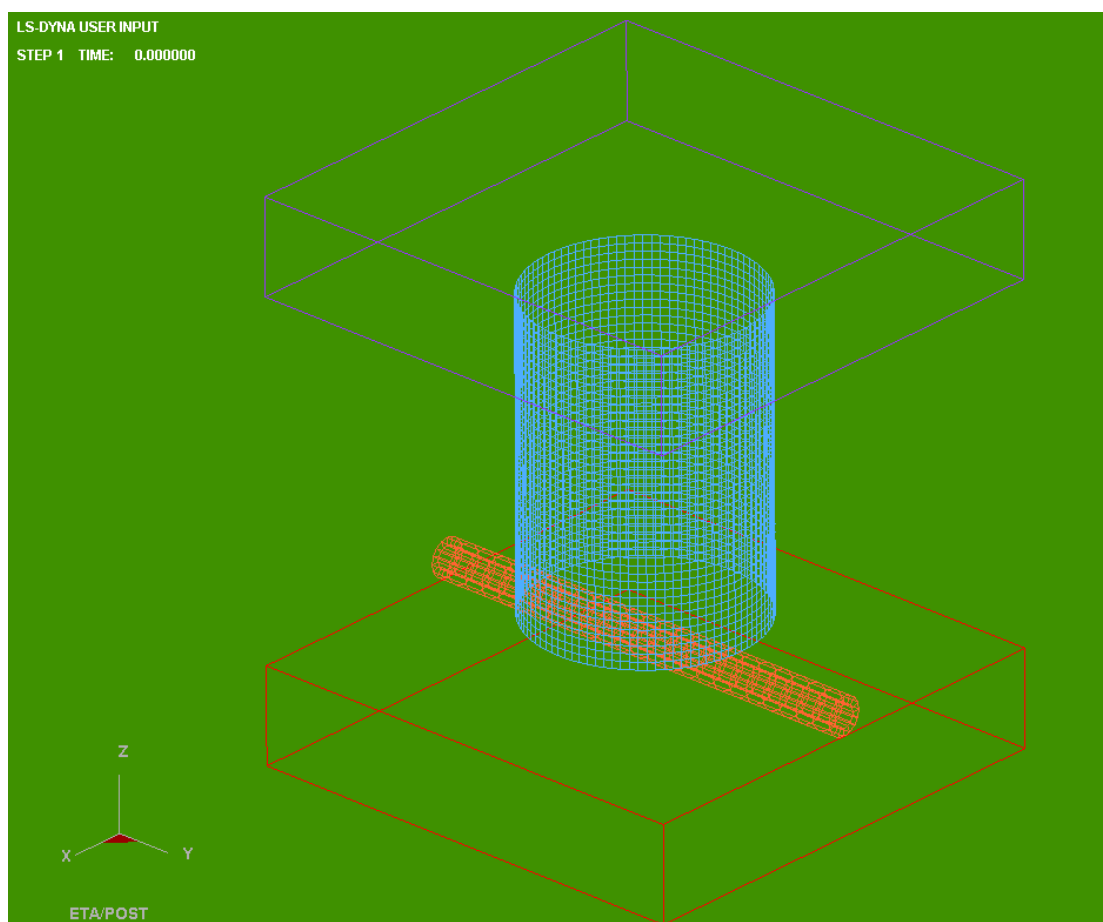
Διαδρομή εμβόλου: 45.0mm
Το μέγιστο φορτίο $P_{max} = 70 \text{ kN}$,
Το μέσο φορτίο $P_{mean} = 46,91 \text{ kN}$,
Η ομοιομορφία φορτίου $P_{max}/P_{mean} = 1,49$
Η συνολική ενέργεια που δαπανήθηκε για την αξονική κατάρρευση του δοκιμίου είναι $E = 2111,1 \text{ kN mm}$

- Από τα στοιχεία που πάρθηκαν από την προσομοίωση στο LS-DYNA για *shell elements*, βρέθηκε:

Διαδρομή εμβόλου: 45.0mm
Το μέγιστο φορτίο $P_{max} = 64.5 \text{ kN}$,
Το μέσο φορτίο $P_{mean} = 41.0 \text{ kN}$,
Η ομοιομορφία φορτίου $P_{max}/P_{mean} = 1.57$
Η συνολική ενέργεια που δαπανήθηκε για την αξονική κατάρρευση του δοκιμίου είναι $E = 1843.8 \text{ kN mm}$

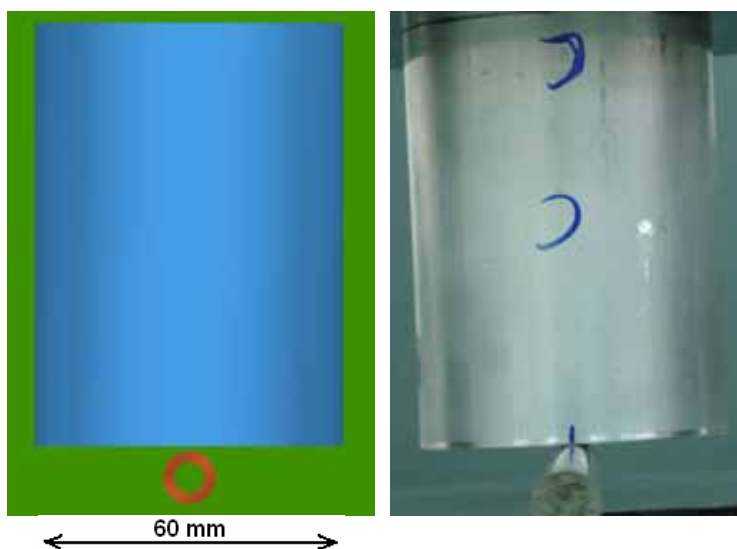
ΕΝΟΤΗΤΑ 5-8 : ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΑΝΕΥ ΕΓΚΟΠΩΝ, ΜΕ ΠΑΤΗΜΑ ΣΕ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΟ ΔΟΚΙΜΙΟ ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ $d = 10\text{mm}$ (Dial-C).

Το μοντέλο του δοκιμίου κυκλικής διατομής χωρίς εγκοπές με κυλινδρικό πάτημα διαμέτρου $d = 10\text{ mm}$, παρουσιάζεται στην ακόλουθη εικόνα:

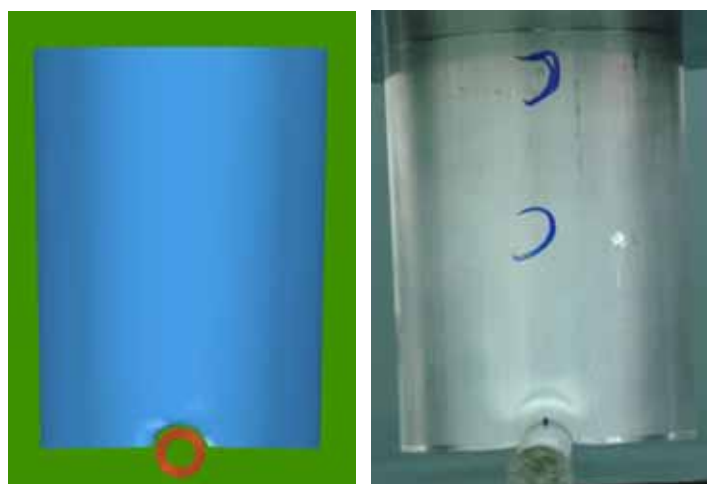


Σχ.1, Απεικόνιση πλέγματος στο LS-DYNA 3D, για κυκλικής διατομής δοκίμιο χωρίς εγκοπές με κυλινδρικό πάτημα διαμέτρου $d = 10\text{ mm}$.

Οι αντίστοιχες φάσεις προσομοίωσης της κατάρρευσης του δοκιμίου αυτού, που κατέγραψα με τη χρήση του LS-DYNA, σε σύγκριση με τις φάσεις που έλαβα κατά την διάρκεια του πειράματος με την χρήση πρέσας Instron, παρουσιάζονται στις επόμενες σελίδες:



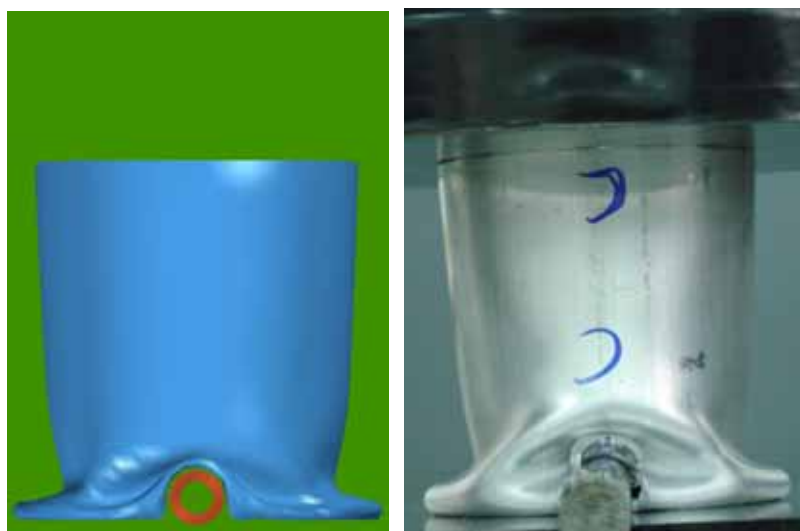
Αρχική τοποθέτηση του δοκιμίου στην πρέσα, και έναρξη της διαδικασίας αξονικής θλίψης του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά). Η έναρξη της προσομοίωσης του μοντέλου μας στο LS-DYNA (αριστερά).



1^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Παρατηρούμε ότι δεν σχηματίζεται κανένας λοβός. Έχουμε παραμόρφωση του κάτω μετώπου του δοκιμίου η οποία ακολουθεί τη μορφή του κυλινδρικού δοκιμίου που έχουμε για πάτημα. Στο πραγματικό δοκίμιο παρατηρείται ροή υλικού προς τα έξω ακριβώς πάνω από το πάτημα. Πάτημα της πρέσας στα 5 mm.



2^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Το δοκίμιο έχει ακουμπήσει στην κάτω πλάκα και ο πρώτος λοβός έχει αρχίσει να δημιουργείται περίπου στο οριζόντιο επίπεδο που περνά από το κέντρο του κυλίνδρου. Στο πραγματικό δοκίμιο παρατηρείται και σκίσιμο του υλικού πάνω από το κυλινδρικό πάτημα. Πάτημα της πρέσας στα 13 mm.



3^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Ο πρώτος λοβός έχει σχεδόν ολοκληρωθεί και στο μοντέλο μας και στο πειραματικό δοκίμιο. Το σκίσιμο του δοκιμίου έχει μεγαλώσει, ενώ στο μοντέλο μας δεν υπάρχει, αφού οι συνθήκες είναι ιδανικές και έχουμε δώσει πλαστική ιδιότητα στο δοκίμιο μας. Πάτημα της πρέσας στα 25 mm.



4^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Το φαινόμενο της πλαστικής παραμόρφωσης γίνεται πολύ έντονο σε επίπεδο παράλληλο με τον πρώτο λοβό και σε ύψος λίγο πάνω από το κυλινδρικό πάτημα. Στην περιοχή αυτή έχουμε ροή υλικού προς τα έξω, ενώ στην παράπλευρη επιφάνεια έχουμε έντονες κοιλότητες. Τα άκρα του λοβού δεξιά και αριστερά έχουν αποκολληθεί από την κάτω πλάκα. Τα φαινόμενα αυτά παρατηρούνται και στο μοντέλο του LS-Dyna αλλά πιο έντονα. Τέλος παρατηρείται μια μικρή εισροή του υλικού στο πάνω μέτωπό του προς τον αξονοσυμμετρικό του άξονα, ενώ στο μοντέλο ξεκινά η δημιουργία ενός εκτατού λοβού. Πάτημα της πρέσας στα 37 mm.



5^η Φάση και τελευταία κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Στα τελευταία 8mm πατήματος με την πρέσα το κάτω μέρος του δοκιμίου δεν έχει αλλάξει πολύ. Αντίθετα με το πάνω μέτωπό του όπου συνεχίζεται η παραμόρφωση προς τα μέσα και απορροφάει όλη την ενέργεια

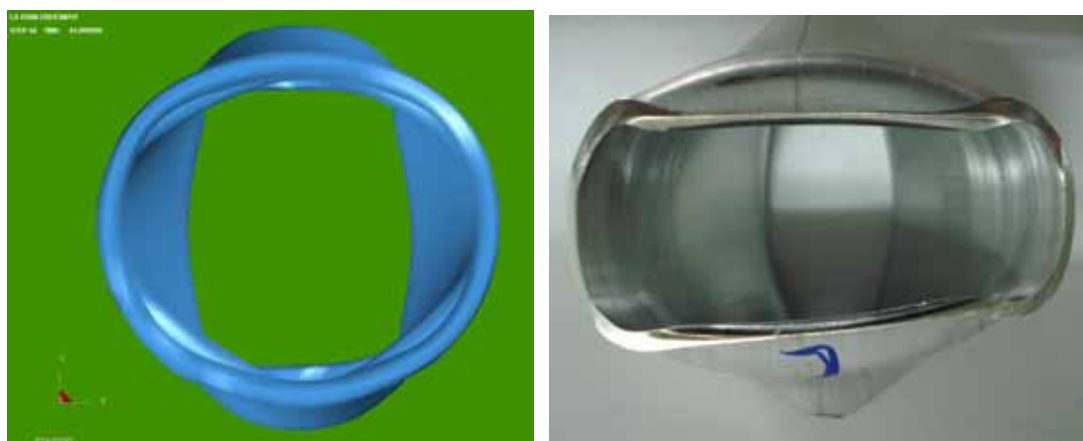
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο

που του δίνουμε, όπως επίσης και στο μοντέλο μας όπου συνεχίζεται η δημιουργία του εκτατού λοβού. Η κατάρρευση του δοκιμίου έχει πλέον ολοκληρωθεί με πάτημα της πρέσας στα 45 mm.



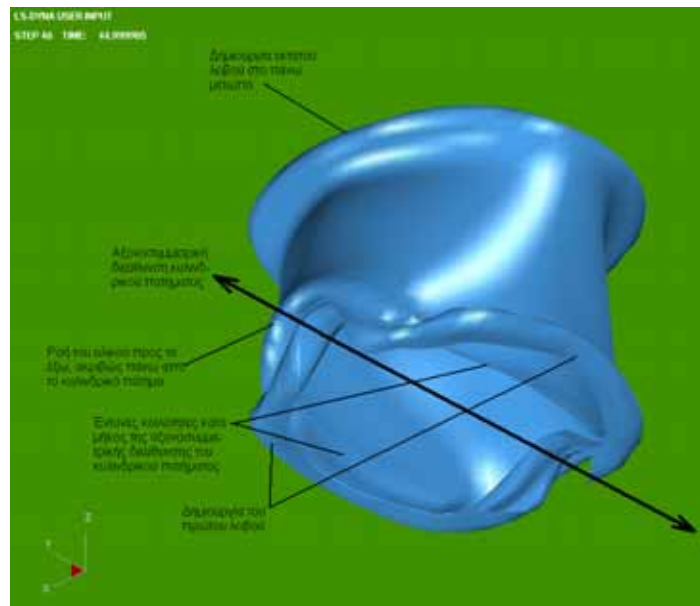
Τελική μορφή δοκιμίου αμέσως μετά το τέλος της διαδικασίας αξονικής κατάρρευσης στην πρέσα (δεξιά). Το ίδιο δοκίμιο μετά το τέλος της προσομοίωσης από το LS-DYNA, (αριστερά). Παρατηρούμε τους δύο λοβούς και το μεγαλύτερο μέτωπο του δεύτερου. Έχουν οβάλ μορφή με περισσότερες γωνίες στον πρώτο και καμπύλες στον δεύτερο. Τελικό πάτημα της πρέσας στα 45 mm.

Σε αντιστραμμένη όψη έχουμε:



Εδώ στο πραγματικό δοκίμιο φαίνεται η εισροή του υλικού και η δημιουργία μη εκτατού λοβού, ενώ στο μοντέλο του LS-Dyna ο λοβός μπορούμε να πούμε ότι είναι σχεδόν εκτατός.

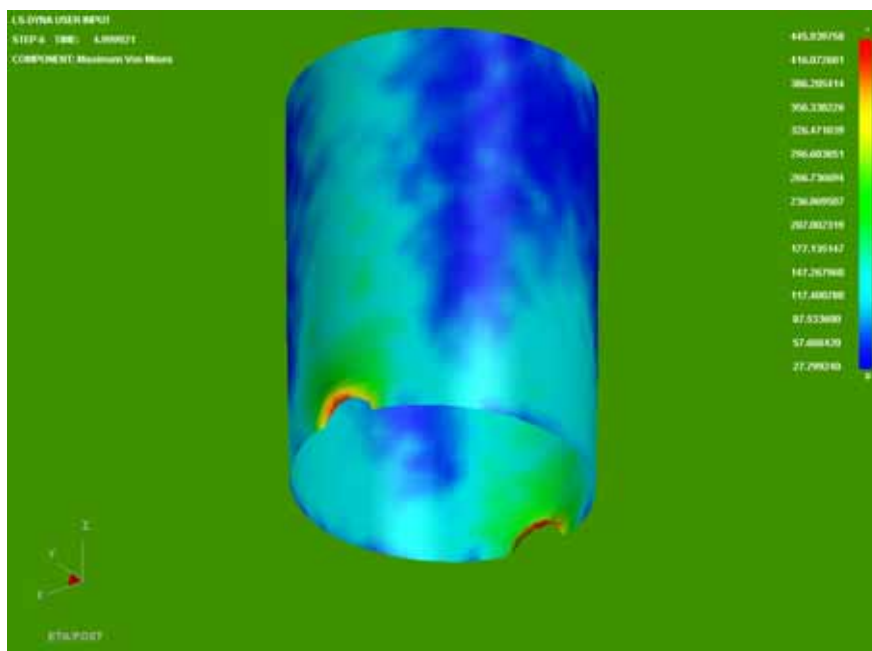
Ακόμα, σε τρισδιάστατη ισομετρική όψη, παρουσιάζεται παρακάτω η τελική μορφή του δοκιμίου όπως προσομοιώθηκε στο LS-DYNA με κατάρρευση του δοκιμίου έως τα 45 mm:



Ακολουθούν εικόνες από την κατανομή των τάσεων σε όλη την επιφάνεια του δοκιμίου κατά τα διάφορα στάδια της κατάρρευσής του:

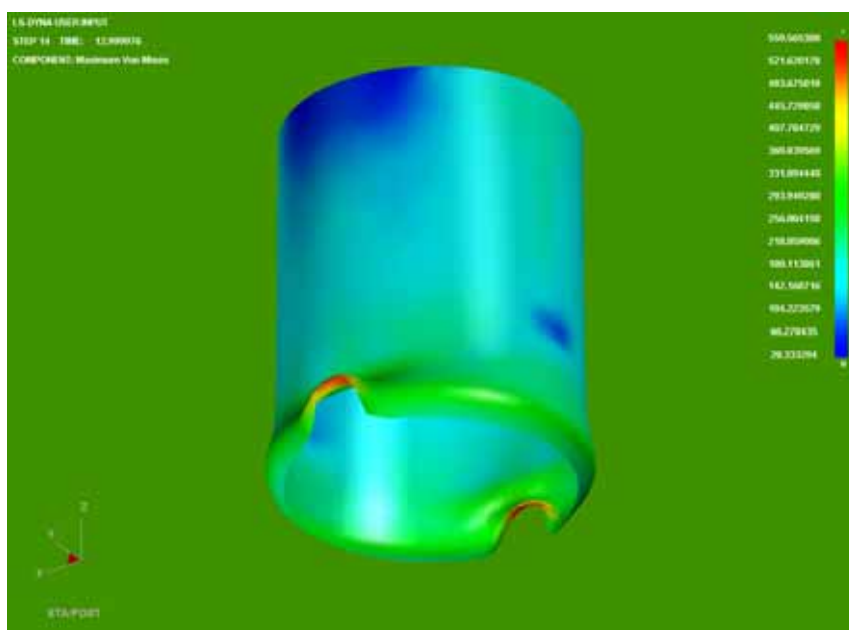
Επιλέγοντας στον ETA POSTGL:

CONTOUR -> STRESS/STRAIN -> MAXIMUM VON MISES STRESSES:

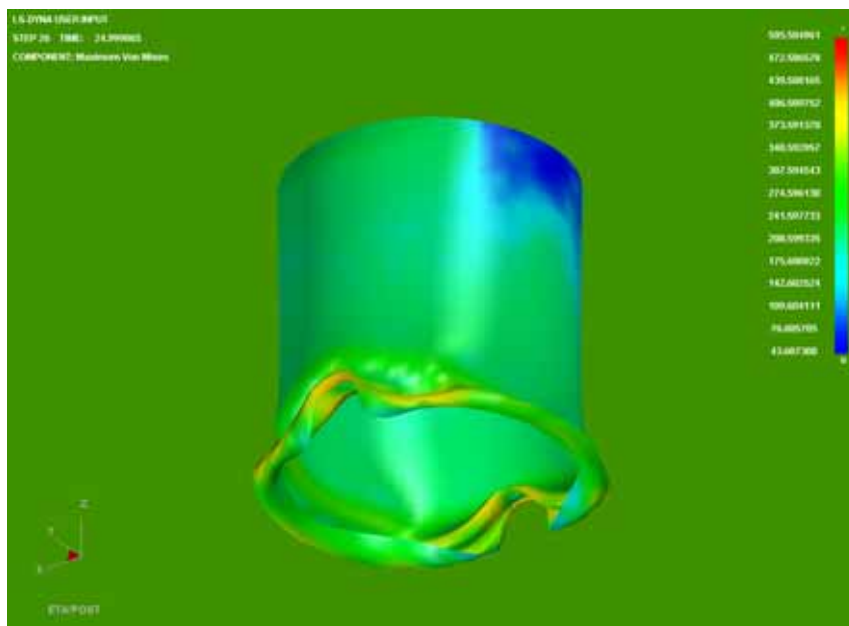


ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο

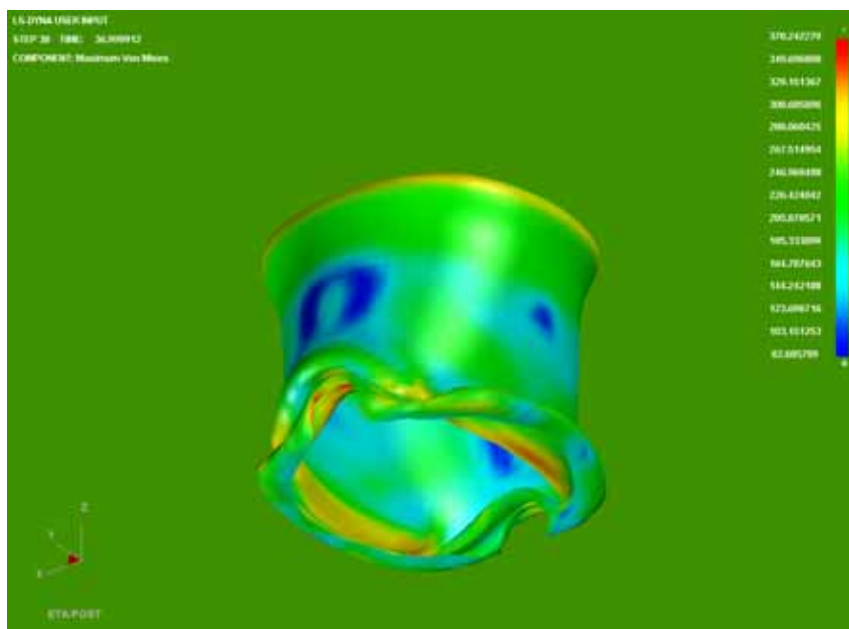
Κατανομή των τάσεων στα 5 mm. Έχουμε εμφάνιση τάσεων στην περιοχή που πατάει στο κυλινδρικό πάτημα που είναι μέγιστες και ίσες με $\sigma = 445,9 \text{ MPa}$, η οποία είναι μεγαλύτερη από το όριο αντοχής του υλικού ($\sigma_A=240 \text{ MPa}$), οπότε ξεκινάει η πλαστική παραμόρφωση του δοκιμίου, με εμφάνιση μονίμων παραμορφώσεων σε αυτό. Το υπόλοιπο δοκίμιο δεν επηρεάζεται από το πάτημα της πρέσας, αφού επικρατούν τάσεις της τάξεως των **30 ως 140 MPa**.



Κατανομή των τάσεων στα 13 mm. Έχουμε μέγιστες τάσεις στην περιοχή που πατάει στο κυλινδρικό πάτημα που είναι μέγιστες και ίσες με $\sigma = 559,6 \text{ MPa}$, όπως επίσης και στην περιοχή σχηματισμού του πρώτου λοβού που είναι $\sigma=340 \text{ MPa}$, που βλέπουμε ότι είναι μεγαλύτερη τιμή από την τάση αντοχής του δοκιμίου ($\sigma_A= 240 \text{ MPa}$), οπότε διαρρέει το υλικό. Στο πάνω μέρος του δοκιμίου επικρατούν μικρότερες τάσεις ίσες με $\sigma = 180 \text{ MPa}$. Συνεχίζεται η κατάρρευση του δοκιμίου από την θέση αυτή και με διεύθυνση προς τα κάτω.

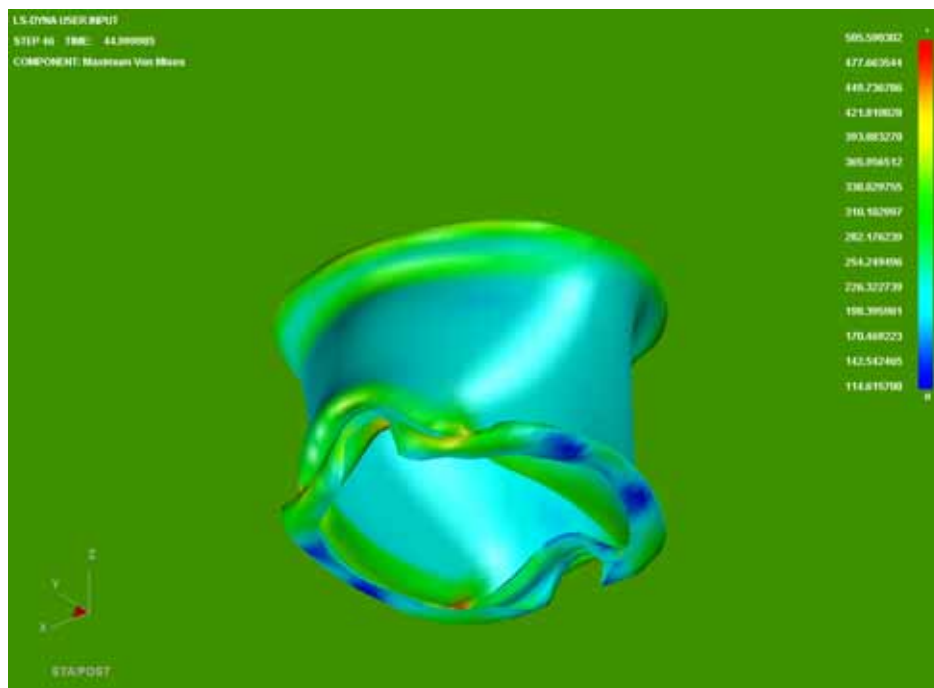


Κατανομή των τάσεων στα 25 mm. Έχουμε μέγιστες τάσεις στην περιοχή που πατάει στο κυλινδρικό πάτημα που είναι μέγιστες και ίσες με $\sigma = 505,6 \text{ MPa}$, ενώ υψηλές τάσεις ασκούνται και στο υπόλοιπο δοκίμιο ίσες με **240 ως 340 MPa**, που βλέπουμε ότι είναι μεγαλύτερη τιμή από την τάση αντοχής του δοκιμίου ($\sigma_A = 240 \text{ MPa}$), οπότε διαρρέει το υλικό.



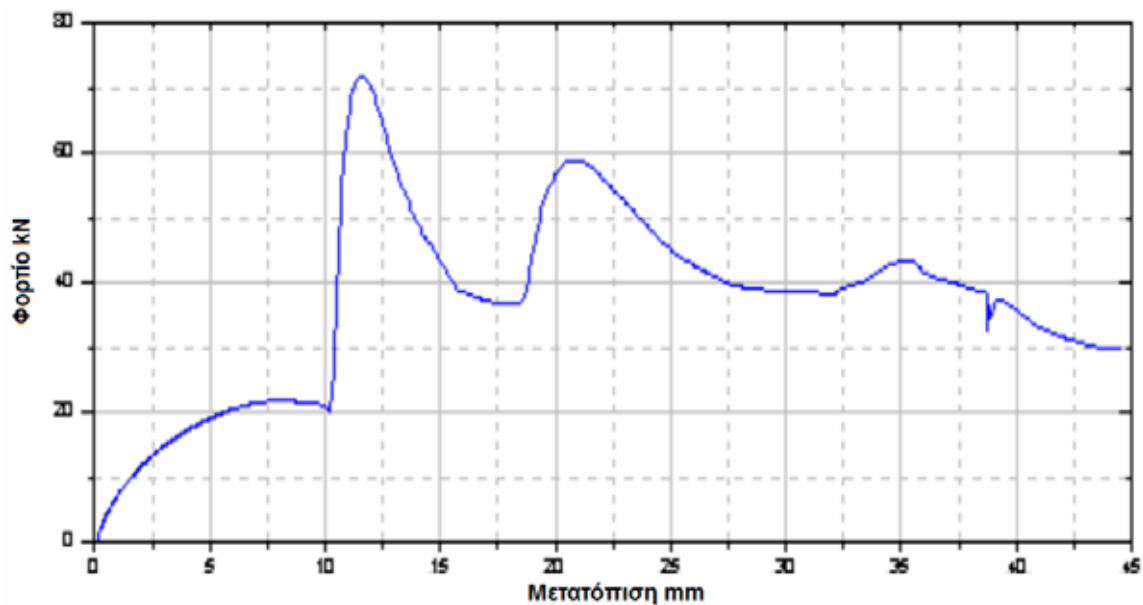
Κατανομή των τάσεων στα 37 mm. Οι μέγιστες τάσεις αναπτύσσονται στην περιοχή που πατάει στο κυλινδρικό πάτημα, στο εσωτερικό του πρώτου λοβού όπου έρχεται σε επαφή με την κάτω πλάκα και στο πάνω μέτωπο του δοκιμίου όπου ξεκινάει ο σχηματισμός του εκτατού λοβού. Οι τάσεις αυτές είναι ίσες με $\sigma = 378,2 \text{ MPa}$, που βλέπουμε ότι είναι μεγαλύτερη τιμή από την τάση αντοχής του δοκιμίου ($\sigma_A = 240 \text{ MPa}$), οπότε συνεχίζει η διαρροή του υλικού. Σημαντικές

τάσεις αναπτύσσονται και στην υπόλοιπη περιοχή του δοκιμίου ίσες με $\sigma = 250$ **MPa**, που το παραμορφώνουν ελαφρώς.

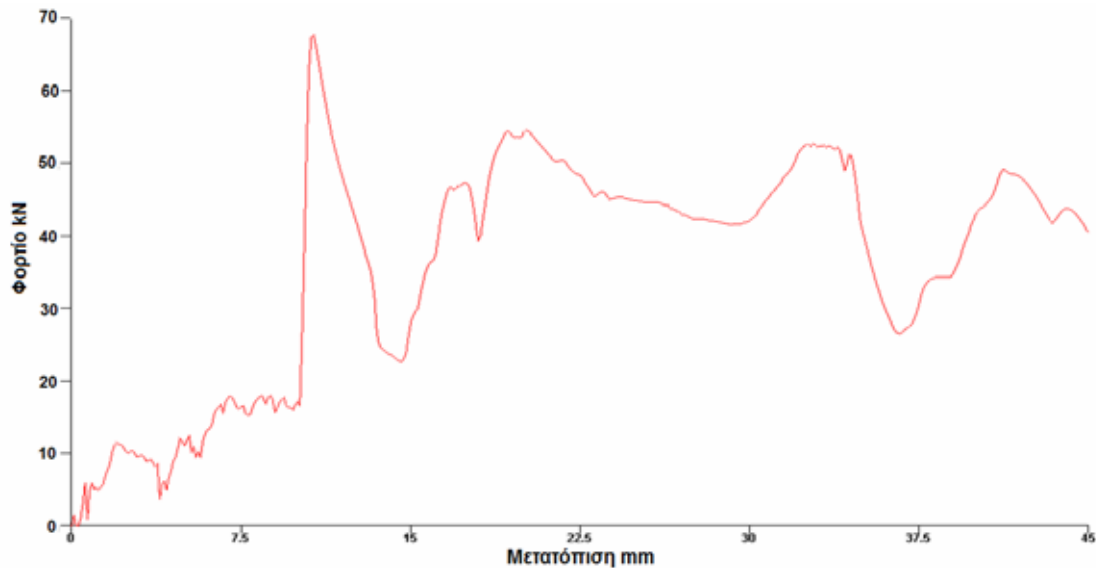


Κατανομή των τάσεων στα 45 mm. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή **505,6 MPa**, που είναι πολύ υψηλές. Σημαντικές τάσεις έχουμε στο πάνω και κάτω μέρος του δοκιμίου που είναι ίσες με **350 MPa**. Αυτό οφείλεται στο ότι λόγω της αναδίπλωσης έρχεται μεγαλύτερο μέρος του υλικού σε επαφή με την άνω και κάτω πλάκα αλλά και με τον ίδιο του τον εαυτό και δυσκολεύει η παραμόρφωσή του. Οι τάσεις στο μέσο τμήμα του δοκιμίου είναι μικρότερες της τάξεως των **200MPa**. Η κατάρρευση του δοκιμίου έχει τελειώσει.

Ακόμα, το διάγραμμα των δυνάμεων μετά την επεξεργασία των στοιχείων που πάρθηκαν από την πρέσα, και με την χρήση του Excel, είναι αυτό που παρουσιάζεται στην επόμενη σελίδα, με τον κατακόρυφο άξονα να δείχνει τις **δυνάμεις σε kN**, και με τον οριζόντιο άξονα να δείχνει τις **μετατοπίσεις** (βραχύνσεις του θλιβόμενου δοκιμίου) **σε mm**:



Το διάγραμμα των δυνάμεων μετά την επεξεργασία των στοιχείων που πάρθηκαν από την προσομοίωση στο Is-dyna, και με την χρήση του Excel, είναι αυτό που παρουσιάζεται στο επόμενο διάγραμμα, με τον κατακόρυφο άξονα να δείχνει τις **δυνάμεις σε kN**, και με τον οριζόντιο άξονα να δείχνει τις **μετατοπίσεις** (βραχύνσεις του θλιβόμενου δοκιμίου) **σε mm**:



➤ Από τα στοιχεία που πάρθηκαν από την πρέσα, βρέθηκε:

Διαδρομή εμβόλου: 44.6mm

Το μέγιστο φορτίο $P_{max} = 71.84 \text{ kN}$,

Το μέσο φορτίο $P_{mean} = 38 \text{ kN}$,

Η ομοιομορφία φορτίου $P_{max}/P_{mean} = 1.89$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο

Η συνολική ενέργεια που δαπανήθηκε για την αξονική κατάρρευση του δοκιμίου είναι $E = 1516 \text{ kN mm}$

- Από τα στοιχεία που πάρθηκαν από την προσομοίωση στο LS-DYNA, βρέθηκε:

Διαδρομή εμβόλου: 45.0mm

Το μέγιστο φορτίο $P_{max} = 69.5 \text{ kN}$,

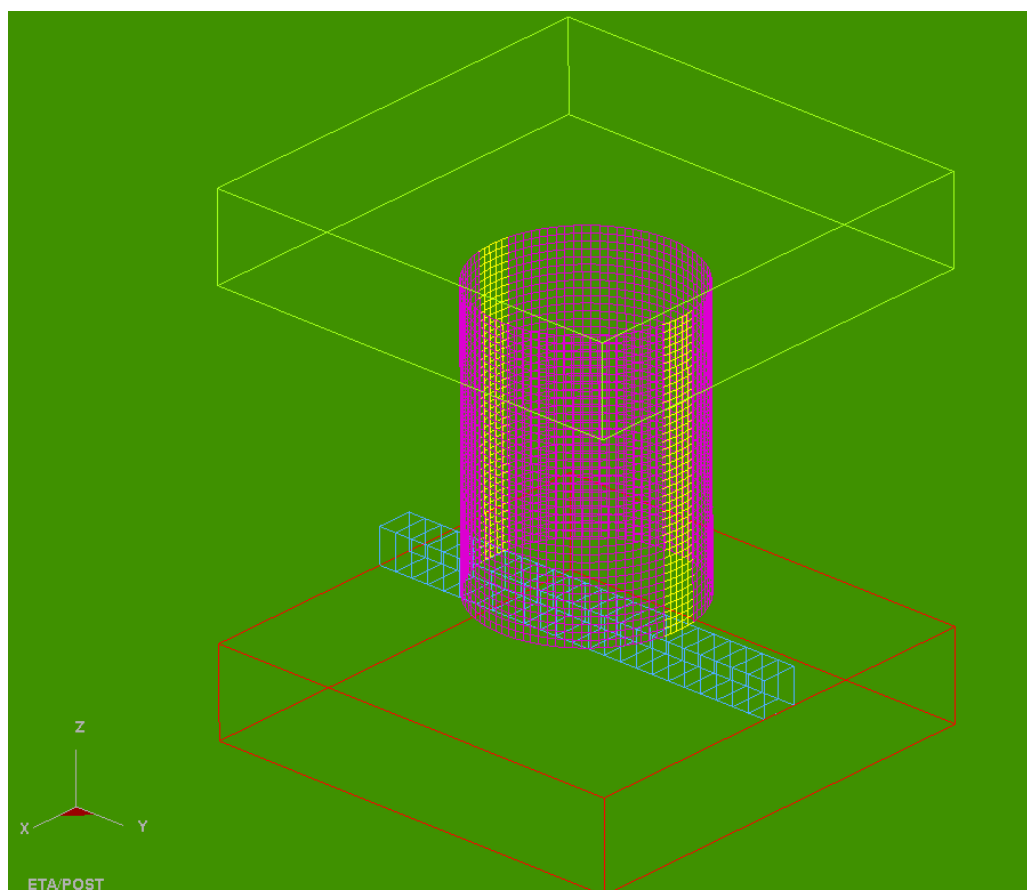
Το μέσο φορτίο $P_{mean} = 35.71 \text{ kN}$,

Η ομοιομορφία φορτίου $P_{max}/P_{mean} = 1.94$

Η συνολική ενέργεια που δαπανήθηκε για την αξονική κατάρρευση του δοκιμίου είναι $E = 1607.1 \text{ kN mm}$

ΕΝΟΤΗΤΑ 5-9 : ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΑΝΕΥ ΕΓΚΟΠΩΝ, ΜΕ ΠΑΤΗΜΑ ΣΕ ΠΑΡΑΛΛΗΛΕΠΙΠΕΔΟ ΔΟΚΙΜΙΟ ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΠΛΕΥΡΑΣ $a = 10\text{mm}$ (Dial-R(p2)).

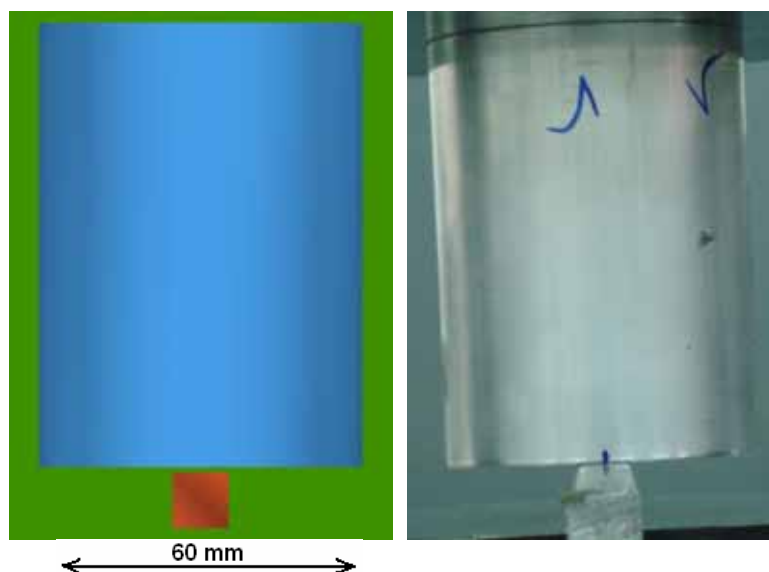
Το μοντέλο του δοκιμίου κυκλικής διατομής χωρίς εγκοπές με πάτημα σε παραλληλεπίπεδο τετραγωνικής διατομής πλευράς $a = 10\text{ mm}$, παρουσιάζεται στην ακόλουθη εικόνα:



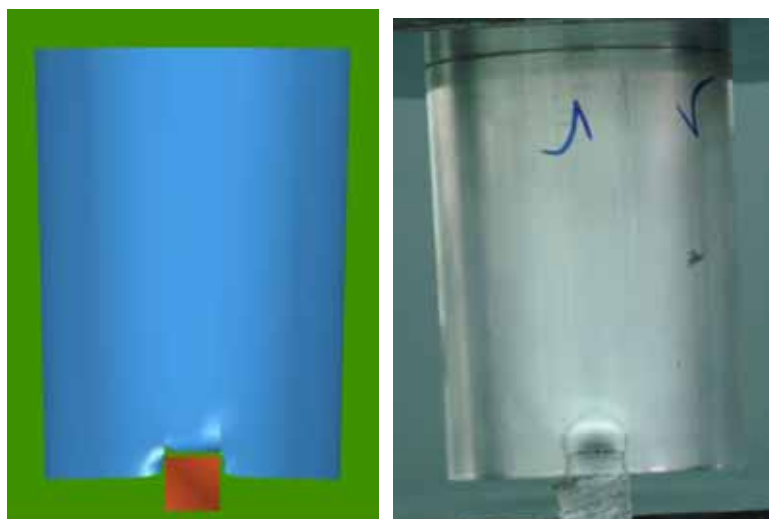
Σχ.1, Απεικόνιση πλέγματος στο LS-DYNA 3D, για κυκλικής διατομής δοκίμιο χωρίς εγκοπές με πάτημα σε παραλληλεπίπεδο τετραγωνικής διατομής πλευράς $a=10\text{mm}$.

Το δοκίμιο ουσιαστικά αποτελείται από δύο parts(δοκίμια) με τις ίδιες ιδιότητες και χρησιμοποιώντας τον μηχανισμό (Contact tie-break)[22] τα κρατάμε ενωμένα χωρίς να διεισδύει το ένα στο άλλο.

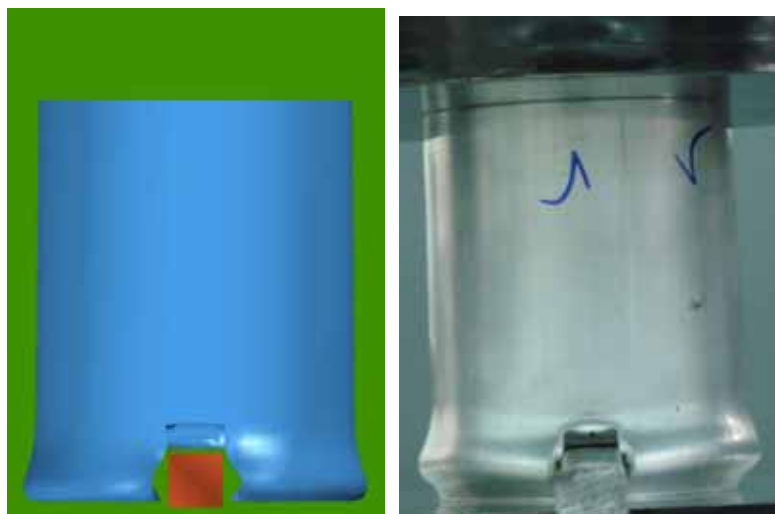
Οι αντίστοιχες φάσεις προσομοίωσης της κατάρρευσης του δοκιμίου αυτού, που κατέγραψα με τη χρήση του LS-DYNA, σε σύγκριση με τις φάσεις που έλαβα κατά την διάρκεια του πειράματος με την χρήση πρέσας Instron, παρουσιάζονται στις επόμενες σελίδες:



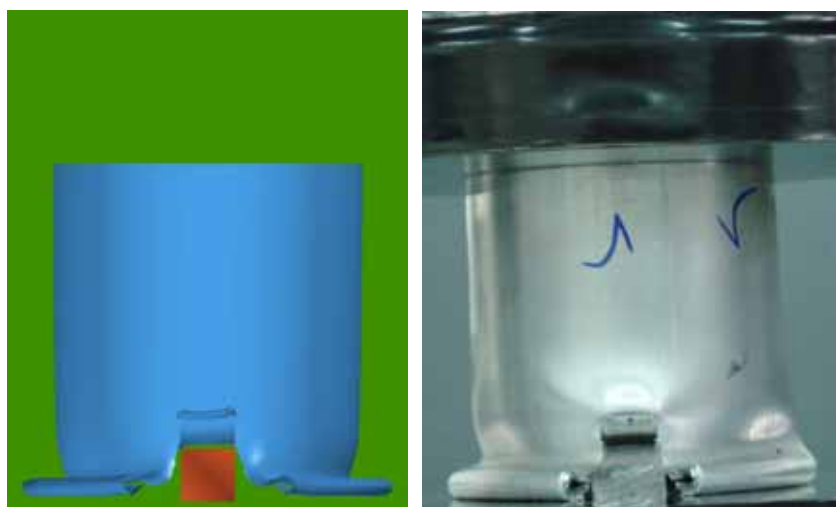
Αρχική τοποθέτηση του δοκιμίου στην πρέσα, και έναρξη της διαδικασίας αξονικής θλίψης του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά). Η έναρξη της προσομοίωσης του μοντέλου μας στο LS-DYNA (αριστερά).

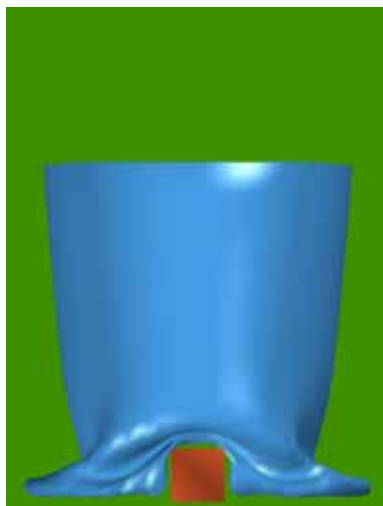


1^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Παρατηρούμε ότι δεν σχηματίζεται κανένας λοβός. Έχουμε παραμόρφωση του κάτω μετώπου του δοκιμίου η οποία ακολουθεί τη μορφή του παραλληλεπίπεδου που έχουμε για πάτημα. Στο πραγματικό δοκίμιο παρατηρείται ροή υλικού προς τα έξω ακριβώς πάνω από το πάτημα. Πάτημα της πρέσας στα 5 mm.

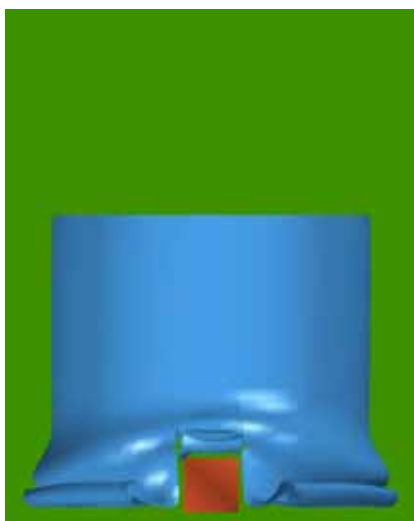


2^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Το δοκίμιο έχει ακουμπήσει στην κάτω πλάκα και ο πρώτος λοβός έχει αρχίσει να δημιουργείται περίπου στο οριζόντιο επίπεδο(και κάθετο στην σελίδα) στα 5mm . Στο πραγματικό δοκίμιο όπως και στο μοντέλο του LS-Dyna παρατηρείται και σκίσιμο του υλικού πάνω από το παραλληλεπίπεδο πάτημα. Επίσης βλέπουμε ότι το πάνω μέτωπο του πραγματικού δοκιμίου πατάει ακόμη στην κάτω πλάκα, ενώ στο μοντέλο μας έχει ήδη λυγίσει προς τα μέσα και ακουμπάει στην κάτω πλάκα το μέτωπο του λοβού. *Αυτό συμβαίνει λόγω των shell elements που έχουμε επιλέξει που προσδίδουν μια καμπυλότητα ακτίνας 1mm στην οριακή θέση του άνω μετώπου του δοκιμίου και έχει ως αποτέλεσμα ο κώδικας του ls-dyna να αναγνωρίζει ως μη επίπεδη την άνω διατομή και να δημιουργεί πιο γρήγορα τον λοβό.* Πάτημα της πρέσας στα 15 mm.

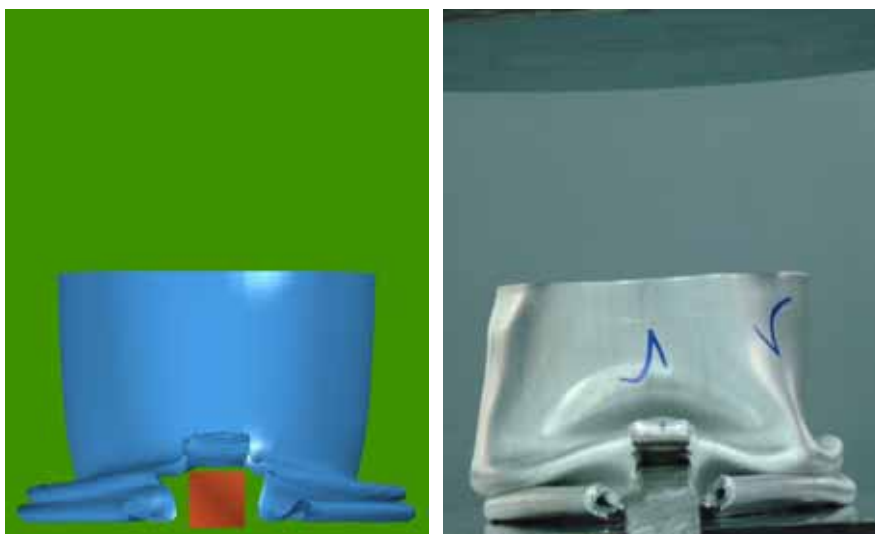




3^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (πίσω δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (πίσω αριστερή εικόνα). Ο πρώτος λοβός έχει σχεδόν ολοκληρωθεί και στο μοντέλο μας και στο πειραματικό δοκίμιο. Το σκίσιμο του δοκιμίου έχει μεγαλώσει. Αρχίζει να δημιουργείται και δεύτερος λοβός. Στο κάτω σχήμα είναι φάση απ' το αντίστοιχο μοντέλο με ένα part. Πάτημα της πρέσας στα 27 mm.

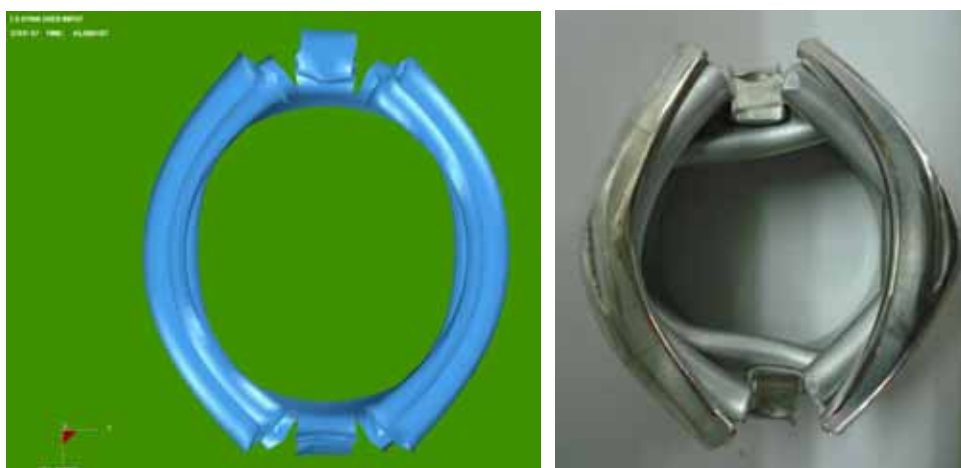


4^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Το φαινόμενο της πλαστικής παραμόρφωσης γίνεται πολύ έντονο σε επίπεδο παράλληλο με τον πρώτο λοβό και σε ύψος λίγο πάνω από το παραλληλεπίπεδο πάτημα. Ο δεύτερος λοβός φαίνεται να έχει τη μορφή diamond, ενώ μέρη του πρώτου λοβού έχουν αποκολληθεί από την κάτω πλάκα και στο πειραματικό δοκίμιο και στο μοντέλο του LS-Dyna. Τέλος παρατηρείται μια μικρή αποκόλληση του υλικού στο πάνω μέτωπό του από την άνω πλάκα, ενώ το μοντέλο του LS-Dyna δεν επηρεάζεται σ' αυτή την περιοχή. Πάτημα της πρέσας στα 36 mm.

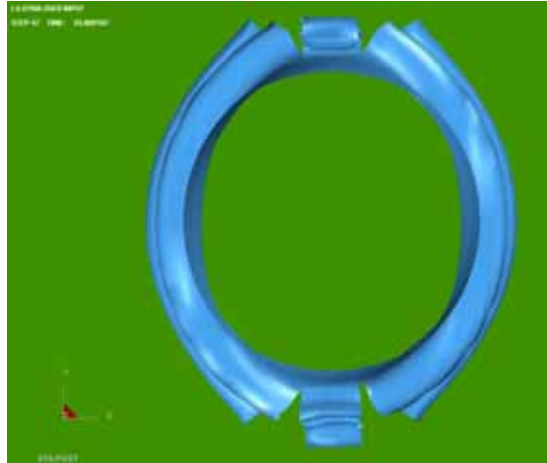


5^η Φάση και τελευταία κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Στα τελευταία 9mm πατήματος με την πρέσα το κάτω μέρος του δοκιμίου είναι αυτό που έχει απορροφήσει το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας και έχει παραμορφωθεί περισσότερο σε σχέση με το υπόλοιπο τμήμα. Στο πάνω μέτωπό του συνεχίζεται η ροή του υλικού προς τα μέσα, αλλά όχι τόσο έντονα. Στο μοντέλο του LS-Dyna η κατάρρευση είναι πιο ομοιόμορφη απ' ότι στο πραγματικό δοκίμιο. Η κατάρρευση του δοκιμίου έχει πλέον ολοκληρωθεί με πάτημα της πρέσας στα 45 mm.

Τελική μορφή δοκιμίου αμέσως μετά το τέλος της διαδικασίας αξονικής κατάρρευσης στην πρέσα (δεξιά). Το ίδιο δοκίμιο μετά το τέλος της προσομοίωσης από το LS-DYNA, (αριστερά). Παρατηρούμε τους δύο λοβούς και το μεγαλύτερο μέτωπο του δεύτερου. Έχουν οβάλ μορφή με συμμετρία στο μοντέλο του LS-Dyna, ενώ στο δοκίμιο μας η συμμετρία έχει χαθεί. Τελικό πάτημα της πρέσας στα 45 mm.

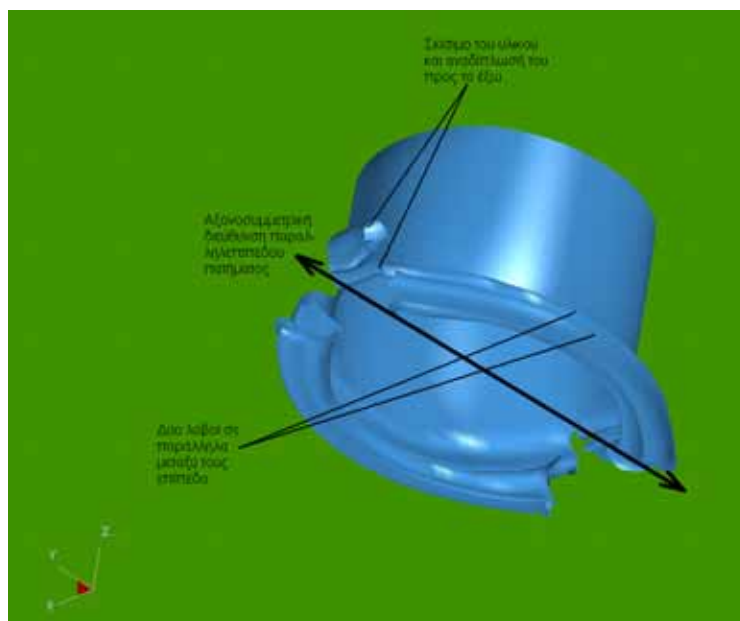


Σε αντιστραμμένη όψη έχουμε:



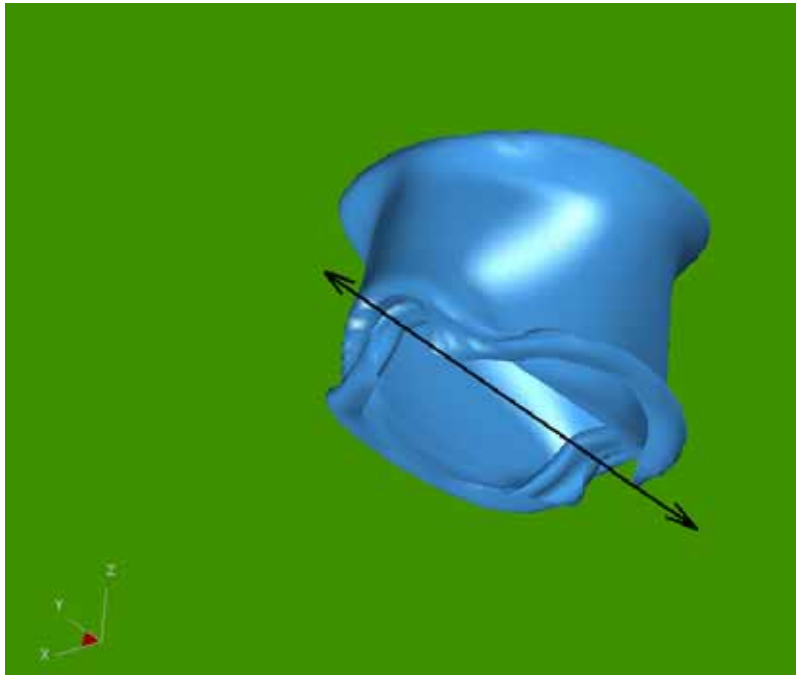
Η αναδίπλωση του υλικού προς τα έξω πάνω από το παραλληλεπίπεδο στο μοντέλο του LS-Dyna φαίνεται έντονα στο παραπάνω σχήμα.

Ακόμα, σε τρισδιάστατη ισομετρική όψη, παρουσιάζεται παρακάτω η τελική μορφή του δοκιμίου όπως προσομοιώθηκε στο LS-DYNA με κατάρρευση του δοκιμίου έως τα 45 mm:



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο

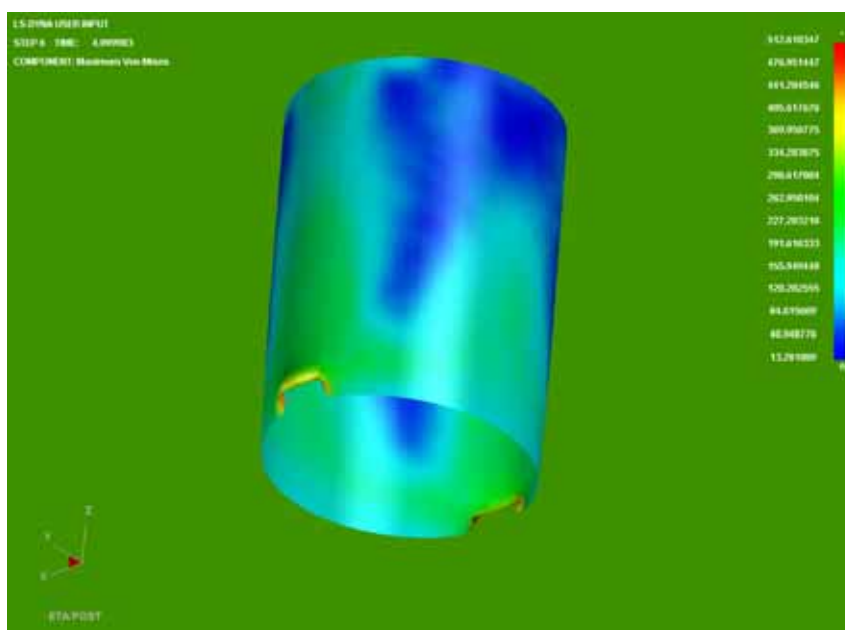
Η αντίστοιχη φάση για δοκίμιο με ένα 'part'.



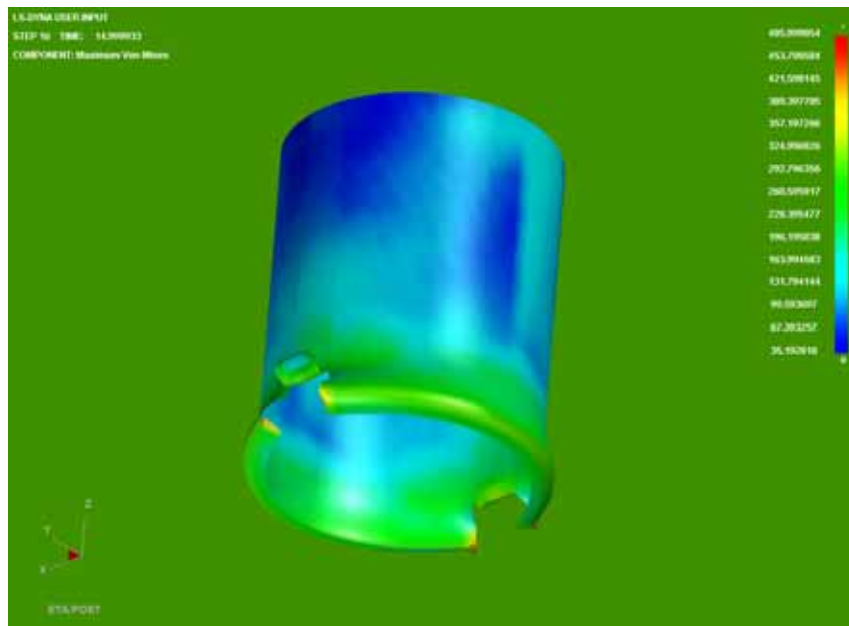
Ακολουθούν εικόνες από την κατανομή των τάσεων σε όλη την επιφάνεια του δοκιμίου κατά τα διάφορα στάδια της κατάρρευσής του:

Επιλέγοντας στον ETA POSTGL:

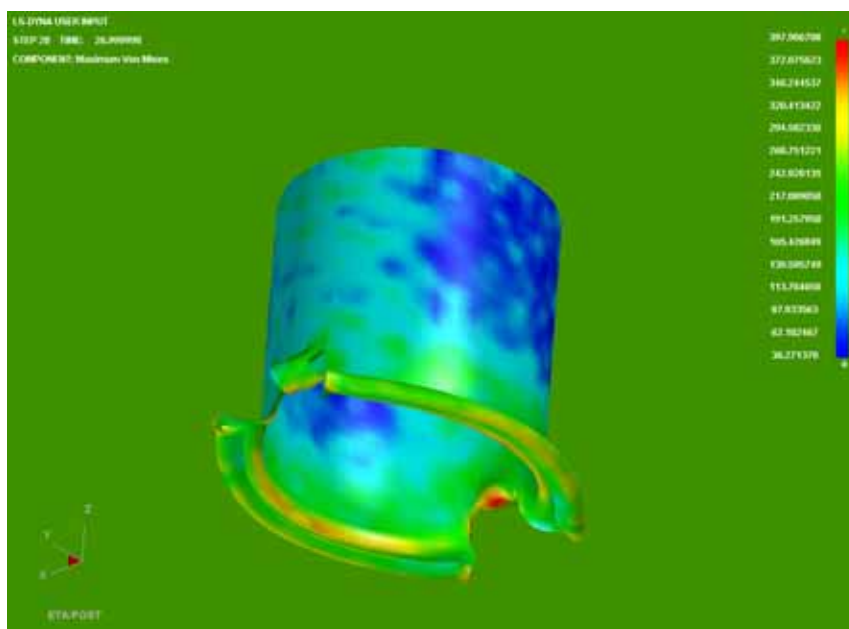
CONTOUR -> STRESS/STRAIN -> MAXIMUM VON MISES STRESSES:



Κατανομή των τάσεων στα 5 mm. Ήδη έχουμε την εμφάνιση υψηλών τάσεων στην περιοχή που πατάει στο παραλληλεπίπεδο πάτημα που είναι μέγιστες και ίσες με $\sigma = 512,6 \text{ MPa}$, η οποία είναι μεγαλύτερη από το όριο αντοχής του υλικού ($\sigma_A=240 \text{ MPa}$), οπότε ξεκινάει η πλαστική παραμόρφωση του δοκιμίου, με εμφάνιση μονίμων παραμορφώσεων σε αυτό. Στο υπόλοιπο κάτω μισό δοκίμιο έχουμε επίσης υψηλές τάσεις της τάξεως των **190 ως 330 MPa**, ενώ στο πάνω τμήμα είναι μικρές ως **90 MPa**.



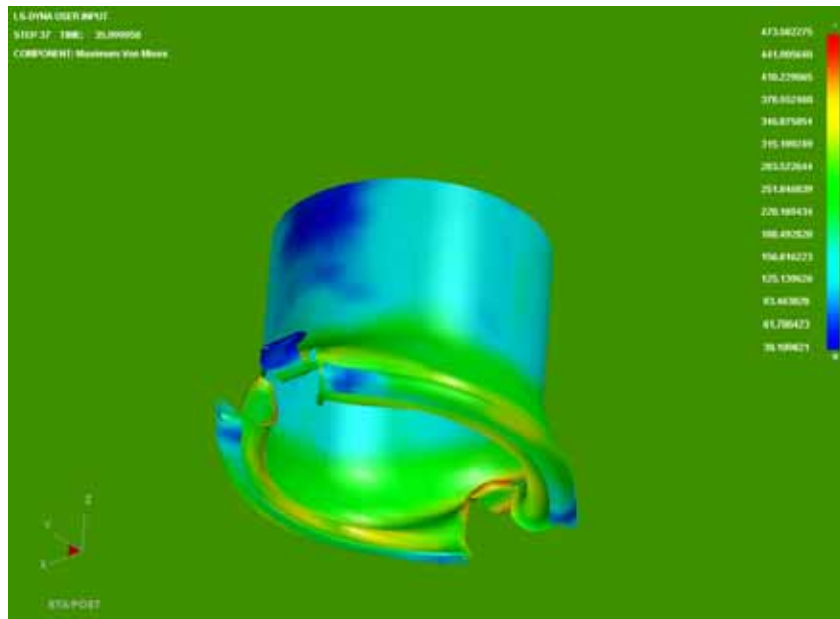
Κατανομή των τάσεων στα 15 mm. Έχουμε μέγιστες τάσεις στην περιοχή που έρχεται σε επαφή με τις πλαϊνές πλευρές του παραλληλεπίπεδου πατήματος που είναι μέγιστες και ίσες με $\sigma = 406 \text{ MPa}$. Στην περιοχή σχηματισμού του πρώτου λοβού είναι $\sigma = 300 \text{ MPa}$, που βλέπουμε ότι είναι μεγαλύτερη τιμή από την τάση αντοχής του δοκιμίου ($\sigma_A = 240 \text{ MPa}$), οπότε διαρρέει το υλικό. Στο πάνω μέρος του δοκιμίου επικρατούν μικρότερες τάσεις μέχρι $\sigma = 180 \text{ MPa}$. Συνεχίζεται η κατάρρευση του δοκιμίου από την θέση αυτή και με διεύθυνση προς τα κάτω.



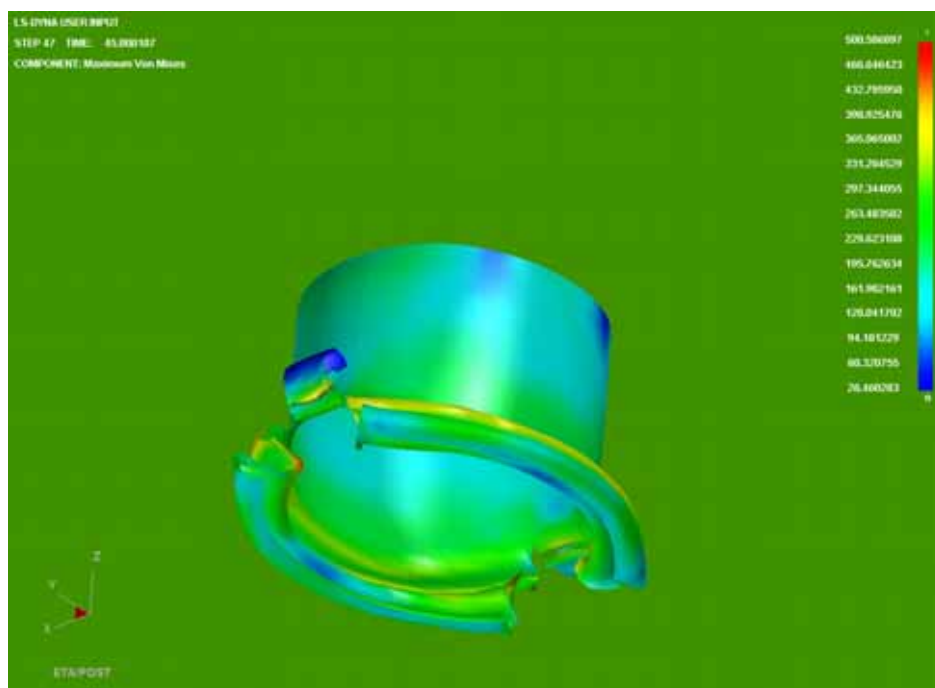
Κατανομή των τάσεων στα 27 mm. Έχουμε μέγιστες τάσεις στην περιοχή που πατάει στο παραλληλεπίπεδο πάτημα που είναι μέγιστες και ίσες με $\sigma = 397,9 \text{ MPa}$, ενώ υψηλές τάσεις ασκούνται και στο υπόλοιπο δοκίμιο που έρχεται σε επαφή με την κάτω πλάκα ίσες με 300 MPa , που βλέπουμε ότι είναι

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο

μεγαλύτερη τιμή από την τάση αντοχής του δοκιμίου ($\sigma_A = 240 \text{ MPa}$), οπότε διαρρέει το υλικό. Το πάνω τμήμα εξακολουθεί να μην δέχεται μεγάλα φορτία.

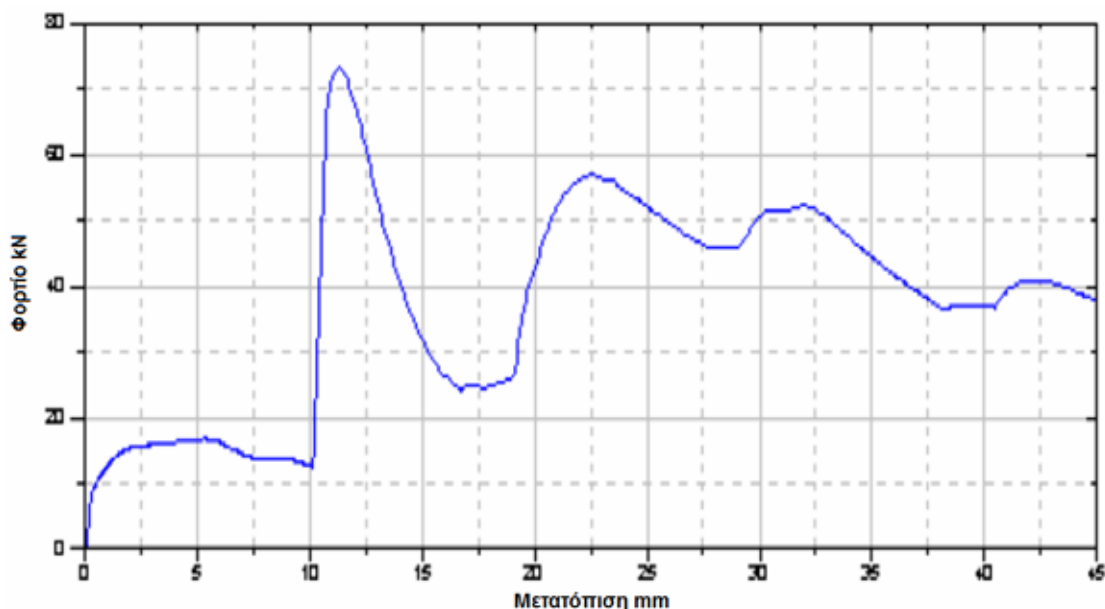


Κατανομή των τάσεων στα 36 mm. Οι μέγιστες τάσεις αναπτύσσονται στην περιοχή που πατάει στο παραλληλεπίπεδο πάτημα που είναι ίσες με $\sigma = 473,6 \text{ MPa}$, που βλέπουμε ότι είναι μεγαλύτερη τιμή από την τάση αντοχής του δοκιμίου ($\sigma_A = 240 \text{ MPa}$), οπότε συνεχίζει η διαρροή του υλικού. Σημαντικές τάσεις αναπτύσσονται και στην υπόλοιπη περιοχή του δοκιμίου λίγο πάνω από τους λοβούς, ίσες με $\sigma = 290 \text{ MPa}$, που το παραμορφώνουν.

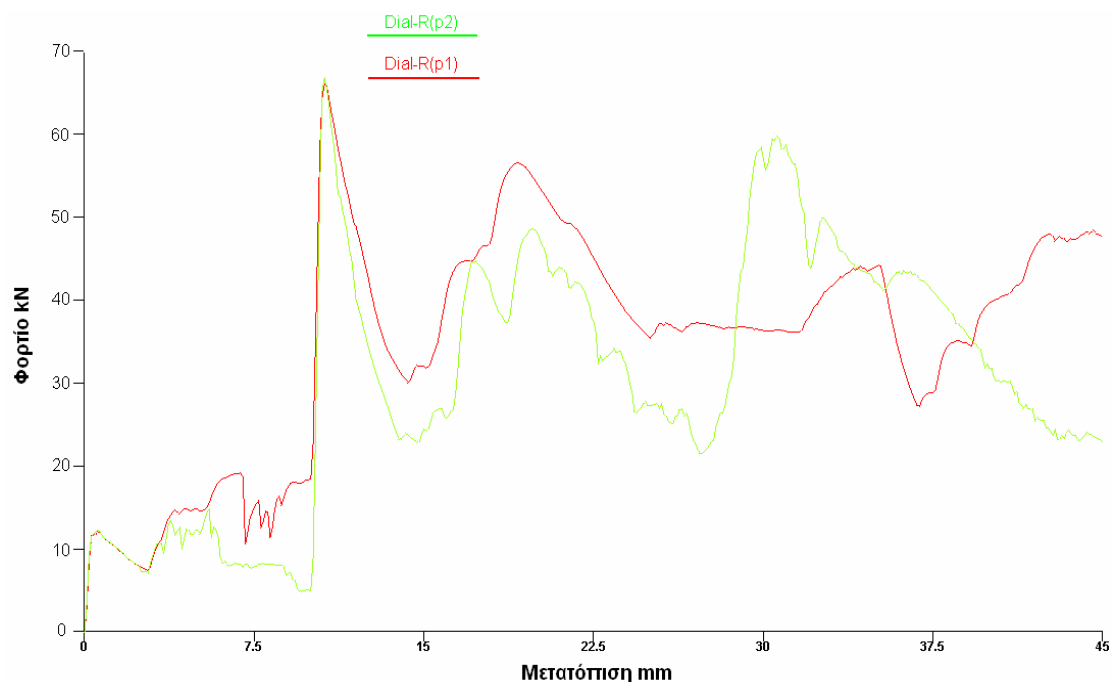


Κατανομή των τάσεων στα 45 mm. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή **500,5 MPa**, που είναι πολύ υψηλές και εμφανίζονται στην περιοχή σχηματισμού του δεύτερου λοβού. Σημαντικές τάσεις έχουμε στην γύρω περιοχή των λοβών που είναι ίσες με **330 MPa**. Αυτό οφείλεται στο ότι λόγω της αναδίπλωσης έρχεται μεγαλύτερο μέρος του υλικού σε επαφή με την κάτω πλάκα αλλά και με τον ίδιο του τον εαυτό και δυσκολεύει η παραμόρφωσή του. Οι τάσεις στο πάνω τμήμα του δοκιμίου αγγίζουν την τιμή των **190 MPa**. Η κατάρρευση του δοκιμίου έχει τελειώσει.

Ακόμα, το διάγραμμα των δυνάμεων μετά την επεξεργασία των στοιχείων που πάρθηκαν από την πρέσα, και με την χρήση του Excel, είναι αυτό που παρουσιάζεται στην επόμενη σελίδα, με τον κατακόρυφο άξονα να δείχνει τις **δυνάμεις σε kN**, και με τον οριζόντιο άξονα να δείχνει τις **μετατοπίσεις** (βραχύνσεις του θλιβόμενου δοκιμίου) **σε mm**:



Το διάγραμμα των δυνάμεων μετά την επεξεργασία των στοιχείων που πάρθηκαν από την προσομοίωση στο Is-dyna και με την χρήση του Excel για το Dial-R(p1) και το Dial-R(p2), είναι αυτό που παρουσιάζεται στο επόμενο διάγραμμα, με τον κατακόρυφο άξονα να δείχνει τις **δυνάμεις σε kN**, και με τον οριζόντιο άξονα να δείχνει τις **μετατοπίσεις** (βραχύνσεις του θλιβόμενου δοκιμίου) **σε mm**:



- Από τα στοιχεία που πάρθηκαν από την πρέσα, βρέθηκε:

Διαδρομή εμβόλου: 45.0mm

Το μέγιστο φορτίο $P_{max} = 73.37 \text{ kN}$,

Το μέσο φορτίο $P_{mean} = 39 \text{ kN}$,

Η ομοιομορφία φορτίου $P_{max}/P_{mean} = 1.88$

Η συνολική ενέργεια που δαπανήθηκε για την αξονική κατάρρευση του δοκιμίου είναι $E = 1498 \text{ kN mm}$

- Από τα στοιχεία που πάρθηκαν από την προσομοίωση στο LS-DYNA για το Dial-R(p2), βρέθηκε:

Διαδρομή εμβόλου: 45.0mm

Το μέγιστο φορτίο $P_{max} = 68 \text{ kN}$,

Το μέσο φορτίο $P_{mean} = 38.36 \text{ kN}$,

Η ομοιομορφία φορτίου $P_{max}/P_{mean} = 1.77$

Η συνολική ενέργεια που δαπανήθηκε για την αξονική κατάρρευση του δοκιμίου είναι $E = 1726.2 \text{ kN mm}$

- Από τα στοιχεία που πάρθηκαν από την προσομοίωση στο LS-DYNA για το Dial-R(p1), βρέθηκε:

Διαδρομή εμβόλου: 45.0mm

Το μέγιστο φορτίο $P_{max} = 67.5 \text{ kN}$,

Το μέσο φορτίο $P_{mean} = 34.98 \text{ kN}$,

Η ομοιομορφία φορτίου $P_{max}/P_{mean} = 1.93$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο

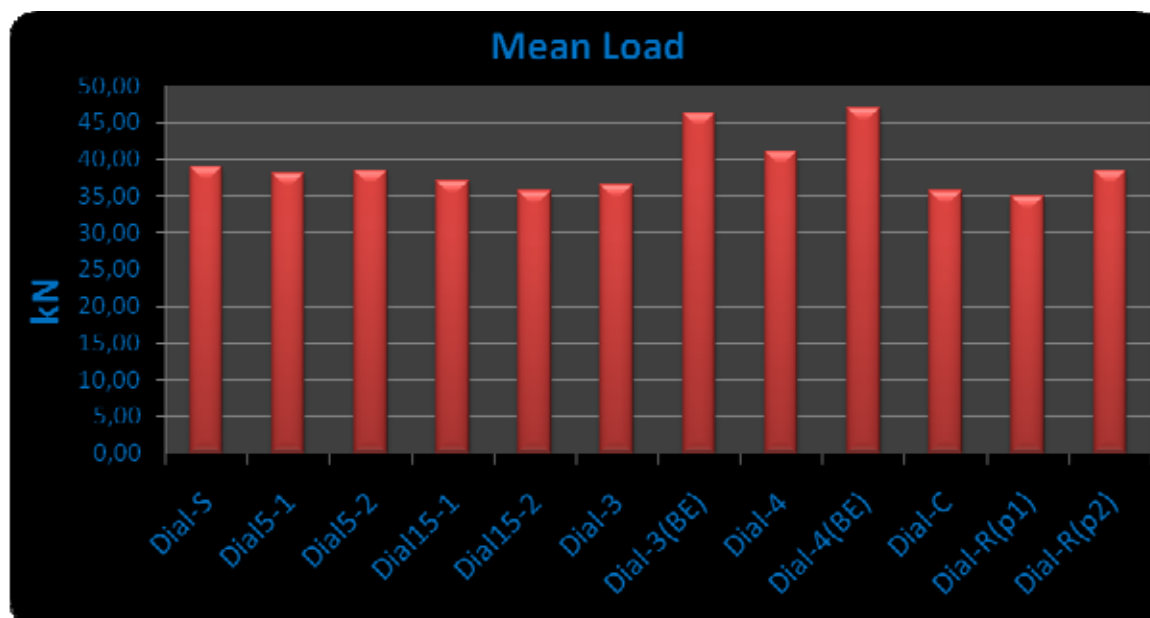
Η συνολική ενέργεια που δαπανήθηκε για την αξονική κατάρρευση του δοκιμίου είναι $E = 1574.2 \text{ kN mm}$

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Ένας συγκεντρωτικός πίνακας των αποτελεσμάτων που πήραμε από τις προσομοιώσεις μας όλων των δοκιμών μας με το LS-Dyna 3D, είναι ο πίνακας που ακολουθεί:

Type	P_{mean} (kN)	P_{max} (kN)	Energy (KNmm)	P_{max} / P_{mean}
Dial-S	38,88	79,9	1749,6	2,06
Dial5-1	38,10	79,9	1714,5	2,10
Dial5-2	38,40	79,0	1728,0	2,06
Dial15-1	37,03	79,0	1666,4	2,13
Dial15-2	35,68	78,5	1784,8	2,20
Dial-3	36,51	65,0	1643,9	1,78
Dial-3(BE)	46,22	72,5	2080,0	1,57
Dial-4	41,00	64,5	1843,8	1,57
Dial-4(BE)	46,91	70,0	2111,1	1,49
Dial-C	35,71	69,5	1607,1	1,94
Dial-R(p1)	34,98	67,5	1574,2	1,93
Dial-R(p2)	38,36	68,0	1726,2	1,77

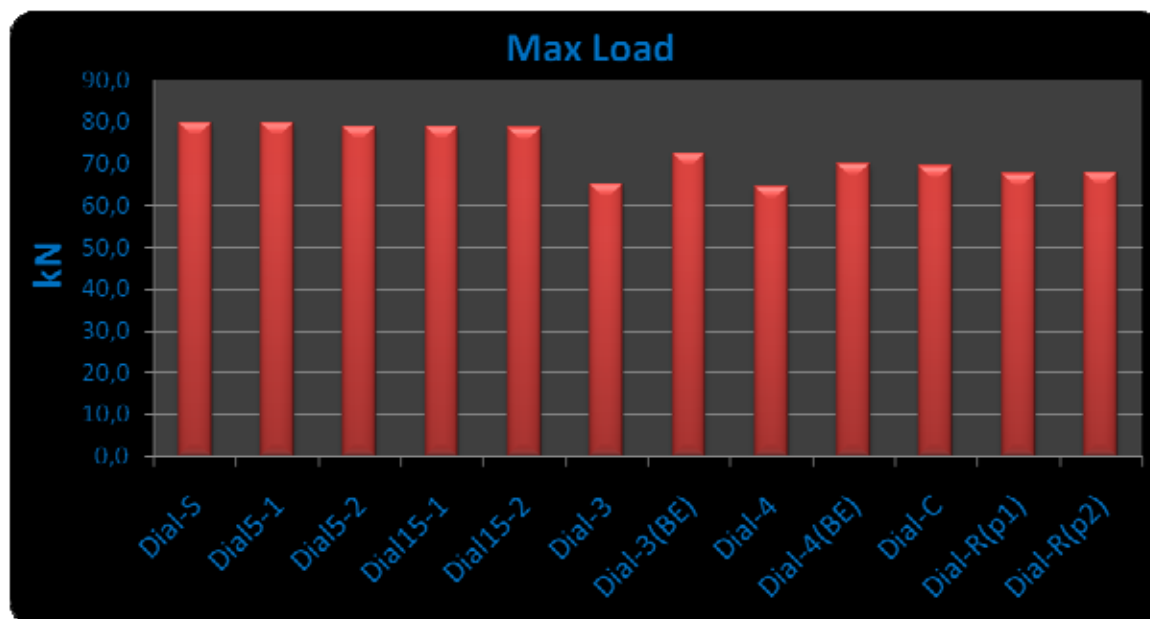
- Το συγκριτικό γράφημα μέσου φορτίου (P_{mean}) για όλα τα δοκίμια είναι το ακόλουθο:



Το δοκίμιο που εμφανίζει το μέγιστο μέσο φορτίο, άρα και μεγαλύτερη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας πλαστικής παραμόρφωσης κατά την αξονική του κατάρρευση, είναι το Dial-4(BE) (δοκίμιο με τέσσερις εγκοπές

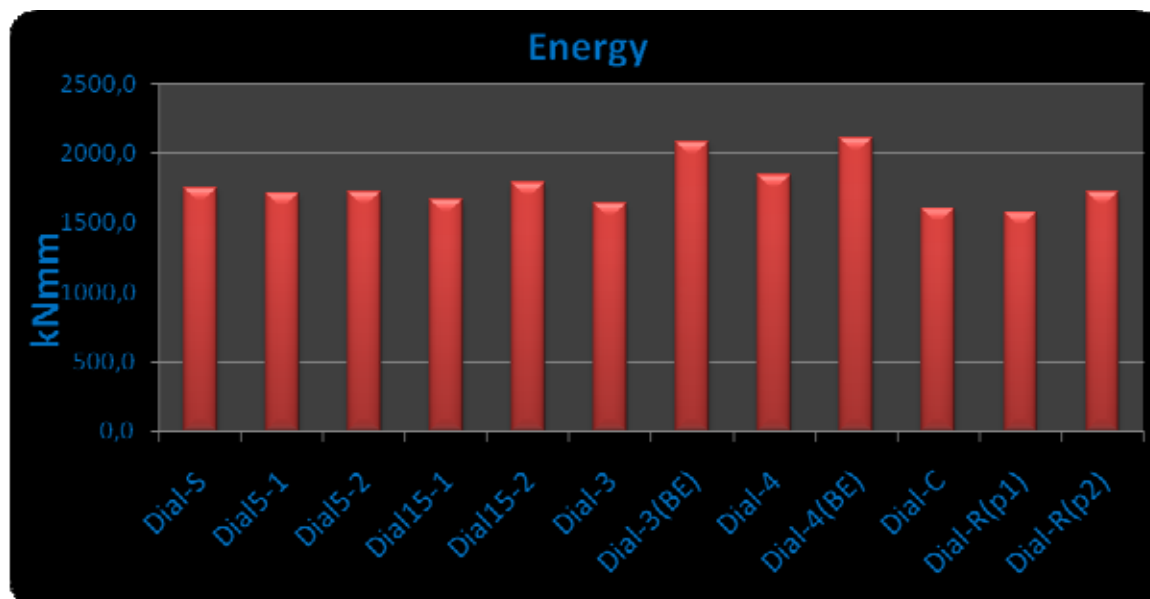
πάχους 10mm και βάθους 5mm και σχεδιασμένο με brick elements), ενώ το δοκίμιο που εμφανίζει το ελάχιστο μέσο φορτίο, άρα και μικρότερη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας πλαστικής παραμόρφωσης κατά την κατάρρευσή του είναι το Dial-R(p1) (δοκίμιο άνευ εγκοπών με πάτημα σε πρίσμα τετραγωνικής διατομής πλευράς $a = 10\text{mm}$) και το αμέσως επόμενο είναι το Dial15-2 (δοκίμιο με δύο εγκοπές πάχους 2mm και βάθους 15mm).

- Το συγκριτικό γράφημα **μέγιστου φορτίου (P_{\max})** για όλα τα δοκίμια είναι το ακόλουθο:



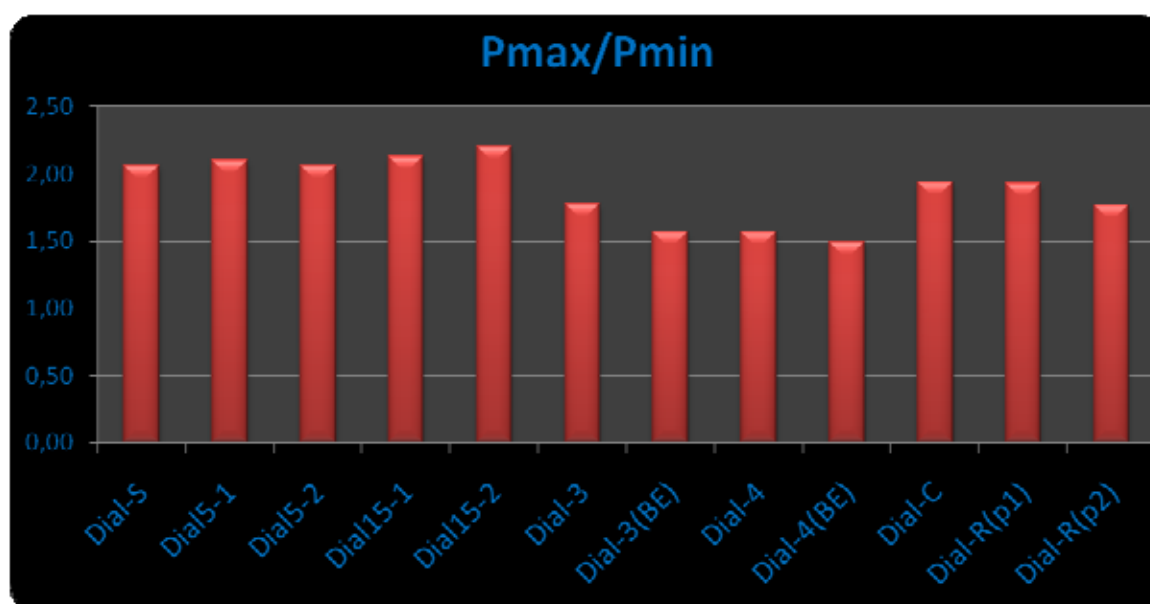
Το δοκίμιο που εμφανίζει το μεγαλύτερο μέγιστο φορτίο, άρα το δοκίμιο που έχει την μεγαλύτερη αντοχή μέχρι να ξεκινήσει η κατάρρευσή του είναι το Dial-S (δοκίμιο άνευ εγκοπών) και το Dial5-1 (δοκίμιο με μία εγκοπή πάχους 2mm και βάθους 5mm). Το δοκίμιο που αντέχει λιγότερο μέχρι να αρχίσει να καταρρέει είναι το Dial-4 (δοκίμιο με τέσσερις εγκοπές πάχους 10mm και βάθους 5mm).

- Το συγκριτικό γράφημα της **ενέργειας πλαστικής παραμόρφωσης** για όλα τα δοκίμια είναι το ακόλουθο:



Το δοκίμιο που εμφανίζει τη μέγιστη ενέργεια πλαστικής παραμόρφωσης είναι το Dial-4(BE) (δοκίμιο με τέσσερις εγκοπές πάχους 10mm και βάθους 5mm και σχεδιασμένο με brick elements) και δεύτερο το Dial-3(BE) (δοκίμιο με τρεις εγκοπές πάχους 10mm και βάθους 5mm και σχεδιασμένο με brick elements), ενώ το δοκίμιο που εμφανίζει την ελάχιστη είναι το Dial-R(p1) (δοκίμιο άνευ εγκοπών με πάτημα σε πρίσμα τετραγωνικής διατομής πλευράς $a = 10\text{mm}$).

- Το συγκριτικό γράφημα $P_{\max} / P_{\text{mean}}$ για όλα τα δοκίμια είναι το ακόλουθο:



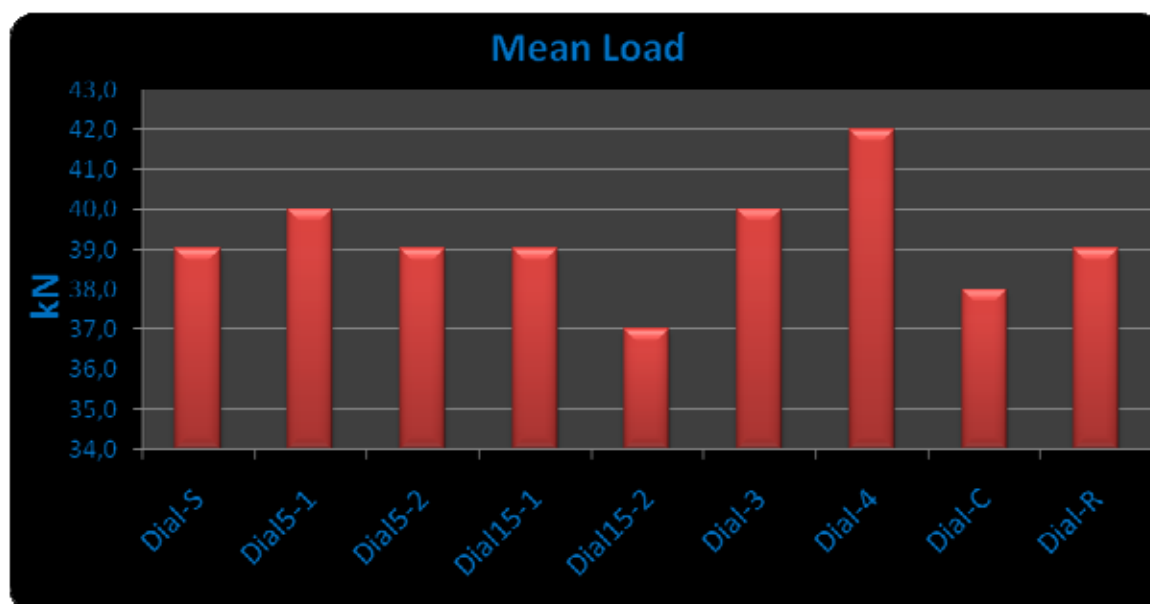
Το δοκίμιο που εμφανίζει το μέγιστο λόγο P_{max} / P_{mean} είναι το Dial15-2 (δοκίμιο με δύο εγκοπές πάχους 2mm και βάθους 15mm), ενώ εξίσου μεγάλο λόγο παρουσιάζει και το Dial15-1 (δοκίμιο με μία εγκοπή πάχους 2mm και βάθους 15mm). Την ελάχιστη τιμή παρουσιάζει το Dial-4(BE) (δοκίμιο με τέσσερις εγκοπές πάχους 10mm και βάθους 5mm και σχεδιασμένο με brick elements).

Ακολουθεί η ίδια διαδικασία και για τα δοκίμια του πειράματος με βάση τα στοιχεία που πήραμε από τα αντίστοιχα διαγράμματα.

- Ένας συγκεντρωτικός πίνακας των αποτελεσμάτων που πήραμε από το πείραμα όλων των δοκιμίων μας στην πρέσα του εγαστηρίου, είναι ο πίνακας που ακολουθεί:

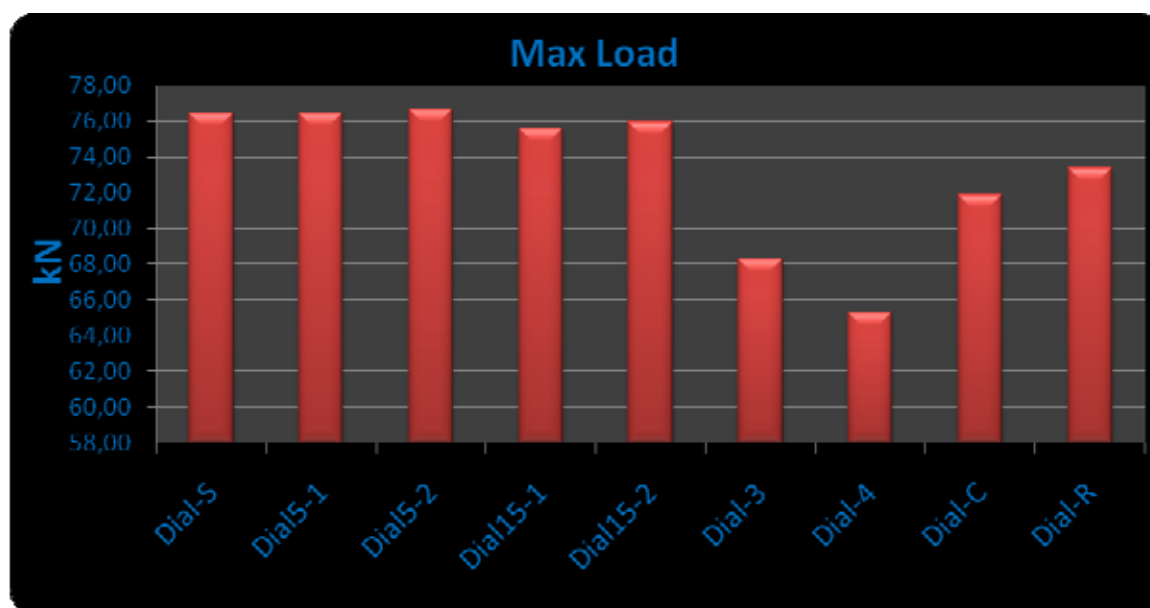
Type	P_{mean} (kN)	P_{max} (kN)	Energy (KNmm)	P_{max} / P_{mean}
Dial-S	39,0	76,46	1642,0	1,96
Dial5-1	40,0	76,46	1705,0	1,91
Dial5-2	39,0	76,67	1669,0	1,97
Dial15-1	39,0	75,57	1604,0	1,94
Dial15-2	37,0	75,92	1653,0	2,05
Dial-3	40,0	68,29	1734,0	1,70
Dial-4	42,0	65,29	1749,0	1,55
Dial-C	38,0	71,84	1516,0	1,89
Dial-R	39,0	73,37	1498,0	1,88

- Το συγκριτικό γράφημα μέσου φορτίου (P_{mean}) για όλα τα δοκίμια είναι το ακόλουθο:



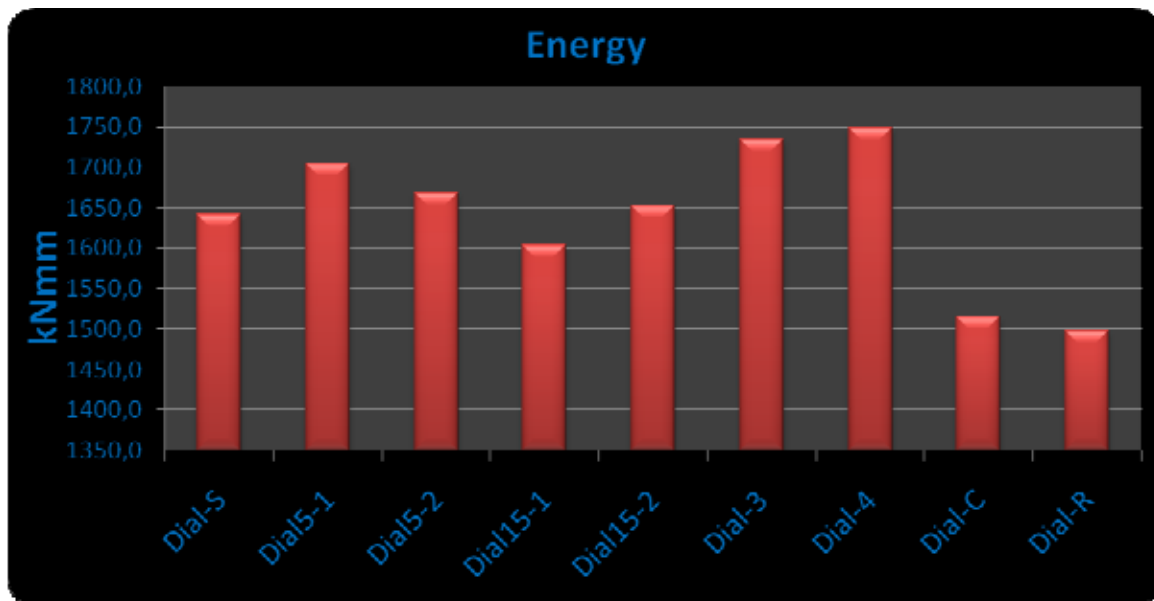
Το δοκίμιο που εμφανίζει το μέγιστο μέσο φορτίο, άρα και μεγαλύτερη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας πλαστικής παραμόρφωσης κατά την αξονική του κατάρρευση, είναι το Dial-4 (δοκίμιο με τέσσερις εγκοπές πάχους 10mm και βάθους), ενώ το δοκίμιο που εμφανίζει το ελάχιστο μέσο φορτίο, άρα και μικρότερη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας πλαστικής παραμόρφωσης κατά την κατάρρευσή του είναι το Dial15-2 (δοκίμιο με δύο εγκοπές πάχους 2mm και βάθους 15mm).

- Το συγκριτικό γράφημα **μέγιστου φορτίου (P_{max})** για όλα τα δοκίμια είναι το ακόλουθο:



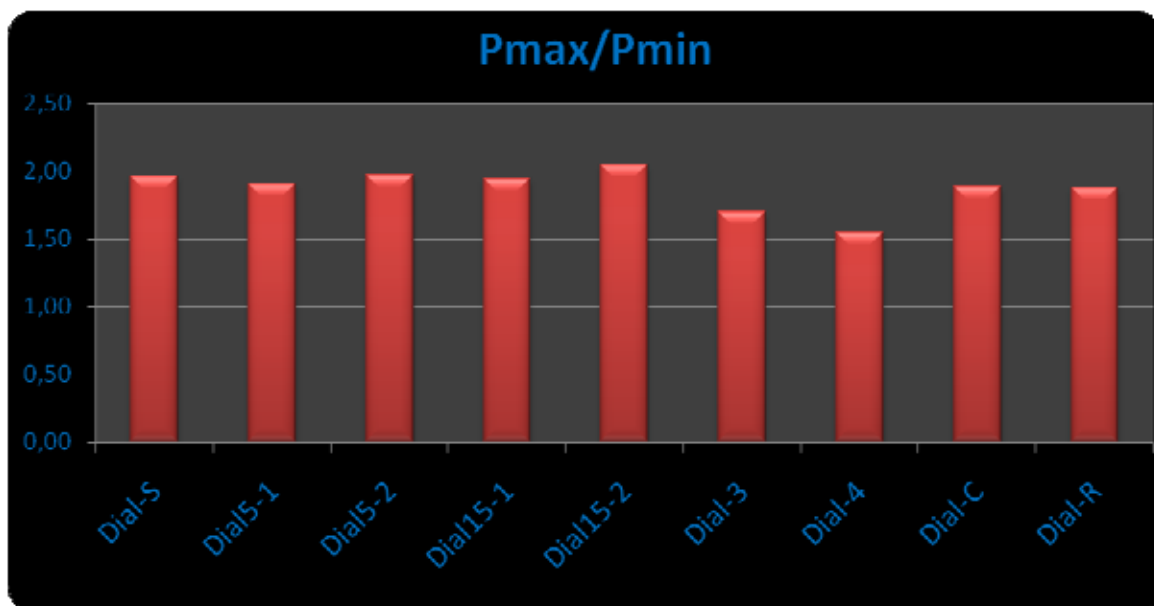
Το δοκίμιο που εμφανίζει το μεγαλύτερο μέγιστο φορτίο, άρα το δοκίμιο που έχει την μεγαλύτερη αντοχή μέχρι να ξεκινήσει η κατάρρευσή του είναι το Dial5-2 (δοκίμιο με δύο εγκοπές πάχους 2mm και βάθους 5mm). Το δοκίμιο που αντέχει λιγότερο μέχρι να αρχίσει να καταρρέει είναι το Dial-4 (δοκίμιο με τέσσερις εγκοπές πάχους 10mm και βάθους 5mm).

- Το συγκριτικό γράφημα της **ενέργειας πλαστικής παραμόρφωσης** για όλα τα δοκίμια είναι το ακόλουθο:



Το δοκίμιο που εμφανίζει τη μέγιστη ενέργεια πλαστικής παραμόρφωσης είναι το Dial-4(BE) (δοκίμιο με τέσσερις εγκοπές πάχους 10mm και βάθους 5mm), ενώ το δοκίμιο που εμφανίζει την ελάχιστη είναι το Dial-R(p1) (δοκίμιο άνευ εγκοπών με πάτημα σε πρίσμα τετραγωνικής διατομής πλευράς $a = 10\text{mm}$).

- Το συγκριτικό γράφημα $P_{\max} / P_{\text{mean}}$ για όλα τα δοκίμια είναι το ακόλουθο:



Το δοκίμιο που εμφανίζει το μέγιστο λόγο $P_{\max} / P_{\text{mean}}$ είναι το Dial15-2 (δοκίμιο με δύο εγκοπές πάχους 2mm και βάθους 15mm). Την ελάχιστη τιμή

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6ο

παρουσιάζει το Dial-4 (δοκίμιο με τέσσερις εγκοπές πάχους 10mm και βάθους 5mm).

Τα συμπεράσματα που βγάζουμε σύμφωνα με τα παραπάνω συμφωνούν απόλυτα μεταξύ των πειραματικών δοκιμών μας και των μοντέλων του LS-Dyna, που σημαίνει πως η προσομοίωσή μας έγινε με αρκετά μεγάλη επιτυχία και τα αποτελέσματα που εξάγουμε είναι τα αντίστοιχα ενός πειράματος στο εργαστήριο. Αυτό φαίνεται και από τους παρακάτω πίνακες:

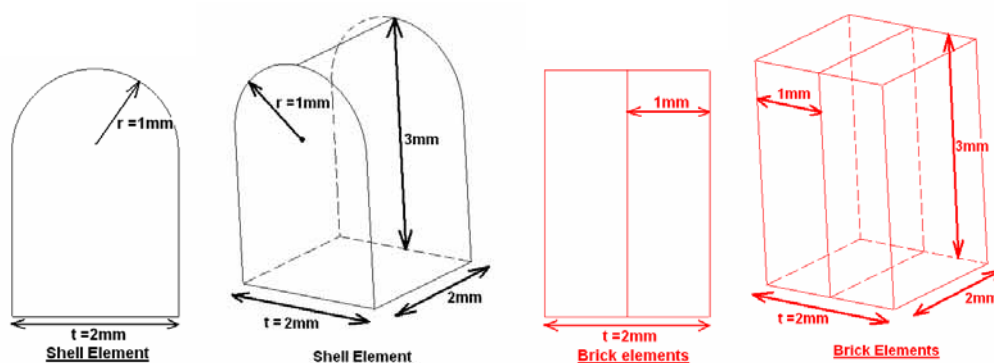
ΜΟΝΤΕΛΑ LS-Dyna		ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ	
MAX (Pmean (kN))	MIN (Pmean (kN))	MAX (Pmean (kN))	MIN (Pmean (kN))
46,91	34,98	42	37
Dial-4(BE)	Dial-R(p1)	Dial-4	Dial15-2
MAX (Pmax (kN))	MIN (Pmax (kN))	MAX (Pmax (kN))	MIN (Pmax (kN))
79,9	64,5	76,67	65,29
Dial-S , Dial5-1	Dial-4	Dial5-2	Dial-4
MAX (Energy (KNmm))	MIN (Energy (KNmm))	MAX (Energy (KNmm))	MIN (Energy (KNmm))
2111,1	1574,2	1749	1498
Dial-4(BE)	Dial-R(p1)	Dial-4	Dial-R
MAX (Pmax / Pmean)	MIN (Pmax / Pmean)	MAX (Pmax / Pmean)	MIN (Pmax / Pmean)
2,20	1,49	2,05	1,55
Dial15-2	Dial-4(BE)	Dial15-2	Dial-4

ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Σε γενικές γραμμές, όπως παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια τα αποτελέσματα, διαπιστώθηκε συμφωνία μεταξύ των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης και εκείνων της πειραματικής διαδικασίας. Οι αποκλίσεις που παρατηρήθηκαν μπορούν να αποδοθούν στους ακόλουθους παράγοντες:

- Τα δοκίμια που καταπονήθηκαν στην πρέσα δεν είναι ιδανικά κατασκευασμένα, ενώ στον κώδικα εισήχθησαν οι ονομαστικές-ιδανικές διαστάσεις και γεωμετρία των δοκιμίων. Υπάρχει βέβαια και η ενδεχόμενη απόκλιση μεταξύ των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού των δοκιμίων των πειραμάτων και των αντίστοιχων μοντέλων του LS-DYNA. Βασικό ρόλο έχουν και οι οριακές συνθήκες (κυρίως οι τριβές) στις οποίες δεν ήταν διαθέσιμες ακριβείς πληροφορίες για την εισαγωγή τους στον κώδικα του LS-DYNA.
- Ο τρόπος στήριξης των δοκιμίων Dial-C και Dial-R δεν είναι ο ιδανικότερος που πετυχαίνουμε όπως στην προσομοίωσή τους, αφού οι άξονες συμμετρίας των πατημάτων και των κελυφών μας δεν συμπίπτουν, με αποτέλεσμα να επηρεάζεται διαφορετικά η κατάρρευση των δοκιμίων και κατά την προσομοίωση να έχουμε μεγαλύτερη συμμετρία κατάρρευσης.
- Οι τιμές που βρέθηκαν στα διαγράμματα φορτίου (μέσο φορτίο + μέγιστο αρχικό φορτίο) της προσομοίωσης και των δοκιμίων αποκλίνουν, διότι στο LS-DYNA, δεν λαμβάνουμε υπόψη την ύπαρξη ατελειών στην ομοιογένεια του υλικού του δοκιμίου που ενδεχομένως να υπάρχουν στα δοκίμια της πειραματικής διαδικασίας. Επίσης σημαντικό ρόλο κατέχει η έστω και μικρή απόκλιση από την παραλληλότητα των δύο μετώπων, άνω και κάτω του δοκιμίου. Ακόμα, οι εγκοπές που σχεδιάζονται στο LS-DYNA, έχουν ακριβείς διαστάσεις και έχουν σχεδιαστεί με τα κέντρα τους σε απόλυτα ακριβή σημεία πάνω στην κυλινδρική επιφάνεια κάθε δοκιμίου, με την χρήση των συντεταγμένων από το πρόγραμμα. Αντίθετα, οι εγκοπές που δημιουργήθηκαν στα πειραματικά δοκίμια μπορεί να εμφανίζουν αποκλίσεις γεωμετρίας και θέσης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι άξονες συμμετρίας των εγκοπών να μην συμπίπτουν μεταξύ τους ή να μην έχουν την ακριβή γωνία στρέψης ο ένας με τον άλλον και έτσι οι τάσεις που θα δημιουργηθούν γύρω από τις εγκοπές δεν θα κατανέμονται συμμετρικά αλλά θα αποκλίνουν. Ακόμα, μπορεί να υπάρχουν διαφορές που οφείλονται στην κατεργασία κατασκευής των δοκιμίων, άρα στις διαστάσεις και τη γεωμετρία (μορφή) των δοκιμίων σε σχέση με τα μοντέλα στο LS-DYNA. Ενώ σημαντικό ρόλο παίζει και η κινηματική ακρίβεια του πειραματικού εξοπλισμού.

- Κατά την στήριξη των δοκιμών μας για να τους δημιουργήσουμε τις εγκοπές μπορεί να ασκήθηκαν δυνάμεις που να παραμόρφωσαν ελαφρά την στρογγυλάδα της διατομής των κελυφών και να δημιούργησαν αρχικές μόνιμες παραμορφώσεις, οι οποίες στην συνέχεια επηρεάζουν την κατάρρευση τους.
- Επιπλέον, στο LS-DYNA η επιλογή των *shell elements* με ομοιόμορφο πάχος $t = 2\text{mm}$ για την προσομοίωση του κελύφους του δοκιμίου, προσδίδει στην ελεύθερη ακμή του κάθε πεπερασμένου στοιχείου (που βρίσκεται στο άνω και κάτω μέτωπο με βάση το σχετικό αλγόριθμο του κώδικα) καμπυλότητα ίση με το ήμισυ του πάχους του στοιχείου ($r = 1\text{mm}$). Αυτή η καμπυλότητα επηρεάζει τον τρόπο κατάρρευσης του δοκιμίου αφού εκλαμβάνεται από τον κώδικα η επιφάνεια της άνω διατομής (και της κάτω) ως μη επίπεδη. Για αυτό παρατηρείται η δημιουργία λοβού πιο γρήγορα στο μοντέλο του LS-Dyna από το πειραματικό δοκίμιο. Αυτό θα είχε αποφευχθεί αν είχαμε επιλέξει για τον σχεδιασμό του κελύφους *brick elements* τα οποία θα μας έδιναν απόλυτα επίπεδο άνω και κάτω μέτωπο και κατά συνέπεια θα έκαναν πολύ πιο ακριβή υπολογιστικά την ανάλυση. Παρόλα αυτά και με τα *shell elements* έχουμε πλησιάσει αρκετά τα πειραματικά δεδομένα. Βέβαια στα δοκίμια που χρειάστηκε επιλέξαμε τα *brick elements* για καλύτερα αποτελέσματα. Η σχηματική παράσταση ενός εκ των shell και brick elements στο πάνω μέτωπο των δοκιμίων φαίνεται στα παρακάτω σχήματα.



Τελειώνοντας, θα πρέπει να αναφέρουμε ότι στο συνοδευτικό DVD της παρούσας εργασίας, περιέχονται όλα τα αρχεία και τα video των προσομοιώσεων για το κάθε δοκίμιο ξεχωριστά στους αντίστοιχους υποκαταλόγους μέσα στον γενικότερο κατάλογο **Βίντεο Αξονικής Κατάρρευσης**, τον οποίο κατάλογο θα πρέπει να του γίνει αντιγραφή στον *root* του σκληρού δίσκου **C:** ώστε να μπορούν να εκτελεστούν τα αρχεία video του κάθε δοκιμίου μέσα από το αντίστοιχο κεφάλαιο στο Word 2003, με τη χρήση του συνδυασμού **CTRL + αριστερό MOUSE CLICK** πάνω στο αντίστοιχο έτοιμο hyperlink. Ο κατάλογος **Διπλωματική** περιλαμβάνει όλα τα κεφάλαια της εργασίας σε μορφή αρχείων κειμένου Word 2003. Στον κατάλογο **Παρουσίαση** υπάρχουν τα αρχεία της παρουσίασης της εργασίας αυτής.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

➤ ΕΛΛΗΝΙΚΗ:

1] *Μελέτη της πειραματικής προσομοίωσης της αξονικής κατάρρευσης κυλινδρικών κελυφών με κυκλικές ατέλειες.* Σωτήρης Γιαννόπουλος, Αθήνα 2006, Διπλωματική Εργασία Ε.Μ.Π

2] *Αξονική κατάρρευση κυλινδρικών κελυφών-μελέτη της επίδρασης κυκλικών ατελειών στα τοιχώματα του κελύφους.* Φεύγας Λεωνίδα, Αθήνα 2007, Διπλωματική Εργασία Ε.Μ.Π.

3] *Αξονική κατάρρευση λεπτότοιχων κελυφών τετραγωνικής διατομής – μελέτη της επίδρασης ανοιγμάτων στα τοιχώματα του κελύφους.* Σακκόπουλος Χρήστος, Αθήνα 2006, Διπλωματική Εργασία Ε.Μ.Π.

➤ ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ:

1] ***ENERGY ABSORPTION OF METALLIC CYLINDRICAL SHELLS WITH INDUCED NON-AXISYMMETRIC FOLDING PATTERNS***, J. Marsolek, H.-G. Reimerdes, Received 24 October 2003

2] ***SIMPLIFIED CRUSHING ANALYSIS OF THIN-WALLED COLUMNS AND BEAMS***, W. Abramowicz, *Eng. Translations*, 29, 5-26 (1981).

3] ***ON THE CRUSHING MECHANICS OF THIN-WALLED STRUCTURES***, T. Wierzbicki and W. Abramowicz, *J. Appl. Mech.*, 50 (1983).

4] ***INEXTENSIONAL COLLAPSE OF THIN-WALLED TUBES UNDER AXIAL COMPRESSION***, W. Johnson, P. D. Soden and S. T. S. Ai-Hassani, *J. Strain Analysis*, 12, 317-330 (1977).

5] ***A MOVING HINGE SOLUTION FOR AXISYMMETRIC CRUSHING OF TUBES***, T. WIERZBICKI and S. U. BHAT, Department of Ocean Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02139, U.S.A., (Received 4 April 1985; and in revised form 29 July 1985). A moving hinge solution for axisymmetric crushing of tubes *International Journal of Mechanical Sciences*, Volume 28, Issue 3, 1986, Pages 135-151

6] ***AN APPROXIMATE ANALYSIS OF THE COLLAPSE OF THIN CYLINDRICAL SHELLS UNDER AXIAL LOAD***, J. M. ALEXANDER, *Q. J. Mech., appl. Math.* 13, 10-15 (1960).

- 7] **DYNAMIC AXIAL CRUSHING OF CIRCULAR TUBES**, W. ABRAMOWICZ and N. JONES, *Int. J. Impact Engng.*, 2, 263-281 (1984).
- 8] **THE EFFECTIVE CRUSHING DISTANCE IN AXIALLY COMPRESSED THIN-WALLED METAL COLUMNS**, W. ABRAMOWICZ, *Int. J. impact Engng.* 1, 309-317 (1983).
- 9] **AXISYMMETRIC AXIAL CRUSHING OF THIN FRUSTA**, N.K. Gupta a,* , H. Abbas B, (a) *Department of Applied Mechanics, Indian Institute of Technology Delhi, New Delhi 110 016, India*, (b) *Department of Civil Engineering, Aligarh Muslim University, Aligarh 202 002, India*, December 1999. Axisymmetric axial crushing of 258 thin frusta *Thin-Walled Structures, Volume 36, Issue 3, March 2000, Pages 169-179*
- 10] **THE QUASI-STATIC CRUMPLING OF THIN WALLED CIRCULAR CYLINDERS AND FRUSTA UNDER AXIAL COMPRESSION**, Mamalis A G, Johnson W., *Int J Mech Sci* 1983; 25:713–32.
- 11] **AXIAL CRUSHING OF CIRCULAR TUBES**, Abramowicz W, Jones N., *Dynamic Int J Impact Engineering*, 1984; 2:263–81.
- 12] **CRASHWORTHINESS OF VEHICLES**, Johnson, W. & Mamalis, A. G. Mechanical Engineering Publications, London, 1978.
- 13] **EXTENSIBLE PLASTIC COLLAPSE OF THIN-WALL FRUSTA AS ENERGY ABSORBERS**, Mamalis, A. G., Manolakos, D. E., Saigal, S., Viegelaahn, G. L. & Johnson, W. *Int. J. Mech. Sci.*, 28 (1986) 219.
- 14] **THE MODELLING OF PROGRESSIVE EXTENSIBLE PLASTIC COLLAPSE OF THIN-WALL SHELLS**, Mamalis, A. G., Manolakos, D. E., Viegelaahn, G. L. & Johnson, W. *Int. J. Mech. Sci.*, 30 (1988) 241.
- 15] **EXPERIMENTAL INVESTIGATION INTO THE AXIAL PLASTIC COLLAPSE OF STEEL THIN-WALLED GROOVED TUBES**, Mamalis, A. G., Viegelaahn, G. L., Manolakos, D. E. & Johnson, W. *Int. J. Impact Engng*, 4 (1986) 117.
- 16] **LS-DYNA KEYWORD USERS MANUAL VOLUME I, VOLUME II, USER'S MANUAL** TECHNOLOGY CORPORATION VERSION 970 APRIL 2003
- 17] **DEFORMATION CHARACTERISTICS OF CRASHWORTHY COMPONENTS**, Mamalis AG, Manolakos DE, Viegelaahn GL. Dusseldorf: Fortschritt-Berichte der VDI-Zeitschriften, Reihe 18, Nr. 62, 1989
- 18] **CONSIDERATIONS IN STRAIGHT FOLD ANALYSIS OF THIN TUBES UNDER AXIAL COMPRESSION**, N.K. GUPTA, H. Abbas, Venkatesha, (a) Department of Applied Mechanics, Indian Institute of Technology, Delhi, Hauz Khas, New Delhi 110016, India, (b) Department of Civil Engineering, Aligarh Muslim

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

University, Aligarh 202 002, India, Received 19 September 2003; received in revised form 1 July 2004; accepted 2 July 2004, Available online 15 September 2004
Considerations in straight fold analysis of thin tubes under axial compression
International Journal of Impact Engineering, Volume 31, Issue 8, September 2005, Pages 1039-1053

19] ***STRESS CONCENTRATION AROUND A SMALL CIRCULAR HOLE IN THE HIMAT COMPOSITE PLATE***, William L. Co, NASA Technical Memorandum 86038.

20] ***THE EFFECTIVE CRUSHING DISTANCE IN AXIALLY COMPRESSED THIN-WALLED METAL COLUMNS***, Wlodzimierz Abramowicz, 11 May 1983, Warsaw, Poland, Polish Academy of Sciences, Institute for Fundamental Technological Research.

The effective crushing distance in axially compressed thin-walled metal columns
International Journal of Impact Engineering, Volume 1, Issue 3, 1983, Pages 309-317

21] ***LS- DYNA THEORY MANUAL***,
3.3 Fully integrated brick elements, p. 3.9
9.6 Fully integrated Hughes-liu shells, p. 9.13

22] ***LS- DYNA 971 KEYWORD USER'S MANUAL***,
Constrained- Constrained Tie-Break, p. 6.106

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ:.....σελ.1

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο: ΘΕΩΡΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΑΞΟΝΙΚΗΣ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗΣ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΩΝ ΣΩΛΗΝΩΝ.....σελ.3

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο: ΣΥΓΚΕΝΤΩΣΗ ΤΑΣΕΩΝ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΕΓΚΟΠΕΣ.....σελ.9

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο: ΓΕΝΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΜΕΘΟΔΟΥ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ (FINITE ELEMENT METHOD-FEM).....σελ.14

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ – ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ...σελ.23

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο:.....σελ.29

- ❖ **ΕΝΟΤΗΤΑ 5-0:** ΠΡΟΒΟΛΗ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ ΤΟΥ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΚΑΤΑ ΤΟ ΠΕΙΡΑΜΑ ΣΕ ΑΝΤΙΠΑΡΑΘΕΣΗ ΜΕ ΤΙΣ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΕΣ ΦΑΣΕΙΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΤΟΥ LS-DYNA.....σελ.29
- ❖ **ΕΝΟΤΗΤΑ 5-1:** ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΑΝΕΥ ΕΓΚΟΠΩΝ...σελ.31
- ❖ **ΕΝΟΤΗΤΑ 5-2:** ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΙΑΣ(1) ΕΓΚΟΠΗΣ ΣΤΟ ΠΑΝΩ ΜΕΤΩΠΟ ΤΟΥ ΚΕΛΥΦΟΥΣ ΠΑΧΟΥΣ $t = 2\text{mm}$ ΚΑΙ ΒΑΘΟΥΣ $h = 5\text{mm}$ (Dial5-1).....σελ.42
- ❖ **ΕΝΟΤΗΤΑ 5-3:** ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ ΔΥΟ(2) ΕΓΚΟΠΕΣ ΣΤΟ ΠΑΝΩ ΜΕΤΩΠΟ ΤΟΥ ΚΕΛΥΦΟΥΣ ΠΑΧΟΥΣ $t = 2\text{mm}$ ΚΑΙ ΒΑΘΟΥΣ $h = 5\text{mm}$ (Dial5-2).....σελ.54
- ❖ **ΕΝΟΤΗΤΑ 5-4:** ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΙΑΣ(1) ΕΓΚΟΠΗΣ ΣΤΟ ΠΑΝΩ ΜΕΤΩΠΟ ΤΟΥ ΚΕΛΥΦΟΥΣ ΠΑΧΟΥΣ $t = 2\text{mm}$ ΚΑΙ ΒΑΘΟΥΣ $h = 15\text{mm}$ (Dial15-1).....σελ.66
- ❖ **ΕΝΟΤΗΤΑ 5-5:** ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ ΔΥΟ(2) ΕΓΚΟΠΕΣ ΣΤΟ ΠΑΝΩ ΜΕΤΩΠΟ ΤΟΥ ΚΕΛΥΦΟΥΣ ΠΑΧΟΥΣ $t = 2\text{mm}$ ΚΑΙ ΒΑΘΟΥΣ $h = 15\text{mm}$ (Dial15-2).....σελ.78
- ❖ **ΕΝΟΤΗΤΑ 5-6:** ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ ΤΡΕΙΣ(3) ΕΓΚΟΠΕΣ ΣΤΟ ΠΑΝΩ ΜΕΤΩΠΟ ΤΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΠΑΧΟΥΣ $t = 10\text{mm}$ ΚΑΙ ΒΑΘΟΥΣ $h = 5\text{mm}$ (Dial-3(BE)).....σελ.88

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

❖ <u>ΕΝΟΤΗΤΑ 5-7:</u> ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ ΤΕΣΣΕΡΙΣ(4) ΕΓΚΟΠΕΣ ΣΤΟ ΠΑΝΩ ΜΕΤΩΠΙΟ ΤΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΠΑΧΟΥΣ $t = 10\text{mm}$ ΚΑΙ ΒΑΘΟΥΣ $h = 5\text{mm}$ (Dial-4(BE)).....σελ.100
❖ <u>ΕΝΟΤΗΤΑ 5-8:</u> ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΑΝΕΥ ΕΓΚΟΠΩΝ ΜΕ ΠΑΤΗ-ΜΑ ΣΕ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΟ ΔΟΚΙΜΙΟ ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ $d = 10\text{mm}$ (Dial-C)σελ.112
❖ <u>ΕΝΟΤΗΤΑ 5-9:</u> ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΑΝΕΥ ΕΓΚΟΠΩΝ ΜΕ ΠΑΤΗ-ΜΑ ΣΕ ΠΑΡΑΛΛΗΛΕΠΙΠΕΔΟ ΔΟΚΙΜΙΟ ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΠΛΕΥΡΑΣ $a = 10\text{mm}$ (Dial-R).....σελ.123
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο:</u> ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....σελ.136
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο:</u> ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ.....σελ.140
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ:σελ.142
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ:σελ.145