



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ, ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ Ε. ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΛΕΩΝΙΚΗ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΩΝ ΚΕΛΥΦΩΝ-ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ
ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΚΥΚΛΙΚΩΝ ΑΤΕΛΕΙΩΝ ΣΤΑ ΤΟΙΧΩΜΑΤΑ ΤΟΥ ΚΕΛΥΦΟΥΣ:
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

ΛΕΩΝΙΔΑΣ Δ. ΦΕΥΓΑΣ

ΑΘΗΝΑ 2007

➤ ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η διπλωματική μου εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ, τον Σεπτέμβριο 2007, 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 κυκλικές ατέλειες ανά διαφορετικές θέσεις καθ' ύψος των δοκιμίων.

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 σπές 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, 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 .

Κατόπιν στις ενότητες 5-0, έως 5-16 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 και προς τον υποψήφιο 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.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2007

Λεωνίδας Δ. Φεύγας

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

ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

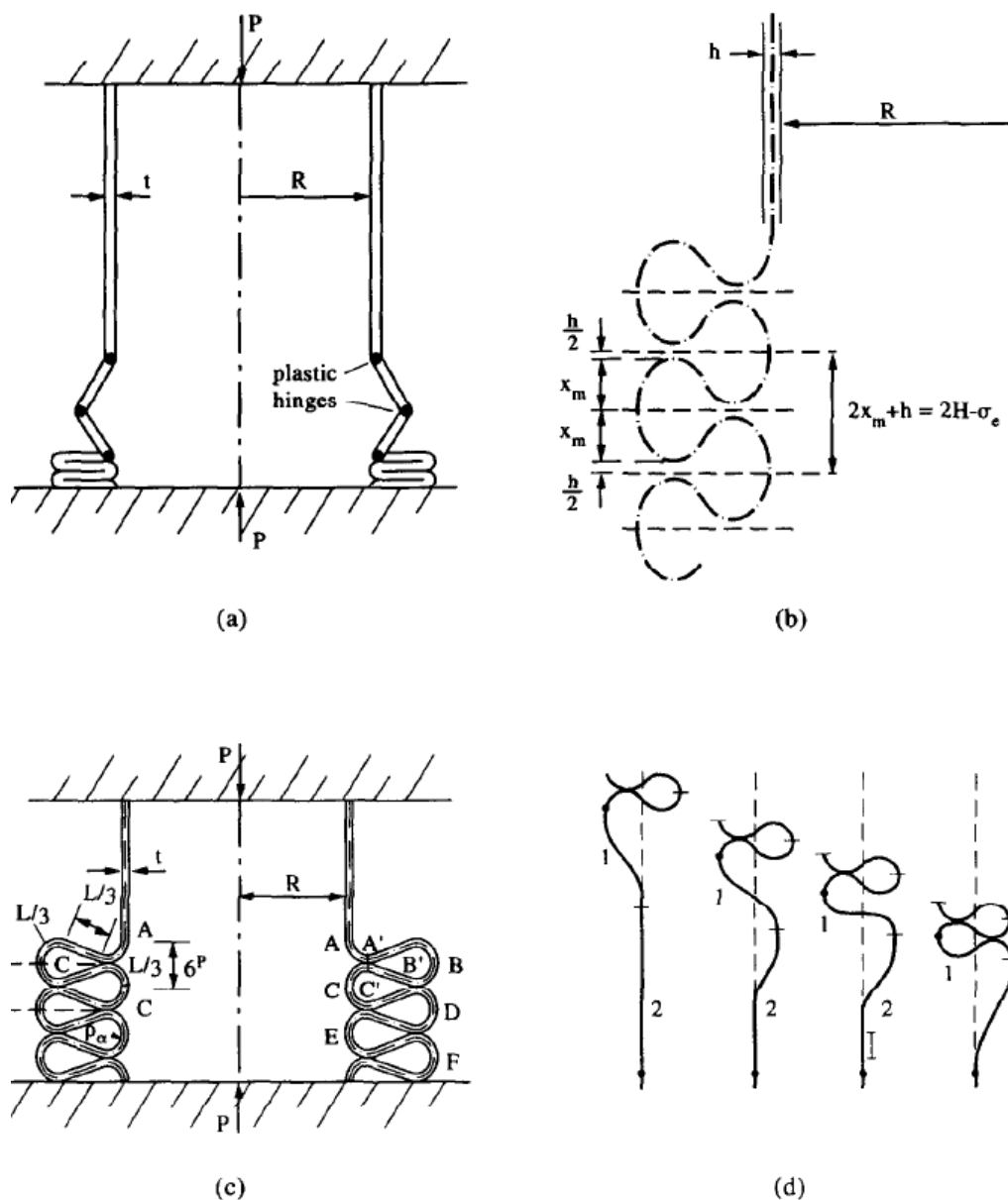
Στις μέρες μας υπάρχει έρευνα κυρίως από τις αυτοκινητοβιομηχανίες, για βελτιώσεις προϊόντων όσον αφορά την μείωση βάρους και την ανάγκη για αντίσταση σε διάβρωση. Τα σημερινά κράματα αλουμινίου έχουν άμεσο ενδιαφέρον λόγω της χαμηλής πυκνότητας τους 2.76g/cm και καλή αντίσταση διάβρωσης. Το μειονέκτημα 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].

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)

Κεφάλαιο 1^ο

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. [1],[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. 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 πτύχωση όπως αναφέρεται στο [5]. (Wierzbicki και Bhat 1984, Abramowicz και Jones 1986, Grzebieta 1990).

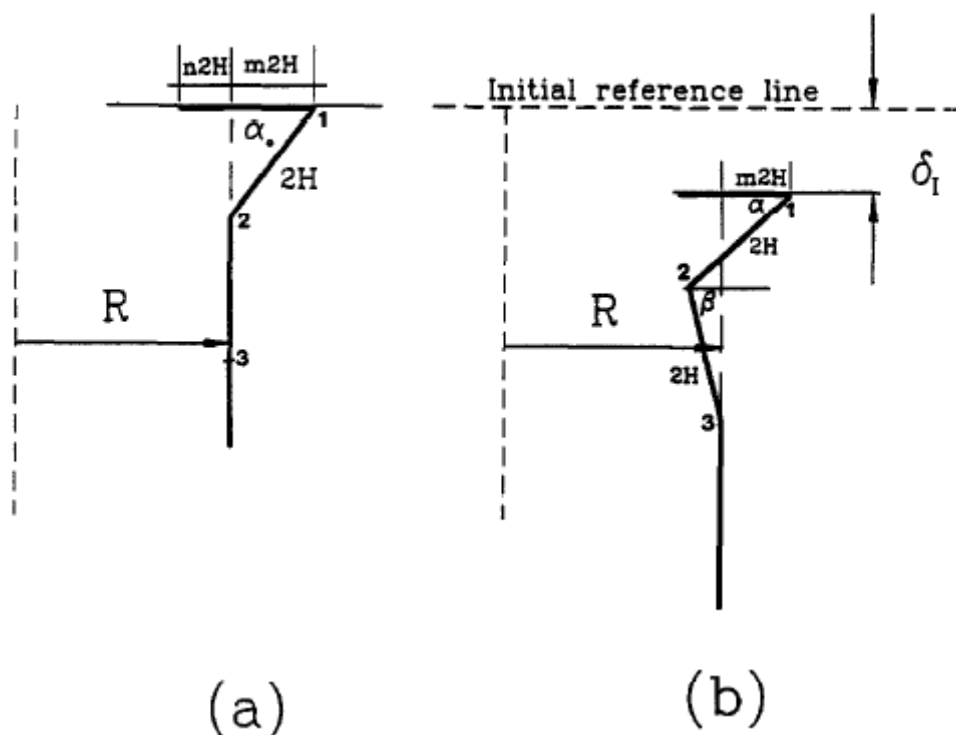


Σχήμα 1α. Διαφορετικοί μηχανισμοί αστοχίας που προταθήκαν για μοντελοποίηση του κανονικού τρόπου θλίψης σύμφωνα με τον α) Alexander(1960) b) Abramowicz και Jones(1986) c) Grzebieta(1990) d) Wierzbicki(1992).

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



Σχημα 1β. 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:

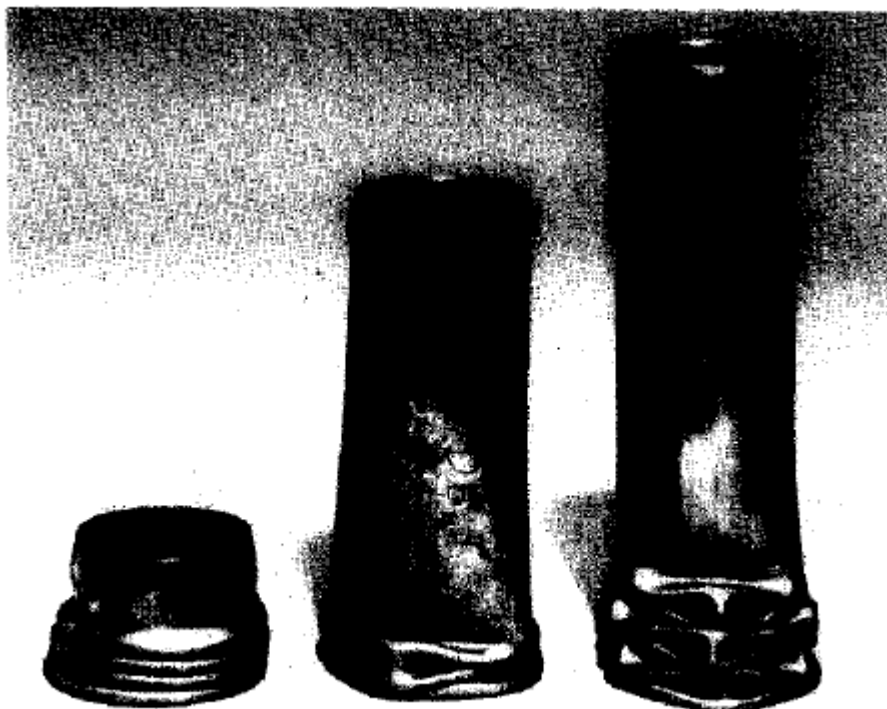
Σύμφωνα με αυτό το είδος παραμόρφωσης, το δοκίμιο που καταρρέει περιέχει δυο είδη αρμών τους 3D και 2D μη εκτατούς λοβούς. Σε τριγωνική μορφή όπου η κάθε άρθρωση διαφέρει κατά $\pi/3$ ενώ υπάρχει και η καρό μορφή σε (diamond) σχήμα όπου η κάθε άρθρωση διαφέρει κατά $\pi/4$.

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.

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.

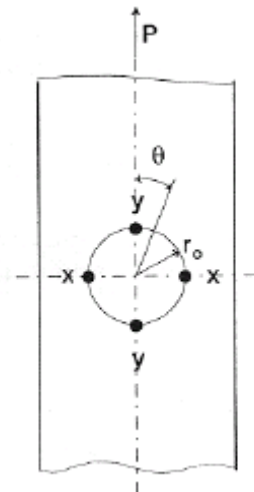


Σχήμα 2. Μοντέλα 1,2,3 που απεικονίζουν εκτατό, ανάμεικτο και μη εκτατό τρόπο κατάρρευσης των δοκιμίων αντίστοιχα.

ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΤΑΣΕΩΝ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΟΠΕΣ**ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΤΑΣΕΩΝ ΣΕ ΟΠΕΣ:**

Σε όλες τις μηχανολογικές κατασκευές έχουμε να αντιμετωπίσουμε το φαινόμενο, οπές 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) από 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:

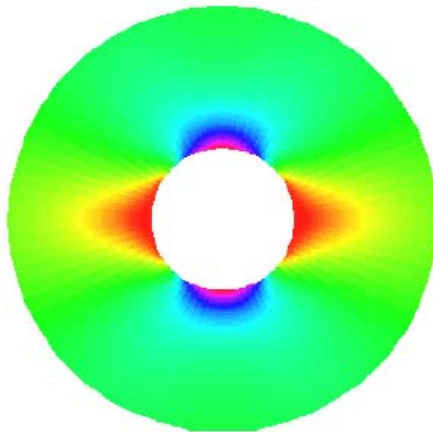
$\sigma = 3p$, για $\theta = \pi/2$, και για $\theta = 3\pi/2$ (σε διεύθυνση κάθετη προς την αξονική διεύθυνση της φόρτισης),

$\sigma = -p$, 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

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 συνδετικά 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.

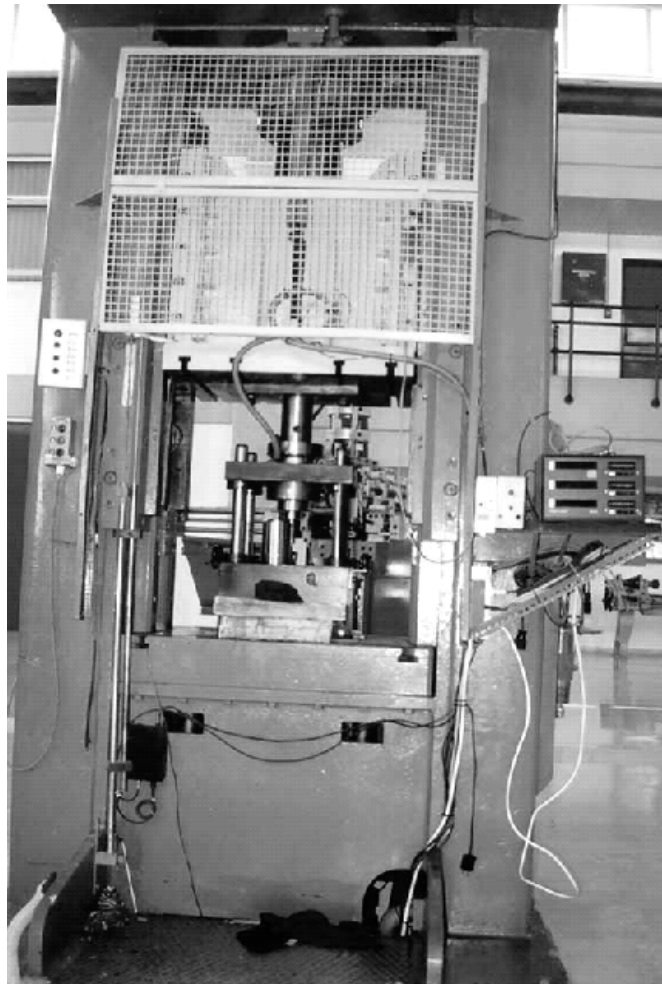
Επίσης, η εταιρεία Boeing θεωρεί ότι έχει αναπτύξει την ιδανικότερη πατέντα για το παραπάνω πρόβλημα, κατά την οποία χρησιμοποιείται ένα ειδικό μεταλλικό χιτώνιο το οποίο τοποθετείται και εφαρμόζει απολύτως εσωτερικά σε κάθε οπή, και την καθιστά απολύτως ασφαλή σε εξωτερικές φορτίσεις.

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 : 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 1 mm/msec.

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 H/Y 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 ελληνική βιβλιογραφία [1] για την περαιτέρω μοντελοποίησή των δοκιμίων με το LS-DYNA 970 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 970, δίνουμε τα παραπάνω ζεύγη τιμών κατά απόλυτη τιμή και ορίζουμε σταθερή ταχύτητα πρόωσης του εμβόλου: $v = -1\text{mm/msec}$, 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 υπάρχοντων 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.

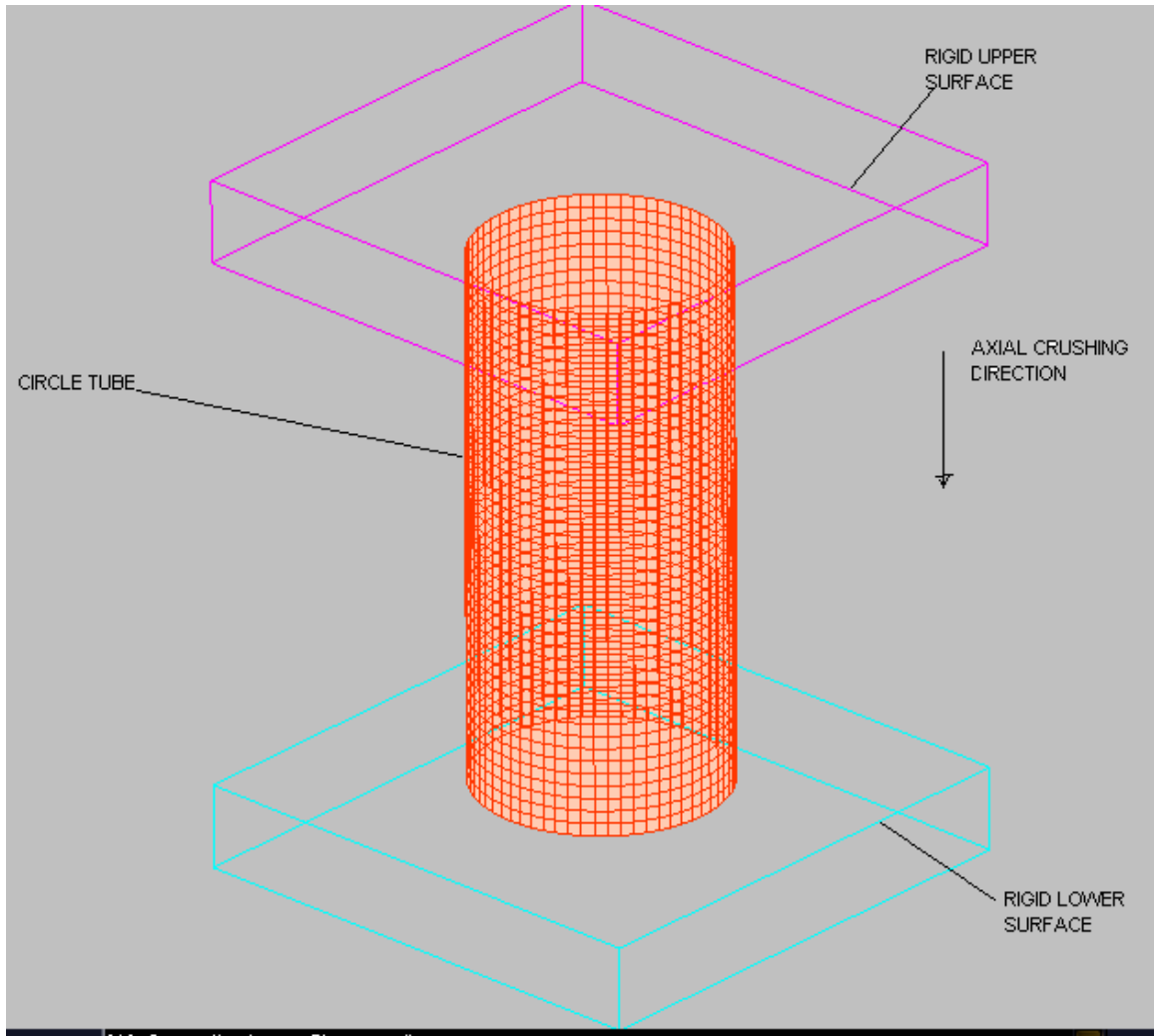
Εξειδικευμένα προγράμματα για συνδυασμένη κινηματική και ελαστική ανάλυση μηχανισμών είναι: ADAMS, DADS.

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 τριδιάστατων προβλημάτων (προβλήματα πλαστικής παραμόρφωσης). Η Εταιρεία κατασκευής είναι η LIVERMORE SOFTWARE TECHNOLOGY CORPORATION, και η τρέχουσα έκδοση, η οποία και χρησιμοποιήθηκε ήταν η 970.

➤ Χρήση του προγράμματος:

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

- 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 $D=60$ $L=127\text{mm}$ και πάχος τοιχώματος 2mm , ενώ η προσομοίωση στο LS-Dyna 970, έγινε με διαστάσεις $D=58$ $L=127\text{mm}$, 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 65msec σε όλα τα δοκίμια (άρα έως τα 65.0mm από την πάνω επιφάνεια του κάθε δοκιμίου την οποία θα πιέζει θλιπτικά το έμβολο της πρέσσας). Τα πεπερασμένα στοιχεία που επιλέξαμε για το πλέγμα στα μοντέλα των δοκιμών είναι *Shell Element* (γι' αυτόν ακριβώς το λόγο τα δοκίμια σχεδιάστηκαν με βάση τις παραπάνω διαστάσεις βλ. [16]).

Ακόμα, στο LS-Dyna 970, δίνουμε τα ζεύγη τιμών σελίδας 13, κατά απόλυτη τιμή και ορίζουμε σταθερή ταχύτητα πρόωσης του εμβόλου: $v = -1\text{mm/msec}$, 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)

Τα δεδομένα σώζονται από τον preprocessor 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:

$$W = \int P ds$$

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

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

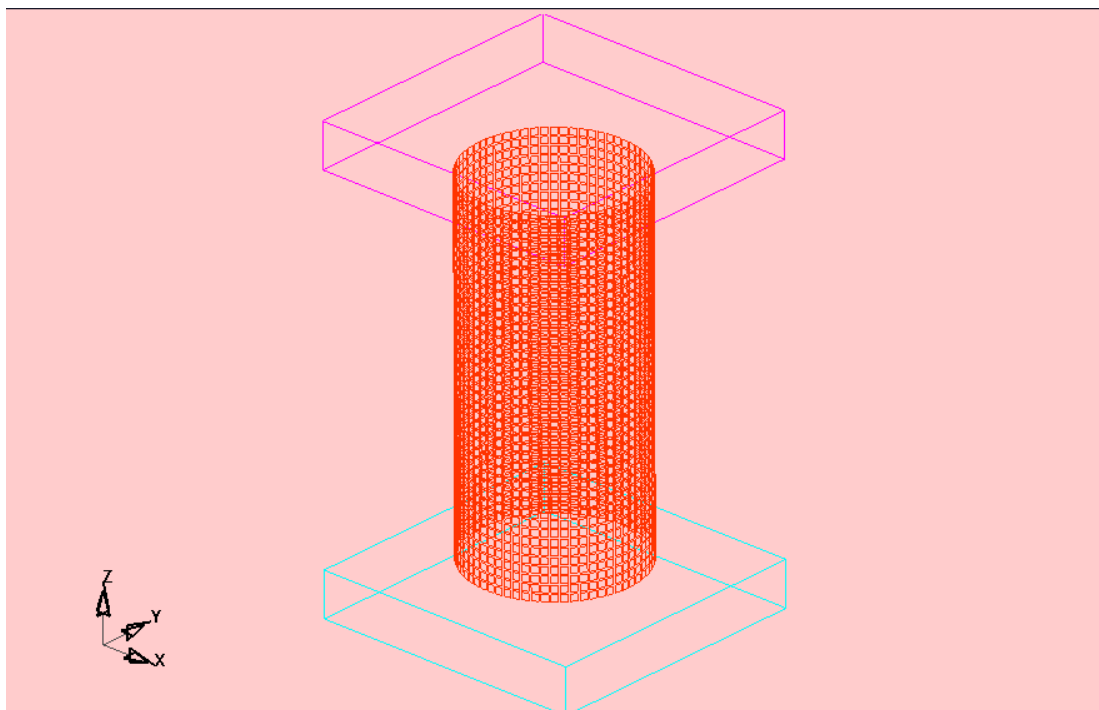
Επίσης, μπορούμε να υπολογίσουμε και την *ομοιομορφία φορτίου* (Load Uniformity), που είναι ο λόγος της μέγιστης τιμής του φορτίου κατά την ελαστική παραμόρφωση του δοκιμίου πριν αρχίσει η κατάρρευση του υλικού, προς το μέσο φορτίο που σημειώνεται κατά τα στάδια κατάρρευσης του υλικού:

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

όπου Pmax, 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: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΑΝΕΥ ΟΠΩΝ (ΤΥΠΕ S)

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

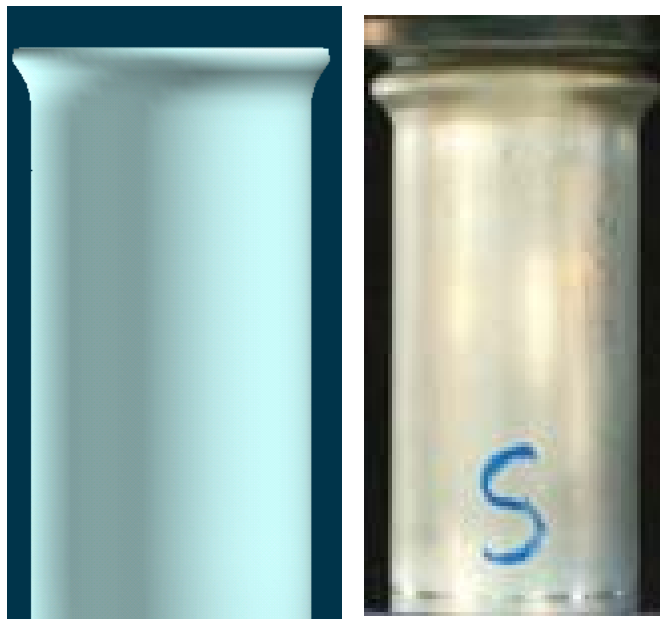


Σχ.1 Απεικόνιση πλέγματος στο LS_DYNA 3D, κυκλικής διατομής δοκιμίου άνευ οπών.

Οι αντίστοιχες φάσεις προσομοίωσης της κατάρρευσης του δοκιμίου αυτού, που κατέγραψα με τη χρήση του LS-DYNA, σε σύγκριση με τις φάσεις που έλαβα από την ελληνική βιβλιογραφία [1] 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 (αριστερή).



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 πάνω μέρος περίπου στα 4mm του ύψους του, και στο μοντέλο του ls-dyna, η αρχική κατάρρευση σημειώνεται από το πάνω χείλος της διατομής. Πάτημα της πρέσας στα 8mm.



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 λοβού, και αρχή δημιουργίας δεύτερου λοβού στο παράλληλο επίπεδο ως προς τον προηγούμενο λοβό. Πάτημα της πρέσας στα 13mm.



3η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Παρατηρούμε ολοκλήρωση του πρώτου εκτατού λοβού και αρχή δημιουργίας του δεύτερου λοβού. Πάτημα της πρέσας στα 18 mm.



4η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Συνέχιση δεύτερου εκτατού λοβού, σε επίπεδο παράλληλο ως προς το επίπεδο του προηγούμενου εκτατού λοβού. Παρατηρούμε ότι στο πραγματικό δοκίμιο στην πρέσα, η κατάρρευση συνεχίζεται από πάνω προς το μέσο του δοκιμίου, με διεύθυνση προς την σταθερή πλάκα συγκράτησης, ενώ το κάτω μισό μέρος του δοκιμίου, φαίνεται σχεδόν ανεπηρέαστο. Στο μοντέλο στο LS-DYNA, η κατάρρευση συνεχίζεται κατά τον ίδιο τρόπο προς τα κάτω. Πάτημα της πρέσας στα 22 mm.



5η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή

εικόνα).Ολοκλήρωση δεύτερου λοβού κ ξεκίνημα δημιουργίας τρίτου εκτατού λοβού σε παράλληλο επίπεδο . Πάτημα της πρέσας στα 35 mm.



6η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (αριστερή εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (δεξιά εικόνα). Συνέχιση και ολοκλήρωση και του τρίτου εκτατού λοβού σε επίπεδο παράλληλο προς τον δεύτερο λοβό. Πάτημα της πρέσας στα 40 mm.



7η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (αριστερή εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (δεξιά εικόνα). Στο δοκίμιο του DYNA έχουμε ολοκλήρωση τρίτου λοβού κ ξεκίνημα δημιουργίας τέταρτου εκτατού λοβού σε παράλληλο επίπεδο. Στο δοκίμιο της πρέσας

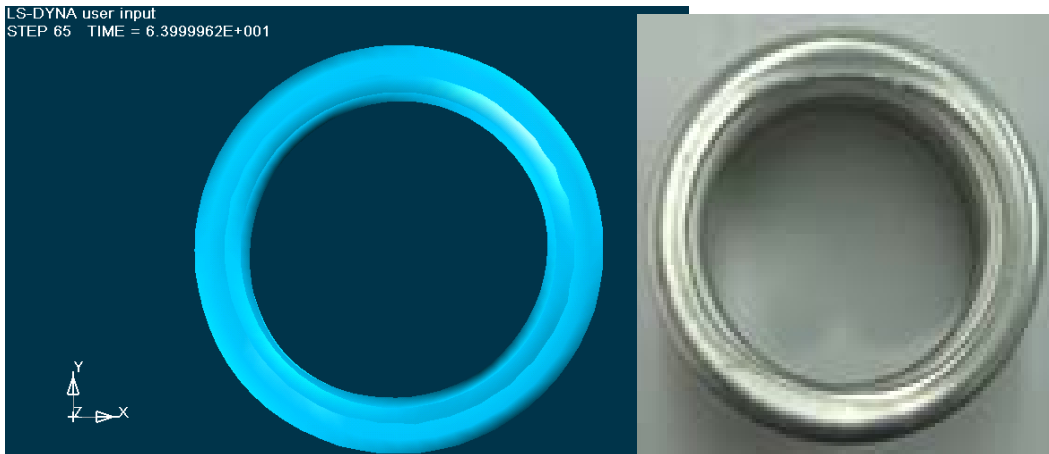
παρατηρούμε εξίσου αρχή δημιουργίας τέταρτου εκτατού λοβού σε παράλληλο επίπεδο ως προς τον προηγούμενο. Πάτημα της πρέσας στα 47 mm.



8η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (αριστερή εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (δεξιά εικόνα). Βλέπουμε αναδίπλωση του υλικού και συνέχιση δημιουργίας του τέταρτου εκτατού λοβού σε επίπεδο παράλληλο προς τον τρίτο λοβό. Πάτημα της πρέσας στα 56 mm.

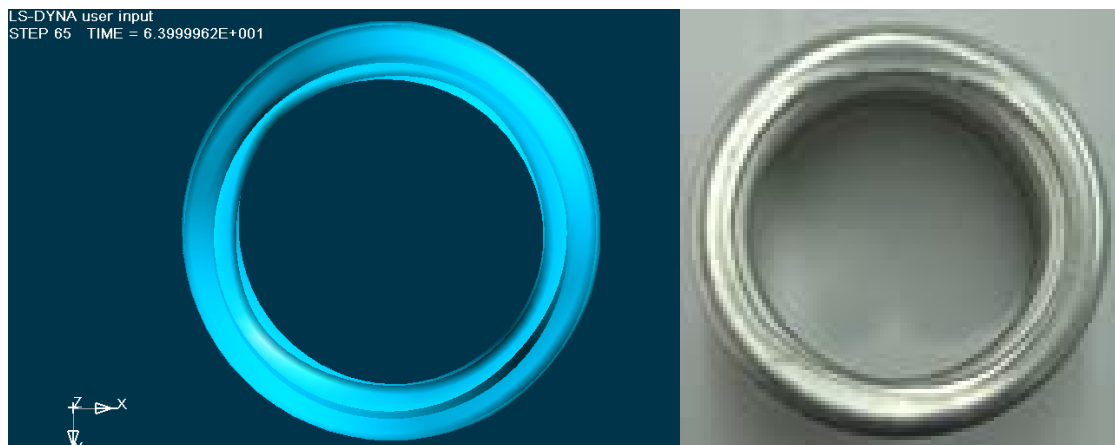


Τελική μορφή δοκιμίου αμέσως μετά το τέλος της διαδικασίας αξονικής κατάρρευσης στην πρέσα. Το ίδιο δοκίμιο(δεξιά) μετά το τέλος της προσομοίωσης από το LS-DYNA, (αριστερά). Παρατηρούμε τρεις ολοκληρωμένους εκτατούς λοβούς σε επίπεδα παράλληλα μεταξύ τους. Ακόμα, παρατηρούμε την ύπαρξη και τέταρτου εκτατού λοβού στο πάνω μισό μέρος του δοκιμίου, ο οποίος όμως δεν έχει ολοκληρωθεί. Τελικό πάτημα της πρέσας στα 65.0 mm.

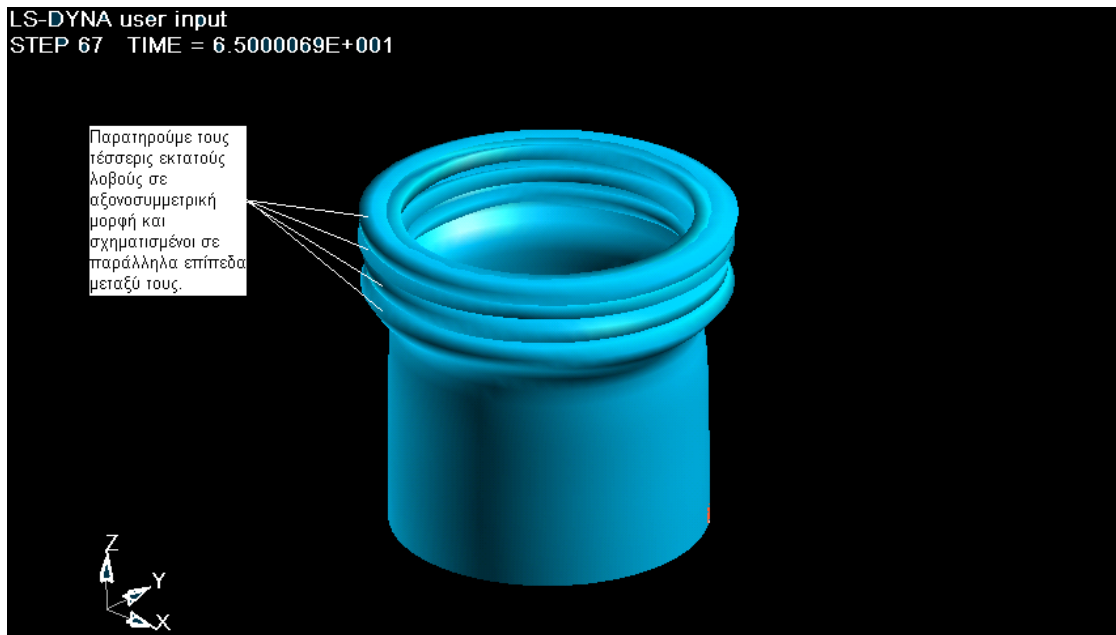


Τελική μορφή δοκιμίου αμέσως μετά το τέλος της διαδικασίας αξονικής κατάρρευσης στην πρέσα (δεξιά). Το ίδιο δοκίμιο μετά το τέλος της προσομοίωσης από το LS-DYNA, (αριστερά). Παρατηρούμε στο δοκίμιο του DYNA τέσσερις εκτατούς λοβούς σε σχήμα αξονοσυμμετρικό. Τελικό πάτημα της πρέσας στα 65.0 mm.

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 65.0 mm:



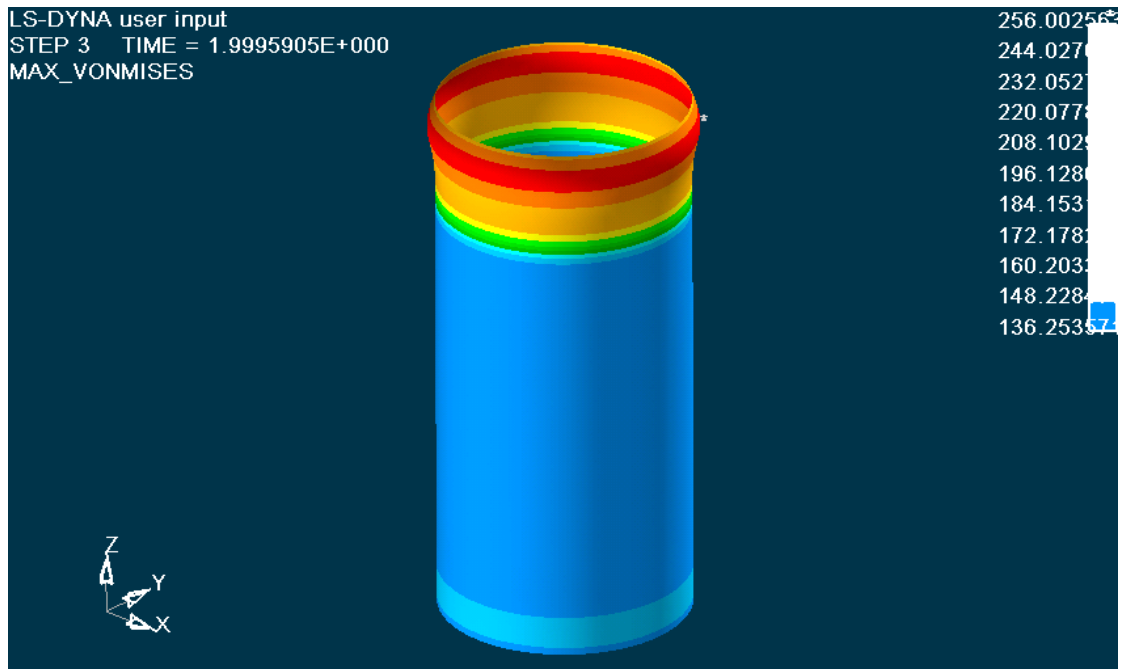
Η ολοκληρωμένη προσομοίωση του μοντέλου μας με το LS-DYNA, παρουσιάζεται και στα αρχεία βίντεο:

- **Deformation isometric.Avi**
- **[Deformation side.Avi](#)**
- **Deformation rear.Avi**

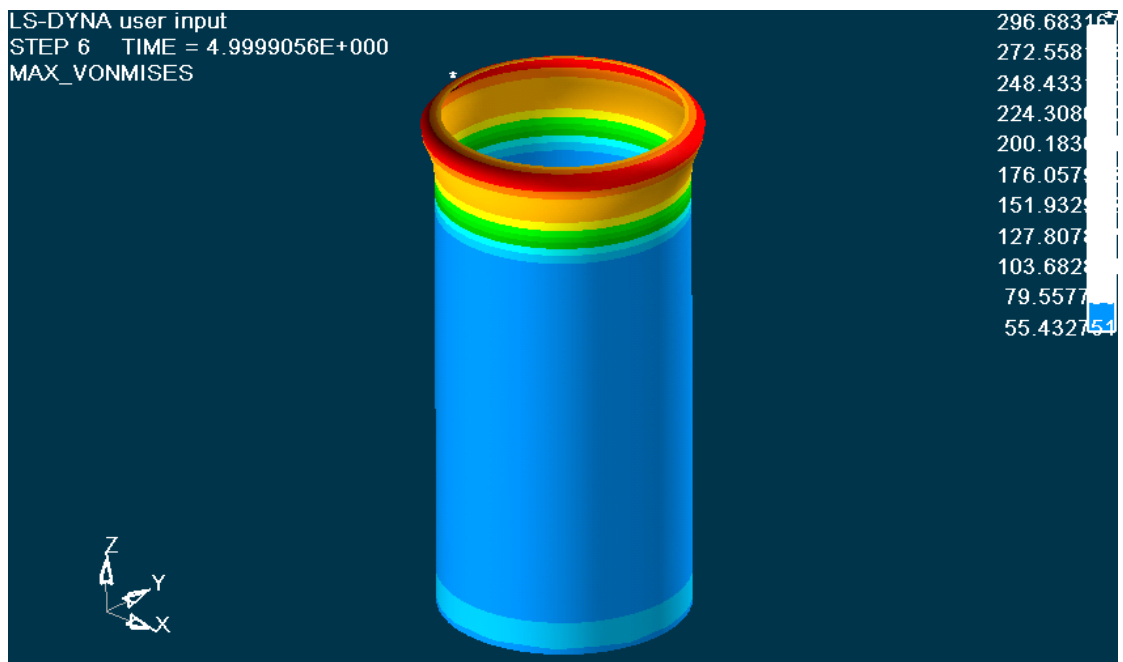
Ακολουθούν εικόνες από την κατανομή των τάσεων σε όλη την επιφάνεια του δοκιμίου κατά τα διάφορα στάδια της κατάρρευσής του:

Επιλέγοντας στον ETA POSTGL:

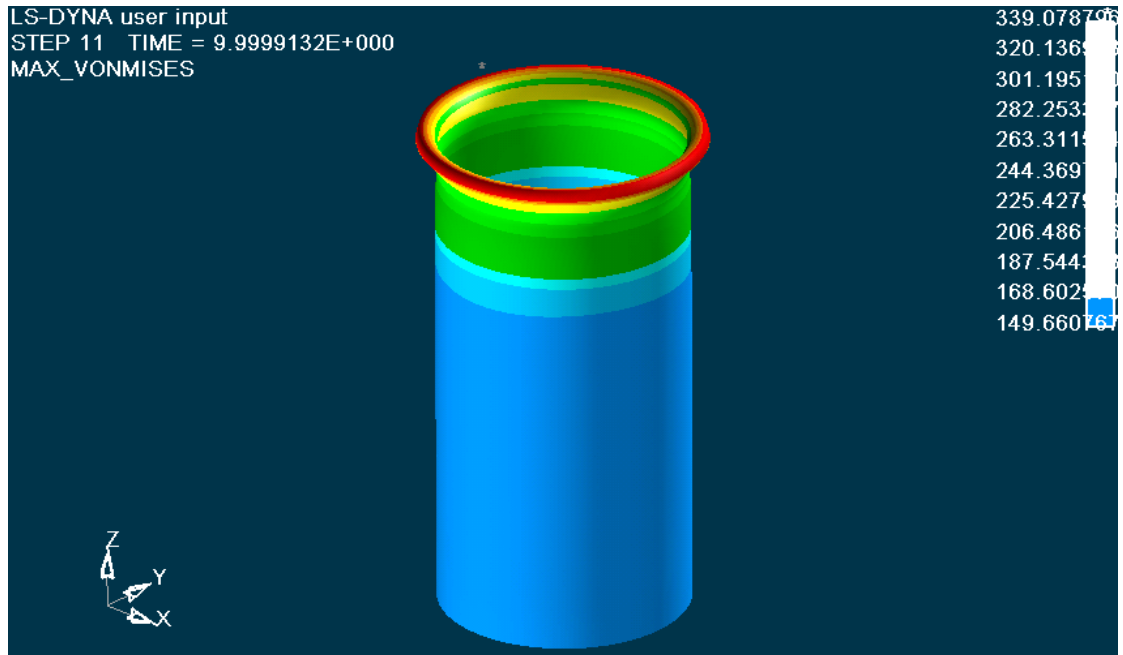
CONTOUR -> STRESS/STRAIN -> MAXIMUM VON MISES STRESSES:



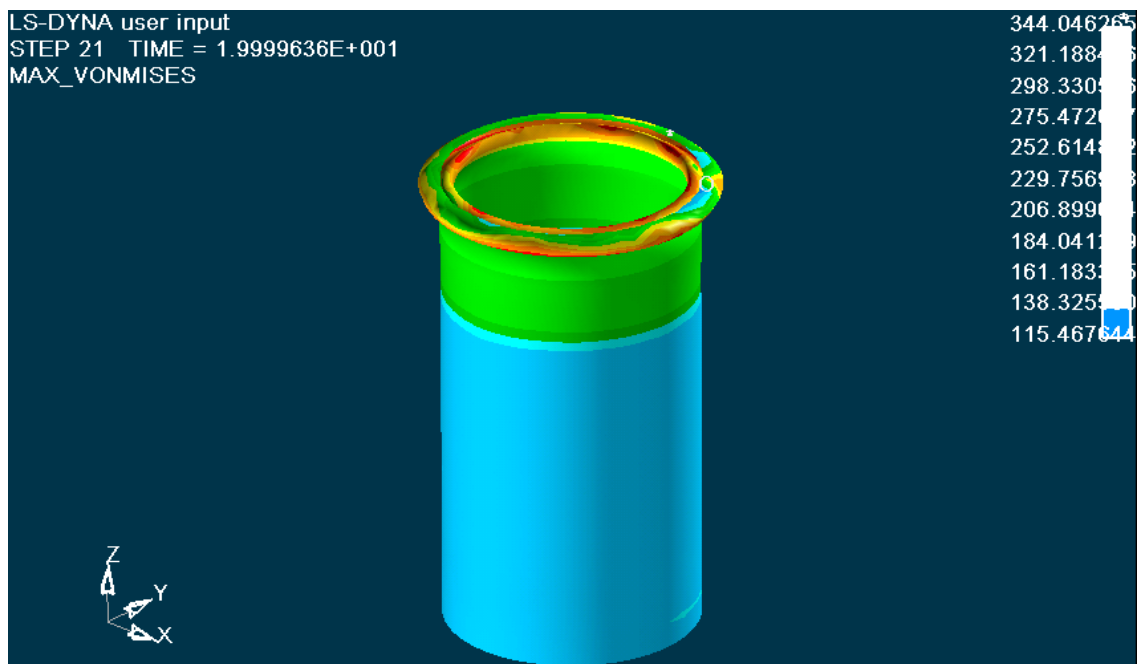
Κατανομή των τάσεων στα 2mm. Έχουμε μέγιστες τάσεις σε όλη την περιοχή του δοκιμίου, που πιέζει το έμβολο της πρέσας. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή **256,0 MPa** στην περιοχή με κόκκινο χρώμα, η οποία είναι μεγαλύτερη από το όριο διαρροής του υλικού ($\sigma_A=220 \text{ MPa}$), οπότε ξεκινάει η πλαστική παραμόρφωση του δοκιμίου, με εμφάνιση μονίμων παραμορφώσεων σε αυτό. Στο σημείο της εικόνας που φαίνεται η μπλε περιοχή, είναι η θέση που έχουμε την ελάχιστη τιμή τάσεων. Είναι κυρίως η παράπλευρη επιφάνεια του δοκιμίου εκτός των περιοχών που απαρτίζουν τις κάτω και άνω διεπιφάνειες του δοκιμίου που έρχονται σε επαφή με την πλάκα και το έμβολο της πρέσας, αντίστοιχα.



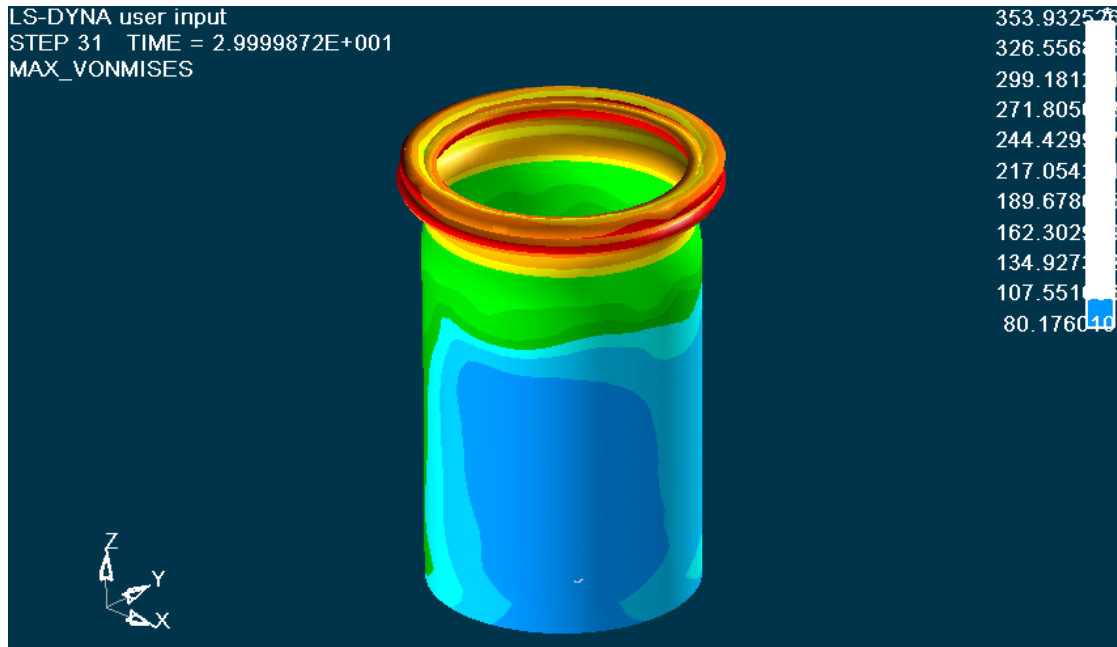
Κατανομή των τάσεων στο 5 mm. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή **296.68 MPa** στην περιοχή με κόκκινο χρώμα. Στην μπλε περιοχή που αντιστοιχεί στο κάτω μέρος του δοκιμίου που έρχεται σε επαφή με την σταθερή πλάκα και την παράπλευρη επιφάνεια κάτω από την περιοχή σχηματισμού του πρώτου λοβού, έχουμε την ελάχιστη τιμή των τάσεων που φαίνεται στην εικόνα με τον αριθμό **55.4MPa**. Παρατηρούμε την αρχή δημιουργίας του πρώτου λοβού στο πάνω μέρος του δοκιμίου.



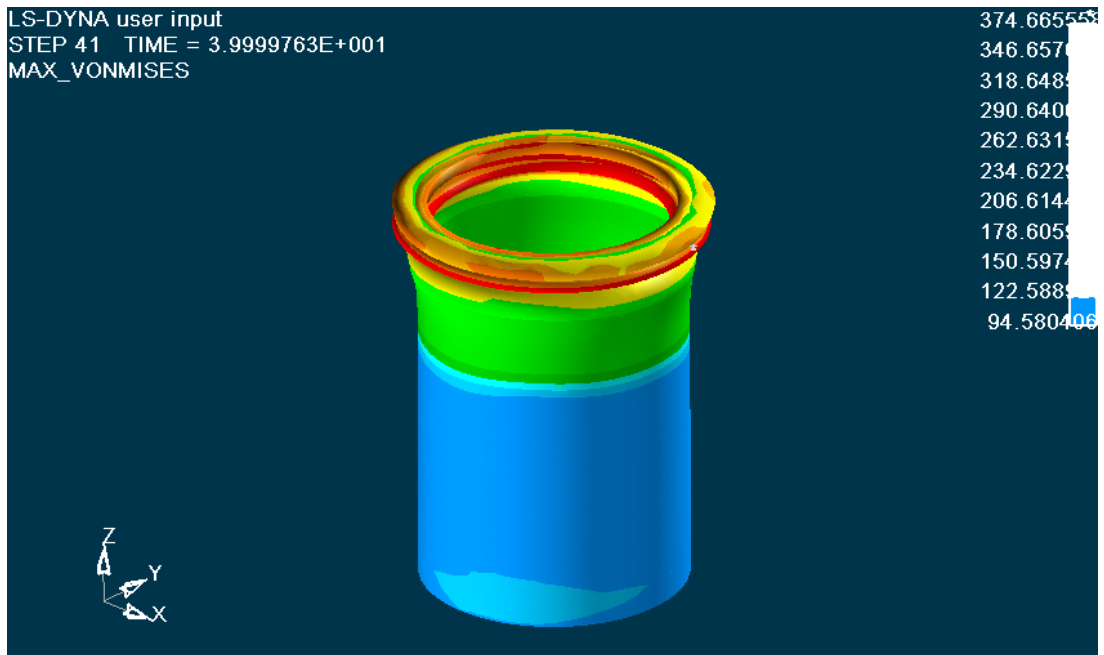
Κατανομή των τάσεων στο 10mm. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή 339,08 MPa που είναι μεγαλύτερη από την τάση αντοχής ($\sigma_A=240\text{MPa}$) στην κόκκινη περιοχή όπου αναδιπλώνεται το υλικό για τον σχηματισμό του πρώτου λοβού.



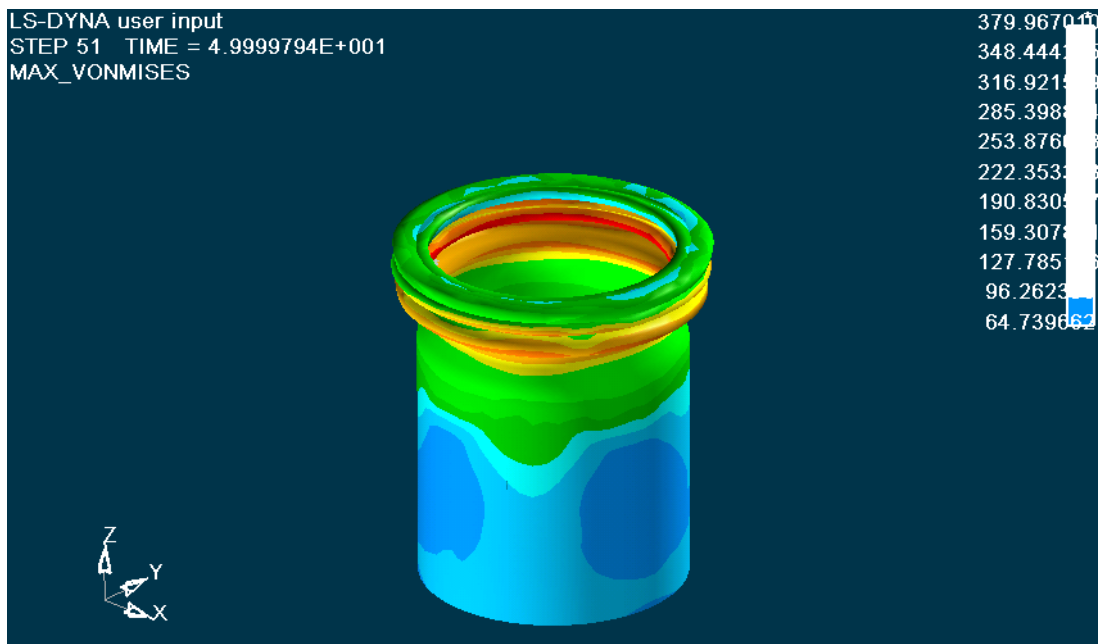
Κατανομή των τάσεων στο 20 mm. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή 344,04 MPa που είναι μεγαλύτερη από την τάση αντοχής ($\sigma_A=240\text{MPa}$). Στο κάτω μισό του δοκιμίου και σε ένα τμήμα του πρώτου λοβού που συμβολίζεται με Ο έχουμε εμφάνιση ελάχιστων τάσεων ίσες με 115.47 MPa.



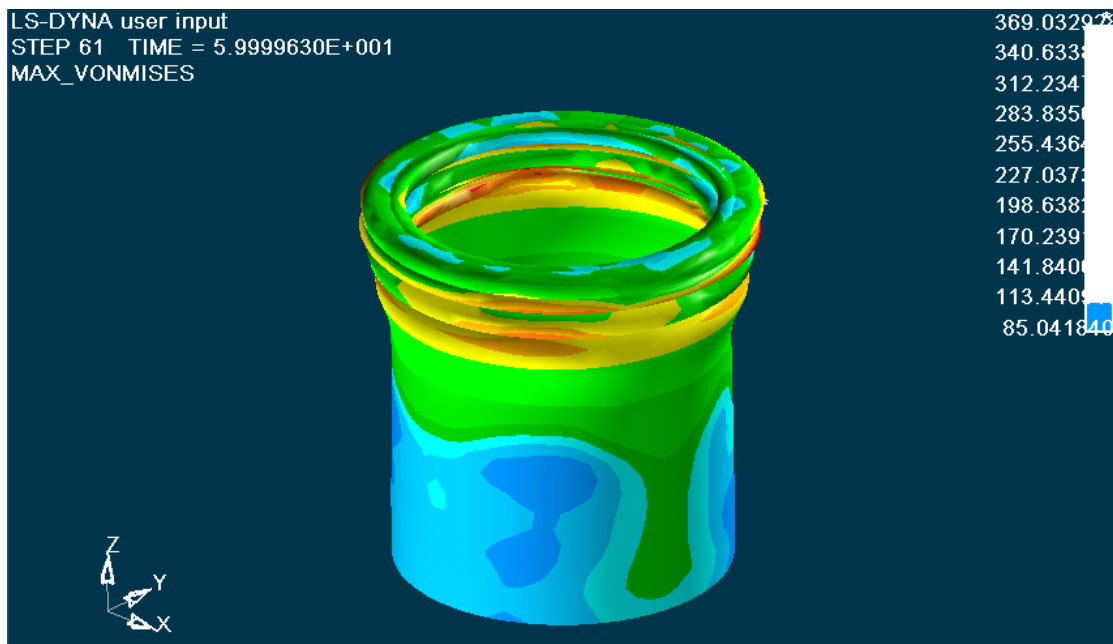
Κατανομή των τάσεων στο 30 mm. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή **353.93 MPa** στις περιοχές με κόκκινο χρώμα. Έχουν σχηματιστεί και οι δύο εκτατοί λοβοί, και αρχίζει η δημιουργία «λαιμού» για την δημιουργία του τρίτου εκτατού λοβού. Οι μέγιστες τάσεις εμφανίζονται στις περιοχές αναδίπλωσης του υλικού για την δημιουργία του πρώτου εκτατού και ο δεύτερου εκτατού λοβού. Έχουμε εμφάνιση ελάχιστων τάσεων στην μπλε περιοχή που αντιστοιχεί στην παράπλευρη επιφάνεια στο κάτω μισό του δοκιμίου ίσες με 80.17MPa.



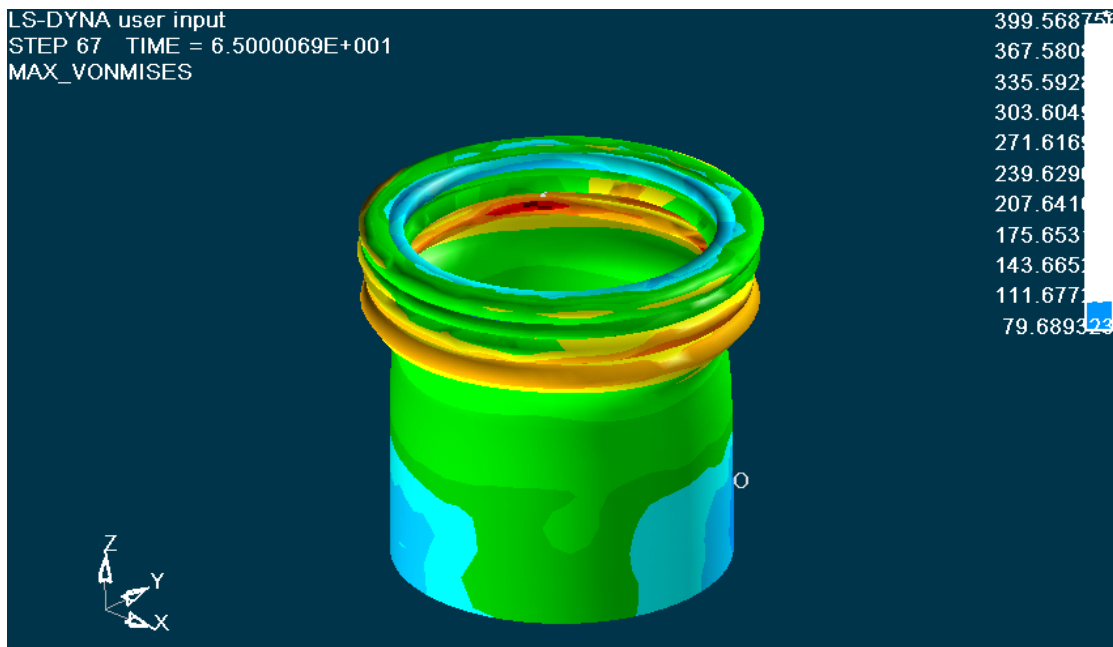
Κατανομή των τάσεων στο 40 mm. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή 374,66 MPa στις επιφάνειες του δεύτερου και τρίτου λοβού, που είναι μεγαλύτερη από την τάση αντοχής ($\sigma_A=240\text{MPa}$). Στο κάτω μισό του δοκιμίου και στην επιφάνεια επαφής του δοκιμίου με την κάτω πλάκα που συμβολίζεται με O έχουμε εμφάνιση ελάχιστων τάσεων ίσες με 94.58 MPa.



Κατανομή των τάσεων στο 50 mm. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή **379.96 MPa** στις περιοχές με κόκκινο χρώμα. Έχουν σχηματιστεί και οι τρεις εκατοί λοβοί. Οι μέγιστες τάσεις εμφανίζονται στις περιοχές αναδίπλωσης του υλικού για την δημιουργία του δεύτερου εκατοού και του τρίτου εκατοού λοβού. Έχουμε εμφάνιση ελάχιστων τάσεων στην μπλε περιοχή που αντιστοιχεί στην παράπλευρη επιφάνεια στο κάτω μισό του δοκιμίου στραμμένη η μία από την άλλη κατά $\pi/2$ ίσες με 64.74MPa.



Κατανομή των τάσεων στο 60 mm. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή **369.03 MPa**. Σε αρκετές περιοχές περιμετρικά του πρώτου λοβού και στην παράπλευρη επιφάνεια στο κάτω 1/4 του δοκιμίου, έχουμε την ελάχιστη τιμή των τάσεων που φαίνεται στην εικόνα με τον αριθμό **85.04MPa**. Η κατάρρευση του δοκιμίου, και η εμφάνιση των τριών εκατόν λοβών, σε επίπεδα παράλληλα μεταξύ τους, είναι πλέον εμφανής στο δοκίμιο.

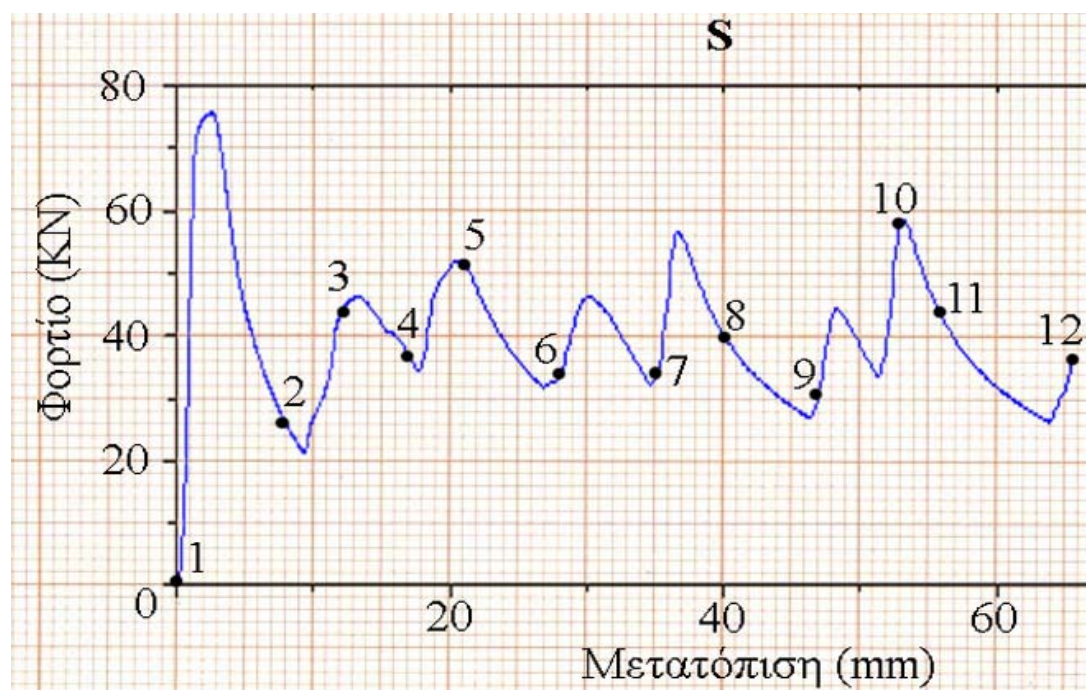


Κατανομή των τάσεων στο 65.0 mm. Οι τελικές τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή **398,31 MPa**. Η περιοχή με τις ελάχιστες τάσεις στο κάτω μισό του δοκιμίου συμβολίζεται με **O**. Η κατάρρευση του δοκιμίου έχει πλέον ολοκληρωθεί, και οι τρεις τελικοί εκατοί λοβοί έχουν σχηματιστεί πλήρως ενώ ο τέταρτος εκατός λοβός είναι ημιτελής.

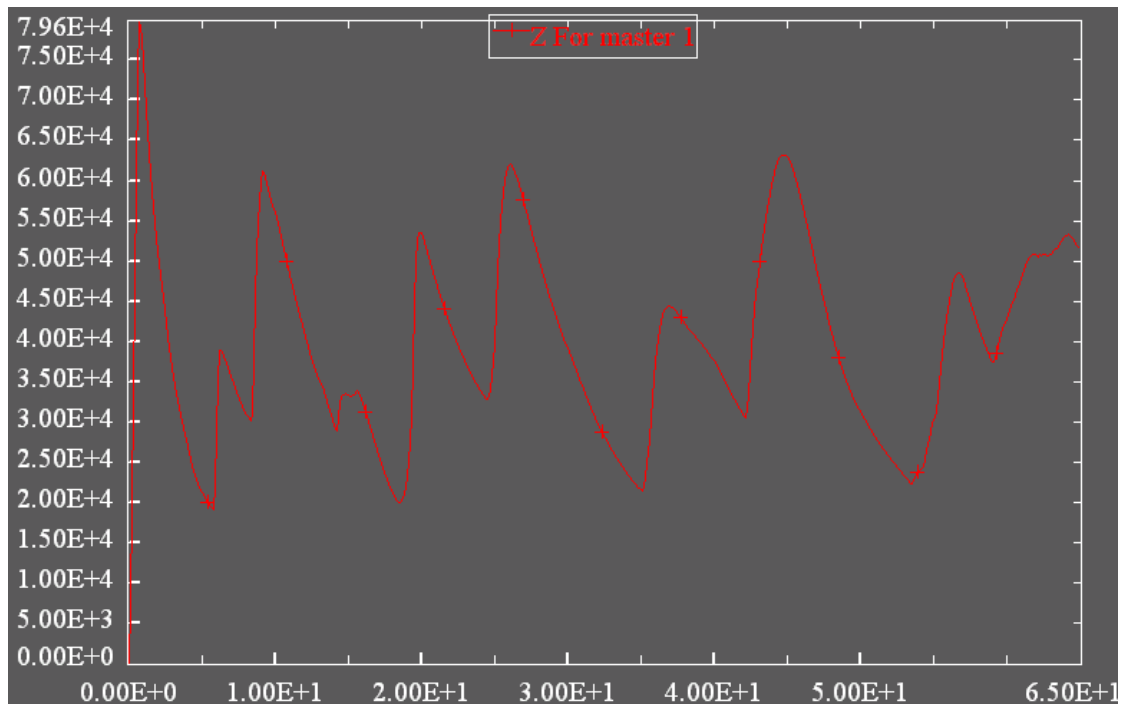
Η ολοκληρωμένη προσομοίωση της κατανομής των τάσεων του μοντέλου μας με το LS-DYNA, παρουσιάζεται και στο αρχείο βίντεο:

➤ [Contour Max Von Mises.Avi](#)

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 N**, 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: 65.2mm

Μέγιστο φορτίο $P_{max}=75.62\text{KN}$ στα 2.229mm

Το μέσο φορτίο $P_{mean}=39,1\text{KN}$

Η ομοιομορφία φορτίου $P_{max}/P_{mean} = 1,93$

Ενέργεια παραμόρφωσης $E=2549\text{KNmm}$

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

Διαδρομή εμβόλου: 65.0mm

Το μέγιστο φορτίο $P_{max} = 79,59\text{KN}$,

Το μέσο φορτίο $P_{mean} = 39,69\text{KN}$

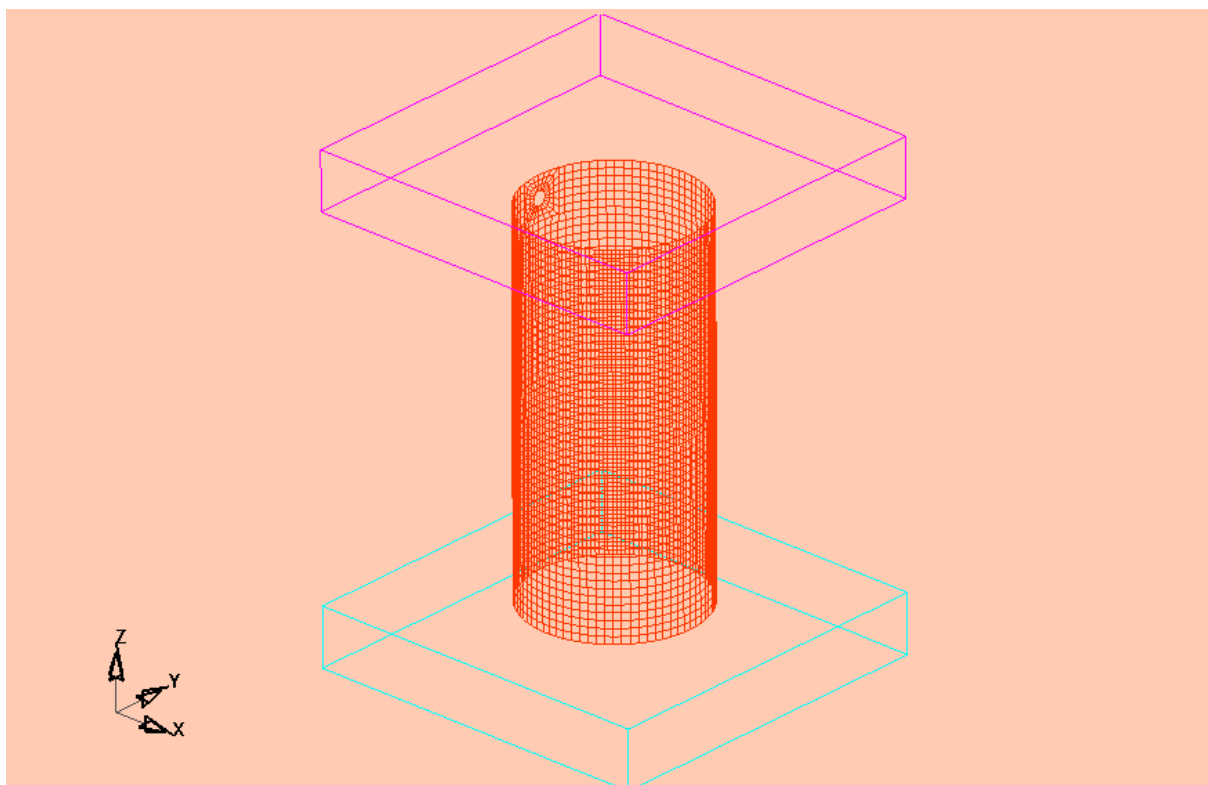
Η ομοιομορφία φορτίου $P_{max}/P_{mean} = 2,01$

Η συνολική ενέργεια που δαπανήθηκε για την αξονική κατάρρευση του δοκιμίου είναι $E = 2580\text{KN mm}$

ΕΝΟΤΗΤΑ 5-1 :

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΙΑΣ ΜΗ ΔΙΑΜΠΕΡΟΥΣ ΟΠΗΣ Φ5 ΜΕ ΚΕΝΤΡΟ ΣΤΑ 7.5mm ΑΠΟ ΤΟ ΑΝΩ ΧΕΙΛΟΣ ΤΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ (TYPE_5T1).

Το μοντέλο του δοκιμίου κυκλικής διατομής με μια οπή μη διαμπερή, διαμέτρου Φ5 σε ύψος 7.5mm από το άνω χείλος του δοκιμίου, και με πάχος τοιχώματος 2mm, παρουσιάζεται στην ακόλουθη εικόνα:



Σχ.1, Απεικόνιση πλέγματος στο LS-DYNA 3D, για κυκλικής διατομής δοκίμιο με μια μη διαμπερή οπή διαμέτρου Φ5 σε ύψος 7.5mm από το άνω χείλος του δοκιμίου.

Οι αντίστοιχες φάσεις προσομοίωσης της κατάρρευσης του δοκιμίου αυτού, που κατέγραψα με τη χρήση του LS-DYNA, σε σύγκριση με τις φάσεις κατάρρευσης που έλαβα από την ελληνική βιβλιογραφία [1] 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 Is-dyna (αριστερά).



1^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα(δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το Is-dyna (αριστερή εικόνα).Ξεκίνημα σχηματισμού εκτατού λοβού στην περιοχή της οπής. Πάτημα της πρέσας στα 1 mm.



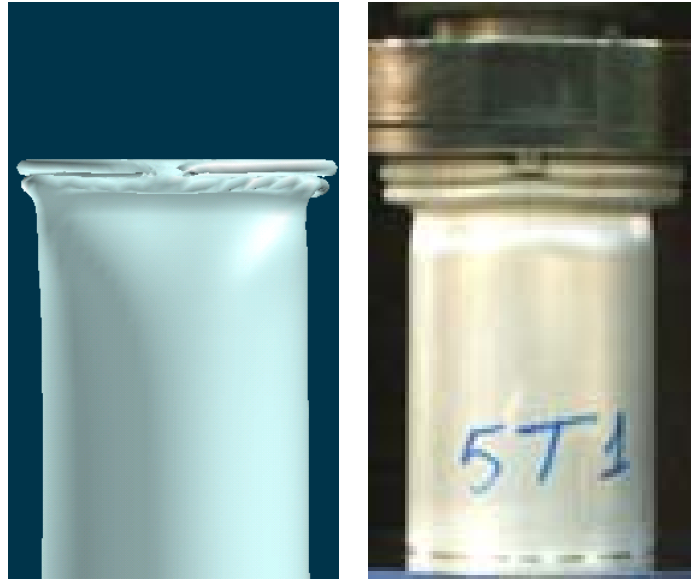
2^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα(δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Δημιουργία αρχικού εκτατού λοβού. *Παρατηρούμε ότι το πραγματικό δοκίμιο στην πρέσα, αρχίζει να καταρρέει περίπου στο μέσο της περιοχής της οπής, αυτό συμβαίνει λόγω του ότι η οπή έχει πολύ μικρή διάσταση οπότε δεν επηρεάζει την αρχική κατάρρευση του πραγματικού δοκιμίου, ενώ αντίθετα στο μοντέλο του LS-DYNA, η αρχική κατάρρευση σημειώνεται στο πάνω μέρος της περιοχή της οπής του δοκιμίου, όπου εκεί αναγνωρίζεται αρχικά από τον κώδικα η ανωμαλία στο δοκίμιο.* Πάτημα της πρέσας στα 6 mm.



3^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το ls-dyna (αριστερή εικόνα). Τελείωμα αρχικού εκτατού λοβού, και ξεκίνημα δημιουργίας επόμενου μη εκτατού λοβού σε καρό (diamond) μορφή στο επόμενο παράλληλο επίπεδο προς τα κάτω, ως προς τον προηγούμενο λοβό. Πάτημα της πρέσας στα 15 mm.



4η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το Is-dyna (αριστερή εικόνα). Τελείωμα δεύτερου μη εκτατού λοβού στο παράλληλο επίπεδο προς τα κάτω, ως προς τον προηγούμενο λοβό. Στο δοκίμιο της πρέσας έχουμε τελείωμα του δεύτερου εκτατού λοβού σε (ring) μορφή. 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). Τελείωμα δεύτερου μη εκτατού 3D λοβού, και αρχή δημιουργίας επόμενου μη εκτατού λοβού, στο επόμενο παράλληλο επίπεδο προς τα κάτω στραμμένος κατά $\pi/3$, ως προς τον προηγούμενο μη εκτατό λοβό. Πάτημα της πρέσας στα 34 mm.



5η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (αριστερή εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (δεξιά εικόνα). Συνέχιση

επόμενου μη εκατού λοβού σε επίπεδο παράλληλο ως προς τα προηγούμενα. Στο δοκίμιο της πρέσας έχει ολοκληρωθεί πλήρως ο σχηματισμός του πρώτου και δεύτερου εκατού λοβού. Τελειώνει η δημιουργία του τρίτου εκατού λοβού. Πάτημα της πρέσας στα 40 mm.



6η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Ολοκλήρωση τρίτου μη εκατού λοβού στο δοκίμιο του ls-dyna. Πάτημα της πρέσας στα 49 mm.



7η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Ολοκλήρωση τρίτου μη εκτατού λοβού στραμμένου κατά $\pi/3$ ως προς τον προηγούμενο λοβό, και συνέχιση τέταρτου μη εκτατού λοβού. Πάτημα της πρέσας στα 60 mm.



8η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Έχουν

ολοκληρωθεί πλήρως οι τρεις λοβοί, και συνεχίζεται ο σχηματισμός για την δημιουργία του τέταρτου μη εκτατού λοβού στο κάτω μέρος του δοκιμίου ο οποίος παραμένει ημιτελής . Πάτημα της πρέσας στα 65.0 mm.

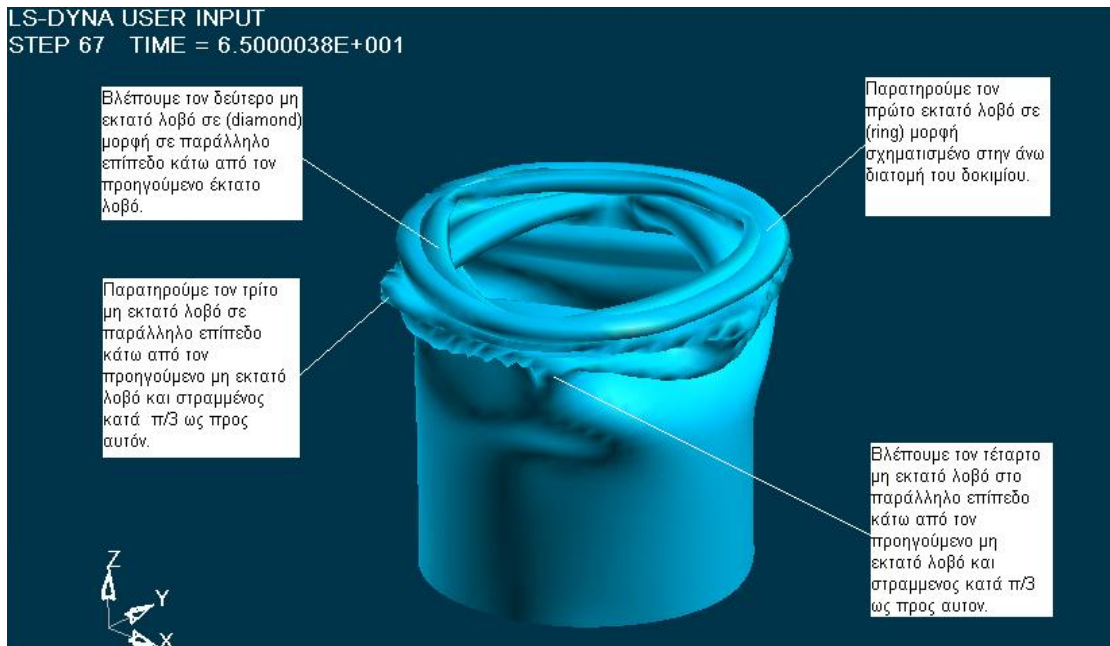


Τελική μορφή κάτοψης δοκιμίου αμέσως μετά το τέλος της διαδικασίας αξονικής κατάρρευση μετά το τέλος της προσομοίωσης από το LS-DYNA,.Παρατηρούμε ένα έκτατο λοβό κ τρεις μη έκτακτους λοβούς οι οποίοι βρίσκονται σε παράλληλα επίπεδα στραμμένα εναλλάξ κατά 60° . Ο μηχανισμός κατάρρευσης του δοκιμίου 5T1 προσεγγίζει περισσότερο τον μη εκτατό (diamond) αλλά και τον μικτό. Τελικό πάτημα της πρέσας στα 65.0 mm.

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 65.0 mm:



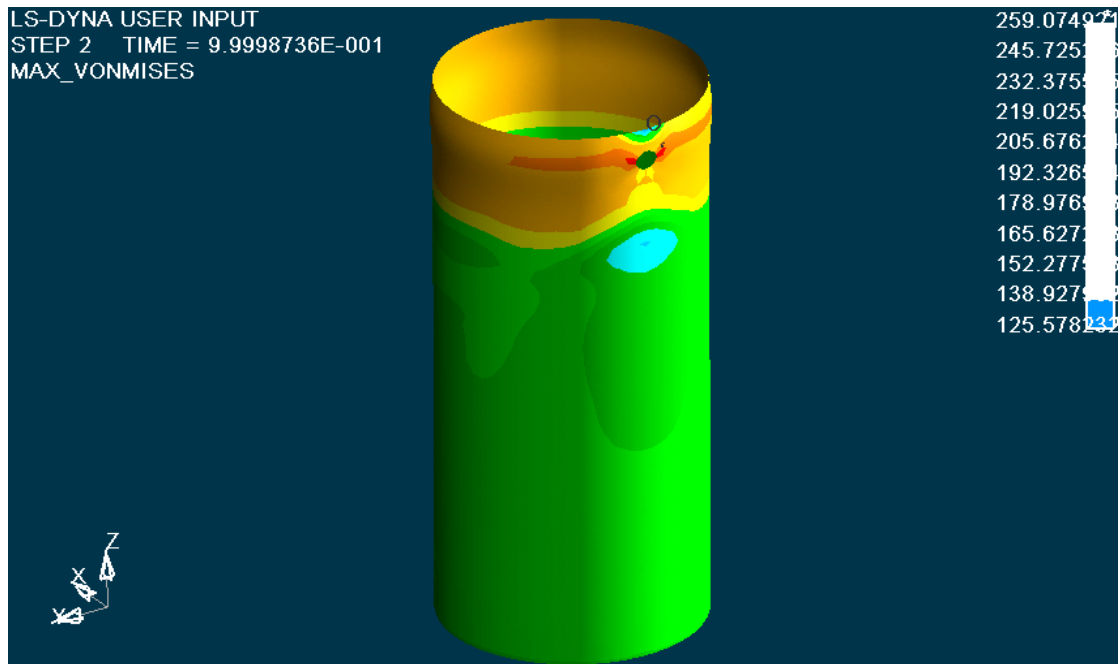
Η ολοκληρωμένη προσομοίωση κατάρρευσης του μοντέλου μας με το LS-DYNA, παρουσιάζεται και στα αρχεία βίντεο:

- Deformation isometric.Avi
- [Deformation side.Avi](#)
- Deformation rear.Avi

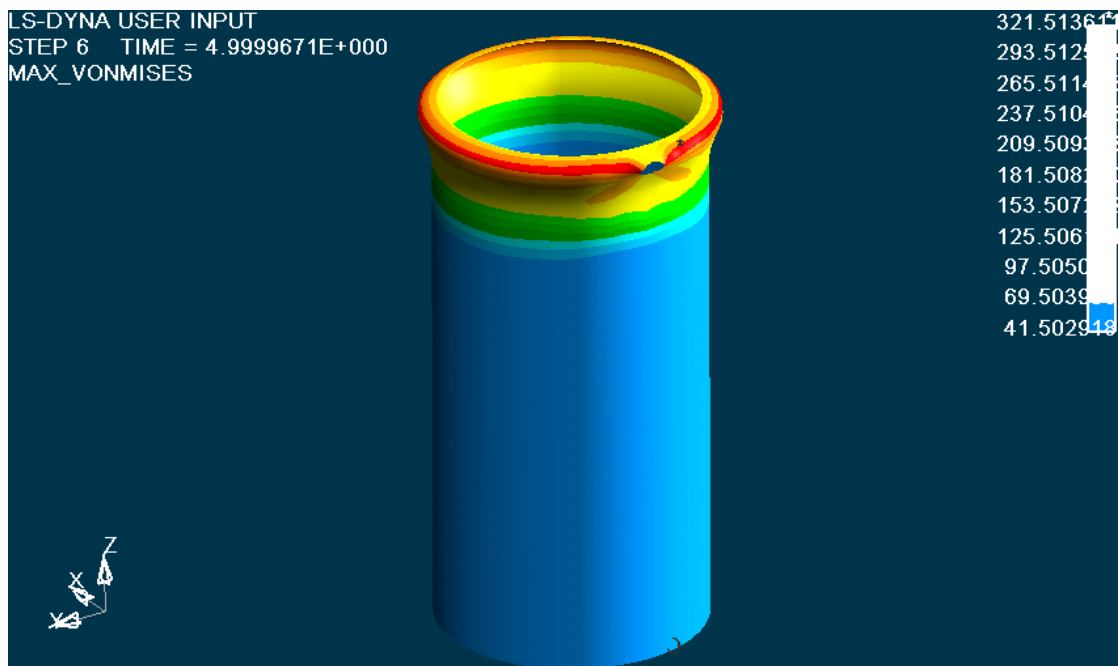
Ακολουθούν εικόνες από την κατανομή των τάσεων σε όλη την επιφάνεια του δοκιμίου κατά τα διάφορα στάδια της κατάρρευσής του:

Επιλέγοντας στον ETA POSTGL:

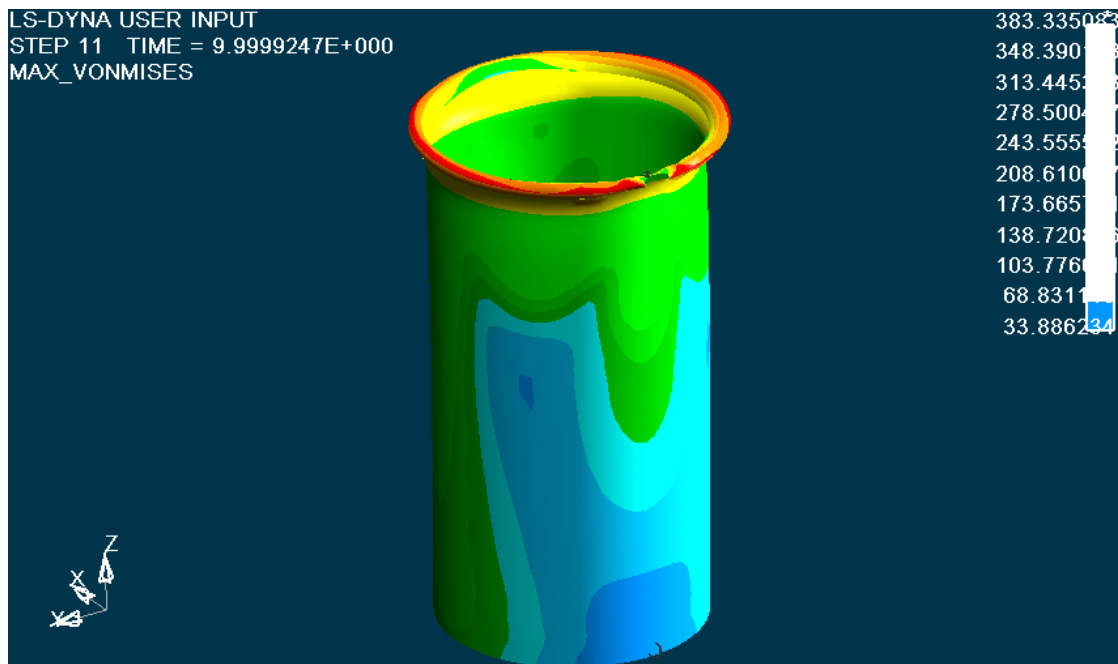
CONTOUR -> STRESS/STRAIN -> MAXIMUM VON MISES STRESSES:



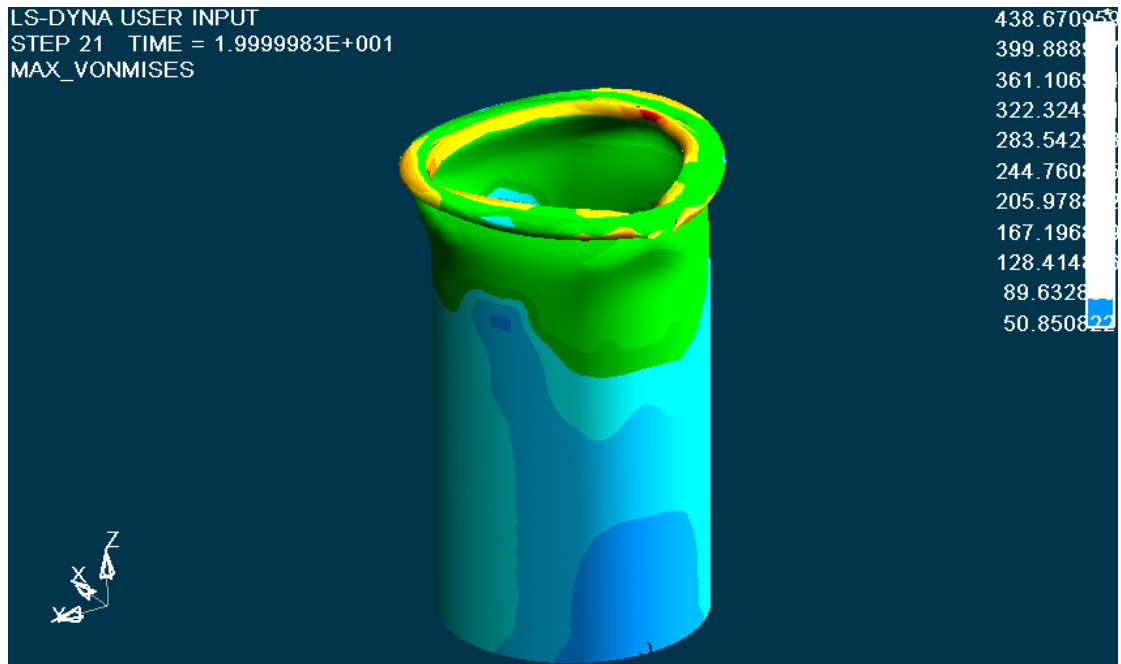
Κατανομή των τάσεων στο 1mm. Έχουμε εμφάνιση τάσεων στην περιοχή γύρω από την οπή του δοκιμίου, που όπως αναφέρθηκε για την θεωρία των τάσεων γύρω από οπές, βλέπουμε ότι γύρω από την οπή του δοκιμίου, κατά την κατακόρυφη διεύθυνση που συμπίπτει με την διεύθυνση της αξονικής θλίψης του δοκιμίου, έχουμε τάσεις ίσες με $\sigma = 219 \text{ MPa}$, ενώ στο οριζόντιο μεσεπίπεδο της οπής, το οποίο είναι κάθετο ως προς το κατακόρυφο επίπεδο της αξονικής θλίψης του δοκιμίου, εκεί εμφανίζονται οι μέγιστες τάσεις για την κατάρρευση του δοκιμίου στη θέση της οπής, ίσες με $\sigma = 259 \text{ MPa}$. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή 240MPa, 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.



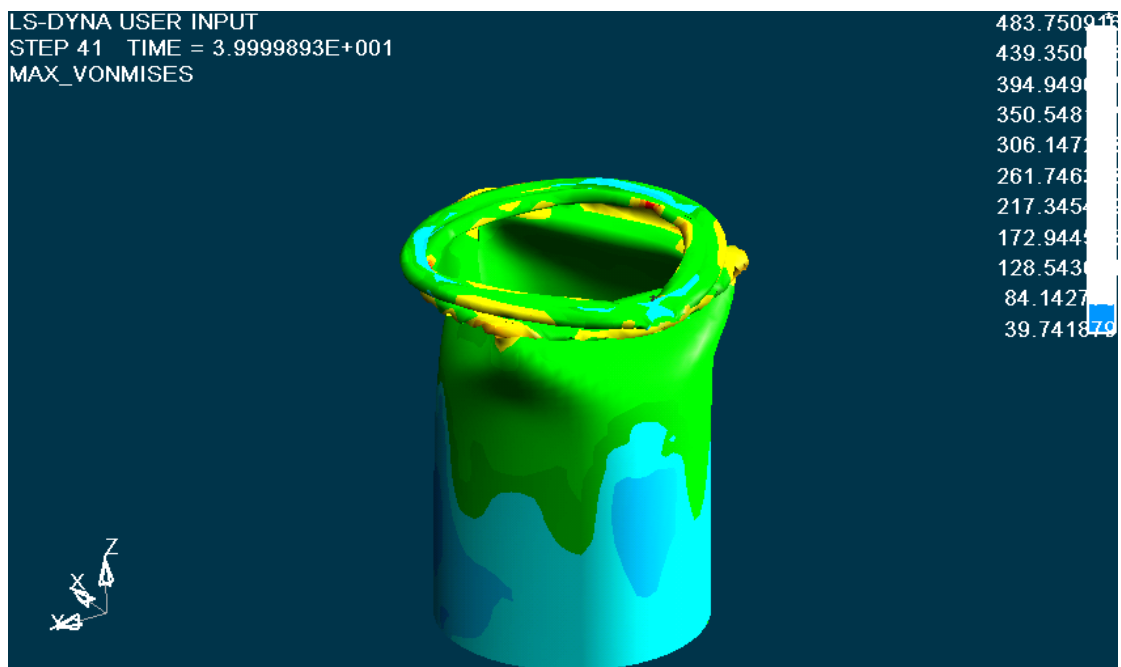
Κατανομή των τάσεων στο 5 mm. Έχουμε μέγιστες τάσεις στην περιοχή γύρω από την οπή του δοκιμίου, που πιέζει το έμβολο της πρέσας, Ιδιαίτερα, στην περιοχή της οπής, οι τάσεις που εφαρμόζονται κατά την διεύθυνση της αξονικής θλίψης είναι $\sigma = 237 \text{ MPa}$, ενώ οι τάσεις που αναπτύσσονται στην οπή κάθετα προς την διεύθυνση αξονικής θλίψης του δοκιμίου, είναι $\sigma = 293 \text{ MPa}$. Το κάτω μέρος του δοκιμίου έχει μικρότερες τάσεις από ότι συμβαίνει στο πάνω μέρος του δοκιμίου. Οι μέγιστη τάση είναι ίση με $\sigma = 321 \text{ MPa}$ η οποία είναι μεγαλύτερη από το όριο αντοχής του υλικού ($\sigma_A=240\text{MPa}$), που συναντάμε περιμετρικά στο πάνω μέρος του δοκιμίου και σε μια μικρή περιοχή γύρω από την περιφέρεια της οπής όπου έχουμε αναδίπλωση του υλικού για την δημιουργία του εκτατού λοβού.



Κατανομή των τάσεων στο 10 mm. Έχουμε μέγιστες τάσεις στην περιοχή σχηματισμού του πρώτου λοβού στα σημεία αναδίπλωσης. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή 383 MPa. Στο υπόλοιπο μέρος του μοντέλου μας εξακολουθούμε να έχουμε εμφάνιση μικρότερων τάσεων στο κάτω μισό του δοκιμίου μας. Η ελάχιστη τιμή των τάσεων συμβολίζεται στο σχήμα μας με 0.

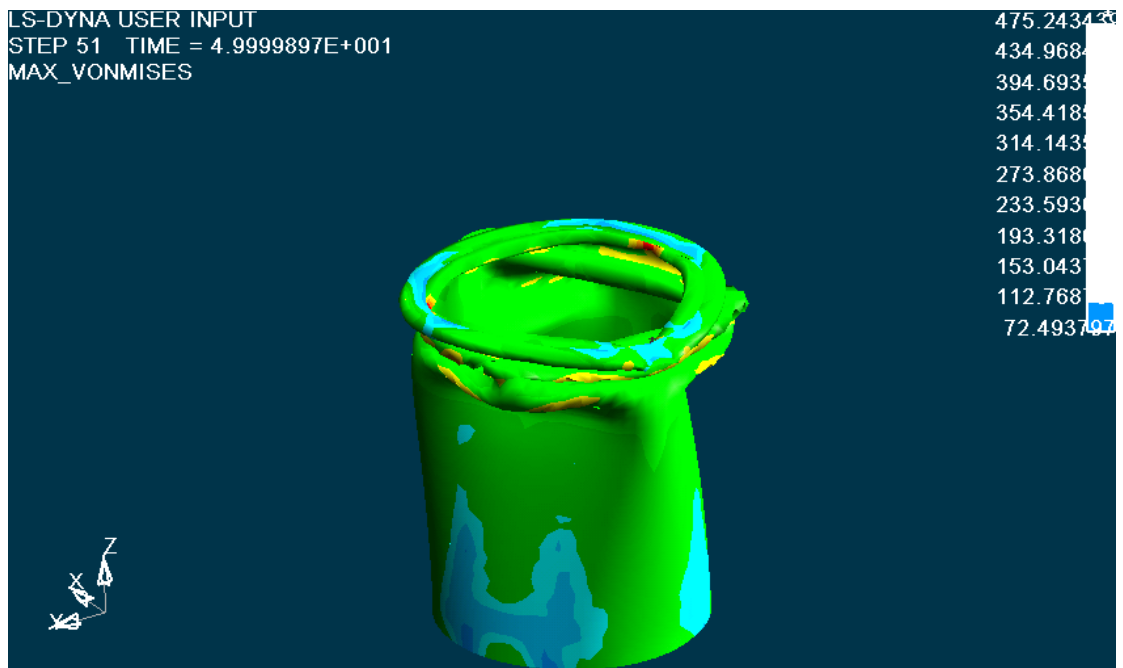


Κατανομή των τάσεων στο 20 mm. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή 438 MPa. Ο πρώτος εκτατός λοβός έχει σχηματιστεί πλήρως, και ξεκινά και ο σχηματισμός του δεύτερου μη εκτατού λοβού, σε επίπεδο παράλληλο προς τα κάτω, ως προς το προηγούμενο επίπεδο του αρχικού λοβού. Τάσεις σημαντικής τιμής 244MPa 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 167MPa.

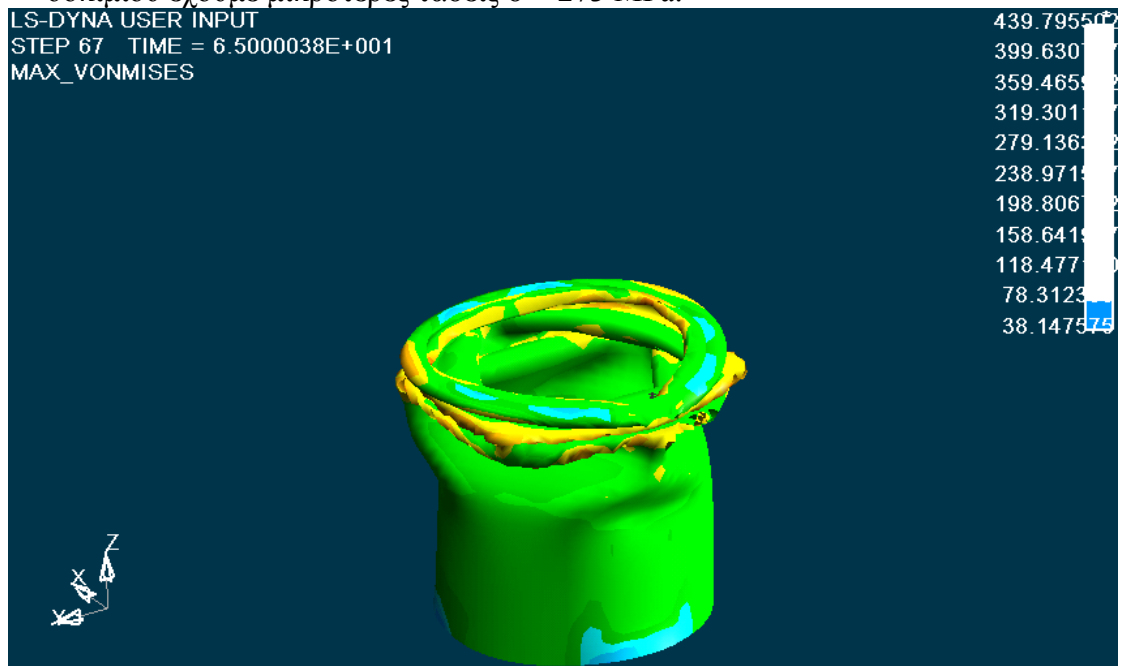


Κατανομή των τάσεων στο 40 mm. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη εμφανιζόμενη τιμή 483 MPa. Έχουν σχηματιστεί και οι δύο μη εκτατοί λοβοί που διαφέρουν κατά $\pi/3$, και ήδη δημιουργείται και ο τρίτος μη

εκτατός λοβός. Στο κάτω μέρος του δοκιμίου έχουμε μικρότερες τάσεις $\sigma = 172$ MPa.



Κατανομή των τάσεων στο 50 mm. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη εμφανιζόμενη τιμή 475 MPa. Έχουν σχηματιστεί και οι δυο μη εκτατοί λοβοί, και ήδη δημιουργείται και ο τέταρτος μη εκτατός λοβός στραμμένος κατά $\pi/3$ σε σχέση με τον προηγούμενο λοβό. Στο κάτω μέρος του δοκιμίου έχουμε μικρότερες τάσεις $\sigma = 273$ MPa.



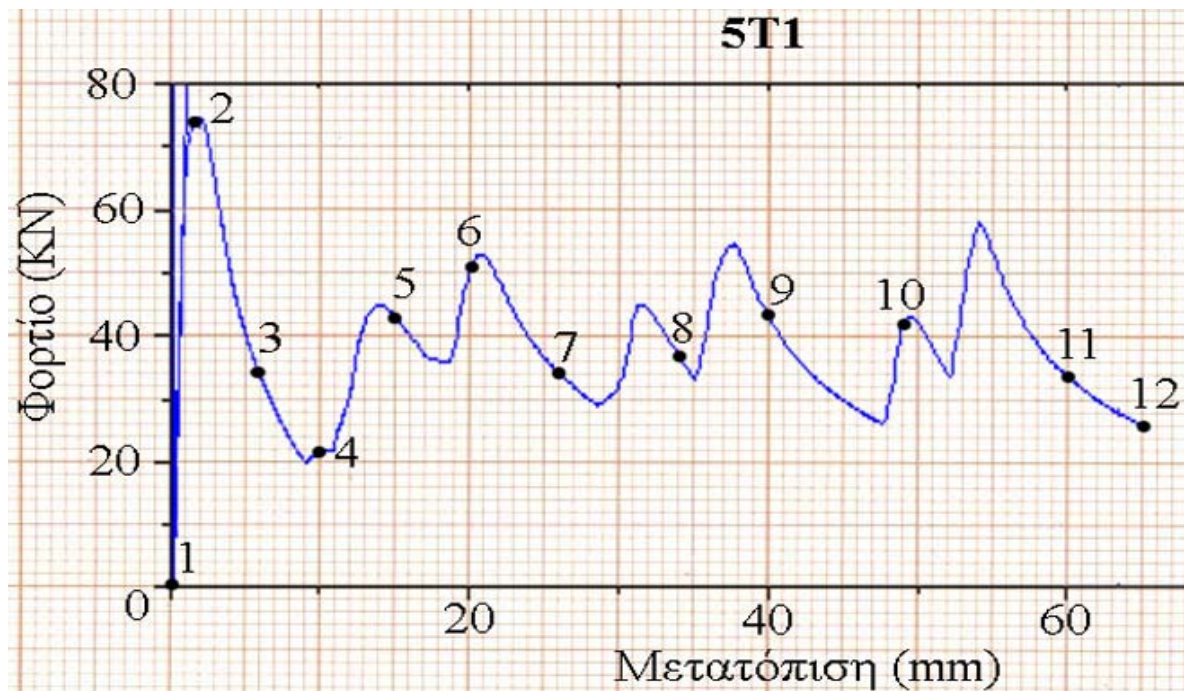
Κατανομή των τάσεων στο 65.0 mm. Οι τελικές τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη εμφανιζόμενη τιμή 439 MPa. Η κατάρρευση του δοκιμίου έχει

πλέον ολοκληρωθεί, και οι τέσσερις τελικοί εκτατοί και μη εκτατοί λοβοί έχουν σχηματιστεί πλήρως.

Η ολοκληρωμένη προσομοίωση της κατανομής των τάσεων του μοντέλου μας με το LS-DYNA, παρουσιάζεται και στο αρχείο βίντεο:

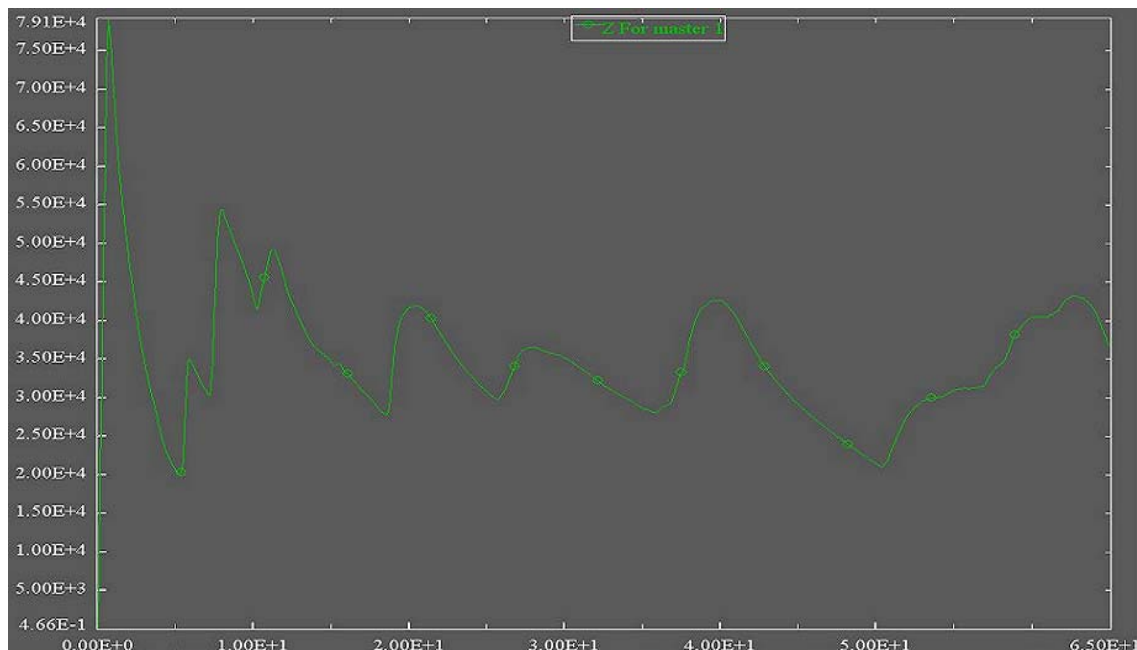
➤ [Contour Max Von Mises.Avi](#)

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 ls-dyna, και με την χρήση του Excel, είναι αυτό που

παρουσιάζεται στο επόμενο διάγραμμα, με τον κατακόρυφο άξονα να δείχνει τις **δυνάμεις σε N**, 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: **65.2mm**

Μέγιστο φορτίο $P_{max}=74.36KN$ στα 1.928mm

Μέσο φορτίο $\bar{P}=38.05KN$

Η ομοιομορφία φορτίου $P_{max}/P_{mean} = 1,95$

Ενέργεια παραμόρφωσης $E=2481KNmm$

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

Διαδρομή εμβόλου: **65.0mm**

Το μέγιστο φορτίο $P_{max} = 79,10 KN$,

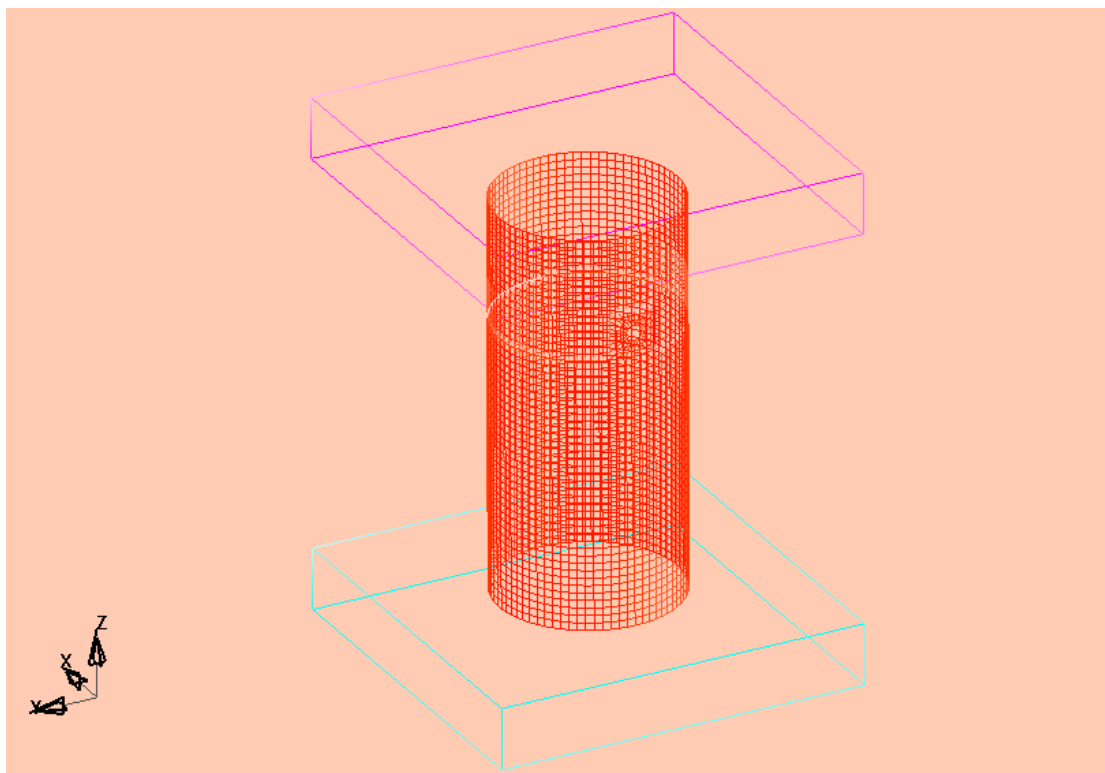
Το μέσο φορτίο $P_{mean} = 34,92 KN$,

Η ομοιομορφία φορτίου $P_{max}/P_{mean} = 2,27$

Η συνολική ενέργεια που δαπανήθηκε για την αξονική κατάρρευση του δοκιμίου είναι $E = 2270 KN mm$

ΕΝΟΤΗΤΑ 5-2 : ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΙΑΣ ΜΗ ΔΙΑΜΠΕΡΟΥΣ ΟΠΗΣ Φ5 ΣΤΟ ¼ ΤΟΥ ΥΨΟΥΣ Η (TYPE_5M1).

Το μοντέλο του δοκιμίου κυκλικής διατομής με μια οπή μη διαμπερή, διαμέτρου Φ5 σε ύψος ¼ του δοκιμίου, και με πάχος τοιχώματος 2mm, παρουσιάζεται στην ακόλουθη εικόνα:



Σχ.1. Απεικόνιση πλέγματος στο LS-DYNA 3D, για κυκλικής διατομής δοκίμιο με μια μη διαμπερή οπή διαμέτρου Φ5 στο ¼ του ύψους του.

Οι αντίστοιχες φάσεις προσομοίωσης της κατάρρευσης του δοκιμίου αυτού, που κατέγραψα με τη χρήση του LS-DYNA, σε σύγκριση με τις φάσεις που έλαβα από την ελληνική βιβλιογραφία [1] 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 στα 3/4 του ύψους του, στην θέση της οπής, ενώ στο μοντέλο του Is-dyna, η αρχική κατάρρευση σημειώνεται στην πάνω διατομή του δοκιμίου που βρίσκεται σε επαφή με το έμβολο της πρέσας . Πάτημα της πρέσας στα 3 mm.



2^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Στο πραγματικό δοκίμιο έχουμε έναν εκτατό λοβό στην πάνω διατομή όπως συμβαίνει και στο δοκίμιο του Is-dyna. Επιπλέον έχουμε έναν μη εκτατό λοβό στην περιοχή της οπής ενώ στο δοκίμιο του Is-dyna η ίδια περιοχή παρατηρούμε ότι παραμένει ανεπηρέαστη. Πάτημα της πρέσας στα 12 mm.



3^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Στο δοκίμιο του Is-dyna έχουμε συνέχιση της αξονοσυμμετρικής παραμόρφωσης (concertina) του υλικού για τελείωμα του πρώτου εκτατού λοβού και αρχή δημιουργίας του δεύτερου σχεδόν εκτατού λοβού με ροή του υλικού γύρω από την οπή εξωτερικά του δοκιμίου. Στο πραγματικό δοκίμιο έχουμε δημιουργία δυο μη εκτατών λοβών που διαφέρουν κατά 60^ο μοίρες. Πάτημα της πρέσας στα 18 mm.



4^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Στο δοκίμιο του ls-dyna βλέπουμε δύο εκτατούς λοβούς και έχουμε εμφάνιση της ροής του υλικού από την περιοχή της οπής προς τα έξω. Στο πραγματικό δοκίμιο έχουμε επίσης ροή υλικού προς τα έξω. Πάτημα της πρέσας στα 41 mm.

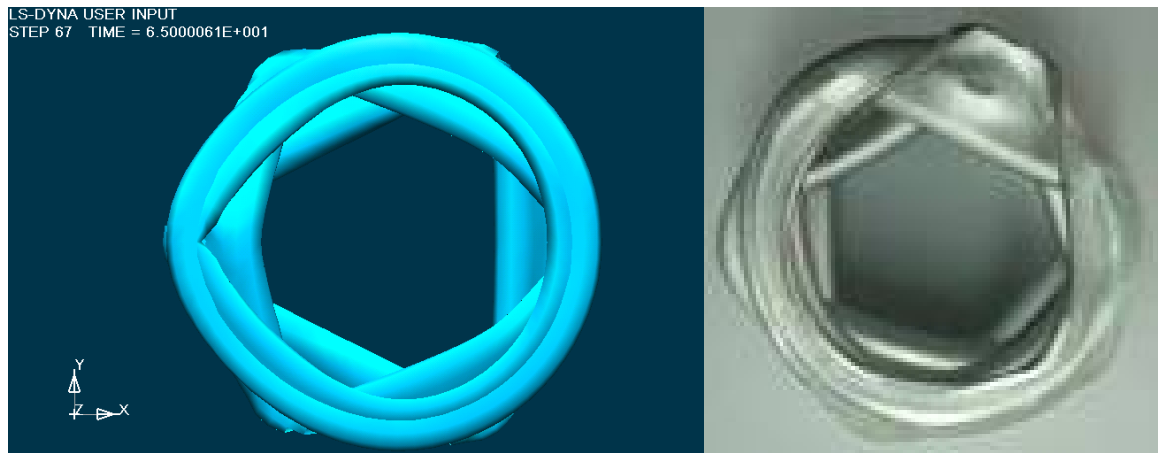


5^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Στο δοκίμιο του ls-dyna έχουν ολοκληρωθεί πλήρως οι δύο εκτατοί λοβοί και ο τρίτος μη εκτατός λοβός και αρχίζει η δημιουργία τέταρτου μη εκτατού λοβού σε παράλληλο επίπεδο

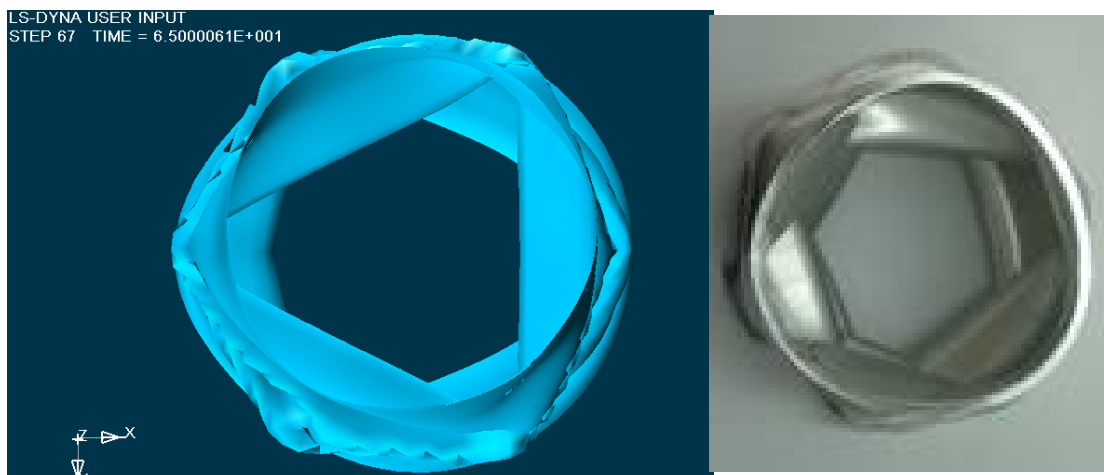
προς τα κάτω και στραμμένος κατά $\pi/3$. Επιπλέον παρατηρούμε κατά την δημιουργία του τέταρτου λοβού δημιουργία φαινομένου λυγισμού κατά Euler του δοκιμίου. Πάτημα της πρέσας στα 59 mm.



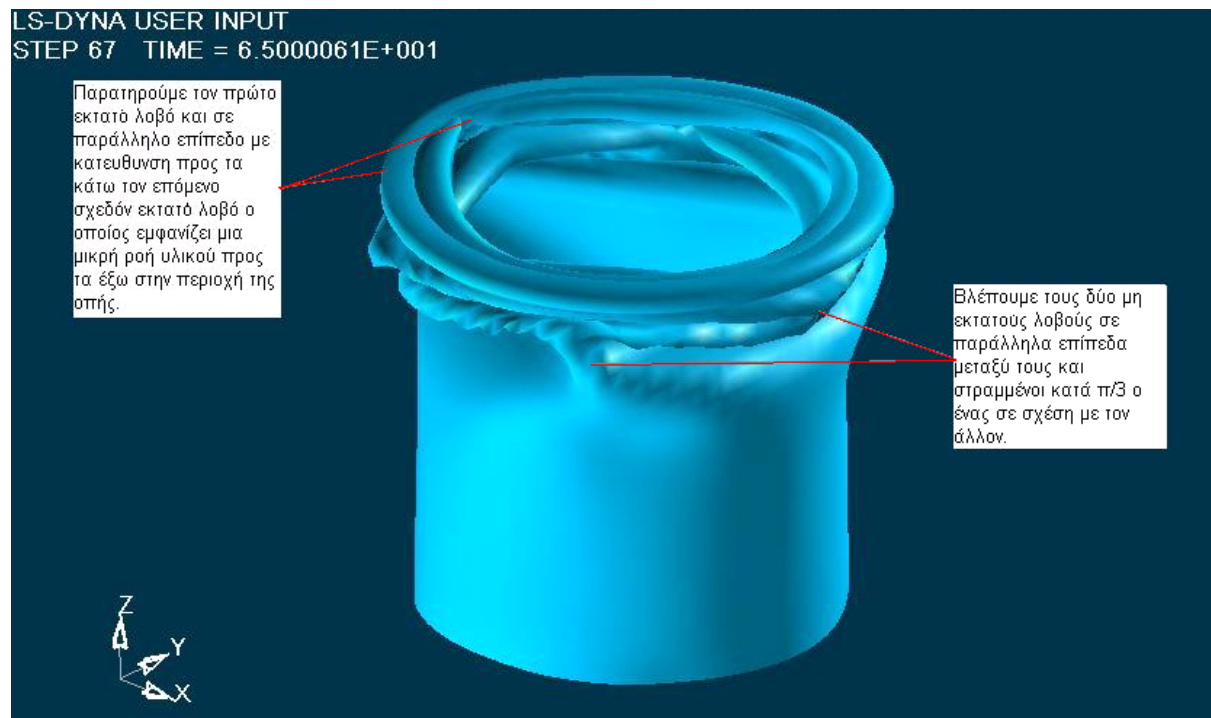
6^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Στο δοκίμιο του ls-dyna το φαινόμενο του λυγισμού είναι εντονότερο όπως και ο τέταρτος ημιτελής μη έκτατος λοβός. Στο πραγματικό δοκίμιο ο μηχανισμός κατάρρευσης του δοκιμίου 5M1 προσεγγίζει περισσότερο τον μη εκτατό (diamond) αλλά και τον μεικτό (mixed mode). Ο λοβός στην θέση της οπής έχει μορφή 3D diamond ενώ στο άνω άκρο προσεγγίζει περισσότερο τη μορφή consertina. Στην συνέχεια της συμπίεσης σχηματίζεται άλλος ένας λοβός 3D κάτω από αυτόν που έχει δημιουργηθεί ήδη, που διαφέρει από τον προηγούμενο $180/3=60^\circ$. Ο πάνω λοβός ενώ έχει μορφή αξονοσυμμετρική επηρεάζεται από τους από κάτω λοβούς με αποτέλεσμα να δημιουργείται μια πτύχωση με ροή του υλικού προς τα έξω όπως παρατηρούμε και στο δοκίμιο του ls-dyna στην περιοχή της οπής. Πάτημα της πρέσας στα 65.0 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 δύο εκτατούς λοβούς στο πάνω μέρος του δοκιμίου και έπειτα δύο μη εκτατούς λοβούς που διαφέρουν κατά $\pi/3$. Ομοίως και στα δύο δοκίμια έχουμε εξωτερική ροή του υλικού στην περιοχή της οπής. Τελικό πάτημα της πρέσας στα 65.0 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 65.0 mm:



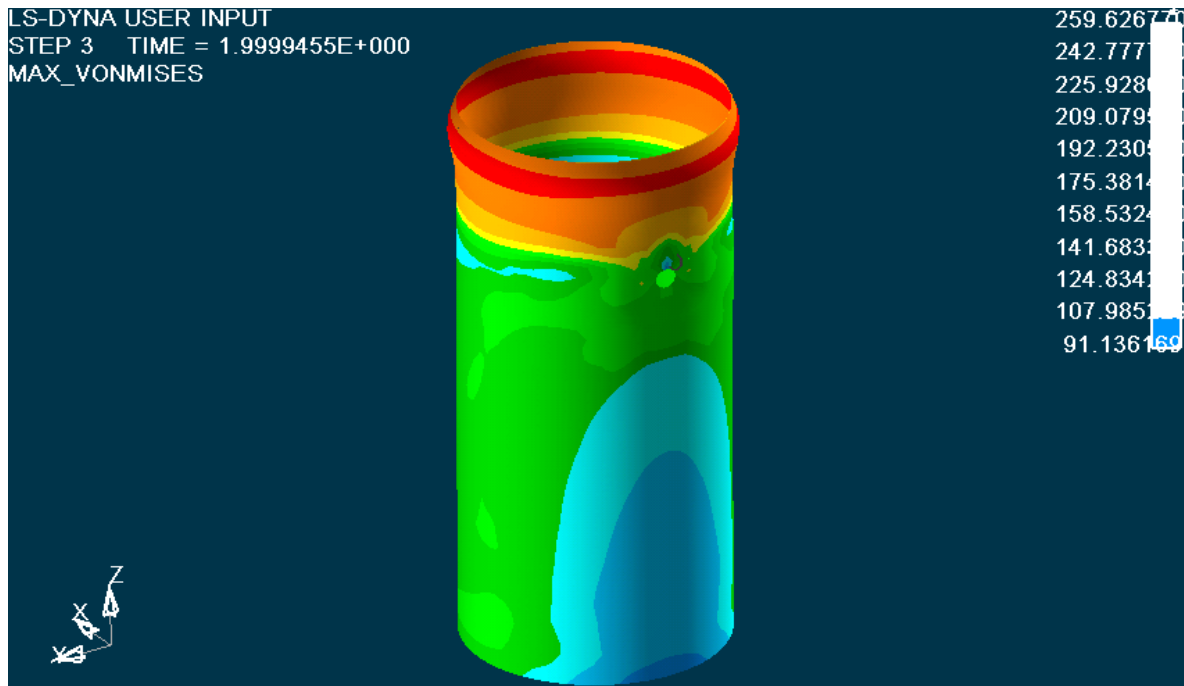
Η ολοκληρωμένη προσομοίωση κατάρρευσης του μοντέλου μας με το LS-DYNA, παρουσιάζεται και στα αρχεία βίντεο:

- Deformation isometric.Avi
- [Deformation side .Avi](#)
- Deformation rear.Avi

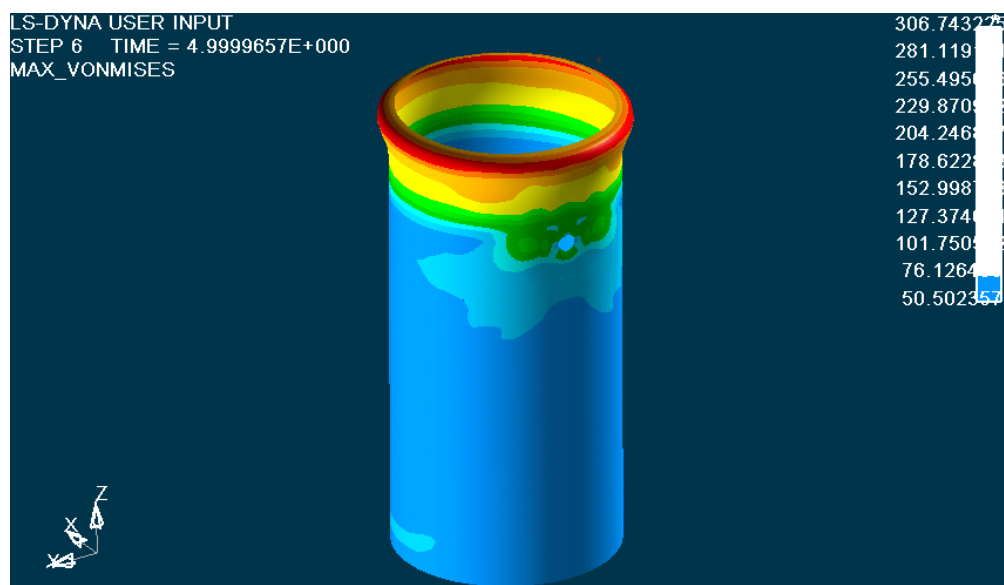
Ακολουθούν εικόνες από την κατανομή των τάσεων σε όλη την επιφάνεια του δοκιμίου κατά τα διάφορα στάδια της κατάρρευσής του:

Επιλέγοντας στον ETA POSTGL:

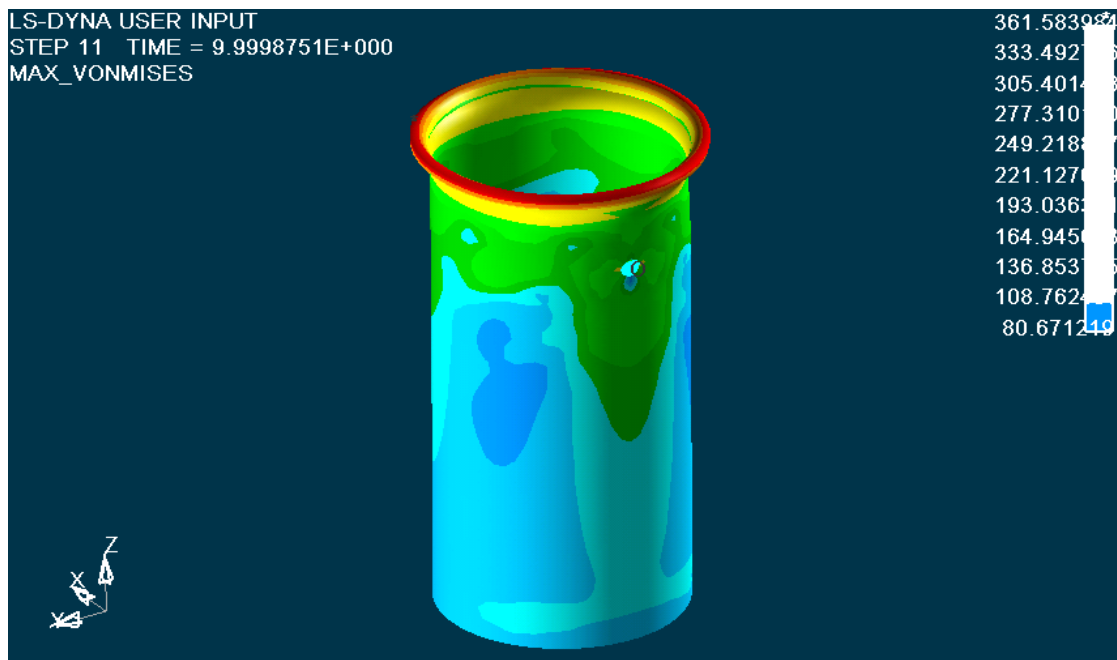
CONTOUR -> STRESS/STRAIN -> MAXIMUM VON MISES STRESSES:



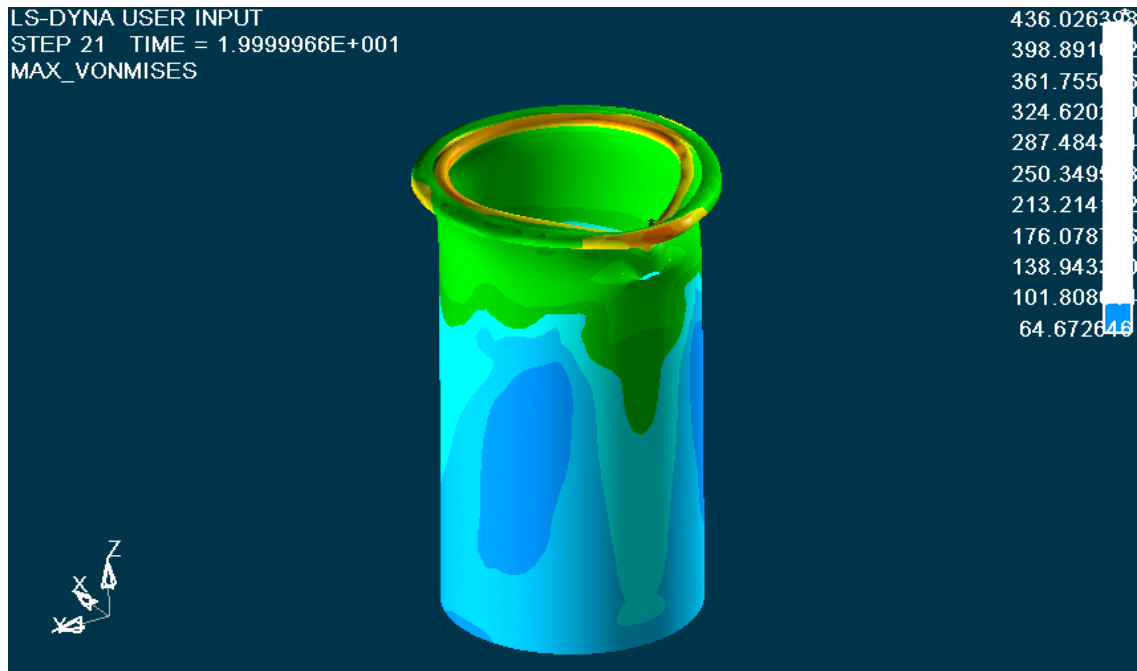
Κατανομή των τάσεων στο 2mm. Έχουμε εμφάνιση τάσεων στην περιοχή γύρω από την οπή του δοκιμίου, που όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 2, για την θεωρία των τάσεων γύρω από οπές, βλέπουμε ότι γύρω από την οπή του δοκιμίου, κατά την κατακόρυφη διεύθυνση που συμπίπτει με την διεύθυνση της αξονικής θλίψης του δοκιμίου, έχουμε τάσεις ίσες με $\sigma = 175 \text{ MPa}$, ενώ στο οριζόντιο μεσοεπίπεδο της οπής, το οποίο είναι κάθετο ως προς το κατακόρυφο επίπεδο της αξονικής θλίψης του δοκιμίου, εκεί εμφανίζονται οι μέγιστες τάσεις για την κατάρρευση του δοκιμίου στη θέση της οπής, ίσες με $\sigma = 192 \text{ MPa}$. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με **μέγιστη τιμή 259 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.



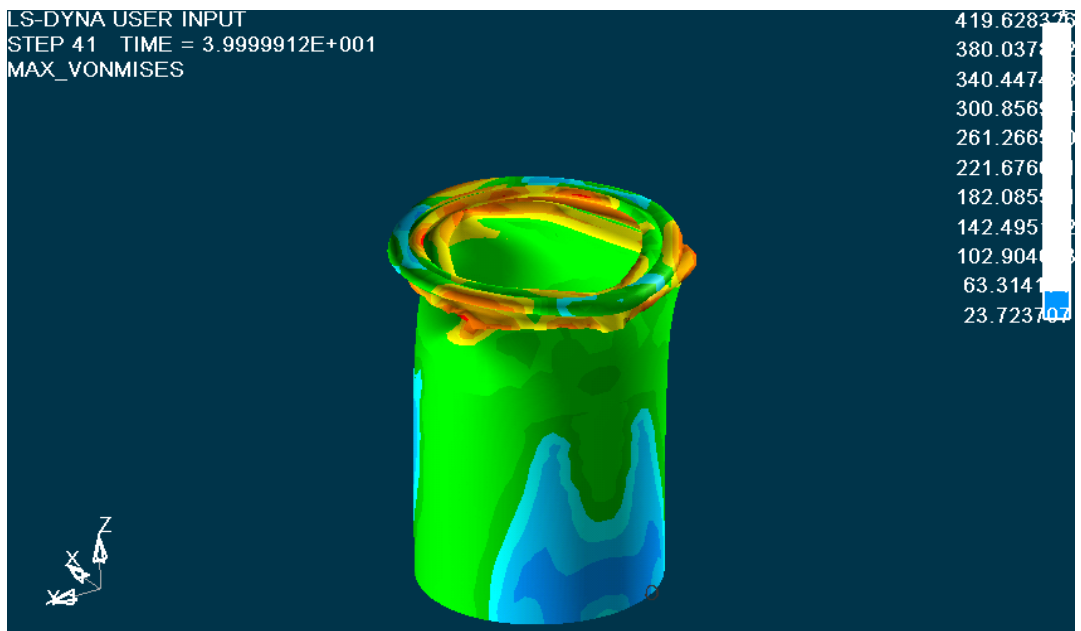
Κατανομή των τάσεων στο 5 mm. Έχουμε μέγιστες τάσεις στην περιοχή πιο πάνω καθ' ύψος από την οπή του δοκιμίου που έρχεται σε επαφή με το έμβολο της πρέσσας, διότι ίσως το μικρό μέγεθος της οπής η οποία δεν είναι και διαμπερής στο δοκίμιο, και η θέση της στο δοκίμιο, να μην επηρεάζουν αρκετά στην δημιουργία του πρώτου λοβού γύρω από την οπή. Για το λόγο αυτό ο πρώτος μη εκτατός λοβός εμφανίζεται πιο πάνω από την οπή. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με **μέγιστη τιμή 306 MPa**, που βλέπουμε ότι είναι μεγαλύτερη τιμή από την τάση διαρροής του δοκιμίου ($\sigma_A = 220 \text{ MPa}$), οπότε διαρρέει το υλικό στη θέση που παρουσιάζεται στο σχήμα, οπότε 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 στο 10 mm. Έχουμε μέγιστες τάσεις στην περιοχή σχηματισμού του πρώτου λοβού στην περιοχή της αναδίπλωσης. Εξίσου μεγάλες τάσεις έχουμε στο οριζόντιο επίπεδο της οπής ίσες με **249 MPa** ενώ στο κατακόρυφο **221 MPa**. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με **μέγιστη τιμή 361 MPa**. Στο υπόλοιπο μέρος του μοντέλου μας εξακολουθούμε να έχουμε εμφάνιση μικρότερων τάσεων στο κάτω μισό του δοκιμίου μας.

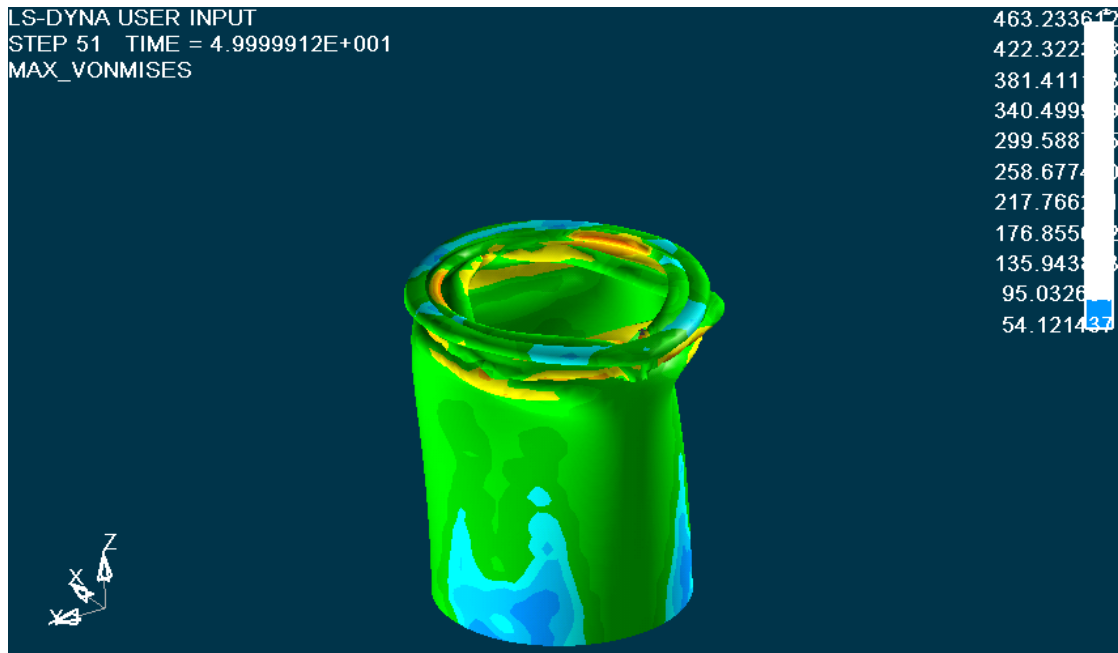


Κατανομή των τάσεων στο 20 mm. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με **μέγιστη τιμή 436 MPa**. Ο πρώτος εκτατός λοβός έχει σχηματιστεί πλήρως, και ξεκινά και ο σχηματισμός του δεύτερου εκτατού λοβού στην περιοχή της οπής, σε επίπεδο παράλληλο προς τα κάτω, ως προς το προηγούμενο επίπεδο του αρχικού λοβού. Τάσεις σημαντικής τιμής της τάξης των **361MPa** εμφανίζονται τώρα στην πάνω περιφέρεια του δοκιμίου, στην περιοχή που ξεκινάει ο δεύτερος λοβός και στο οριζόντιο επίπεδο της οπής του δοκιμίου. Στα κάτω μισό του δοκιμίου και στην κάτω διατομή του δοκιμίου σημειώνονται μικρότερες τάσεις ίσες με **101MPa** που φαίνονται και στο σχήμα.

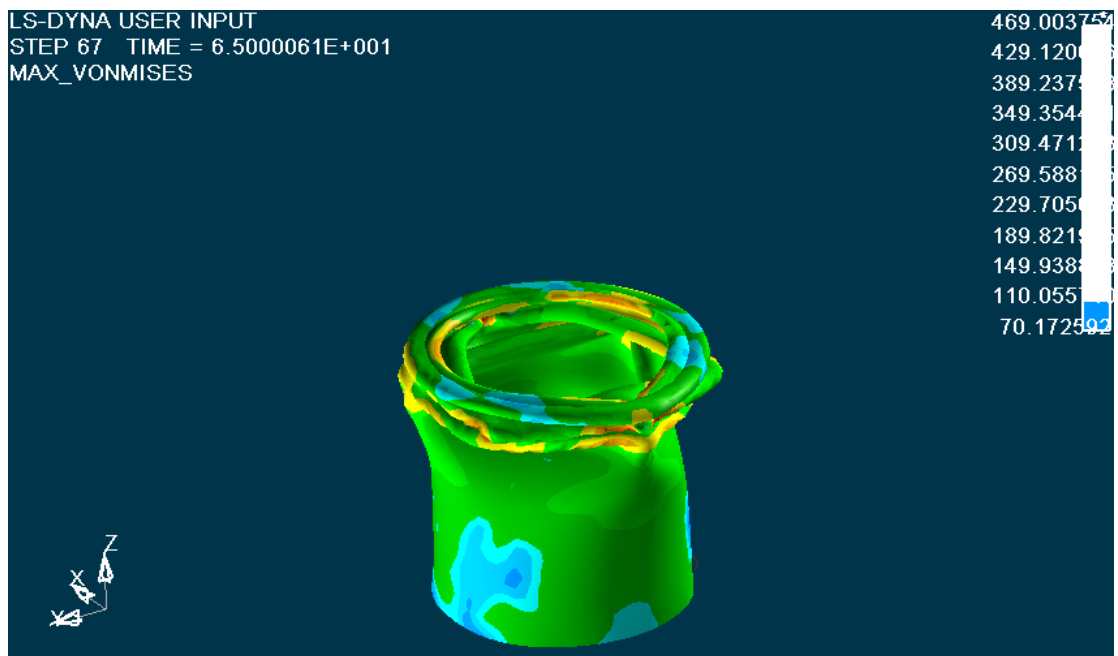


Κατανομή των τάσεων στο 40 mm. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με **μέγιστη τιμή 419 MPa**. Στο κάτω χείλος του δοκιμίου έχουμε την ελάχιστη τιμή των τάσεων που φαίνεται στην εικόνα με τον αριθμό μηδέν. Μέγιστες τάσεις

σημειώνονται στα σημεία αναδίπλωσης του υλικού και εμφάνισης του μη εκτατού λοβού.



Κατανομή των τάσεων στο 50 mm. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη εμφανιζόμενη τιμή **463 MPa**. Έχουν σχηματιστεί και ο τρίτος μη εκτατός λοβός, και ήδη δημιουργείται και ο τέταρτος μη εκτατός λοβός. Στα κάτω χείλη του δοκιμίου έχουμε μικρότερες τάσεις $\sigma = 95 \text{ MPa}$.

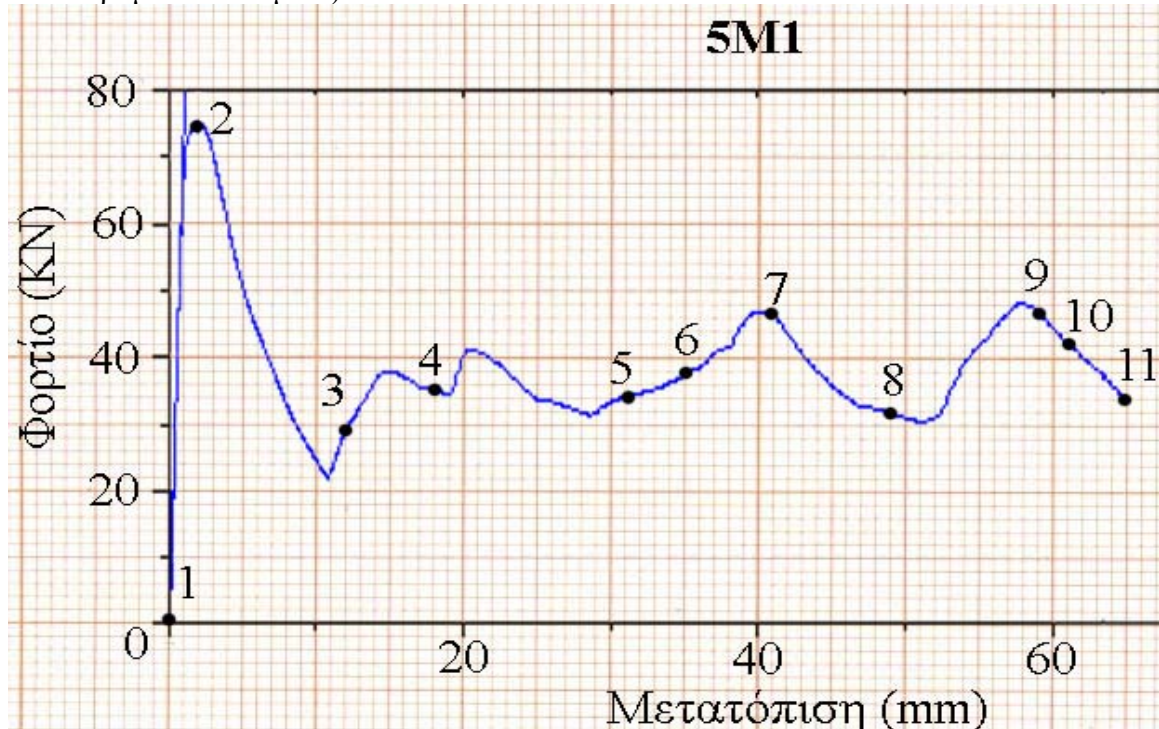


Κατανομή των τάσεων στο 65,0 mm. Οι τελικές τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη εμφανιζόμενη τιμή 469 MPa. Η κατάρρευση του δοκιμίου έχει πλέον ολοκληρωθεί, έχουν σχηματιστεί πλήρως δύο εκτατοί λοβοί και δυο μη εκτατοί λοβοί όπου ο τελευταίος παραμένει ατελώς σχηματισμένος.

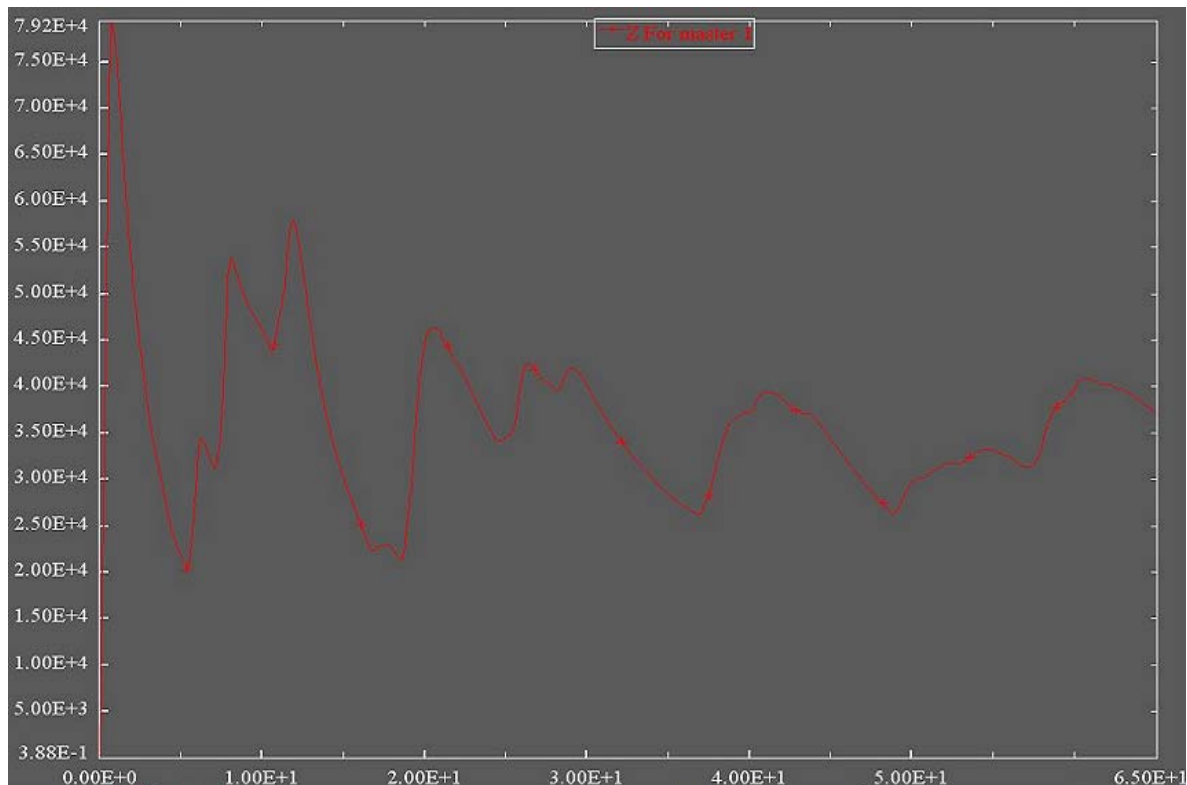
Η ολοκληρωμένη προσομοίωση της κατανομής των τάσεων του μοντέλου μας με το LS-DYNA, παρουσιάζεται και στο αρχείο βίντεο:

➤ [Contour Max Von Mises.Avi](#)

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 ls-dyna, και με την χρήση του Excel, είναι αυτό που παρουσιάζεται στο επόμενο διάγραμμα, με τον κατακόρυφο άξονα να δείχνει τις **δυνάμεις σε N**, 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: 65mm

Το μέγιστο φορτίο $P_{max} = 74,84 \text{ KN}$,

Το μέσο φορτίο $P_{mean} = 37,92 \text{ KN}$,

Η ομοιομορφία φορτίου $P_{max}/P_{mean} = 1,97$

Η συνολική ενέργεια που δαπανήθηκε για την αξονική κατάρρευση του δοκιμίου είναι $E = 2465 \text{ KN mm}$

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

Διαδρομή εμβόλου: 65mm

Το μέγιστο φορτίο $P_{max} = 79,20 \text{ KN}$,

Το μέσο φορτίο $P_{mean} = 36,15 \text{ KN}$,

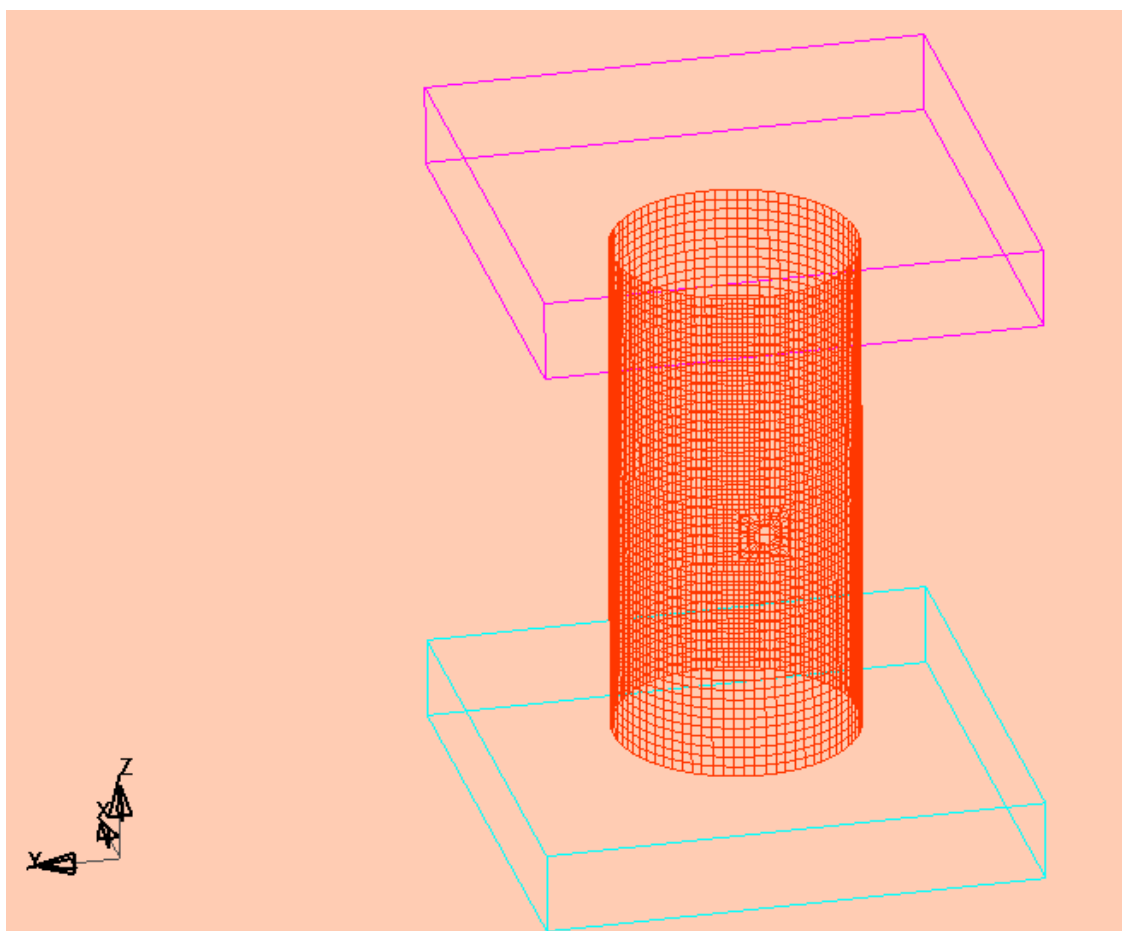
Η ομοιομορφία φορτίου $P_{max}/P_{mean} = 2,19$

Η συνολική ενέργεια που δαπανήθηκε για την αξονική κατάρρευση του δοκιμίου είναι $E = 2350 \text{ KN mm}$

ΕΝΟΤΗΤΑ 5-3 :

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΙΑΣ ΜΗ ΔΙΑΜΠΕΡΟΥΣ ΟΠΗΣ Φ5 ΣΤΟ 1/2 ΤΟΥ ΥΨΟΥΣ Η ΤΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ (TYPE_5B1).

Το μοντέλο του δοκιμίου κυκλικής διατομής με μια οπή μη διαμπερή, διαμέτρου Φ5 στο 1/2 του ύψους Η του δοκιμίου, και με πάχος τοιχώματος 2mm, παρουσιάζεται στην ακόλουθη εικόνα:

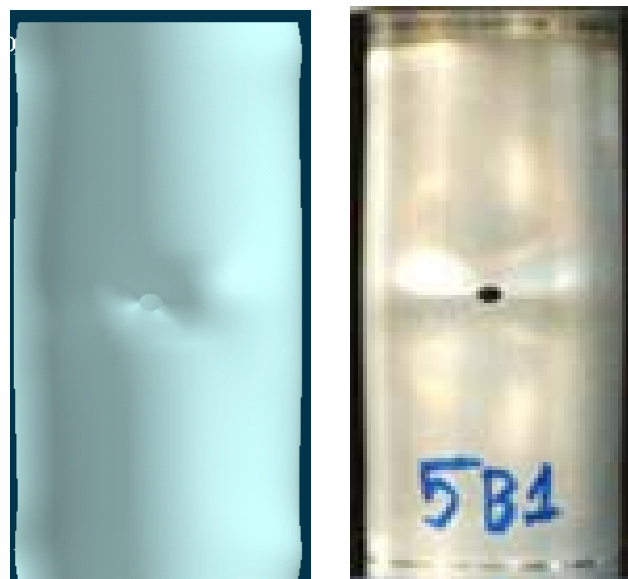


Σχ.1, Απεικόνιση πλέγματος στο LS-DYNA 3D, για κυκλικής διατομής δοκίμιο με μια μη διαμπερή οπή διαμέτρου Φ5.

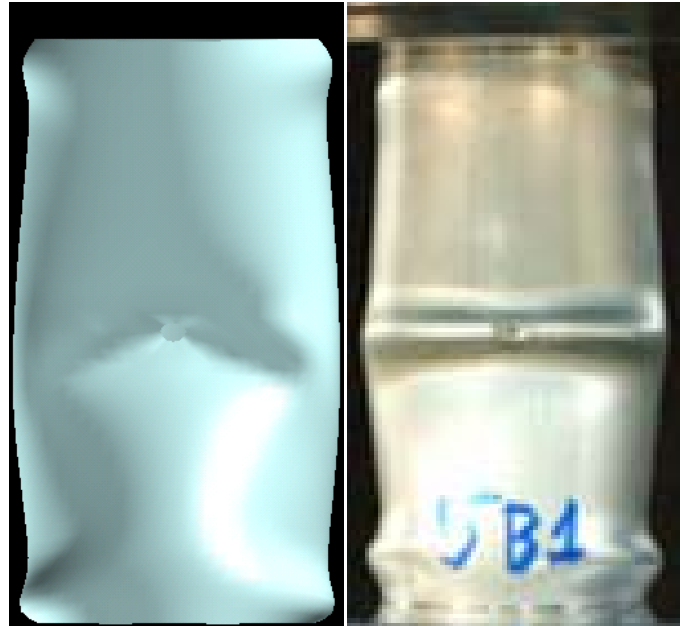
Οι αντίστοιχες φάσεις προσομοίωσης της κατάρρευσης του δοκιμίου αυτού, που κατέγραψα με τη χρήση του LS-DYNA, σε σύγκριση με τις φάσεις που έλαβα από την ελληνική βιβλιογραφία [1] με την χρήση πρέσας Instron, παρουσιάζονται στις επόμενες σελίδες:



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 του (θέση οπής), ενώ και στο μοντέλο του LS-DYNA, η αρχική κατάρρευση σημειώνεται στην πάνω διατομή του δοκιμίου. Πάτημα της πρέσας στα 2 mm.

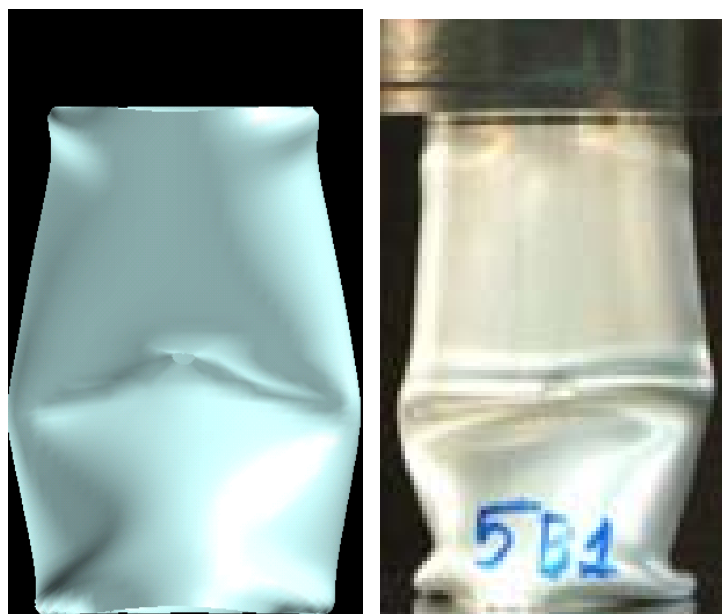


2η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Συνέχιση αρχικού σχεδόν εκτατού λοβού στο πάνω μέρος του δοκιμίου και εμφάνιση εκτατού λοβού στην διατομή που έρχεται σε επαφή με την κάτω πλάκα. Επιπλέον έχουμε εμφάνιση του φαινομένου λυγισμού κατά EYLER στην περιοχή της οπής στο μέσο του δοκιμίου. Πάτημα της πρέσας στα 7 mm.



3η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερά εικόνα). Συνέχιση των δύο εκτατών λοβών και συνέχιση του λυγισμού στην οπή με ροή του υλικού προς το εσωτερικό του δοκιμίου. Όπως παρατηρούμε από τις φωτογραφίες στις προοδευτικές φάσεις κατάρρευση, η αρχική θραύση του δοκιμίου γίνεται στο ύψος της οπής που έχουμε διανοίξει. Επειδή όμως η οπή είναι μόνο από την μία πλευρά του δοκιμίου, αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η πτύχωση που δημιουργείται κατά την εξέλιξη της συμπίεσης να μην είναι συμμετρική. Έχει ολοκληρωθεί πλήρως ο σχηματισμός

του πρώτου λοβού. Δημιουργείται και ο δεύτερος λοβός. 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 στο δοκίμιο της προσομοίωσης πως στην βάση το δοκίμιο αρχίζει να σηκώνεται με αποτέλεσμα να μην έρχεται όλη η διατομή σε επαφή με την βάση της πρέσας, όπως θα δούμε και στην κάτοψη έπειτα. Στο πειραματικό δοκίμιο συνδυάζει τις δύο τυπικές μορφές κατάρρευσης, δηλαδή αξονοσυμμετρική (εκτατή), ούτε μη εκτατή (diamond). Η μορφή της κατάρρευσης επίσης προσεγγίζει λίγο τον λυγισμό κατά Euler. Πάτημα της πρέσας στα 20mm.



5η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερά εικόνα). Παρατηρούμε στο δοκίμιο της προσομοίωσης πως λόγω του λυγισμού η περιοχή της

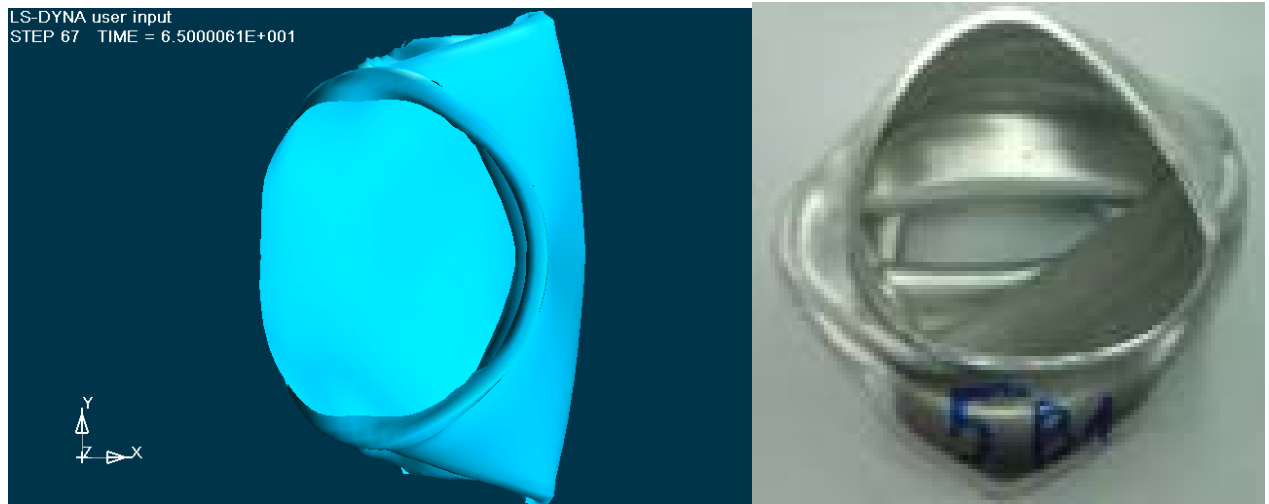
οπή μετατοπίζεται προς το εσωτερικό με αποτέλεσμα να έρχεται σε επαφή με την συμμετρική απέναντι περιοχή. Η περιοχή της πάνω διατομής προσεγγίζει την αντίστοιχη περιοχή της διατομής στην βάση του δοκιμίου. Στο πειραματικό δοκίμιο επειδή όμως η οπή είναι μόνο από την μία πλευρά του δοκιμίου, αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η πτύχωση που δημιουργείται κατά την εξέλιξη της συμπίεσης να μην είναι συμμετρική. Αυτό τελικά θα οδηγήσει σε κατάρρευση που συνδυάζει τις γνωστές μορφές δηλαδή mixed mode. Πάτημα της πρέσας στα 40mm.



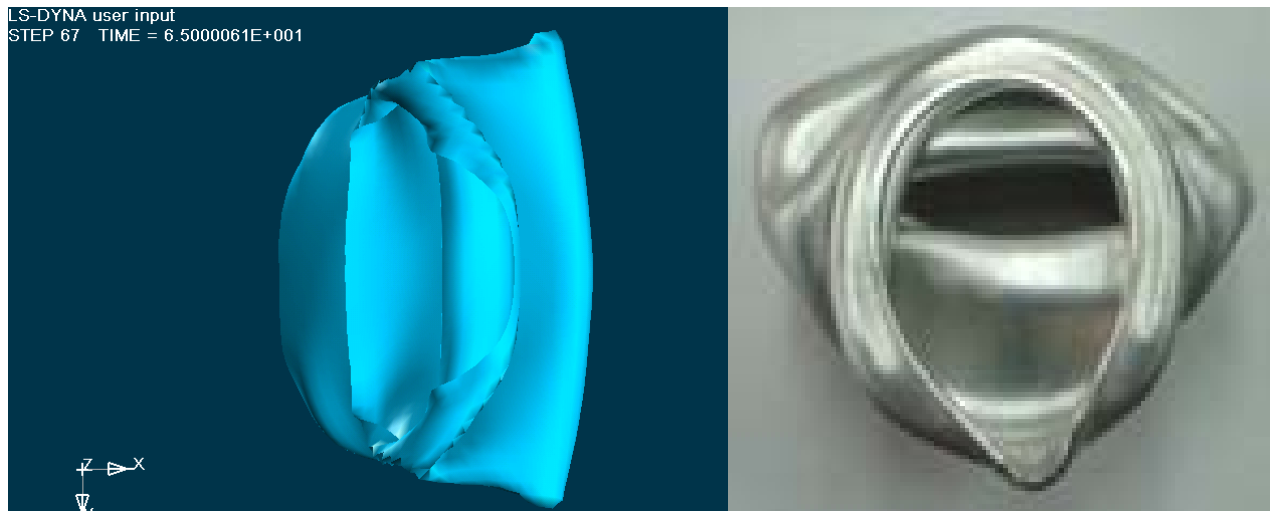
6η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερά εικόνα). Παρατηρούμε πως η περιοχή της αναδίπλωσης του δοκιμίου τείνει να προσεγγίσει την βάση της πρέσας. Το δοκίμιο πλέον ακουμπάει μόνο σε ένα μέρος της διατομής αφού το υπόλοιπο έχει ανασηκωθεί και τείνει να έρθει σε επαφή με το πάνω μέρος του. Για το πειραματικό δοκίμιο όπως φαίνεται από τις τελικές όψεις, το κάτω μέρος του δοκιμίου είναι ελαφρώς μετατοπισμένο προς την πλευρά της οπής. Κατά την εξέλιξη της συμπίεσης σχηματίζεται ένας 2D λοβός, ένας αξονοσυμμετρικός και ένας ατελής 3D. Πάτημα της πρέσας στα 56mm.



7η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερά εικόνα). Είναι εμφανέστερος ο λυγισμός στην περιοχή της οπής όπου ο κώδικας του ls-dyna λαμβάνει ως ανωμαλία στη δομή του δοκιμίου και έχουμε ροή υλικού προς το εσωτερικό του δοκιμίου. Στο πειραματικό δοκίμιο έχουμε λοβούς με πτύχωση προς τα έξω, μη ολοκληρωμένους μη εκτατούς λοβούς και μετατόπιση του κάτω μέρους προς τα πάνω. Πάτημα της πρέσας στα 65.0mm.

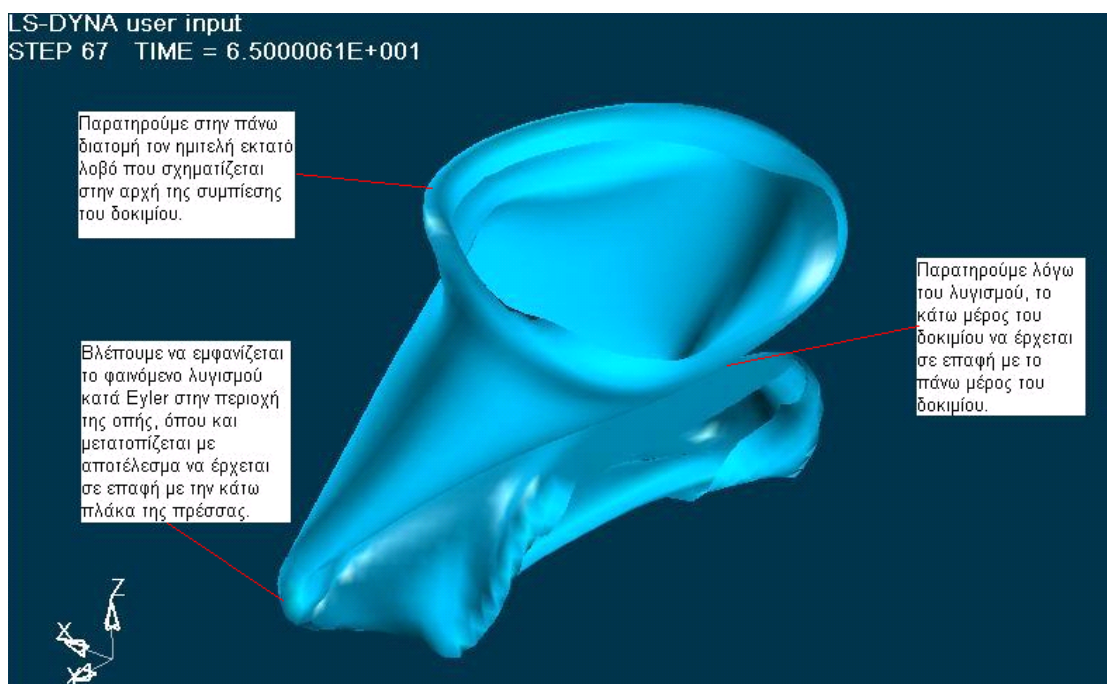


Τελική μορφή δοκιμίου αμέσως μετά το τέλος της διαδικασίας αξονικής κατάρρευσης στην πρέσα (δεξιά). Το ίδιο δοκίμιο μετά το τέλος της προσομοίωσης από το LS-DYNA, (αριστερά). Παρατηρούμε τον ημιτελή εκτατό λοβό στην πάνω διατομή του δοκιμίου και τον εμφανή λυγισμό του δοκιμίου στο μέσο του. Τελικό πάτημα της πρέσας στα 65.0 mm. Σε αντιστραμμένη όψη έχουμε:



Παρατηρούμε την εισροή του υλικού στο εσωτερικό του δοκιμίου λόγω λυγισμού στην οπή και την μορφή των μη εκτατών 2D και 3D λοβών.

Ακόμα, σε τρισδιάστατη ισομετρική όψη, παρουσιάζεται παρακάτω η τελική μορφή του δοκιμίου όπως προσομοιώθηκε στο LS-DYNA, με κατάρρευση του δοκιμίου έως τα 65.0 mm:



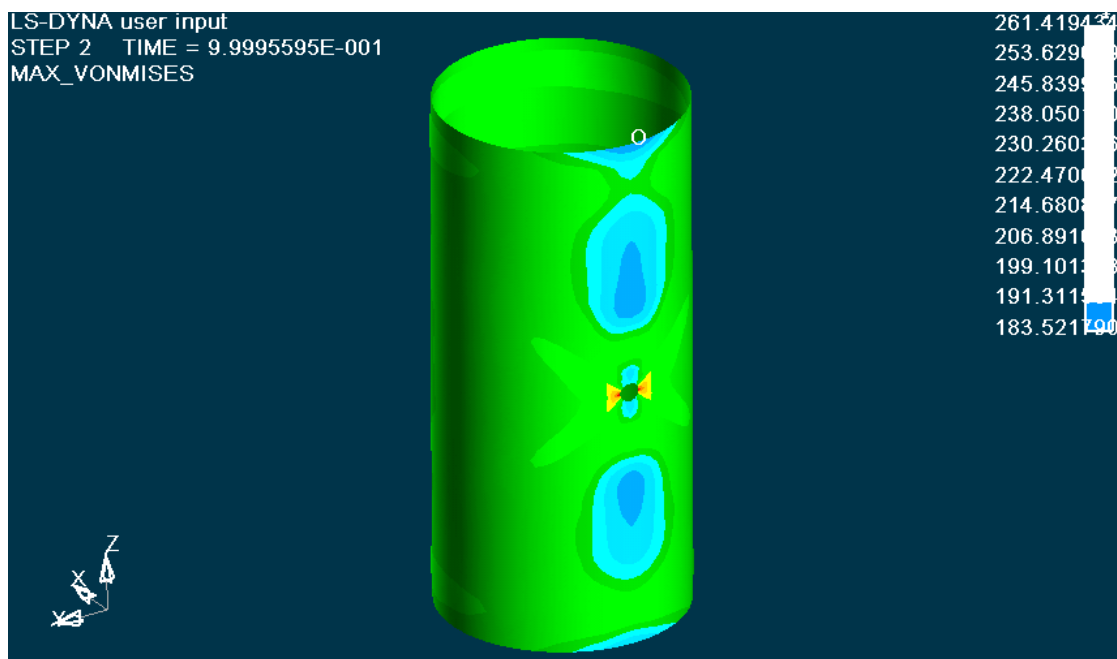
Η ολοκληρωμένη προσομοίωση κατάρρευσης του μοντέλου μας με το LS-DYNA, παρουσιάζεται και στα αρχεία βίντεο:

- Deformation isometric.Avi
- [Deformation side.Avi](#)
- Deformation rear.Avi

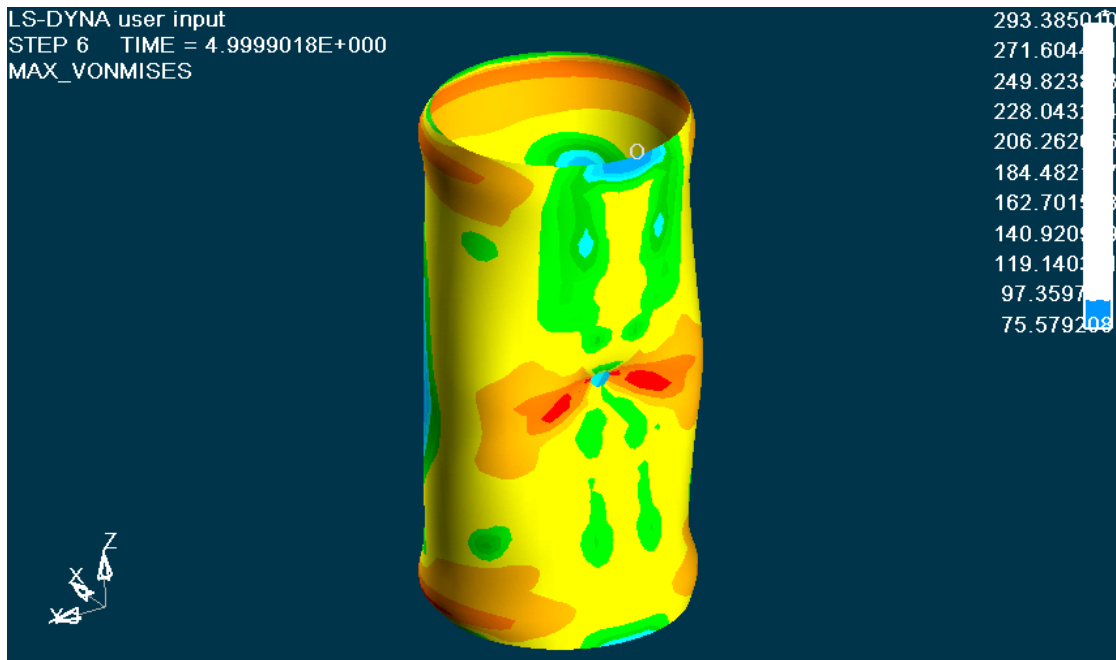
Ακολουθούν εικόνες από την κατανομή των τάσεων σε όλη την επιφάνεια του δοκιμίου κατά τα διάφορα στάδια της κατάρρευσής του:

Επιλέγοντας στον ETA POSTGL:

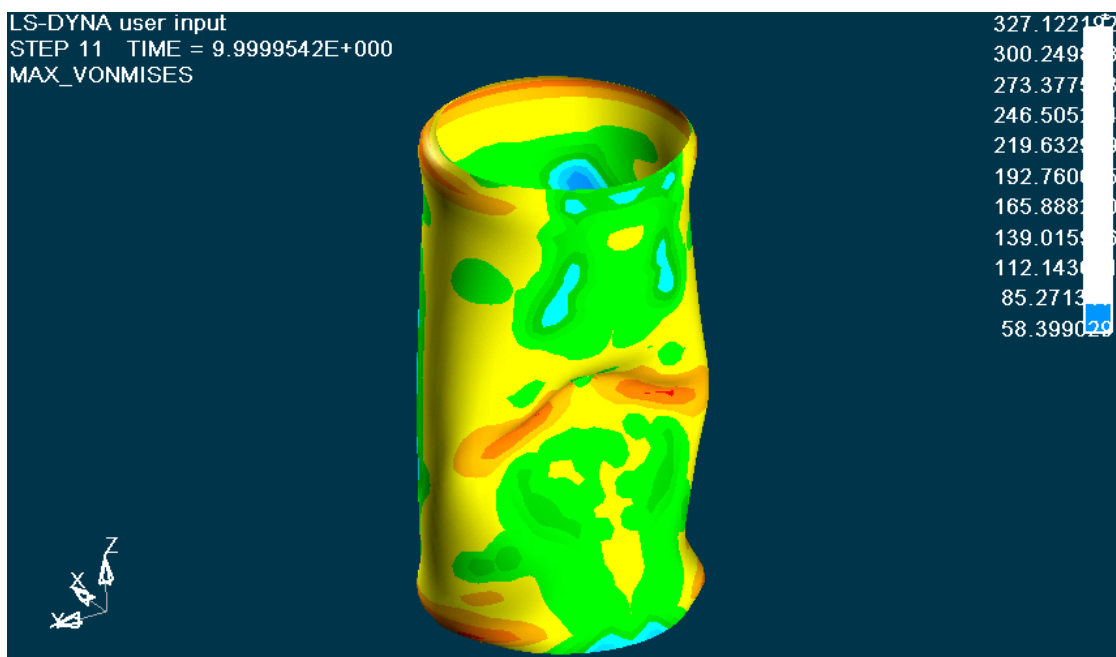
CONTOUR -> STRESS/STRAIN -> MAXIMUM VON MISES STRESSES:



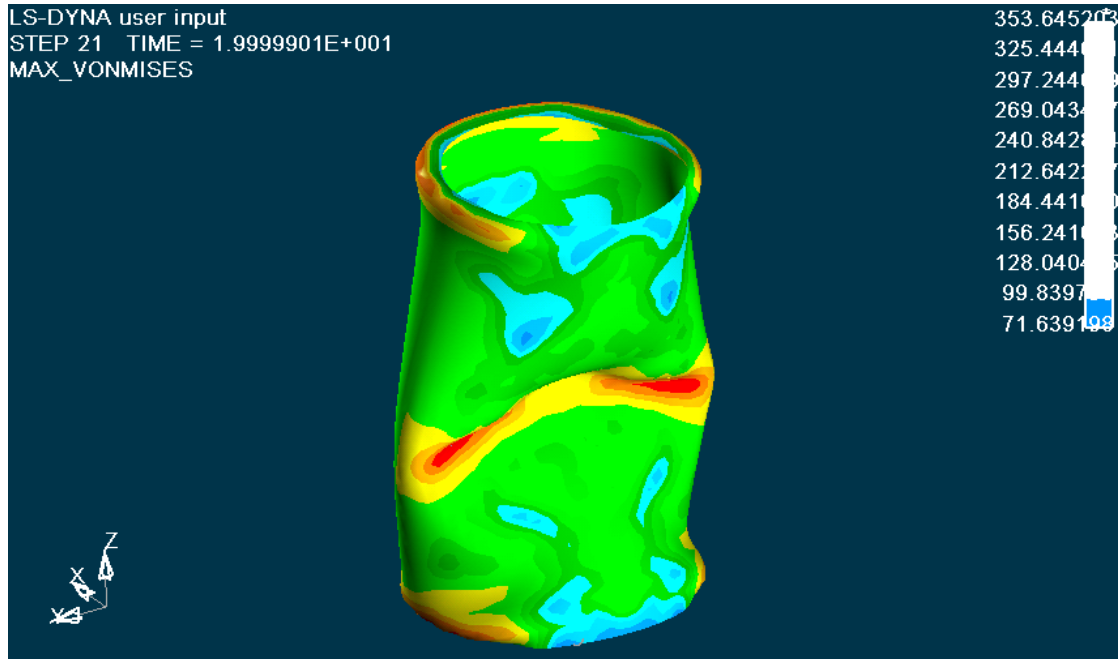
Κατανομή των τάσεων στο 1mm. Έχουμε εμφάνιση τάσεων στην περιοχή γύρω από την οπή του δοκιμίου, που όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 2, για την θεωρία των τάσεων γύρω από οπές, κατά την κατακόρυφη διεύθυνση που συμπίπτει με την διεύθυνση της αξονικής θλίψης του δοκιμίου, έχουμε τάσεις ίσες με $\sigma = 206 \text{ MPa}$, ενώ στο οριζόντιο μέσο επίπεδο στο πάνω μέρος του δοκιμίου, το οποίο είναι κάθετο ως προς το κατακόρυφο επίπεδο της αξονικής θλίψης του δοκιμίου, εκεί εμφανίζονται οι μέγιστες τάσεις για την κατάρρευση του δοκιμίου στη θέση της οπής, ίσες με $\sigma = 261,4 \text{ MPa}$. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή 261,4 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.



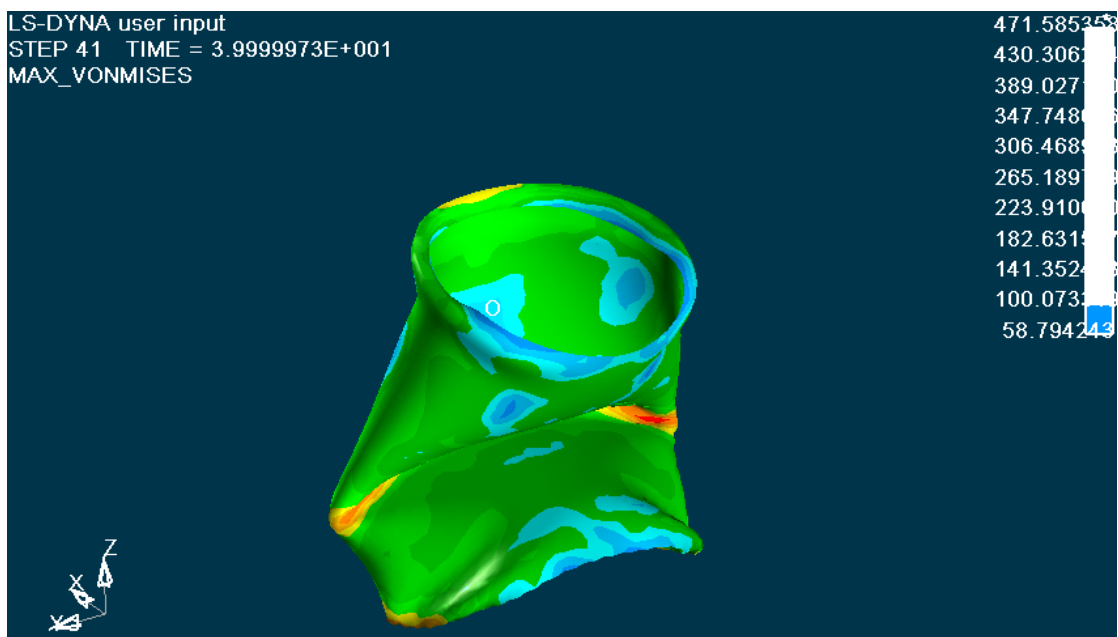
Κατανομή των τάσεων στο 5 mm. Έχουμε μέγιστες τάσεις στην περιοχή της πάνω περιφέρειας του δοκιμίου, που πιέζει το έμβολο της πρέσας, Ιδιαίτερα, στην περιοχή της οπής, οι τάσεις που εφαρμόζονται κατά την διεύθυνση της αξονικής θλίψης είναι $\sigma = 228 \text{ MPa}$, ενώ οι τάσεις που αναπτύσσονται στην οπή κάθετα προς την διεύθυνση αξονικής θλίψης του δοκιμίου, είναι $\sigma = 293 \text{ MPa}$. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με **μέγιστη τιμή 293,4 MPa**, που βλέπουμε ότι είναι μεγαλύτερη τιμή από την τάση διαρροής του υλικού του δοκιμίου ($\sigma_A = 220 \text{ MPa}$), οπότε οπότε ξεκινάει η πλαστική παραμόρφωση του δοκιμίου, με εμφάνιση μονίμων παραμορφώσεων και εμφάνιση λυγισμού στη θέση της οπής. Συνεχίζεται η δημιουργία του πρώτου σχεδόν εκτατού λοβού στο πάνω επίπεδο, και συνεχίζεται η κατάρρευση του δοκιμίου από την θέση αυτή και με διεύθυνση προς τα κάτω.



Κατανομή των τάσεων στο 10 mm. Έχουμε μέγιστες τάσεις στην περιοχή σχηματισμού του πρώτου λοβού και στα σημεία αναδίπλωσης στο μέσο του δοκιμίου. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με **μέγιστη τιμή 327 MPa**. Στην πάνω και κάτω διατομή οπού έχουμε δημιουργία εκτατού λοβού και στο μέσο του δοκιμίου οπού έχουμε λυγισμό, έχουμε τις μέγιστες τάσεις που **κυμαίνονται από 246 ως 327 MPa**. Στο υπόλοιπο μέρος του μοντέλου μας έχουμε εμφάνιση αντιδιαμετρικής συμμετρίας στην κατανομή των τάσεων.

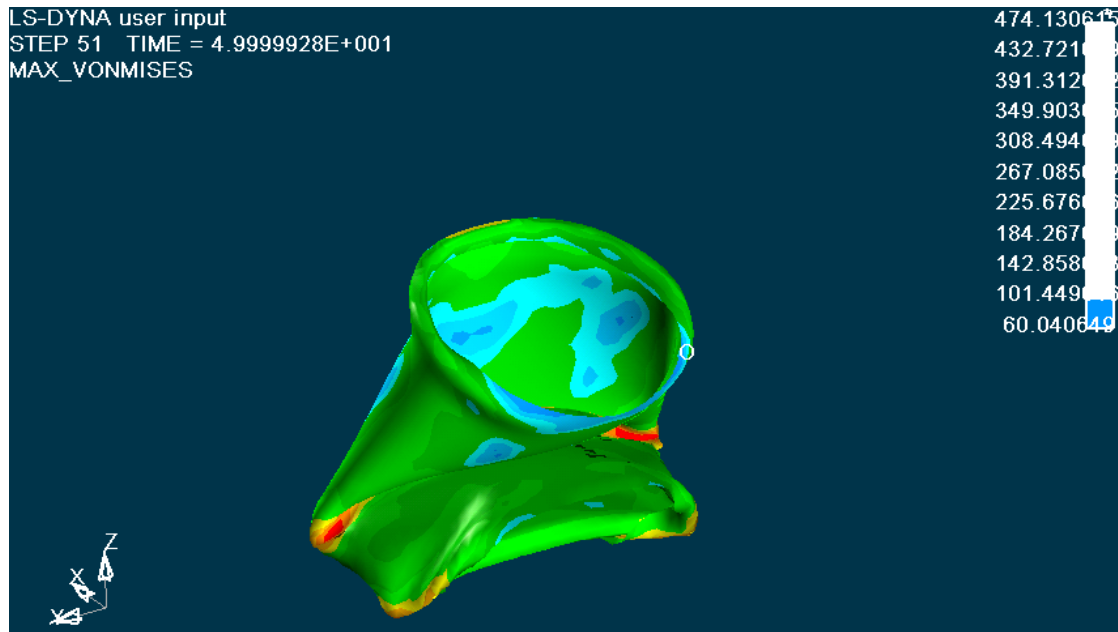


Κατανομή των τάσεων στο 20 mm. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με **μέγιστη τιμή 353 MPa** στις περιοχές που έχουμε πλαστική άρθρωση στον πρώτο έκτατο λοβό και στην περιοχή εμφάνισης λυγισμού. Τάσεις σημαντικής τιμής, εμφανίζονται τώρα κυρίως στο μέσο του δοκιμίου στην διατομή γύρω από την οπή.

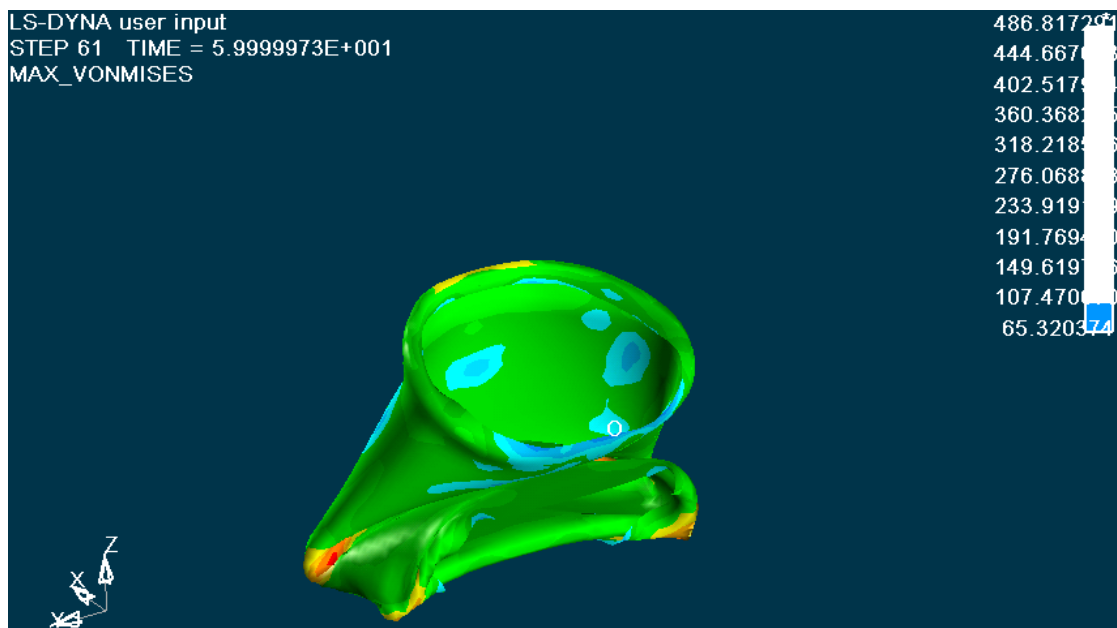


Κατανομή των τάσεων στο 40 mm. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη εμφανιζόμενη τιμή 471MPa.

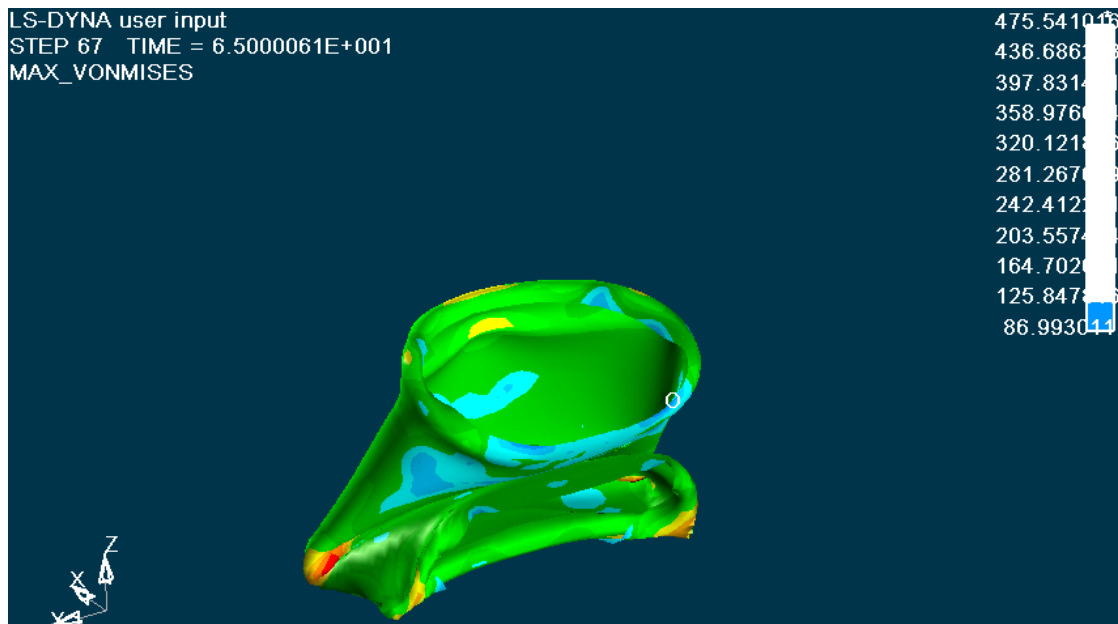
Στο κάτω μέρος του δοκιμίου που έρχεται σε επαφή με την σταθερή πλάκα, και στην περιοχή της οπής στο μέσο του δοκιμίου έχουμε τις μεγαλύτερες τάσεις που κυμαίνονται από 347-471MPa. Στην πάνω διατομή του δοκιμίου έχουμε τάσεις που κυμαίνονται από 141-265 MPa ενώ οι μέγιστες τάσεις εμφανίζονται στις περιοχές των λοβών.



Κατανομή των τάσεων στο 50 mm. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη εμφανιζόμενη τιμή 474MPa. Στην περιοχή που συμβολίζεται με O έχουμε εμφάνιση των ελάχιστων τάσεων.



Κατανομή των τάσεων στο 60 mm. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη εμφανιζόμενη τιμή 486MPa. Η κατάρρευση του δοκιμίου, και η αναδίπλωση του λόγω του λυγισμού είναι πλέον εμφανής σε όλο το δοκίμιο.

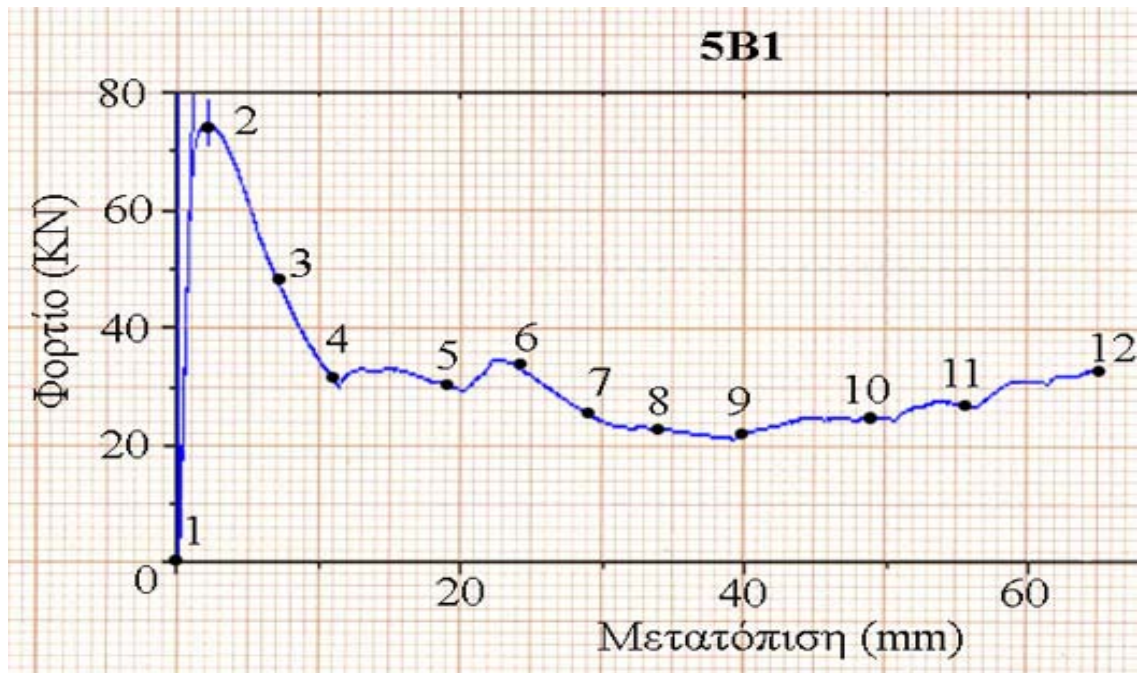


Κατανομή των τάσεων στο 65.0mm. Οι τελικές τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη εμφανιζόμενη τιμή 475 MPa. Η κατάρρευση του δοκιμίου έχει πλέον ολοκληρωθεί

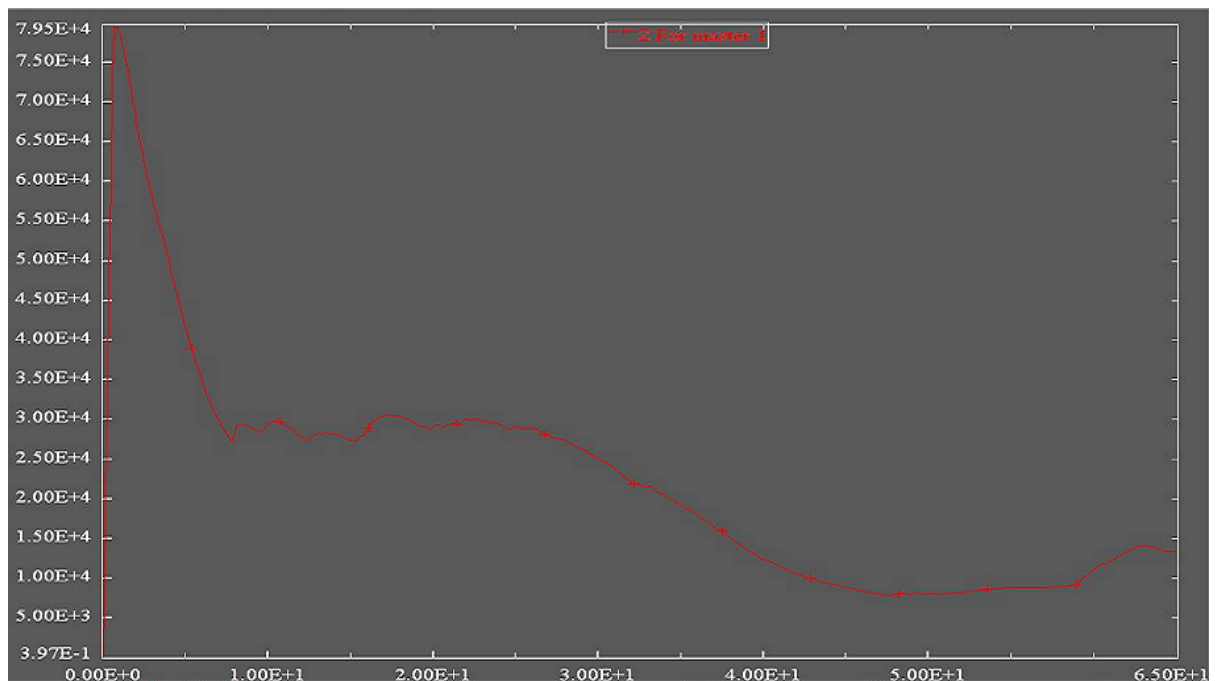
Η ολοκληρωμένη προσομοίωση της κατανομής των τάσεων του μοντέλου μας με το LS-DYNA, παρουσιάζεται και στο αρχείο βίντεο:

➤ [Contour Max Von Mises.Avi](#)

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



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

Το μέγιστο φορτίο $P_{max} = 74,52KN$

Το μέσο φορτίο $P_{mean} = 31,2 KN$,

Η ομοιομορφία φορτίου $P_{max}/P_{mean} = 2,39$

Η συνολική ενέργεια που δαπανήθηκε για την αξονική κατάρρευση του δοκιμίου είναι $E = 2028 KN mm$

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

Το μέγιστο φορτίο $P_{max} = 79,50KN$,

Το μέσο φορτίο $P_{mean} = 22,31 KN$,

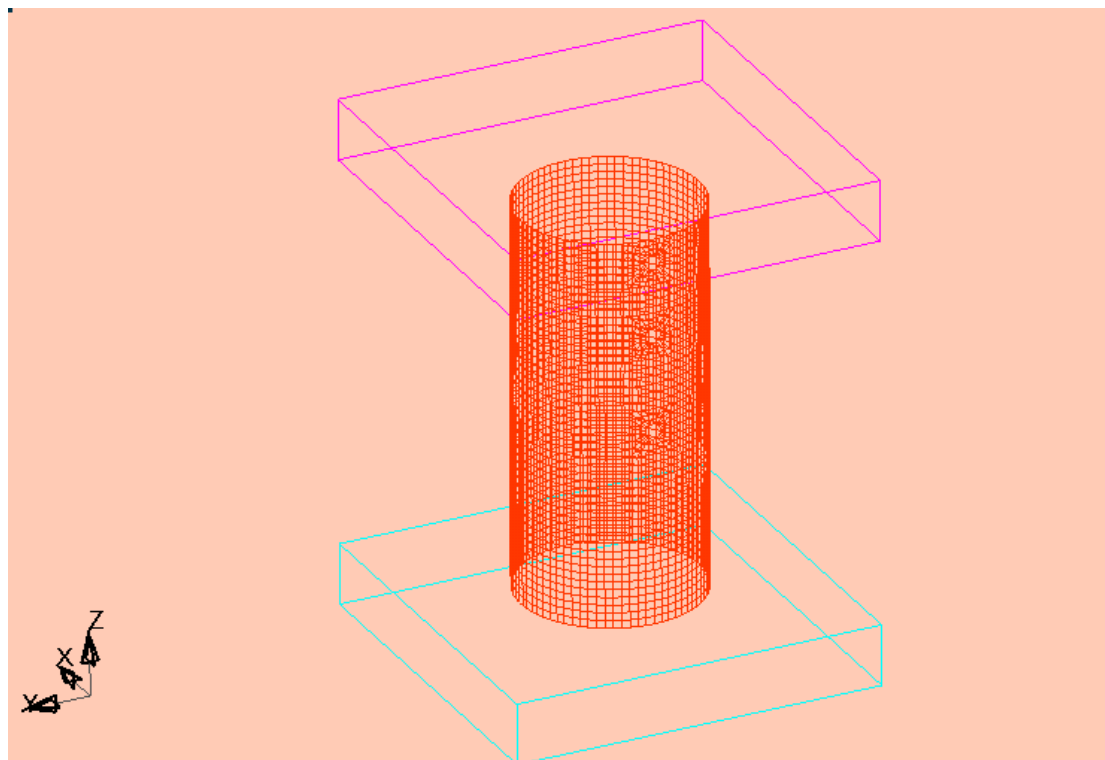
Η ομοιομορφία φορτίου $P_{max}/P_{mean} = 3,56$

Η συνολική ενέργεια που δαπανήθηκε για την αξονική κατάρρευση του δοκιμίου είναι $E = 1450 KN mm$

ΕΝΟΤΗΤΑ 5-4 :

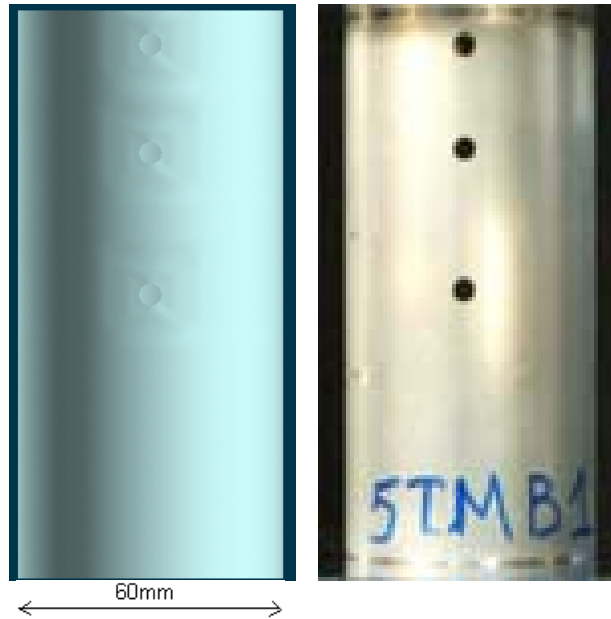
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΤΡΙΩΝ ΜΗ ΔΙΑΜΠΕΡΩΝ ΟΠΩΝ Φ5 (TYPE_5TMB1).

Το μοντέλο του δοκιμίου κυκλικής διατομής με τρεις οπές μη διαμπερείς, διαμέτρου Φ5 στο 1/2 , στο 1/4 του ύψους του δοκιμίου και 7.5mm από το χείλος της άνω διατομής, και με πάχος τοιχώματος 2mm, παρουσιάζεται στην ακόλουθη εικόνα:



Σχ.1, Απεικόνιση πλέγματος στο LS-DYNA 3D, για κυκλικής διατομής δοκίμιο με τρεις μη διαμπερείς οπές στο 1/2 , στο 1/4 του ύψους του δοκιμίου και 7.5mm από το χείλος της άνω διατομής διαμέτρου Φ5.

Οι αντίστοιχες φάσεις προσομοίωσης της κατάρρευσης του δοκιμίου αυτού, που κατέγραψα με τη χρήση του LS-DYNA, σε σύγκριση με τις φάσεις που έλαβα από την ελληνική βιβλιογραφία [1] 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 (αξονοσυμμετρικού) λοβού. Παρατηρούμε ότι το πραγματικό δοκίμιο στην πρέσα όπως και στο μοντέλο του ls-dyna, η αρχική κατάρρευση σημειώνεται στη θέση της πάνω οπής του δοκιμίου. Στο πραγματικό δοκίμιο βλέπουμε αρχική παραμόρφωση του υλικού και στις δύο άλλες οπές του. Πάτημα της πρέσας στα 3 mm.



2^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το Is-dyna (αριστερή εικόνα). Τελείωμα πρώτου εκτατού λοβού και στα δύο μοντέλα. Πάτημα της πρέσας στα 12 mm.



3^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το Is-dyna (αριστερή εικόνα). Αρχή νέου μη έκτατου λοβού καρό μορφής(diamond) στο παράλληλο επίπεδο κάτω από τον προηγούμενο και δύο δοκίμια. Διαφέρουν στην θέση της οπής. Στο δοκίμιο του Is-dyna ο μη εκτατός λοβός γίνεται πάνω από την δεύτερη οπή ενώ στο δοκίμιο της πρέσας δημιουργείται στο μέσο της οπής. Πάτημα της πρέσας στα 20 mm.



4^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Στο δοκίμιο του Is-dyna έχουμε τελείωμα του μη εκτατού λοβού και στο δοκίμιο της πρέσας το τελείωμα του εκτατού λοβού. Πάτημα της πρέσας στα 30 mm.



5^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το Is-dyna (αριστερή εικόνα). Στο δοκίμιο του Is-dyna έχουμε δημιουργία μη εκτατού 3D λοβού στην θέση της δεύτερης οπής στραμμένος κατά $\pi/3$ ως προς τον προηγούμενο μη εκτατό λοβό ενώ στο δοκίμιο της πρέσας αρχή δημιουργίας εκτατού λοβού στη θέση της τρίτης οπής. Πάτημα της πρέσας στα 40 mm.



6^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το Is-dyna (αριστερή εικόνα). Στο δοκίμιο του Is-dyna έχουμε αρχή δημιουργίας τρίτου μη εκτατού λοβού πάνω από την τρίτη οπή σε επίπεδο παράλληλο και στραμμένος κατά $\pi/3$ από τον προηγούμενο. Στο δοκίμιο της πρέσας έχουμε τελείωμα τρίτου εκτατού λοβού και αρχή νέου εκτατού λοβού. Πάτημα της πρέσας στα 55 mm.



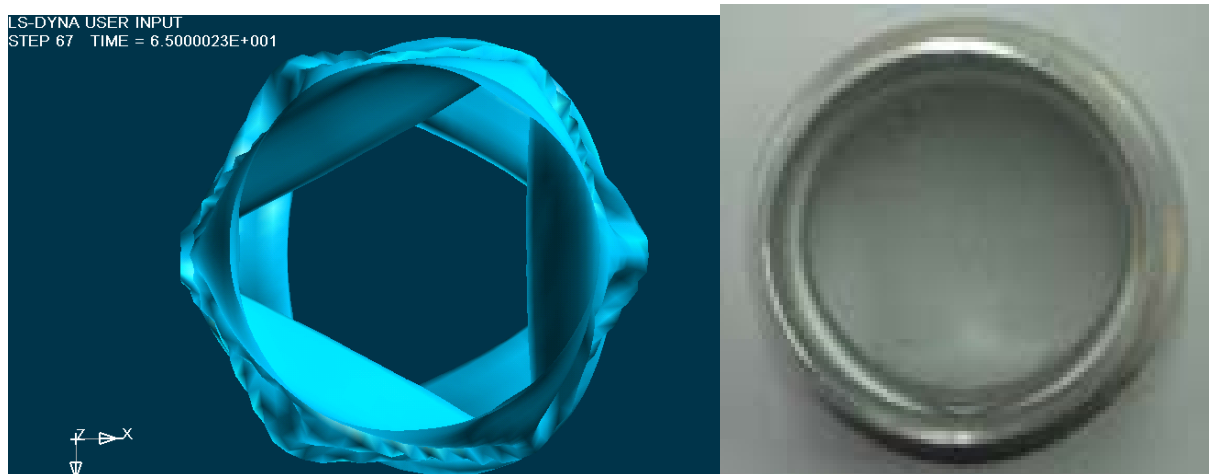
7^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το Is-dyna (αριστερή εικόνα). Στο δοκίμιο του Is-dyna έχουμε τελείωμα του μη εκτατού λοβού και στο πραγματικό δοκίμιο έχουμε

ημιτελή τέταρτο εκτατό λοβό. Τέλος αξονικής κατάρρευσης δοκιμίου στην πρέσα. Πάτημα της πρέσας στα 65.0 mm.

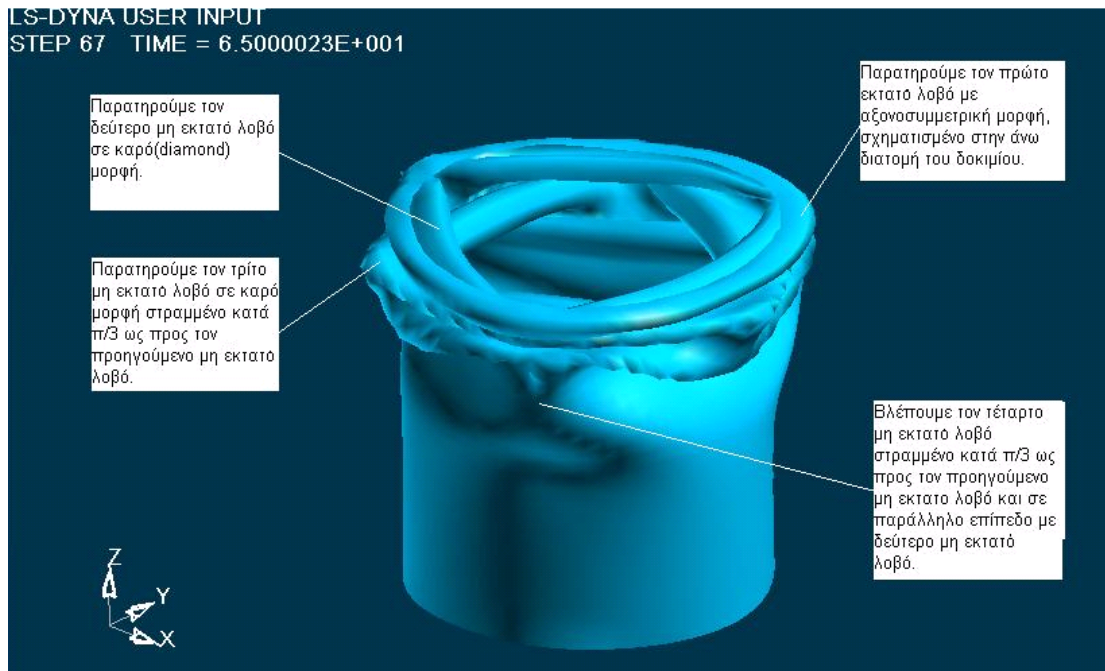


Τελική μορφή δοκιμίου αμέσως μετά το τέλος της διαδικασίας αξονικής κατάρρευσης στην πρέσα (δεξιά). Βλέπουμε τους τέσσερις αξονοσυμμετρικούς λοβούς. Το ίδιο δοκίμιο μετά το τέλος της προσομοίωσης από το ls-dyna, (αριστερά). Διακρίνουμε έναν εκτατό και τρεις μη εκτατούς λοβούς 3D που διαφέρουν κατά $\pi/3$ ο καθένας ως προς τον προηγούμενο του και οδηγούν στην παραπάνω καρό μορφή.

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 65.0 mm:



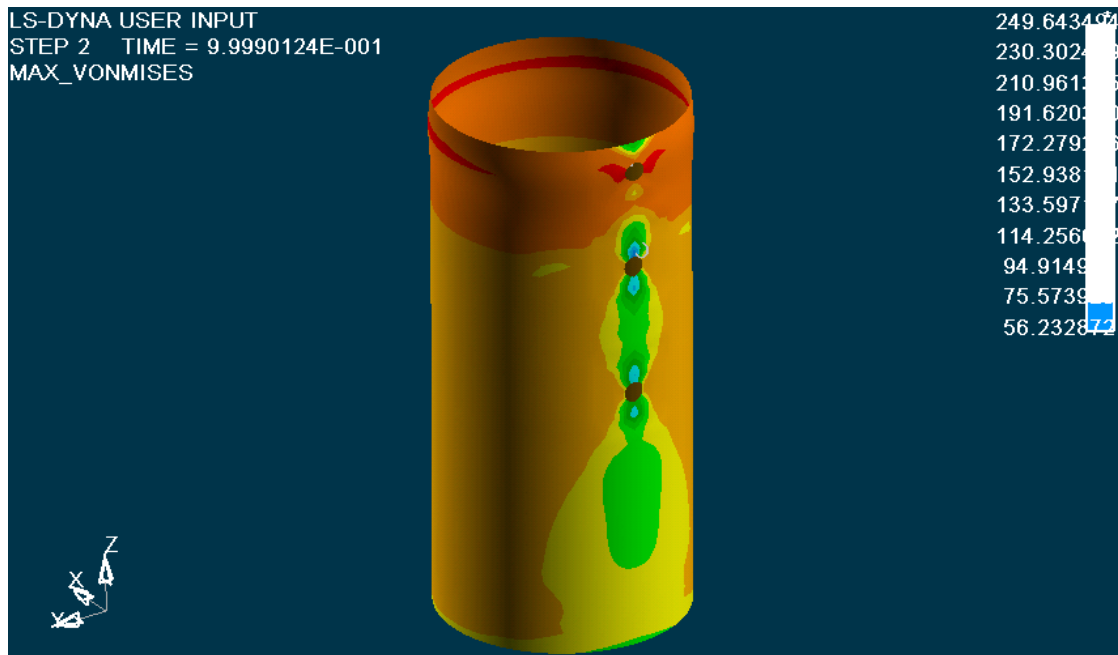
Η ολοκληρωμένη προσομοίωση κατάρρευσης του μοντέλου μας με το LS-DYNA, παρουσιάζεται και στα αρχεία βίντεο:

- Deformation isometric.Avi
- [Deformation side.Avi](#)
- Deformation rear.Avi

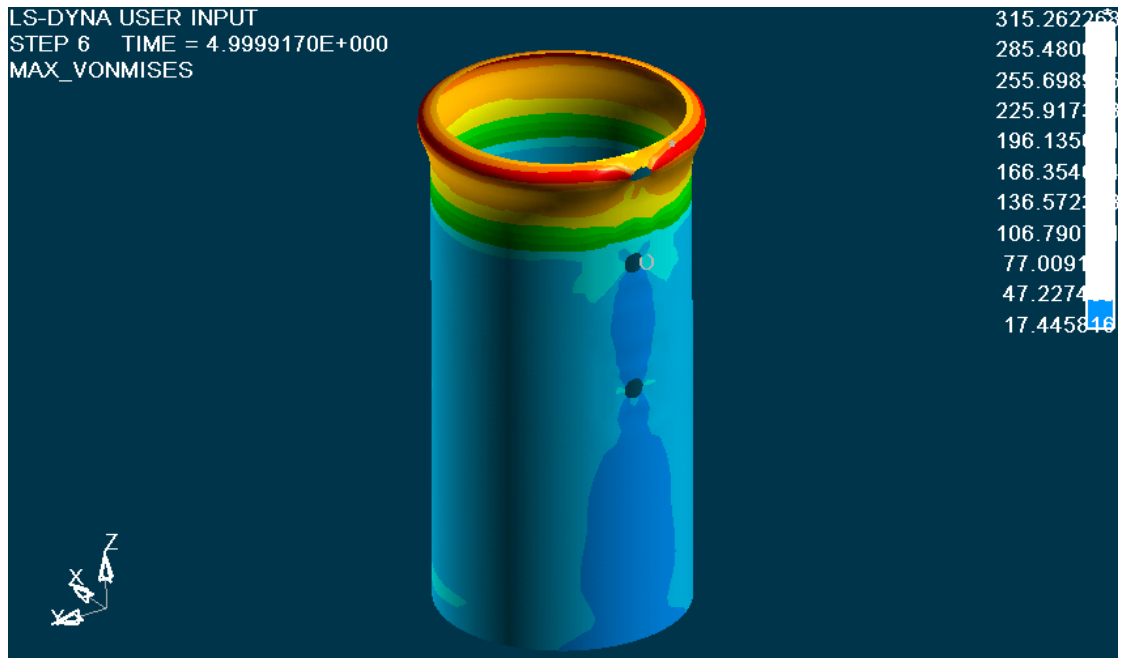
Ακολουθούν εικόνες από την κατανομή των τάσεων σε όλη την επιφάνεια του δοκιμίου κατά τα διάφορα στάδια της κατάρρευσής του:

Επιλέγοντας στον ETA POSTGL:

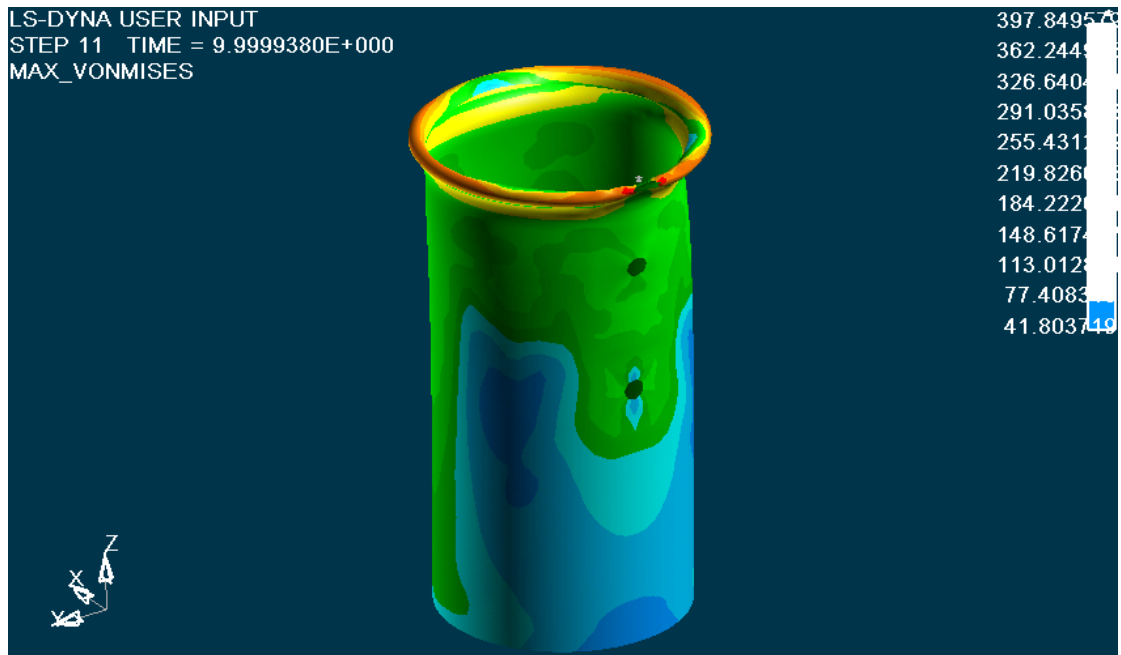
CONTOUR -> STRESS/STRAIN -> MAXIMUM VON MISES STRESSES:



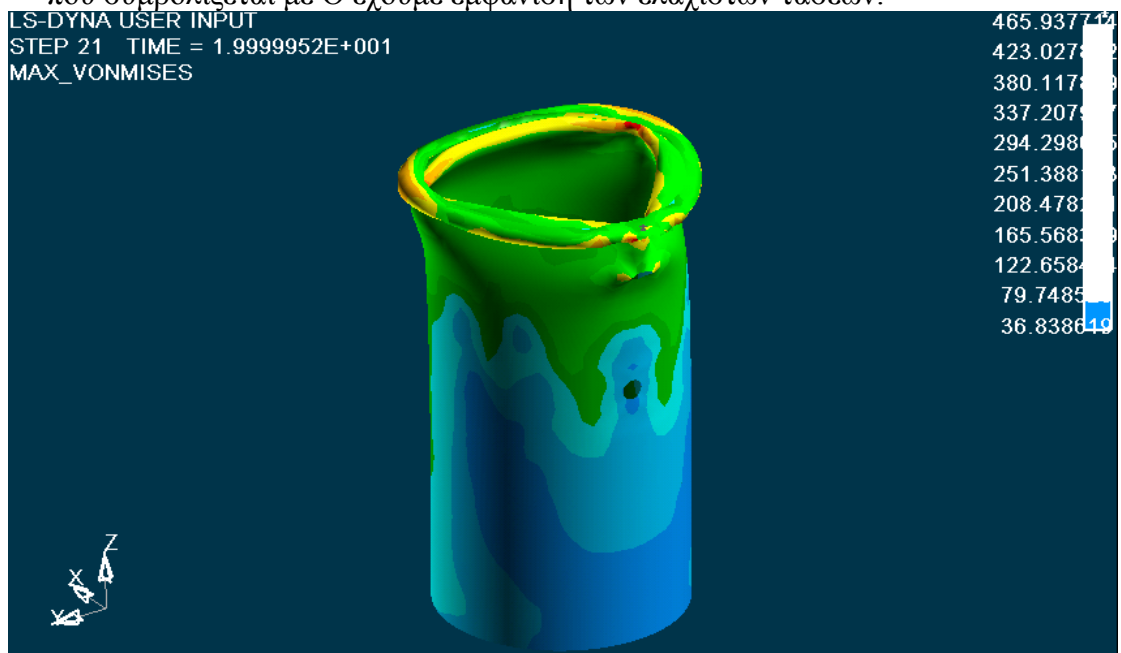
Κατανομή των τάσεων στο 1mm. Έχουμε εμφάνιση τάσεων στην περιοχή γύρω από τις τρεις οπές του δοκιμίου, που όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 2, για την θεωρία των τάσεων γύρω από οπές, βλέπουμε ότι γύρω από κάθε οπή του δοκιμίου, κατά την κατακόρυφη διεύθυνση που συμπίπτει με την διεύθυνση της αξονικής θλίψης του δοκιμίου, έχουμε τάσεις ίσες με 230MPa που φαίνονται στο παραπάνω σχήμα, ενώ στο οριζόντιο μέσο επίπεδο κάθε οπής, το οποίο είναι κάθετο ως προς το κατακόρυφο επίπεδο της αξονικής θλίψης του δοκιμίου, εκεί εμφανίζονται οι μέγιστες τάσεις για την κατάρρευση του δοκιμίου στη θέση των οπών, ίσες με $\sigma = 249 \text{ MPa}$. Βλέπουμε ότι σε όλη την περιοχή της πάνω οπής και στην πάνω διάμετρο που πιέζεται από την πρέσα, εμφανίζονται μέγιστες τάσεις. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή 249 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 στο 5 mm. Έχουμε μέγιστες τάσεις στην περιοχή γύρω από την πρώτη οπή του δοκιμίου, που πιέζει το έμβολο της πρέσας, Ιδιαίτερα, στην περιοχή της πρώτης οπής, οι τάσεις που εφαρμόζονται κατά την διεύθυνση της αξονικής θλίψης είναι $\sigma = 255 \text{ MPa}$, ενώ οι τάσεις που αναπτύσσονται στην οπή κάθετα προς την διεύθυνση αξονικής θλίψης του δοκιμίου, είναι $\sigma = 315 \text{ MPa}$. Όσον αφορά την δεύτερη οπή, εκεί βλέπουμε ότι οι τάσεις που εφαρμόζονται κατά την διεύθυνση της αξονικής θλίψης είναι $\sigma = 47 \text{ MPa}$, ενώ οι τάσεις που αναπτύσσονται στην οπή κάθετα προς την διεύθυνση αξονικής θλίψης του δοκιμίου, είναι $\sigma = 106 \text{ MPa}$. Το κάτω 1/2 μέρος του δοκιμίου έχει μικρότερες τάσεις από ότι συμβαίνει στο υπόλοιπο μέρος του δοκιμίου. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή 315 MPa, που βλέπουμε ότι είναι μεγαλύτερη τιμή από την τάση αντοχής του δοκιμίου ($\sigma_{αντ} = 240 \text{ MPa}$), οπότε διαρρέει το υλικό στη θέση της πρώτης οπής, οπότε σχηματίζεται ο πρώτος εκτατός λοβός στο επίπεδο αυτό, και συνεχίζεται η κατάρρευση του δοκιμίου από την θέση αυτή και με διεύθυνση προς τα κάτω.

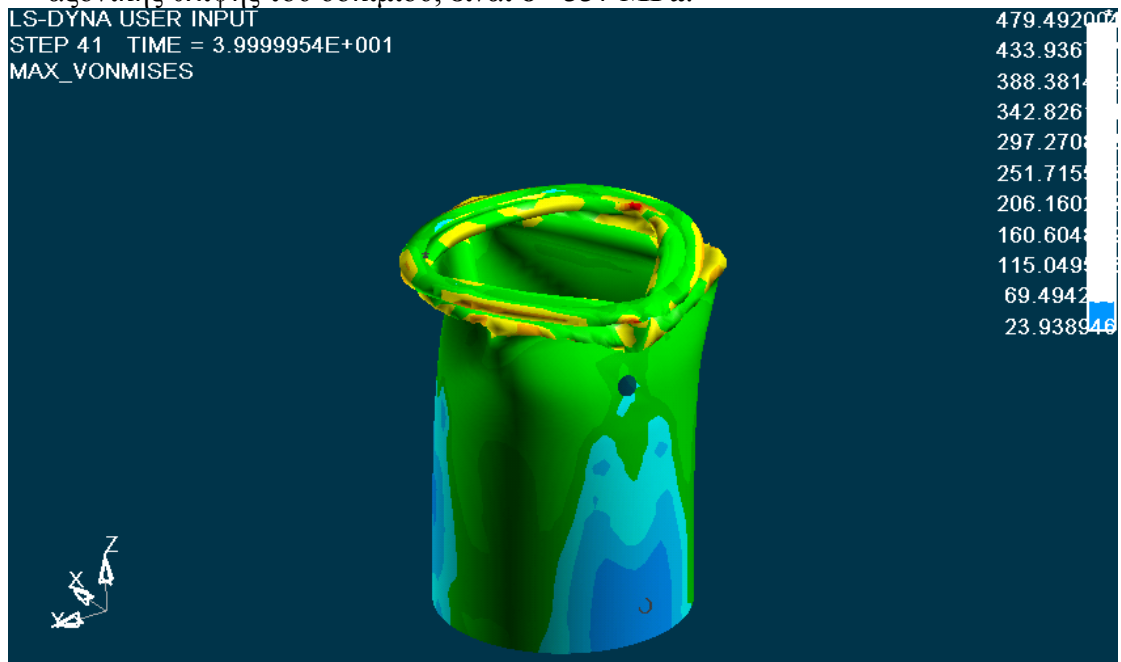


Κατανομή των τάσεων στο 10 mm. Έχουμε μέγιστες τάσεις στην περιοχή σχηματισμού του πρώτου λοβού στα σημεία αναδίπλωσης. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή 397 MPa. Στο κάτω 1/2 μέρος του μοντέλου μας εξακολουθούμε να έχουμε εμφάνιση μικρότερων τάσεων. Στη θέση που συμβολίζεται με O έχουμε εμφάνιση των ελάχιστων τάσεων.

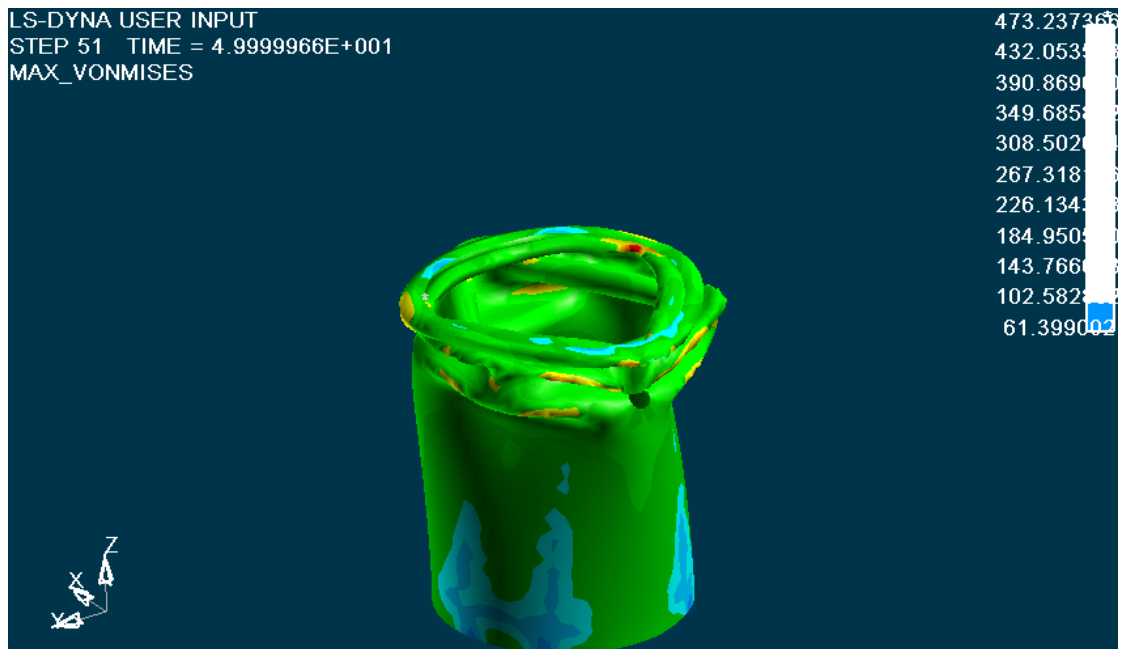


Κατανομή των τάσεων στο 20 mm. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή 465 MPa. Ο πρώτος εκτατός λοβός έχει σχηματιστεί πλήρως, και ξεκινά και ο σχηματισμός του δεύτερου μη εκτατού λοβού, σε επίπεδο παράλληλο προς τα κάτω, ως προς το προηγούμενο επίπεδο του αρχικού λοβού. Τάσεις σημαντικής τιμής, εμφανίζονται τώρα σχεδόν σε όλο το μήκος καθ' ύψος του πάνω 1 / 2 δοκιμίου. Γύρω από την τρίτη οπή έχουμε κατανομή των τάσεων με τιμή 122 MPa κατά την αξονική διεύθυνση. Γύρω από την περιοχή της δεύτερης οπής, οι τάσεις που εφαρμόζονται κατά την διεύθυνση της αξονικής θλίψης είναι $\sigma = 251$

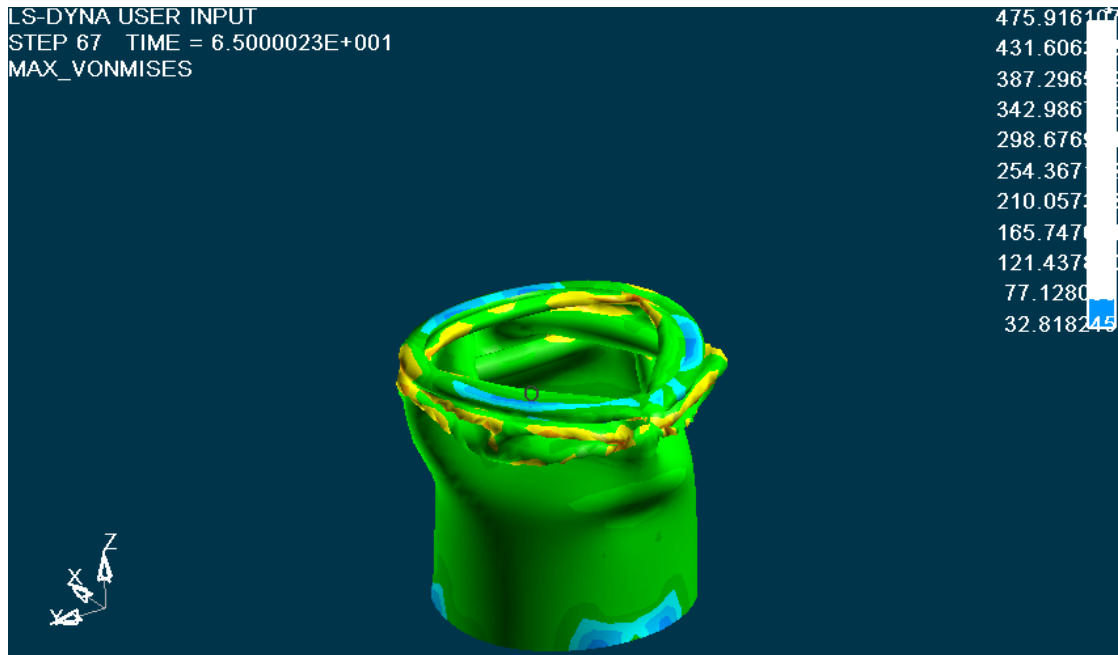
MPa, ενώ οι τάσεις που αναπτύσσονται στην οπή κάθετα προς την διεύθυνση αξονικής θλίψης του δοκιμίου, είναι $\sigma = 337$ MPa.



Κατανομή των τάσεων στο 40 mm. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή 479 MPa που εμφανίζεται στα σημεία αναδίπλωσης του μη εκτατού λοβού. Στην κάτω περιφέρεια του δοκιμίου που έρχεται σε επαφή με την σταθερή πλάκα, έχουμε την ελάχιστη τιμή των τάσεων που φαίνεται στην εικόνα με τον αριθμό μηδέν. Στο κάτω μισό του δοκιμίου εμφανίζεται παντού ομοιόμορφη τάση στην περιοχή γύρω από την τρίτη οπή ίσες με 206MPa.



Κατανομή των τάσεων στο 50 mm. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή 473 MPa. Έχει σχηματιστεί ο πρώτος μη εκτατός λοβός, και ήδη δημιουργείται και ο δεύτερος μη εκτατός λοβός στραμμένος κατά $\pi/3$. Στην κάτω βάση του δοκιμίου έχουμε μικρότερες τάσεις $\sigma = 102$ MPa.

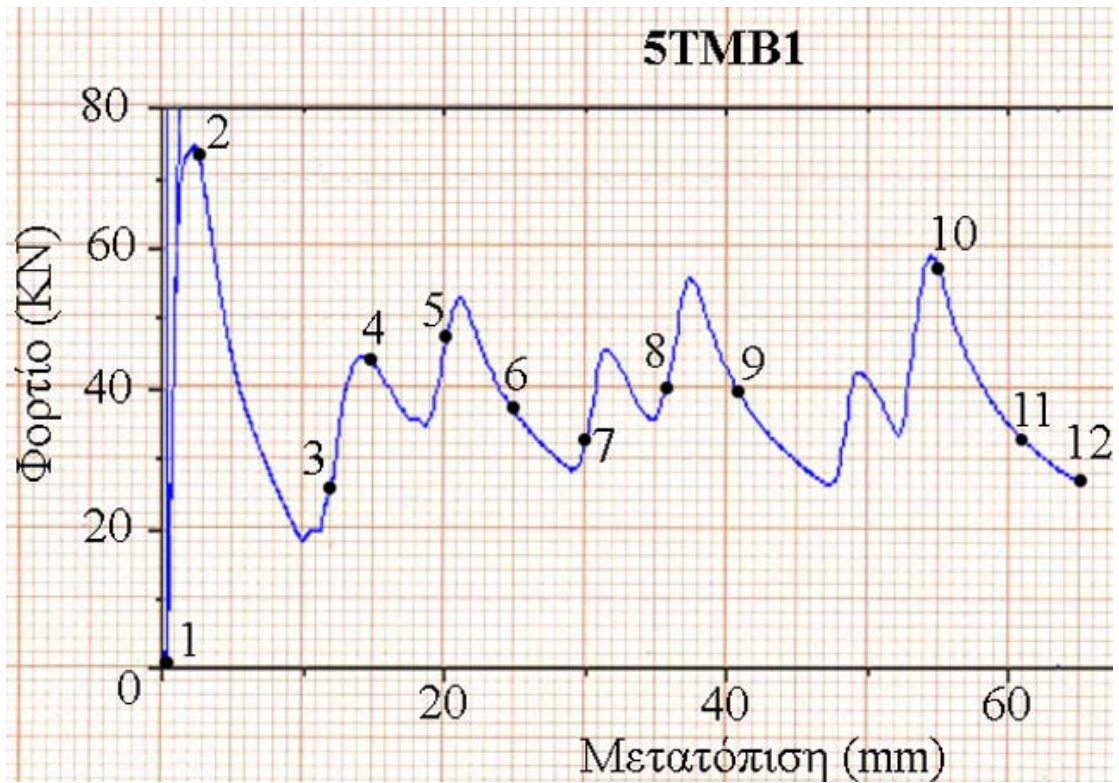


Κατανομή των τάσεων στο 65.0 mm. Οι τελικές τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή 475 MPa. Η κατάρρευση του δοκιμίου έχει πλέον ολοκληρωθεί, και οι τέσσερις τελικοί εκτατοί και μη εκτατοί λοβοί έχουν σχηματιστεί πλήρως.

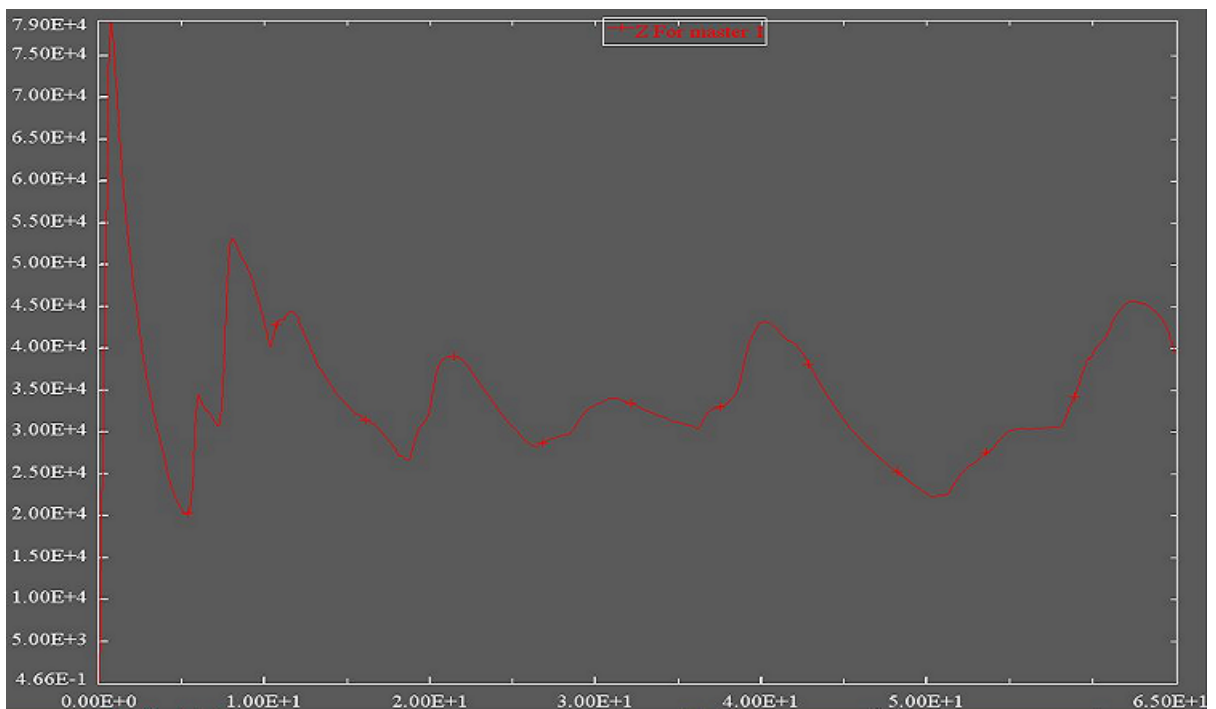
Η ολοκληρωμένη προσομοίωση της κατανομής των τάσεων του μοντέλου μας με το LS-DYNA, παρουσιάζεται και στο αρχείο βίντεο:

➤ [Contour Max Von Mises.Avi](#)

Ακόμα, το διάγραμμα των δυνάμεων μετά την επεξεργασία των στοιχείων που πάθησαν 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 N**, και με τον οριζόντιο άξονα να δείχνει τις **μετατοπίσεις** (βραχύνσεις του θλιβόμενου δοκιμίου) **σε mm**:



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

Το μέγιστο φορτίο $P_{\max} = 74,36 \text{ KN}$,

Το μέσο φορτίο $P_{\text{mean}} = 38,32 \text{ KN}$,

Η ομοιομορφία φορτίου $P_{\max} / P_{\text{mean}} = 1,94$

Η συνολική ενέργεια που δαπανήθηκε για την αξονική κατάρρευση του δοκιμίου είναι $E = 2491 \text{ KN mm}$

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

Το μέγιστο φορτίο $P_{\max} = 79,00 \text{ KN}$,

Το μέσο φορτίο $P_{\text{mean}} = 34,46 \text{ KN}$,

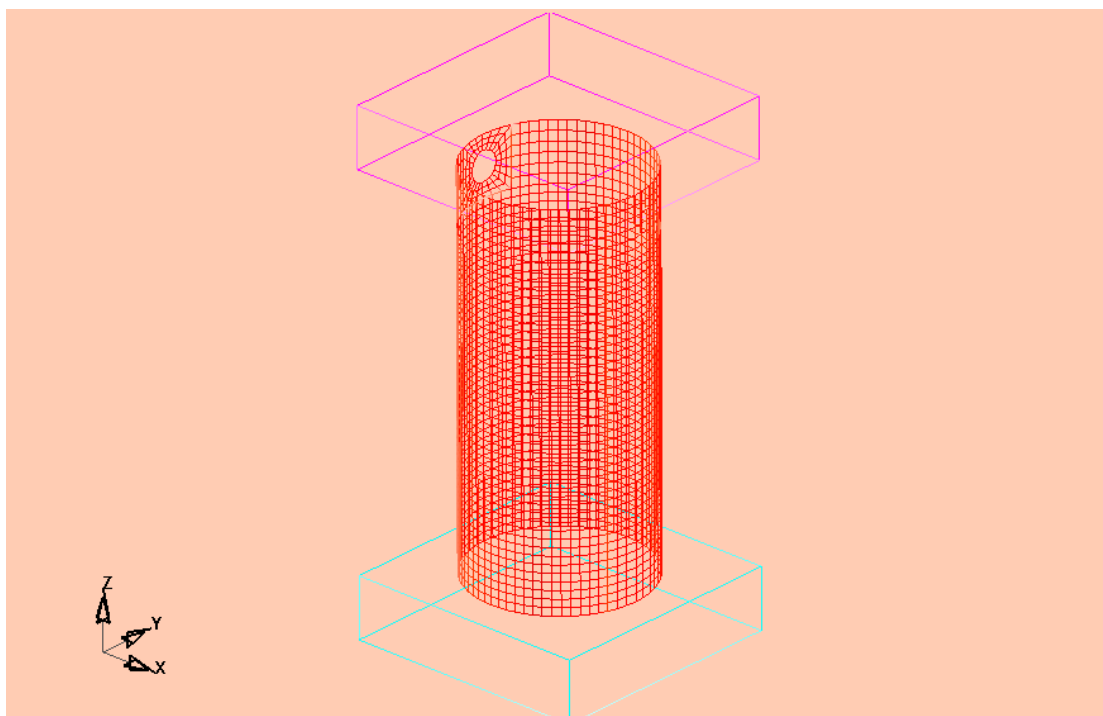
Η ομοιομορφία φορτίου $P_{\max} / P_{\text{mean}} = 2,29$

Η συνολική ενέργεια που δαπανήθηκε για την αξονική κατάρρευση του δοκιμίου είναι $E = 2240 \text{ KN mm}$

ΕΝΟΤΗΤΑ 5-5 :

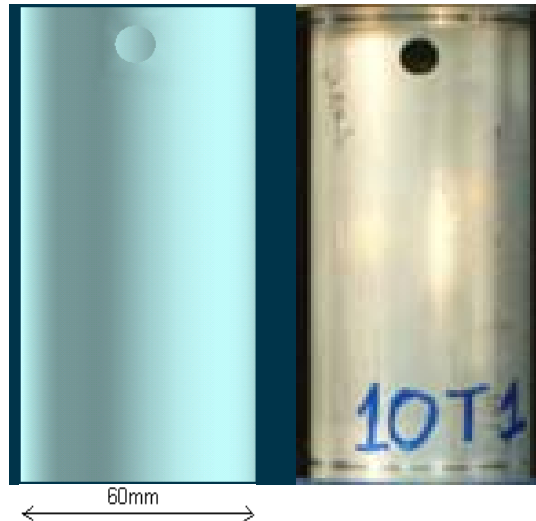
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΙΑΣ ΜΗ ΔΙΑΜΠΕΡΟΥΣ ΟΠΗΣ Φ10 ΜΕ ΚΕΝΤΡΟ ΣΤΑ 10 mm ΑΠΟ ΤΟ ΑΝΩ ΧΕΙΛΟΣ ΤΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ (TYPE_10T1).

Το μοντέλο του δοκιμίου κυκλικής διατομής με μια οπή μη διαμπερή, διαμέτρου Φ10 σε ύψος 10mm από το άνω χείλος του δοκιμίου, και με πάχος τοιχώματος 2mm, παρουσιάζεται στην ακόλουθη εικόνα:



Σχ.1, Απεικόνιση πλέγματος στο LS-DYNA 3D, για κυκλικής διατομής δοκίμιο με μια μη διαμπερή οπή διαμέτρου Φ10 σε ύψος 10mm από το άνω χείλος του δοκιμίου.

Οι αντίστοιχες φάσεις προσομοίωσης της κατάρρευσης του δοκιμίου αυτού, που κατέγραψα με τη χρήση του LS-DYNA, σε σύγκριση με τις φάσεις που έλαβα από την ελληνική βιβλιογραφία [1] 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 πάνω μέρος της οπής κοντά στην άνω διατομή και όχι στην περιοχή στο μέσο της οπής, 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 πτυχή με ροή του υλικού του πάνω μετώπου στο εσωτερικό του δοκιμίου.* Πάτημα της πρέσας στα 2 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. Πάτημα της πρέσας στα 10 mm.



3η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα ,και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA. Αρχή δημιουργίας δεύτερου εκτατού λοβού σε επίπεδο παράλληλο ως προς τον προηγούμενο. Πάτημα της πρέσας στα 20 mm.



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 έκτατου λοβού. Πάτημα της πρέσας στα 40 mm.



5η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα , και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA . Έχουν ολοκληρωθεί πλήρως ο ένας μη έκτατός και οι δύο έκτατοι λοβοί, και συνεχίζεται ο σχηματισμός και τέταρτου μη έκτατου λοβού στο κάτω μέρος του δοκιμίου ο οποίος είναι στραμμένος κατά $\pi/4$ σε σχέση με τον προηγούμενο μη έκτατό λοβό. Πάτημα της πρέσας στα 55 mm.



7η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα , και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA .Ο τέταρτος μη εκτατός λοβός στο δοκίμιο του ls-dyna και ο τέταρτος εκτατός λοβός στο δοκίμιο του εργαστηρίου παραμένουν ημιτελής. Τέλος αξονικής κατάρρευσης δοκιμίου στην πρέσα. Πάτημα της πρέσας στα 65.0 mm.



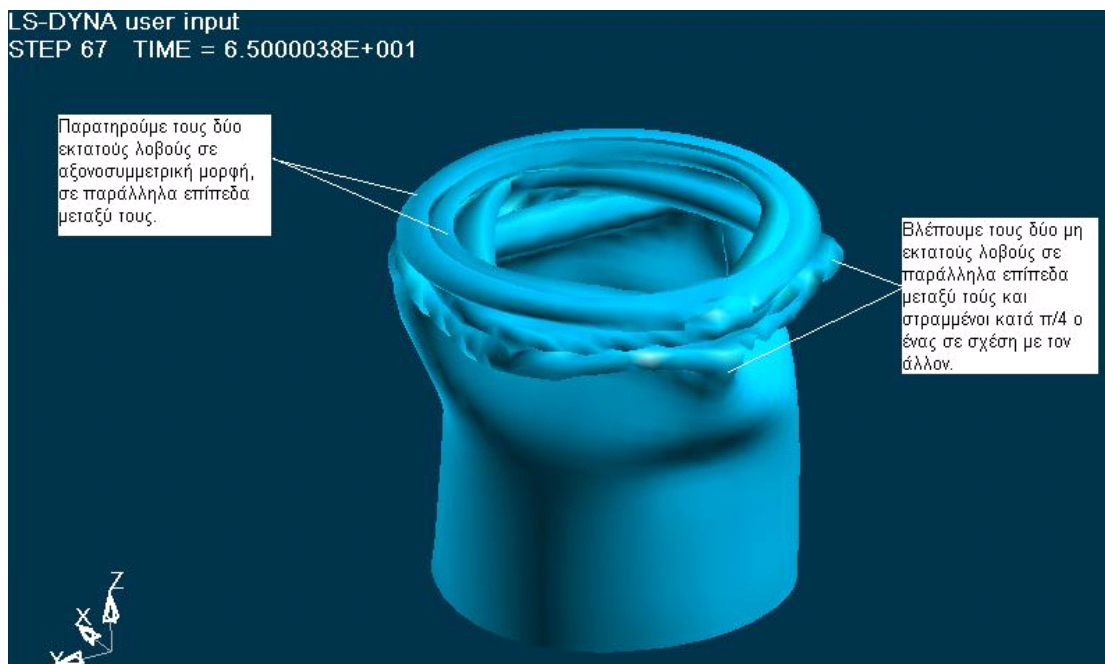
Τελική μορφή δοκιμίου αμέσως μετά το τέλος της διαδικασίας αξονικής κατάρρευσης στην πρέσα (δεξιά). Το ίδιο δοκίμιο μετά το τέλος της προσομοίωσης από το LS-DYNA, (αριστερά). Παρατηρούμε τον πρώτο εκτατό λοβό, τον δεύτερο λοβό που προσεγγίζει την αξονοσυμμετρική κατάρρευση, τον τρίτο και τέταρτο μη εκτατό λοβό που είναι στραμμένοι μεταξύ τους κατά $\pi/4$.Στο δοκίμιο της πρέσας βλέπουμε τέσσερις εκτατούς λοβούς σε (ring) μορφή. Τελικό πάτημα της πρέσας στα 65.0 mm.

Σε αντιστραμμένη όψη έχουμε:



Έχουμε στο πάνω μέρος δύο 3D μη εκτατούς λοβούς που διαφέρουν κατά 45° μοίρες, ενώ στο δοκίμιο της πρέσας τέσσερις εκτατούς λοβούς.

Ακόμα, σε τρισδιάστατη ισομετρική όψη, παρουσιάζεται παρακάτω η τελική μορφή του δοκιμίου όπως προσομοιώθηκε στο LS-DYNA, με κατάρρευση του δοκιμίου έως τα 65.0 mm:



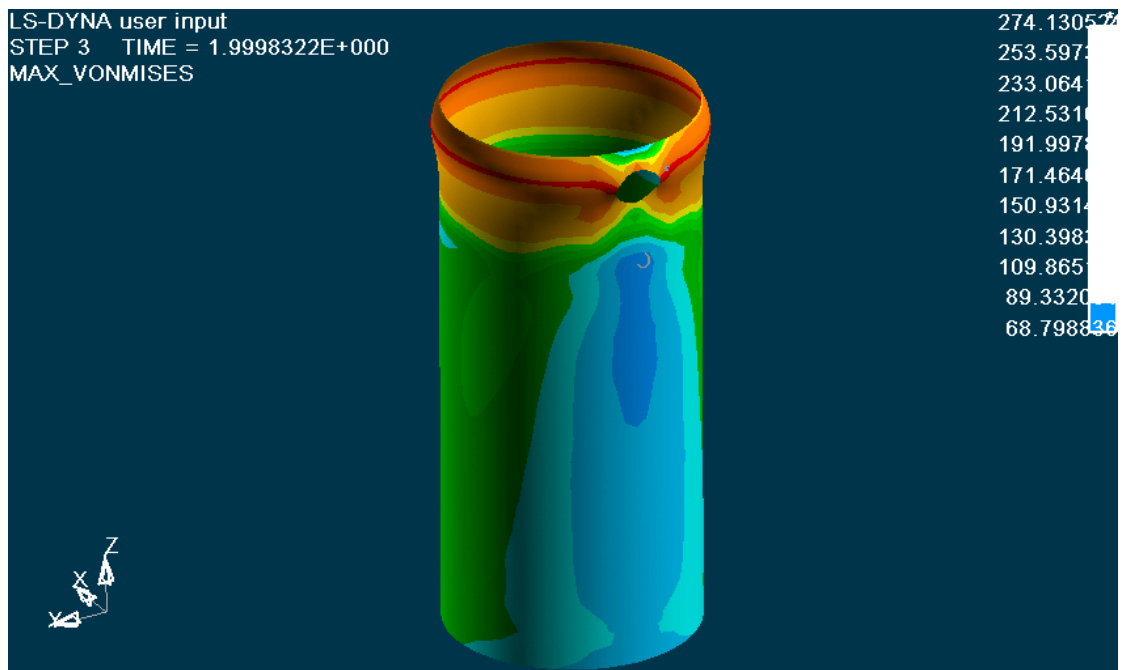
Η ολοκληρωμένη προσομοίωση κατάρρευσης του μοντέλου μας με το LS-DYNA, παρουσιάζεται και στα αρχεία βίντεο:

- Deformation isometric.Avi
- [Deformation side.Avi](#)
- Deformation rear.Avi

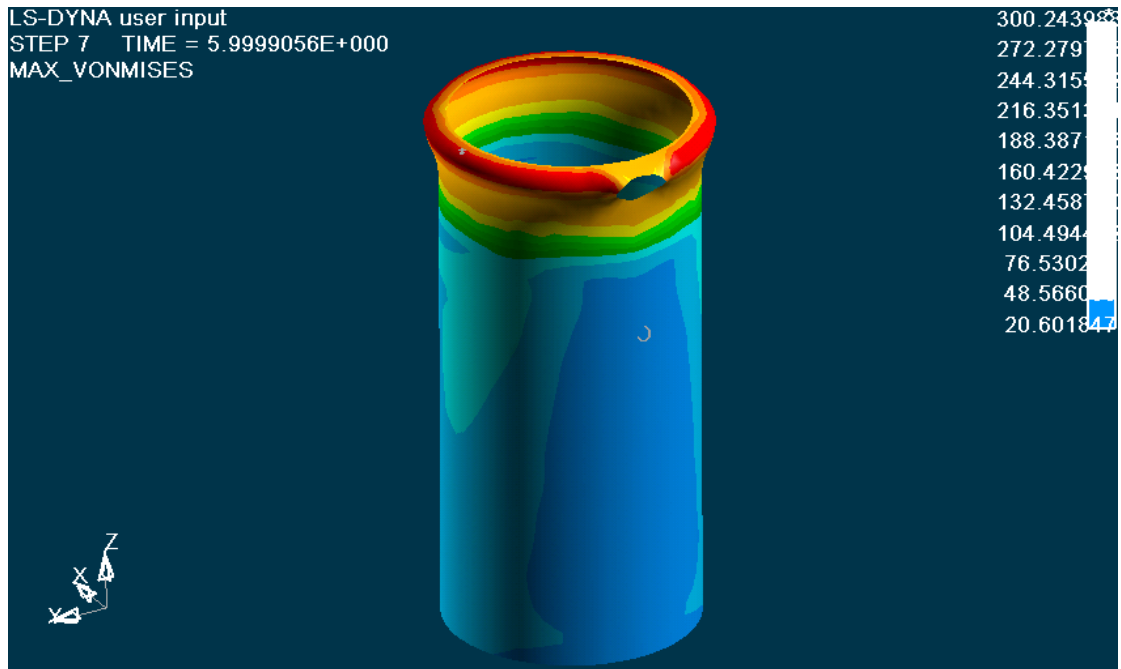
Ακολουθούν εικόνες από την κατανομή των τάσεων σε όλη την επιφάνεια του δοκιμίου κατά τα διάφορα στάδια της κατάρρευσής του:

Επιλέγοντας στον ETA POSTGL:

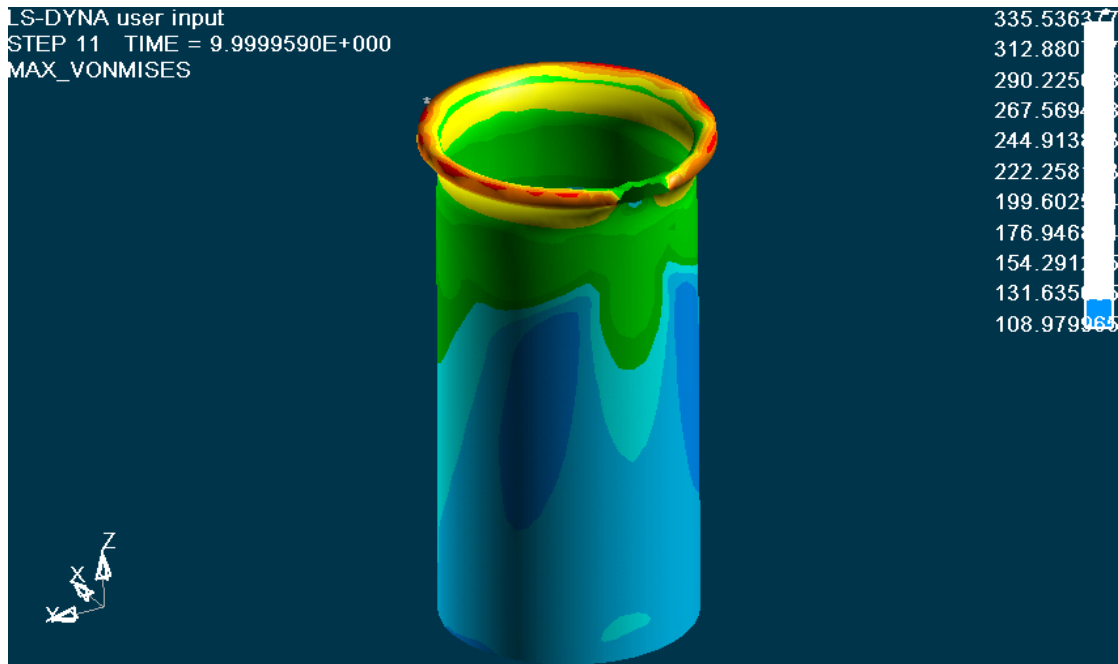
CONTOUR -> STRESS/STRAIN -> MAXIMUM VON MISES STRESSES:



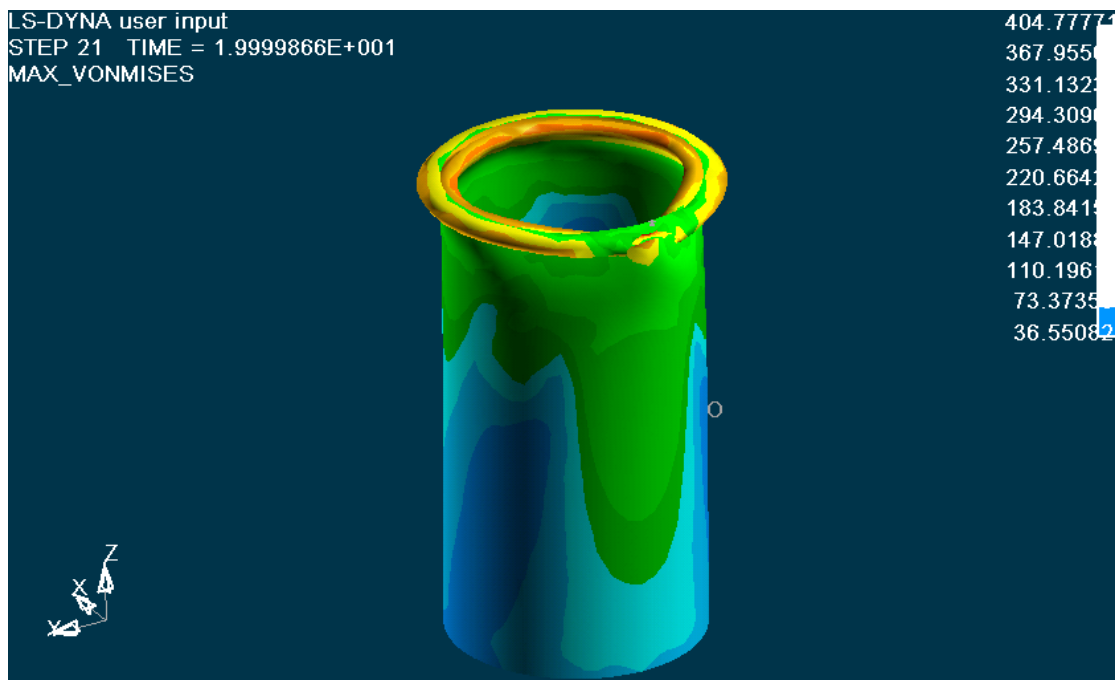
Κατανομή των τάσεων στο 2mm. Έχουμε εμφάνιση τάσεων στην περιοχή γύρω από την οπή του δοκιμίου, που όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 2, για την θεωρία των τάσεων γύρω από οπές, βλέπουμε ότι γύρω από την οπή του δοκιμίου, κατά την κατακόρυφη διεύθυνση που συμπίπτει με την διεύθυνση της αξονικής θλίψης του δοκιμίου, έχουμε τάσεις ίσες με $\sigma = 233 \text{ MPa}$, ενώ στο οριζόντιο μέσο επίπεδο της οπής, το οποίο είναι κάθετο ως προς το κατακόρυφο επίπεδο της αξονικής θλίψης του δοκιμίου, εκεί εμφανίζονται οι μέγιστες τάσεις για την κατάρρευση του δοκιμίου στη θέση της οπής, ίσες με $\sigma = 274 \text{ MPa}$. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή 274 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 στο 6 mm. Έχουμε μέγιστες τάσεις στην περιοχή γύρω από την οπή του δοκιμίου, που πιέζει το έμβολο της πρέσας, Ιδιαίτερα, στην περιοχή της οπής, οι τάσεις που εφαρμόζονται κατά την διεύθυνση της αξονικής θλίψης είναι $\sigma = 244 \text{ MPa}$, ενώ οι τάσεις που αναπτύσσονται στην οπή κάθετα προς την διεύθυνση αξονικής θλίψης του δοκιμίου, είναι $\sigma = 300 \text{ MPa}$. Το κάτω μέρος του δοκιμίου έχει μικρότερες τάσεις από ότι συμβαίνει στο πάνω μέρος του δοκιμίου στην περιοχή γύρω από την οπή. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή 300 MPa, που βλέπουμε ότι είναι μεγαλύτερη τιμή από την τάση διαρροής του δοκιμίου ($\sigma_A = 240 \text{ MPa}$), οπότε αστοχεί το υλικό στη θέση της οπής, οπότε σχηματίζεται ο πρώτος εκτατός λοβός στο επίπεδο αυτό, και συνεχίζεται η κατάρρευση του δοκιμίου από την θέση αυτή και με διεύθυνση προς τα κάτω.

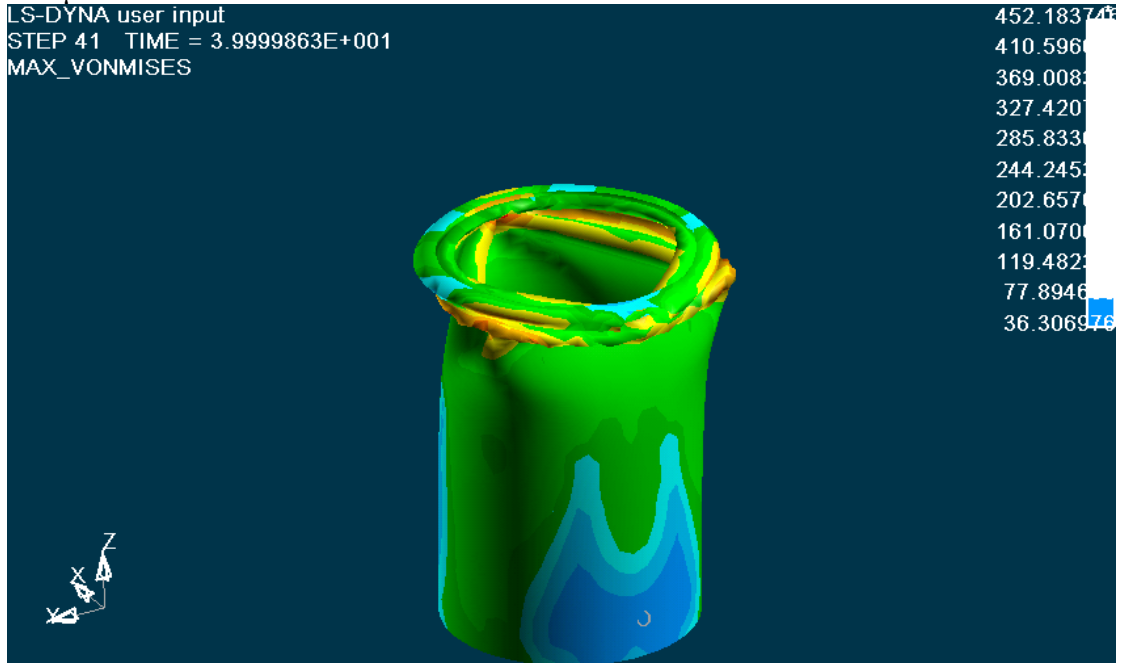


Κατανομή των τάσεων στο 10 mm. Έχουμε μέγιστες τάσεις στην περιοχή σχηματισμού του πρώτου εκτατού λοβού στα σημεία αναδίπλωσης. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή 335 MPa. Στο υπόλοιπο μέρος του μοντέλου μας εξακολουθούμε να έχουμε εμφάνιση μικρότερων τάσεων στο κάτω μέρος του δοκιμίου μας που κυμαίνονται από 131 ως 225MPa.

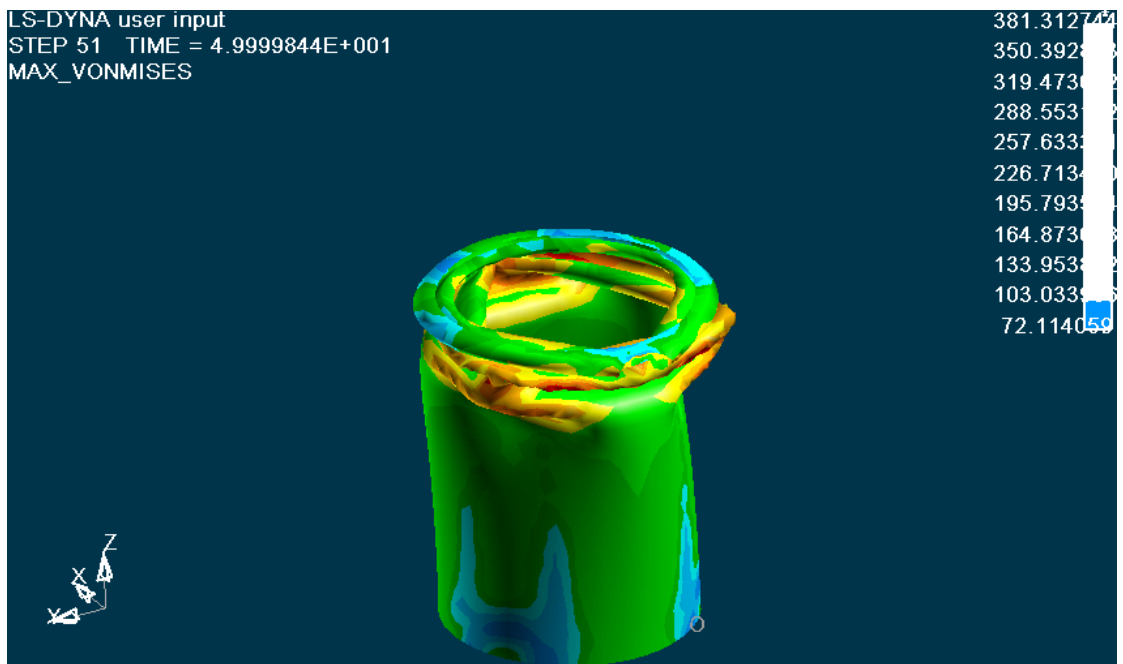


Κατανομή των τάσεων στο 20 mm. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή 404MPa. Ο πρώτος εκτατός λοβός έχει σχηματιστεί πλήρως, και ξεκινά και ο σχηματισμός του δεύτερου εκτατού λοβού, σε επίπεδο παράλληλο ως προς το προηγούμενο επίπεδο του αρχικού λοβού. Τάσεις σημαντικής τιμής 73MPa ως 257MPa εμφανίζονται τώρα σχεδόν σε όλο το μήκος καθ' ύψος του

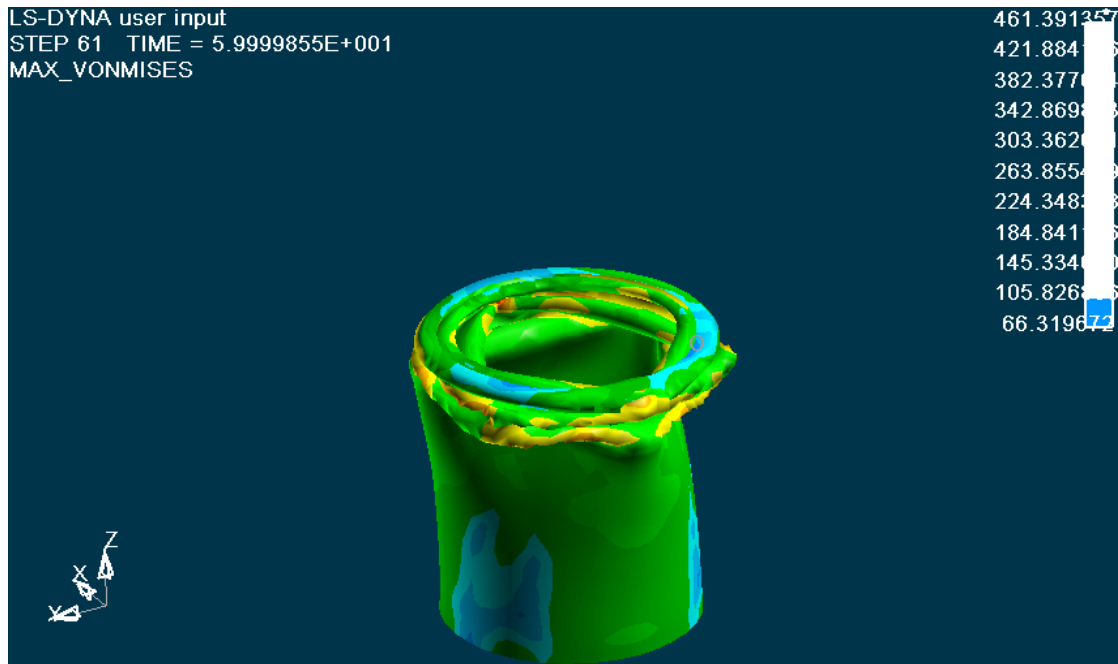
δοκιμίου.



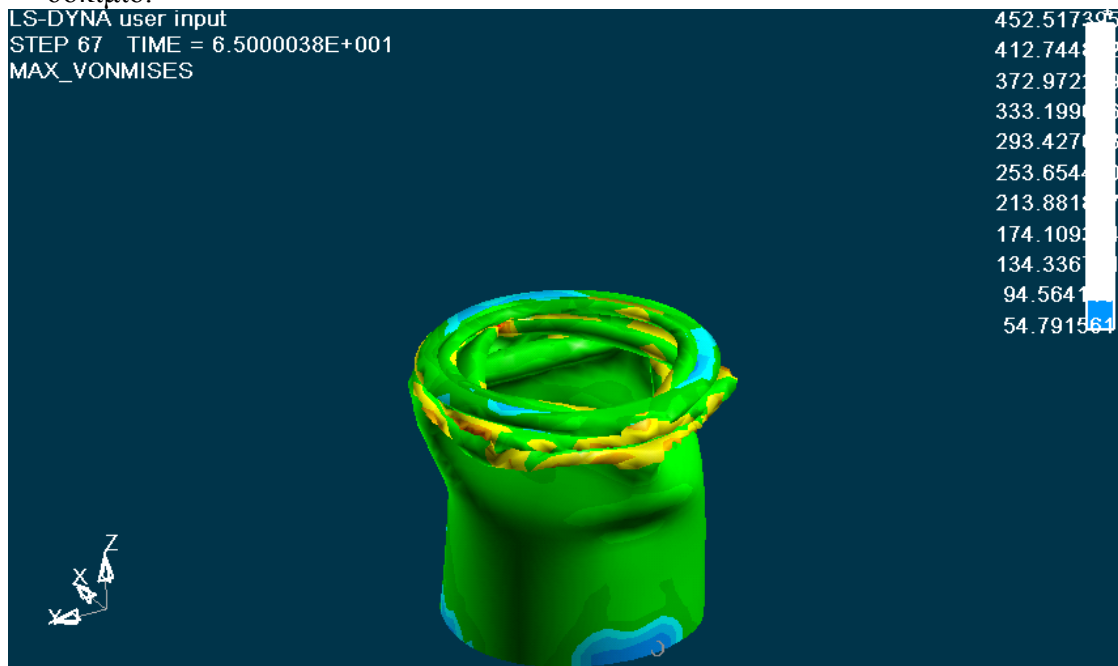
Κατανομή των τάσεων στο 40 mm. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή 452 MPa. Στο κάτω μέρος του δοκιμίου που έρχεται σε επαφή με την σταθερή πλάκα, έχουμε την ελάχιστη τιμή των τάσεων που φαίνεται στην εικόνα ίση με 77MPa και συμβολίζεται στο σχήμα με O.



Κατανομή των τάσεων στο 50 mm. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη εμφανιζόμενη τιμή 381 MPa. Έχουν σχηματιστεί οι δύο εκτατοί λοβοί και ο τρίτος μη εκτατός λοβός, και ήδη δημιουργείται και ο τέταρτος μη εκτατός λοβός. Στο κάτω μέρος του δοκιμίου έχουμε μικρότερες τάσεις $\sigma = 103$ MPa και την περιοχή αυτή την συμβολίζουμε με O.



Κατανομή των τάσεων στο 60 mm. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη εμφανιζόμενη τιμή 461 MPa. Η κατάρρευση του δοκιμίου, και η εμφάνιση του τρίτου και τέταρτου μη εκτατών λοβών, σε επίπεδα εναλλάξ στραμμένα μεταξύ τους κατά γωνία $\pi/4$, αρχίζει να είναι πλέον εμφανής στο δοκίμιο.

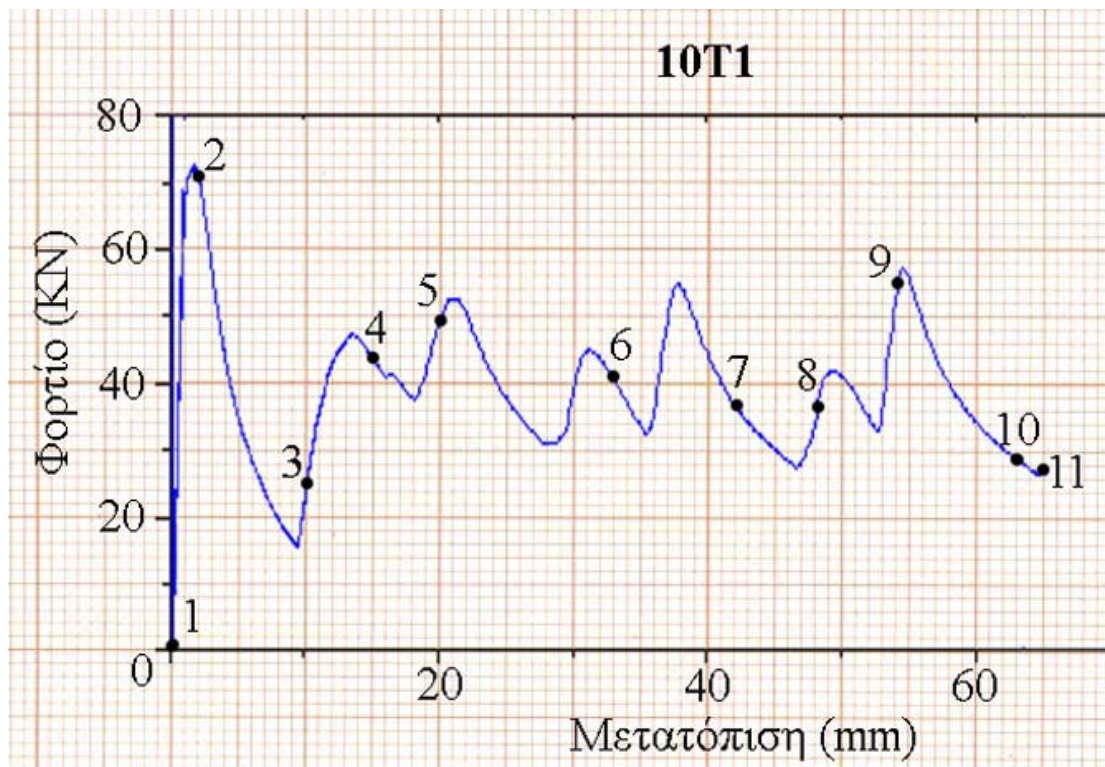


Κατανομή των τάσεων στο 65.0 mm. Οι τελικές τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη εμφανιζόμενη τιμή 452 MPa. Η κατάρρευση του δοκιμίου έχει πλέον ολοκληρωθεί, και οι τέσσερις τελικοί λοβοί έχουν σχηματιστεί πλήρως.

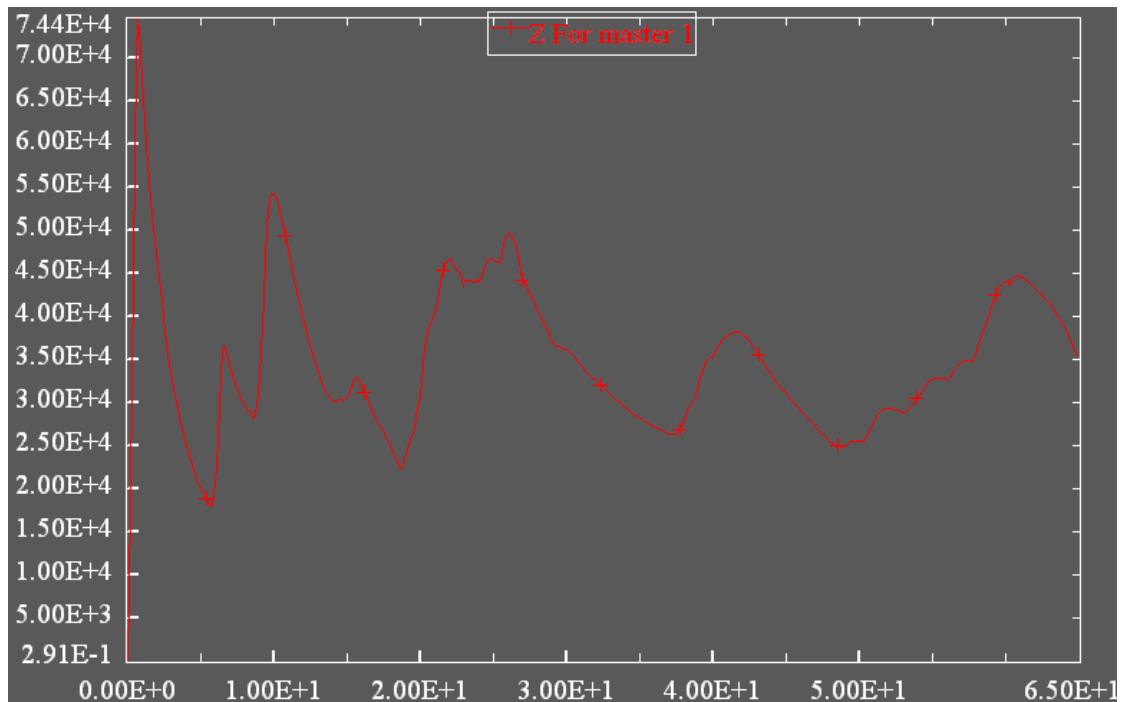
Η ολοκληρωμένη προσομοίωση της κατανομής των τάσεων του μοντέλου μας με το LS-DYNA, παρουσιάζεται και στο αρχείο βίντεο:

➤ [Contour Max Von Mises.Avi](#)

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 N**, 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: 65mm

Το μέγιστο φορτίο $P_{max} = 72.19 \text{ KN}$,

Το μέσο φορτίο $P_{mean} = 38.41 \text{ KN}$,

Η ομοιομορφία φορτίου $P_{max}/P_{mean} = 1,88$

Η συνολική ενέργεια που δαπανήθηκε για την αξονική κατάρρευση του δοκιμίου είναι $E = 2497 \text{ KN mm}$

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

Το μέγιστο φορτίο $P_{max} = 74.40 \text{ KN}$,

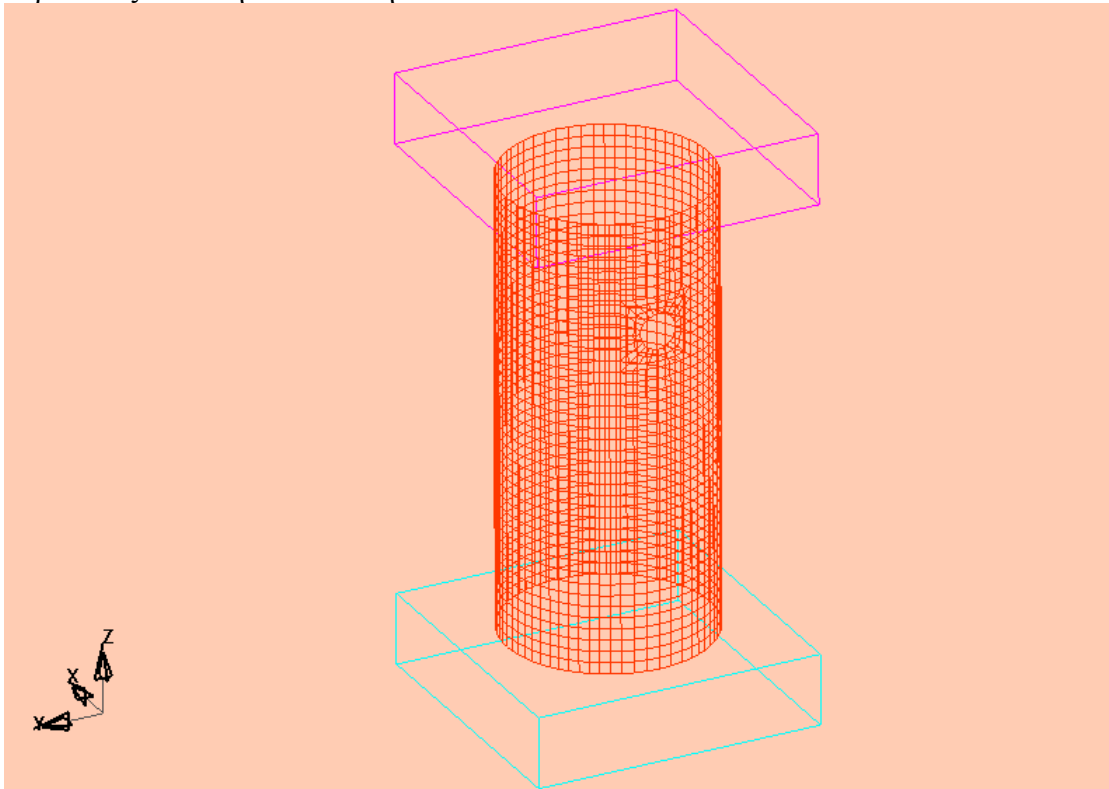
Το μέσο φορτίο $P_{mean} = 34,77 \text{ KN}$

Η ομοιομορφία φορτίου $P_{max}/P_{mean} = 2,14$

Η συνολική ενέργεια που δαπανήθηκε για την αξονική κατάρρευση του δοκιμίου είναι $E = 2260 \text{ KN mm}$

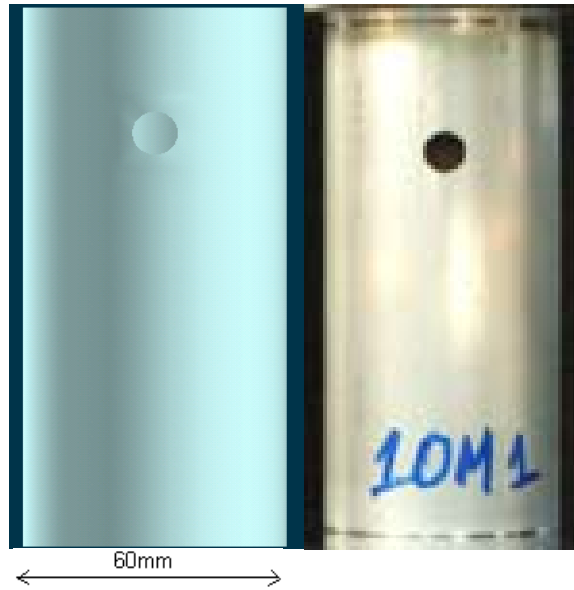
ΕΝΟΤΗΤΑ 5-6 : ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΙΑΣ ΜΗ ΔΙΑΜΠΕΡΟΥΣ ΟΠΗΣ Φ10 ΣΤΟ ¼ ΤΟΥ ΥΨΟΥΣ Η (TYPE_10M1).

Το μοντέλο του δοκιμίου κυκλικής διατομής με μια οπή μη διαμπερή, διαμέτρου Φ10 σε ύψος ¼ του δοκιμίου, και με πάχος τοιχώματος 2mm, παρουσιάζεται στην ακόλουθη εικόνα:



Σχ.1, Απεικόνιση πλέγματος στο LS-DYNA 3D, για κυκλικής διατομής δοκίμιο με μια μη διαμπερή οπή διαμέτρου Φ10 στο ¼ του ύψους του.

Οι αντίστοιχες φάσεις προσομοίωσης της κατάρρευσης του δοκιμίου αυτού, που κατέγραψα με τη χρήση του LS-DYNA, σε σύγκριση με τις φάσεις που έλαβα από την ελληνική βιβλιογραφία [1] 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 μη εκτατού λοβού. Παρατηρούμε ότι το πραγματικό δοκίμιο στην πρέσα, αρχίζει να καταρρέει στο $\frac{1}{4}$ του ύψους του (θέση οπή), ενώ και στο μοντέλο του ls-dyna, η αρχική κατάρρευση σημειώνεται στη θέση αυτή του δοκιμίου αλλά και στην επιφάνεια της διατομής που έρχεται σε επαφή με την πρέσα . Πάτημα της πρέσας στα 3 mm.



2^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Στο δοκίμιο του ls-dyna έχουμε στην πάνω επιφάνεια δημιουργία ενός εκτατού λοβού και πάνω από την περιοχή της οπής πτύχωση με ροή του υλικού προς τα έξω. Πάτημα της πρέσας στα 7 mm.



3^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Στο δοκίμιο του ls-dyna έχουμε εντονότερη την διαρροή του υλικού στην περιοχή του δοκιμίου που είναι η οπή ενώ συνεχίζεται η δημιουργία του εκτατού λοβού. Στο πραγματικό δοκίμιο φαίνονται οι μη εκτατοί λοβοί στην οπή και πάνω από αυτήν. Πάτημα της πρέσας στα 12 mm.



4^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Στο δοκίμιο του Is-dyna έχουμε δημιουργία δεύτερου σχεδόν εκτατού λοβού στην περιοχή της οπής σε παράλληλο επίπεδο με τον προηγούμενο εκτατό λοβό. Έχουμε μικρή ροή υλικού προς τα έξω στην περιοχή της οπής για αυτό ο λοβός δεν έχει ακριβώς αξονοσυμμετρική μορφή. Πάτημα της πρέσας στα 24 mm.



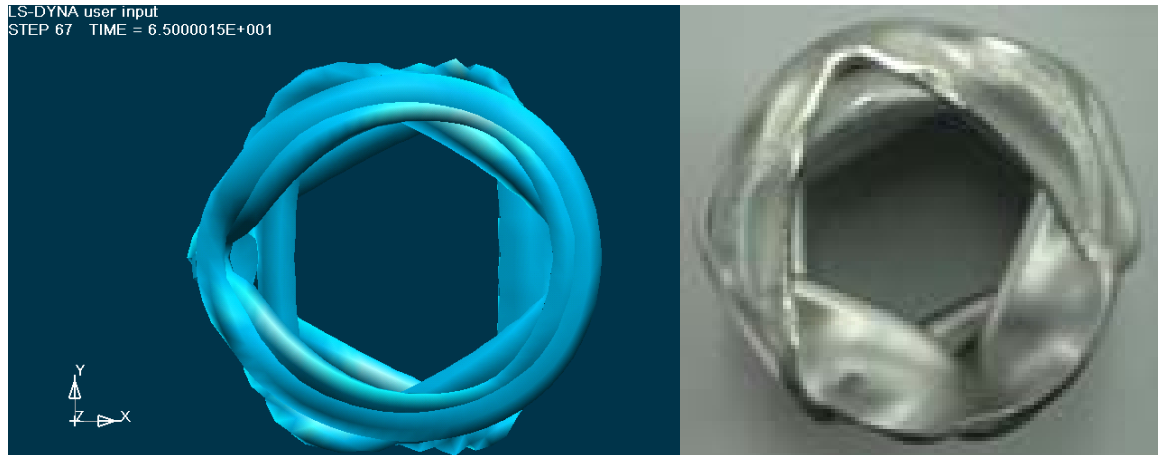
5^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Στο δοκίμιο του Is-dyna έχουμε συνέχιση για δημιουργία τρίτου μη εκτατού λοβού σε παράλληλο επίπεδο με τον προηγούμενο έκτατο λοβό. Στο πραγματικό δοκίμιο ο πρώτος λοβός σχηματίζεται στο ύψος της οπής πράγμα που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η παρουσία της επηρεάζει τον μηχανισμό κατάρρευσης. **Κάθε μη εκτατός λοβός διαφέρει από τον επόμενο σε γωνία κατά $180/3=60^\circ$** . Πάτημα της πρέσας στα 43 mm.



6^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Στο δοκίμιο του Is-dyna έχουμε τελείωμα του τρίτου εκτατού λοβού και εμφανής την εισχώρηση του υλικού της περιοχής της οπής στο εσωτερικό του δοκιμίου όπως και στο πραγματικό δοκίμιο. **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 52 mm.



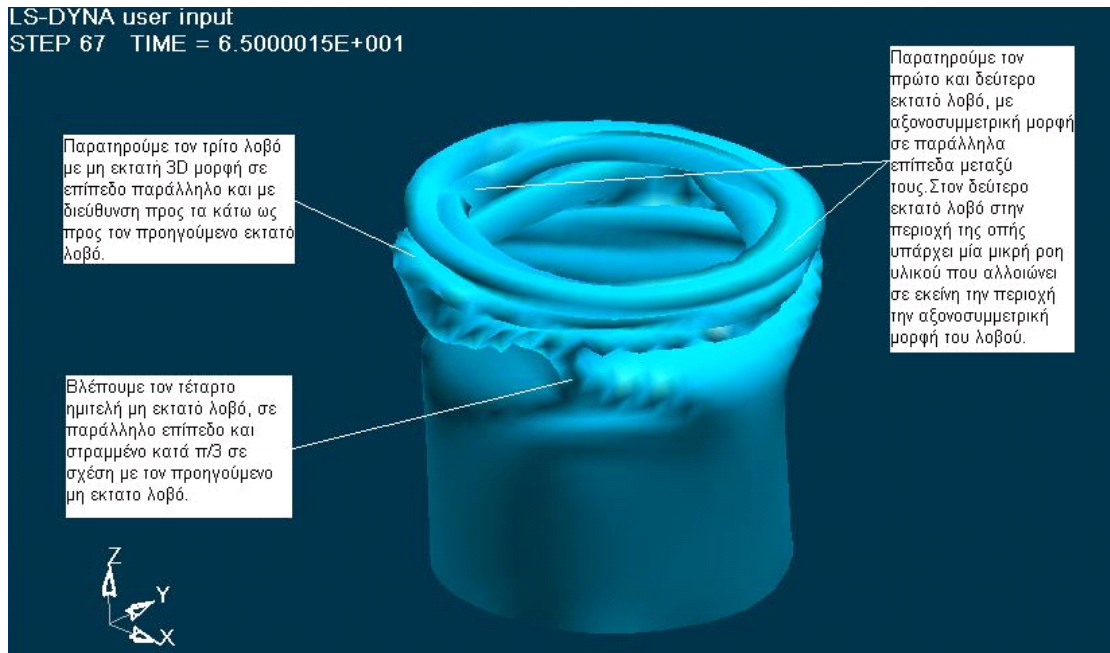
7^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Τέλος αξονικής κατάρρευσης δοκιμίου στην υδραυλική πρέσα. Η κατάρρευση του δοκιμίου έχει πλέον ολοκληρωθεί, και οι τρεις τελικοί έκτατοι και μη εκτατοί λοβοί έχουν σχηματιστεί πλήρως ενώ ο τέταρτος μη εκτατός λοβός παραμένει ημιτελής. Πάτημα της πρέσας στα 65.0 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 στο δοκίμιο του ls-dyna δύο εκτατούς και δύο μη εκτατούς λοβούς σε επίπεδα εναλλάξ κατά 60° ενώ στο πραγματικό δοκίμιο τέσσερις μη εκτατούς λοβούς. Τελικό πάτημα της πρέσας στα 65.0 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 65.0 mm:



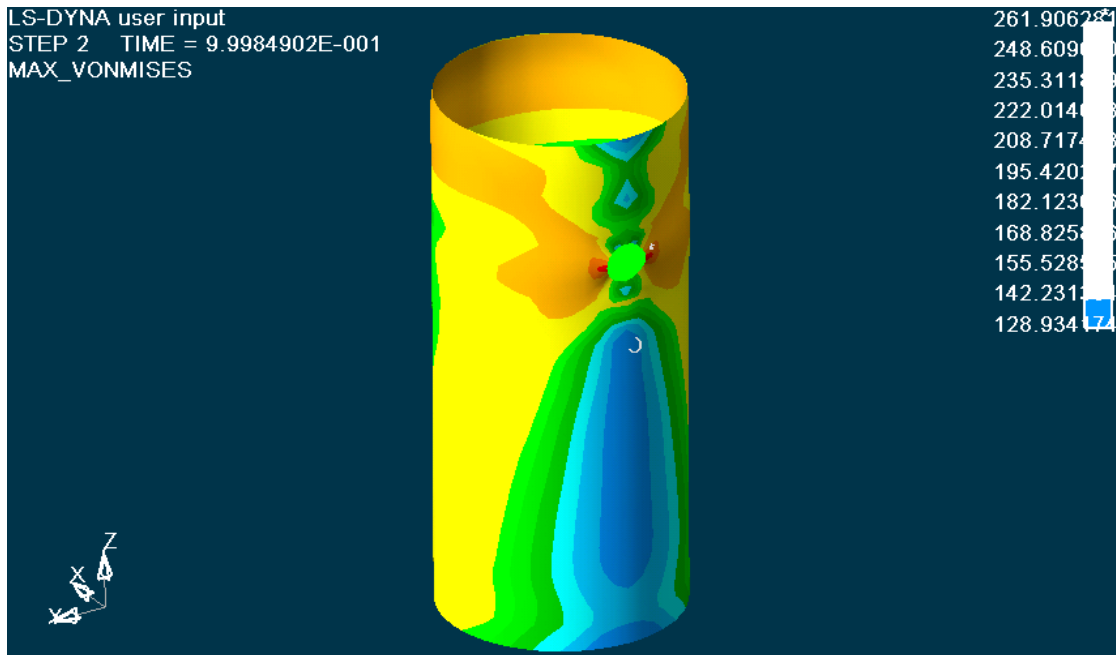
Η ολοκληρωμένη προσομοίωση κατάρρευσης του μοντέλου μας με το LS-DYNA, παρουσιάζεται και στα αρχεία βίντεο:

- Deformation isometric.Avi
- [Deformation side .Avi](#)
- Deformation rear.Avi

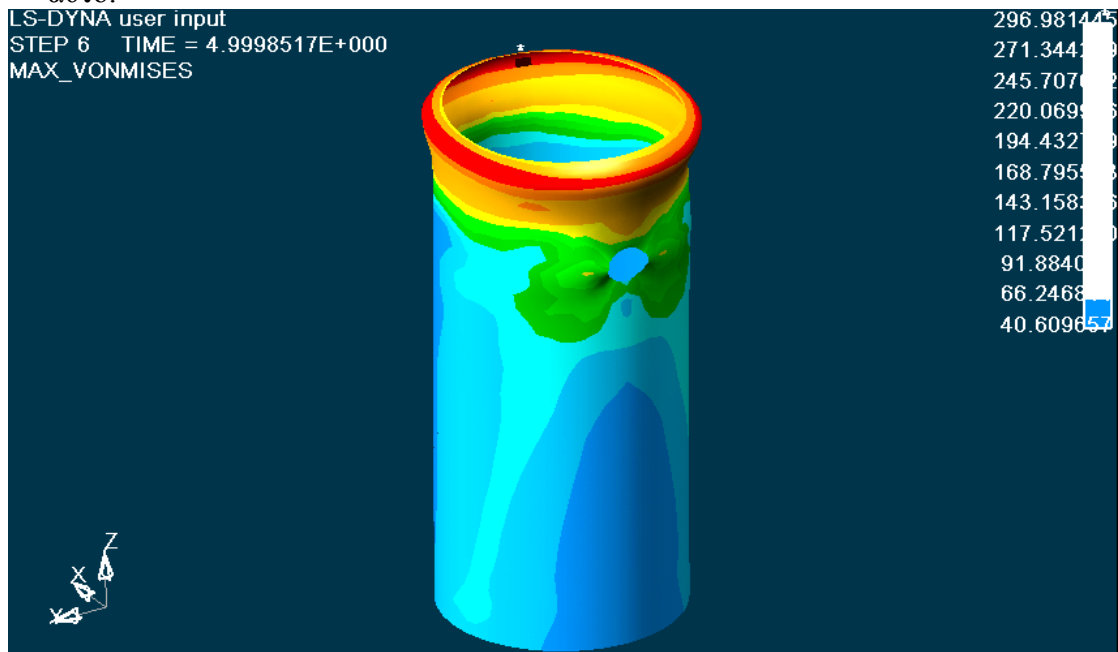
Ακολουθούν εικόνες από την κατανομή των τάσεων σε όλη την επιφάνεια του δοκιμίου κατά τα διάφορα στάδια της κατάρρευσής του:

Επιλέγοντας στον ETA POSTGL:

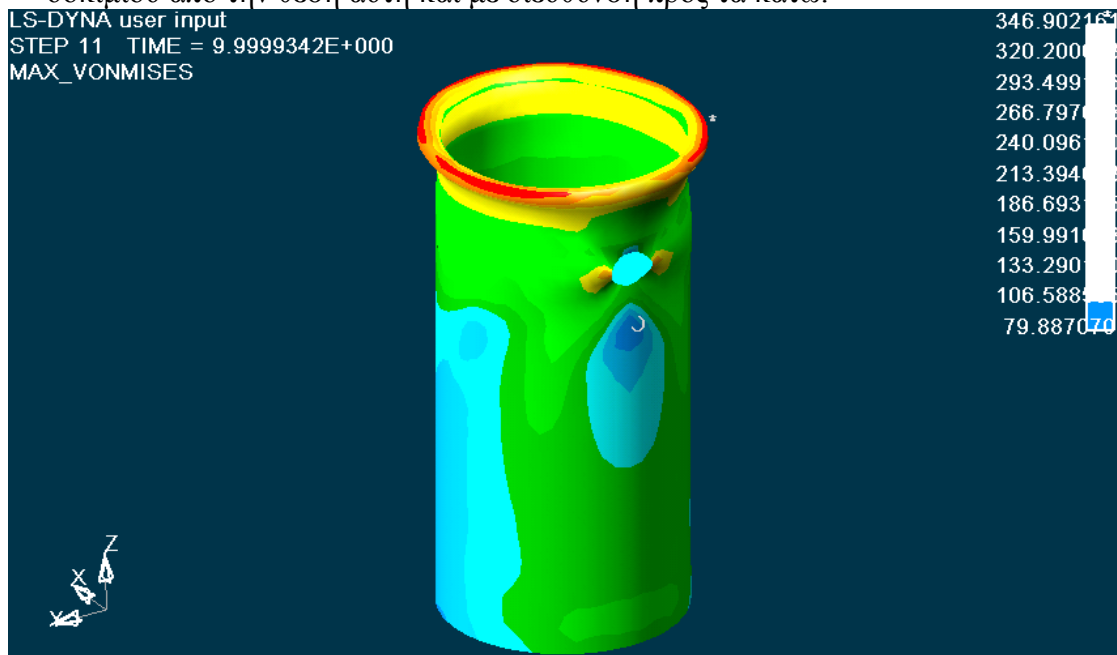
CONTOUR -> STRESS/STRAIN -> MAXIMUM VON MISES STRESSES:



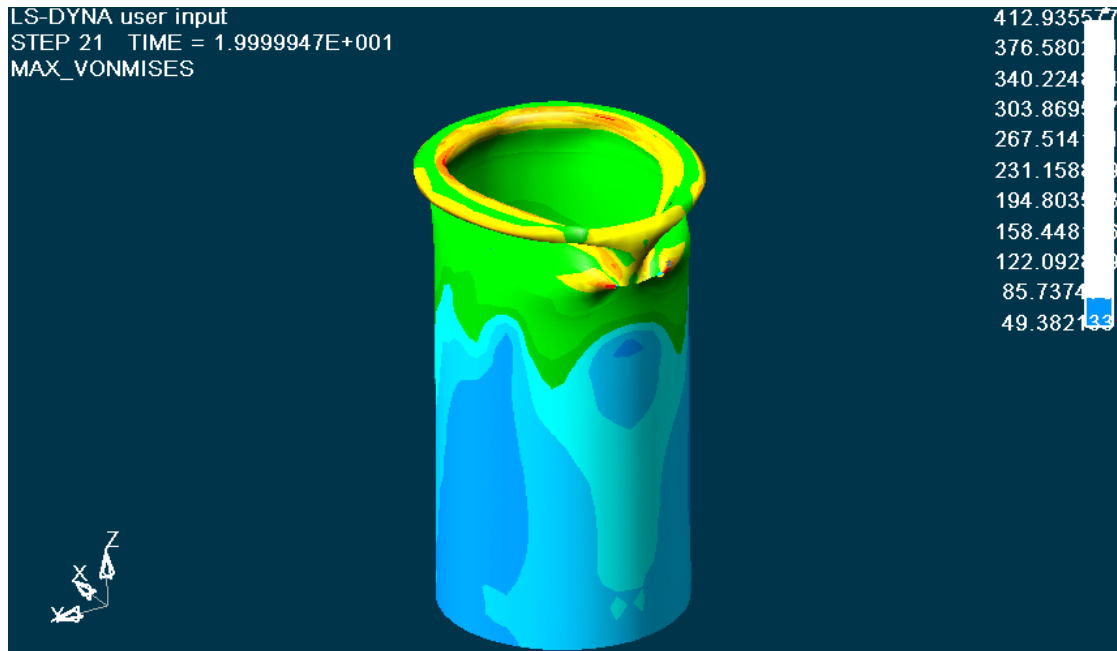
Κατανομή των τάσεων στο 1mm. Έχουμε εμφάνιση τάσεων στην περιοχή γύρω από την οπή του δοκιμίου, που όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 2, για την θεωρία των τάσεων γύρω από οπές, βλέπουμε ότι γύρω από την οπή του δοκιμίου, κατά την κατακόρυφη διεύθυνση που συμπίπτει με την διεύθυνση της αξονικής θλίψης του δοκιμίου, έχουμε τάσεις ίσες με $\sigma = 195 \text{ MPa}$, ενώ στο οριζόντιο μέσο επίπεδο της οπής, το οποίο είναι κάθετο ως προς το κατακόρυφο επίπεδο της αξονικής θλίψης του δοκιμίου, εκεί εμφανίζονται οι μέγιστες τάσεις για την κατάρρευση του δοκιμίου στη θέση της οπής, ίσες με $\sigma = 261 \text{ MPa}$. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή 261 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.



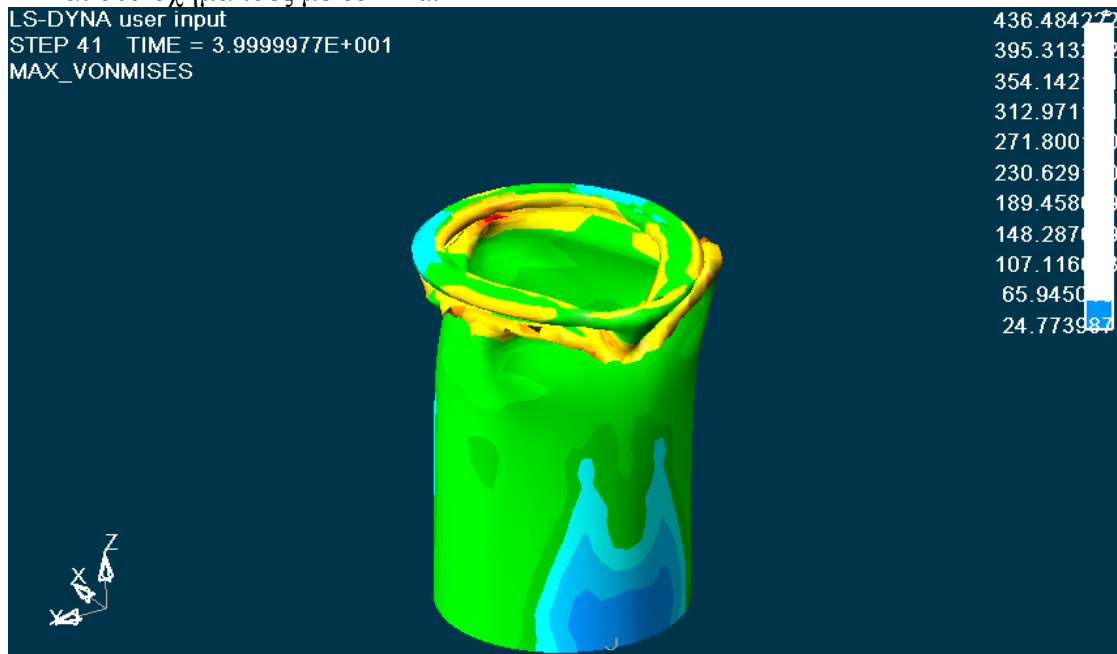
Κατανομή των τάσεων στο 5 mm. Έχουμε μέγιστες τάσεις στην περιοχή γύρω από την οπή του δοκιμίου και στην επιφάνεια της διατομής που πιέζει το έμβολο της πρέσας, Ιδιαίτερα, στην περιοχή της οπής, οι τάσεις που εφαρμόζονται κατά την διεύθυνση της αξονικής θλίψης είναι $\sigma=168 \text{ MPa}$, ενώ οι τάσεις που αναπτύσσονται στην οπή κάθετα προς την διεύθυνση αξονικής θλίψης του δοκιμίου, είναι $\sigma = 194 \text{ MPa}$. Το κάτω 1/2 μέρος του δοκιμίου έχει μικρότερες τάσεις από ότι συμβαίνει στο υπόλοιπο μέρος του δοκιμίου και εμφανίζει ελάχιστες τάσεις στην κάτω διατομή που έρχεται σε επαφή με την πλάκα. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή 296 MPa, που βλέπουμε ότι είναι μεγαλύτερη τιμή από την τάση αντοχής του δοκιμίου ($\sigma_A= 240 \text{ MPa}$), οπότε διαρρέει το υλικό στη θέση της οπής και της πάνω διατομής, οπότε σχηματίζεται ο πρώτος εκτατός λοβός στο επίπεδο αυτό, και συνεχίζεται η κατάρρευση του δοκιμίου από την θέση αυτή και με διεύθυνση προς τα κάτω.



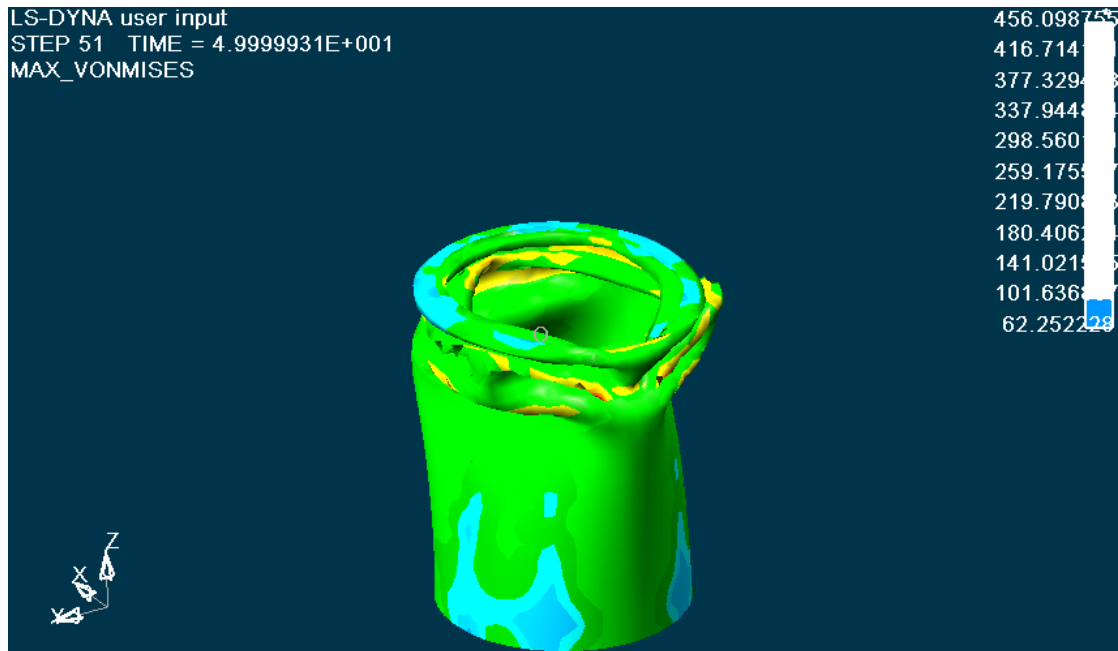
Κατανομή των τάσεων στο 10 mm. Έχουμε μέγιστες τάσεις στην περιοχή σχηματισμού του πρώτου λοβού στα σημεία αναδίπλωσης. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή 346 MPa. Τάσεις σημαντικής τιμής ίσες με 186MPa, εμφανίζονται σχεδόν σε όλο το μήκος καθ' ύψος του δοκιμίου Στο υπόλοιπο μέρος του μοντέλου μας κάτω από την οπή, εξακολουθούμε να έχουμε εμφάνιση μικρότερων τάσεων κυρίως στο κάτω 1/2 του δοκιμίου μας με ελάχιστη τάση την περιοχή με σύμβολο 0.



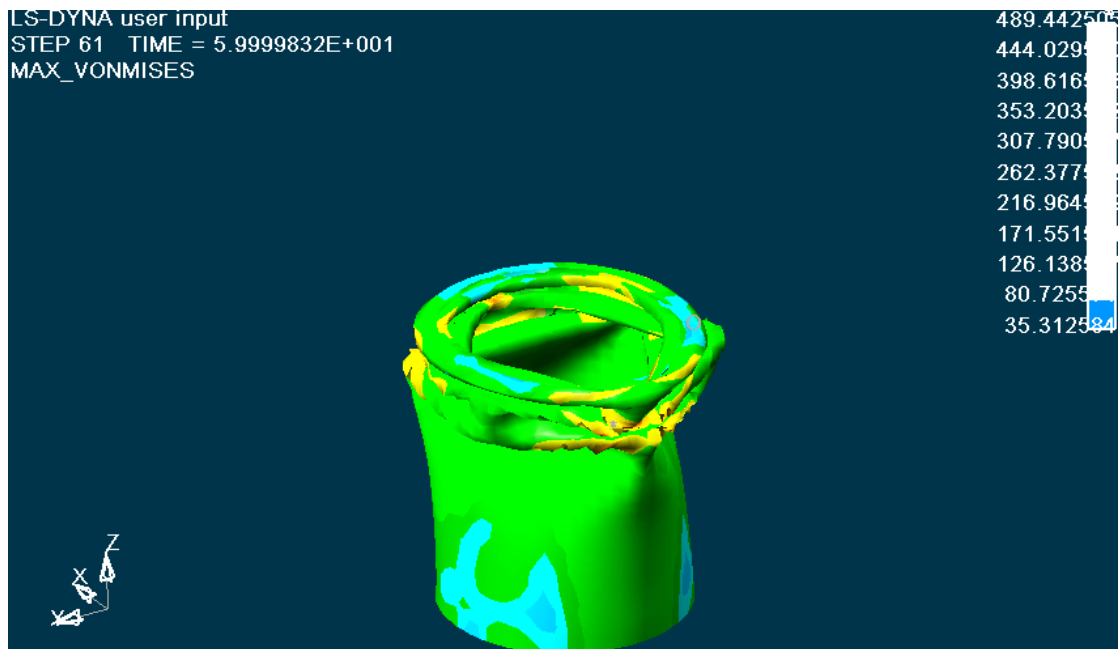
Κατανομή των τάσεων στο 20 mm. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή 412 MPa. Ο πρώτος εκτατός λοβός έχει σχηματιστεί πλήρως, και ξεκινά και ο σχηματισμός του δεύτερου σχεδόν εκατοού λοβού, σε επίπεδο παράλληλο προς τα κάτω στην περιοχή της οπής. Τάσεις σημαντικής τιμής, εμφανίζονται σχεδόν σε όλο το μήκος καθ' ύψος του δοκιμίου ίσες με 158MPa. Στην κάτω διατομή του δοκιμίου σημειώνονται μικρότερες τάσεις που φαίνονται και στο σχήμα ίσες με 85MPa.



Κατανομή των τάσεων στο 40 mm. Έχουμε μέγιστες τάσεις στην περιοχή σχηματισμού του δεύτερου σχεδόν εκατοού λοβού στα σημεία αναδίπλωσης ίσες με 436 MPa. Τάσεις σημαντικής τιμής, εμφανίζονται σχεδόν σε όλο το μήκος καθ' ύψος του δοκιμίου ίσες με 230 MPa. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με ελάχιστη τιμή 65 MPa στην περιοχή της κάτω διατομής που συμβολίζεται με O.

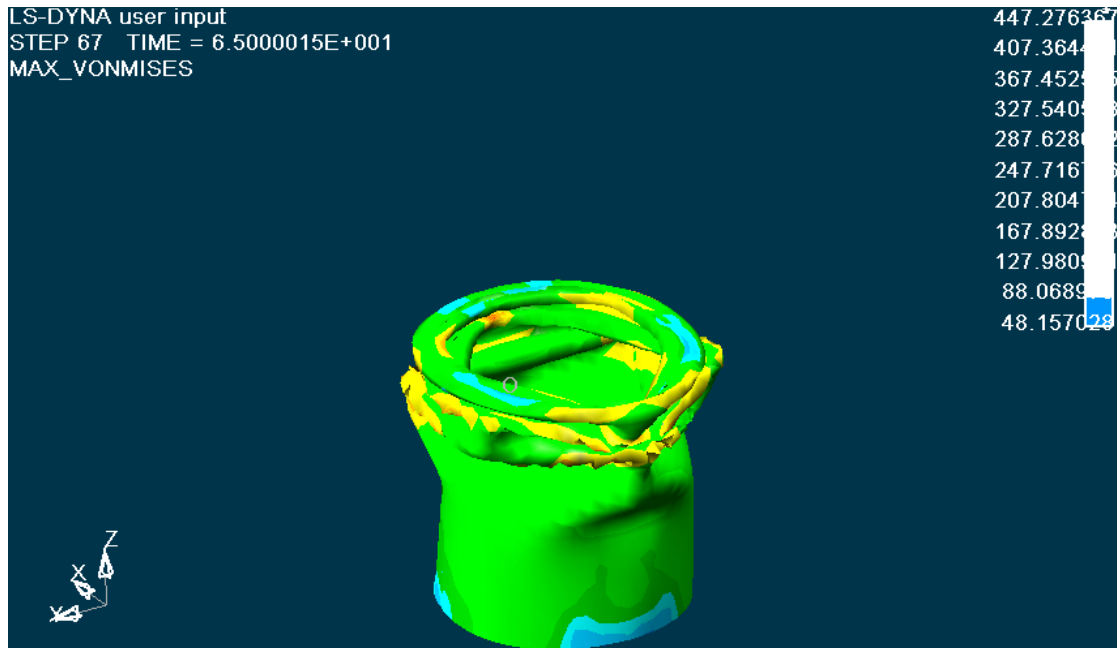


Κατανομή των τάσεων στο 50 mm. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη εμφανιζόμενη τιμή 456 MPa στις ακμές του τρίτου μη έκτατου λοβού. Έχουν σχηματιστεί πλήρως ο δεύτερος μη εκτατός λοβός, και ήδη δημιουργείται και ο τρίτος μη εκτατός λοβός. Στο κάτω μισό μέρος του δοκιμίου έχουμε μικρότερες τάσεις ίσες με $\sigma = 141$ MPa. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στο σχήμα με ελάχιστη τιμή τάσεων στην περιοχή της πάνω διατομής του δοκιμίου που συμβολίζεται με O.



Κατανομή των τάσεων στο 60 mm. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη εμφανιζόμενη τιμή 489 MPa. Ο τρίτος μη εκτατός λοβός έχει ολοκληρωθεί και αρχίζει η δημιουργία του τέταρτου μη εκτατού λοβού. Η κατάρρευση του δοκιμίου, και η εμφάνιση των δύο εκτατών και των δύο μη

εκτατών λοβών, σε επίπεδα εναλλάξ στραμμένα μεταξύ τους κατά γωνία $\pi/3$, αρχίζει να είναι πλέον εμφανής σε όλο το δοκίμιο.

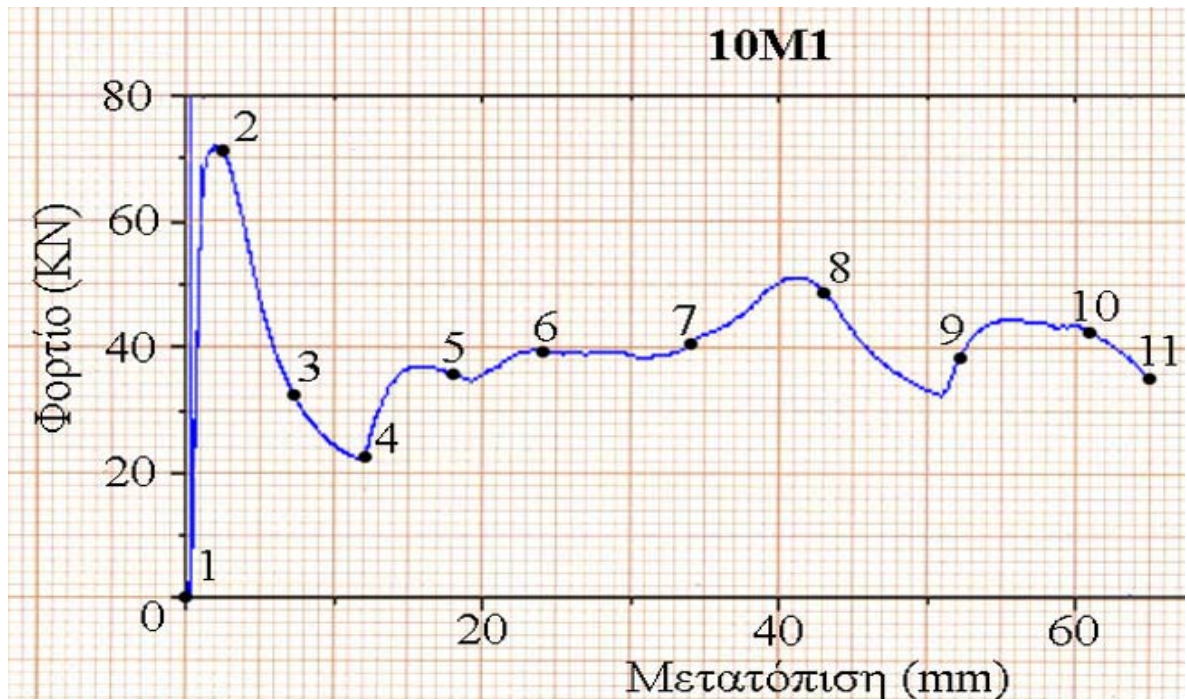


Κατανομή των τάσεων στο 65.0 mm. Οι τελικές τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη εμφανιζόμενη τιμή 447 MPa. Η κατάρρευση του δοκιμίου έχει πλέον ολοκληρωθεί, και οι τρεις τελικοί εκτατοί και μη εκτατοί λοβοί έχουν σχηματιστεί πλήρως ενώ ο τέταρτος μη εκτατός λοβός παραμένει ημιτελής.

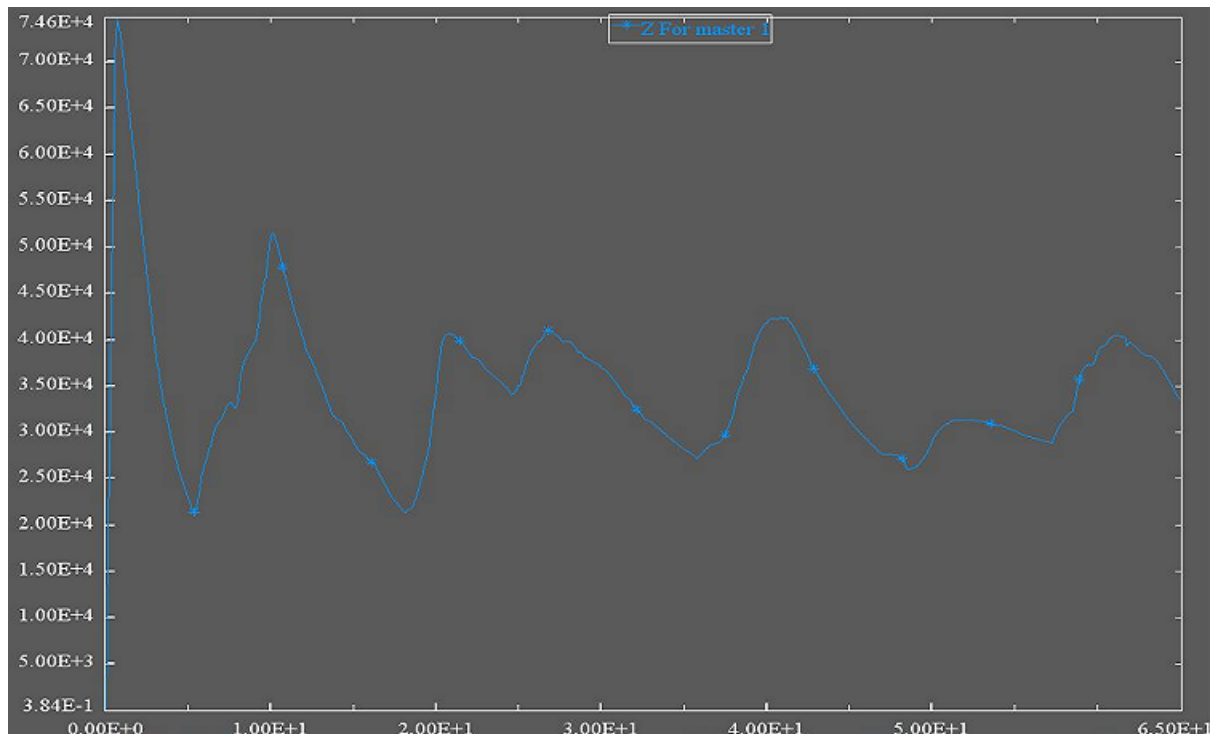
Η ολοκληρωμένη προσομοίωση της κατανομής των τάσεων του μοντέλου μας με το LS-DYNA, παρουσιάζεται και στο αρχείο βίντεο:

➤ [Contour Max Von Mises. Avi](#)

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



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

Το μέγιστο φορτίο $P_{max} = 71,84 \text{ KN}$,

Το μέσο φορτίο $P_{mean} = 39,48 \text{ KN}$,

Η ομοιομορφία φορτίου $P_{max}/P_{mean} = 1,82$

Η συνολική ενέργεια που δαπανήθηκε για την αξονική κατάρρευση του δοκιμίου είναι $E = 2566 \text{ KN mm}$

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

Το μέγιστο φορτίο $P_{max} = 74,6 \text{ KN}$,

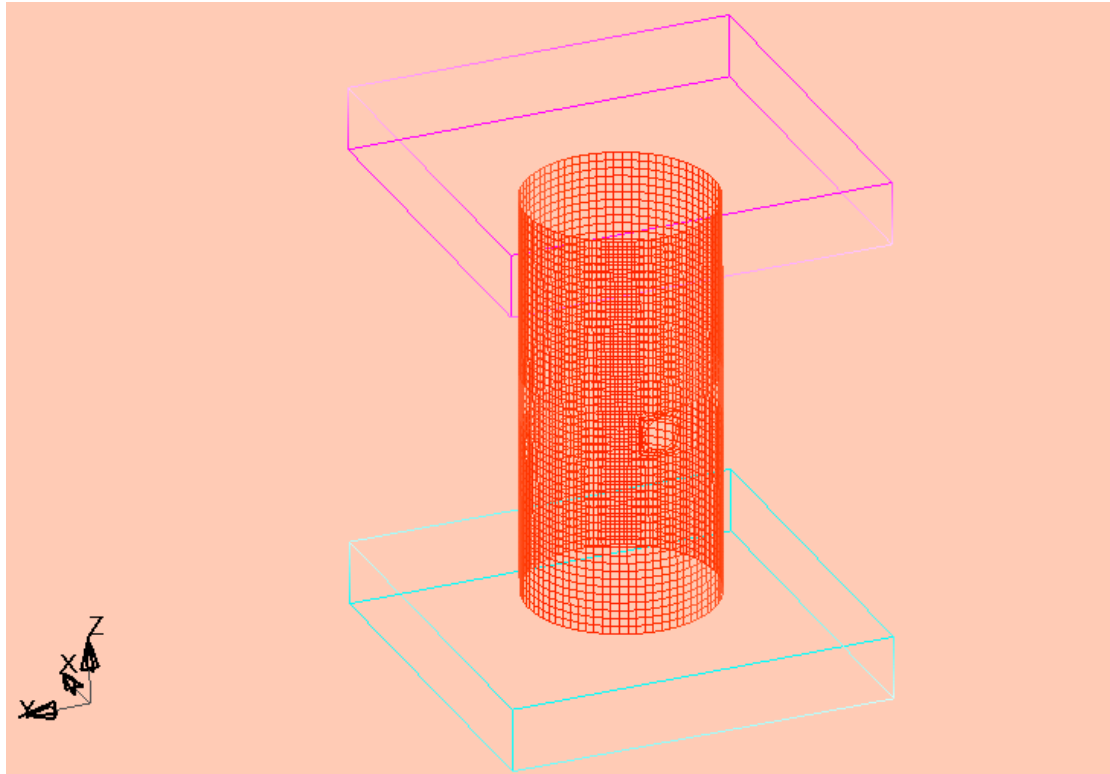
Το μέσο φορτίο $P_{mean} = 34,5 \text{ KN}$,

Η ομοιομορφία φορτίου $P_{max}/P_{mean} = 2,16$

Η συνολική ενέργεια που δαπανήθηκε για την αξονική κατάρρευση του δοκιμίου είναι $E = 2243 \text{ KN mm}$

ΕΝΟΤΗΤΑ 5-7: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΙΑΣ ΜΗ ΔΙΑΜΠΕΡΟΥΣ ΟΠΗΣ Φ10 ΣΤΟ 1/2 ΤΟΥ ΥΨΟΥΣ Η ΤΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ (TYPE_10B1).

Το μοντέλο του δοκιμίου κυκλικής διατομής με μια οπή μη διαμπερή, διαμέτρου Φ10 στο 1/2 του ύψους Η του δοκιμίου και με πάχος τοιχώματος 2mm, παρουσιάζεται στην ακόλουθη εικόνα:



Σχ.1, Απεικόνιση πλέγματος στο LS-DYNA 3D, για κυκλικής διατομής δοκίμιο με μια μη διαμπερή οπή διαμέτρου Φ10.

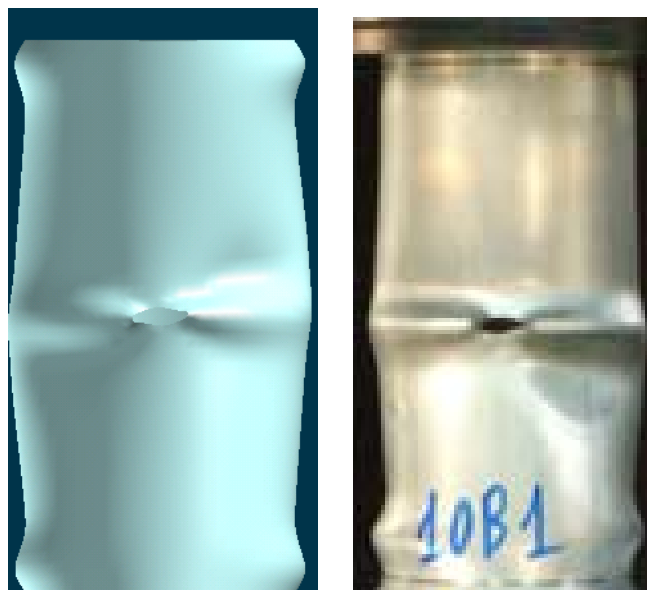
Οι αντίστοιχες φάσεις προσομοίωσης της κατάρρευσης του δοκιμίου αυτού, που κατέγραψα με τη χρήση του LS-DYNA, σε σύγκριση με τις φάσεις που έλαβα από την ελληνική βιβλιογραφία [1] με την χρήση πρέσας Instron, παρουσιάζονται στις επόμενες σελίδες:



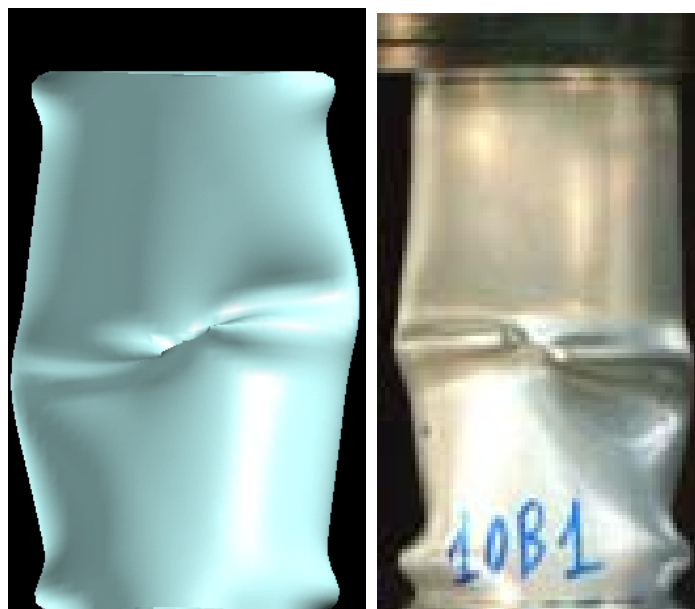
Αρχική τοποθέτηση του δοκιμίου στην πρέσα, και έναρξη της διαδικασίας αξονικής θλίψης του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά). Η έναρξη της προσομοίωσης του μοντέλου μας στο LS-DYNA (αριστερα).



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 μη εκτατού λοβού. Παρατηρούμε ότι το πραγματικό δοκίμιο στην πρέσα, αρχίζει να καταρρέει στο μισό του ύψους του (θέση οπής), ενώ και στο μοντέλο του ls-dyna, η αρχική κατάρρευση σημειώνεται στη θέση αυτή του δοκιμίου αλλά έχουμε παραμόρφωση που τείνουν για σχηματισμό αξονοσυμμετρικού λοβού και στην άνω και κάτω διατομή που έρχονται σε επαφή με τις πλάκες. Πάτημα της πρέσας στα 2 mm.

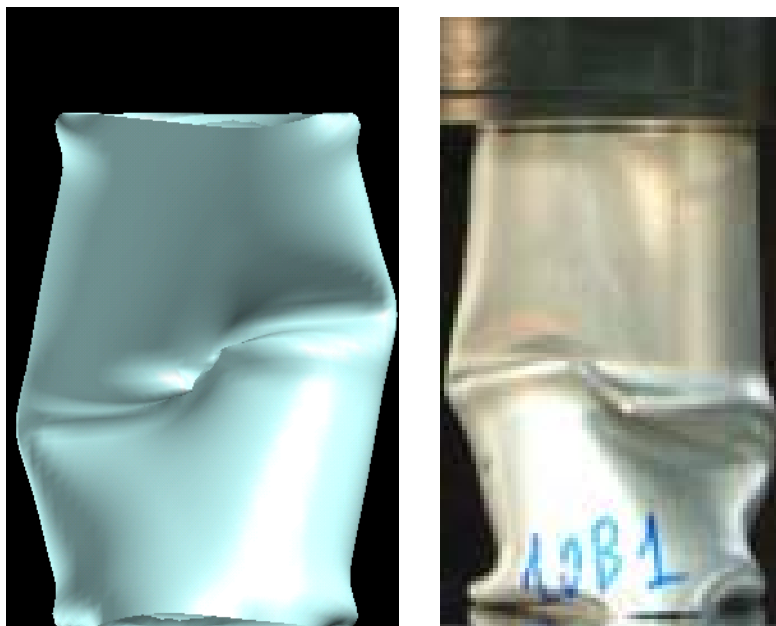


2^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Στα δύο δοκίμια έχουμε δημιουργία αρχικού σχεδόν εκτατού λοβού στην θέση της οπής και στην θέση επαφής με την σταθερή πλάκα. Παρατηρούμε στο δοκίμιο του Is-dyna στην θέση της οπής μια μορφή λυγισμού κατά EYLER αλλά και στην πάνω διατομή που έρχεται σε επαφή με το έμβολο της πρέσας δημιουργία αρχικού σχεδόν εκτατού λοβού. Πάτημα της πρέσας στα 6 mm.

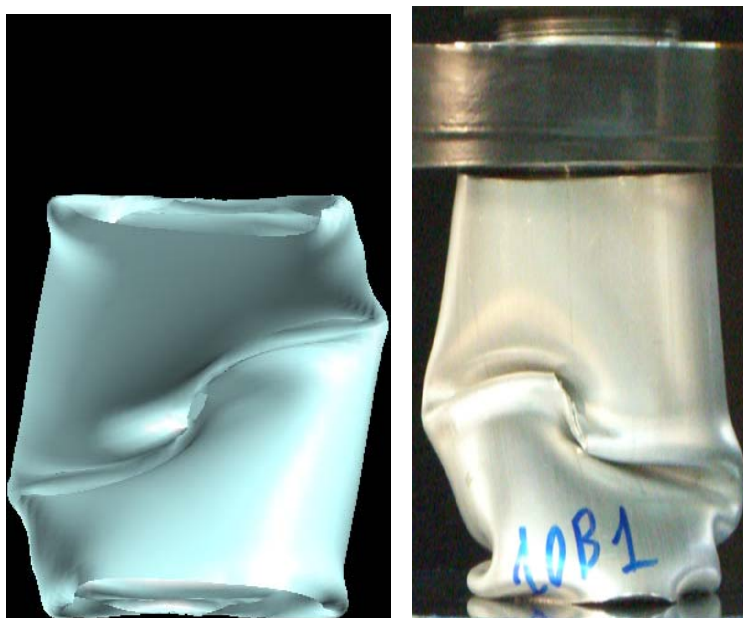


3^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Στο δοκίμιο του Is-dyna είναι εμφανής στην θέση της οπής ο λυγισμός, η παραμόρφωση του υλικού και η ροή του προς το εσωτερικό σε εκείνη την περιοχή. Ταυτόχρονα και στα

δύο δοκίμια έχουμε εμφάνιση μη εκτατού 2D λοβού κάτω από την υπάρχουσα οπή. Πάτημα της πρέσας στα 12mm.



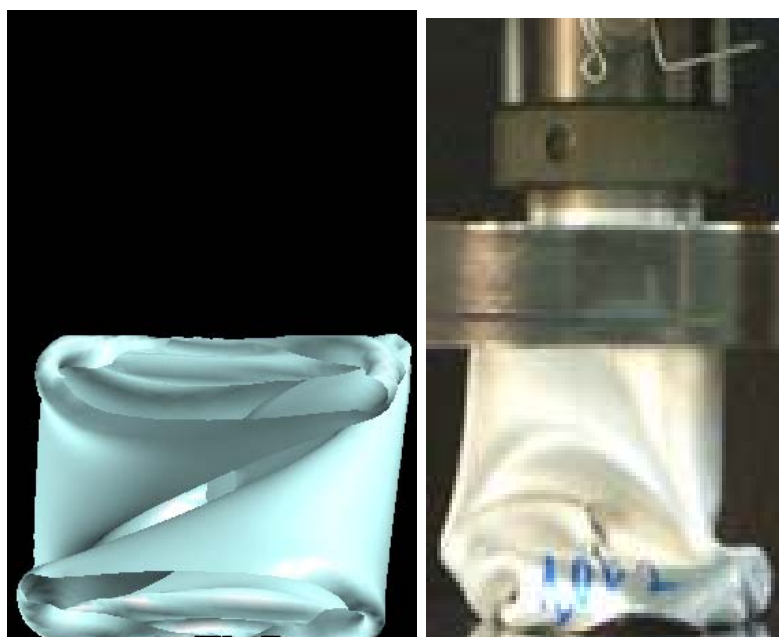
4^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Στα δύο δοκίμια λόγω της αναδίπλωσης του δοκιμίου έχουμε στην βάση του δοκιμίου μεταβολή του σχεδόν εκτατού λοβού σε δημιουργία λοβού με πτύχωση προς τα έξω. Πάτημα της πρέσας στα 21mm.



5^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Έχουμε δημιουργία πτύχωσης με ροή υλικού προς τα έξω και στην θέση επαφής με την πάνω πλάκα και στα δύο δοκίμια. Επιπλέον έχουμε μεταβολή του εκτατού λοβού λόγω κίνησης του κάτω υλικού προς τα πάνω. Πάτημα της πρέσας στα 37mm.

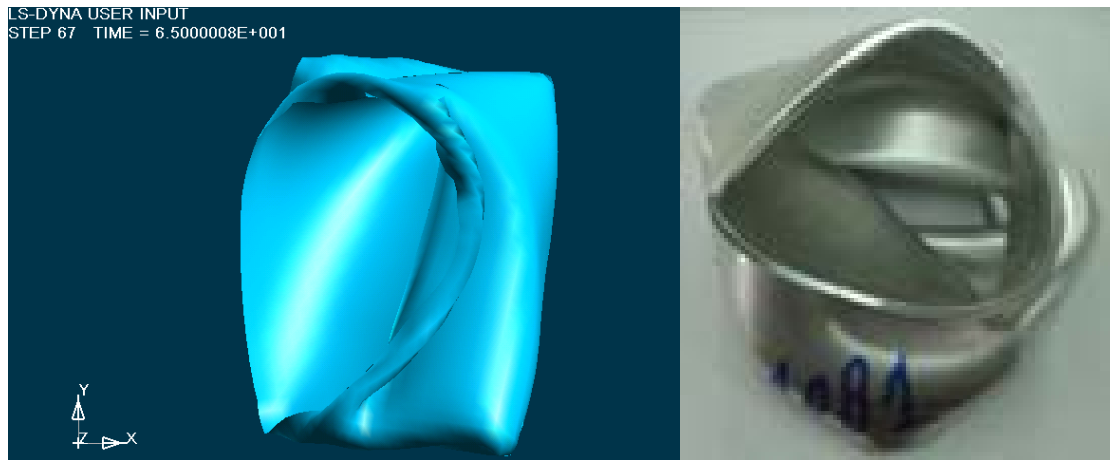


6^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Στο δοκίμιο του Is-dyna παρατηρούμε αναδίπλωση του υλικού στην άνω και κάτω βάση προς το εσωτερικό με τάση να συγκλίνουν μεταξύ τους. Πάτημα της πρέσας στα 52mm.



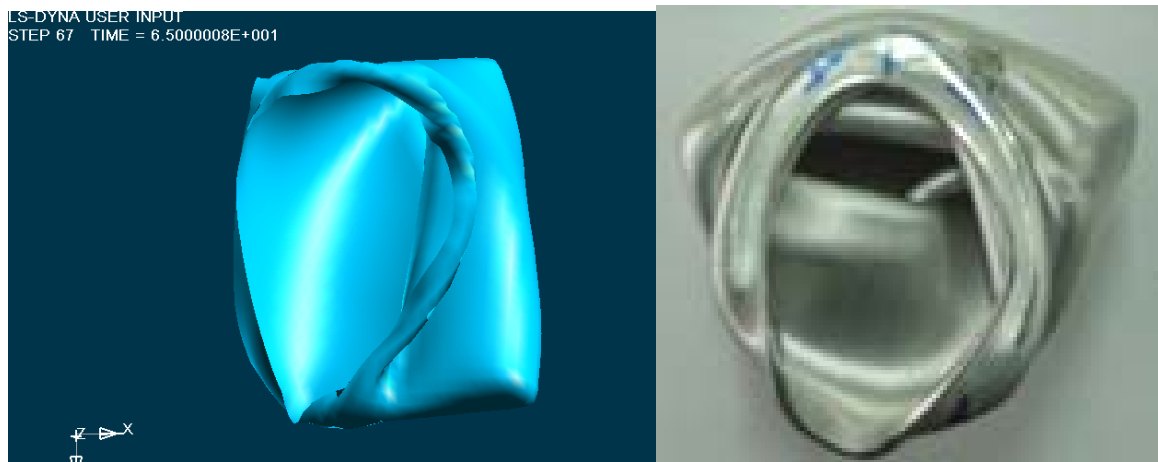
7^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Παρατηρούμε πως συναντήσαμε ξανά οι δύο γνωστοί τύποι κατάρρευσης (εκτατός και μη εκτατός) καθώς επίσης και μία μορφή λυγισμού. Είναι δυνατό να ειπωθεί ότι έχουμε mixed mode για τον τρόπο κατάρρευσης. Ο τρόπος αυτός κατάρρευσης, και κυρίως η παρουσία μορφής λυγισμού κατά Euler, οδηγεί σε χαμηλά επίπεδα ενέργειας παραμόρφωσης και μέσου φορτίου.

Τέλος αξονικής κατάρρευσης δοκιμίου στην πρέσα. Πάτημα της πρέσας στα 65.0 mm.

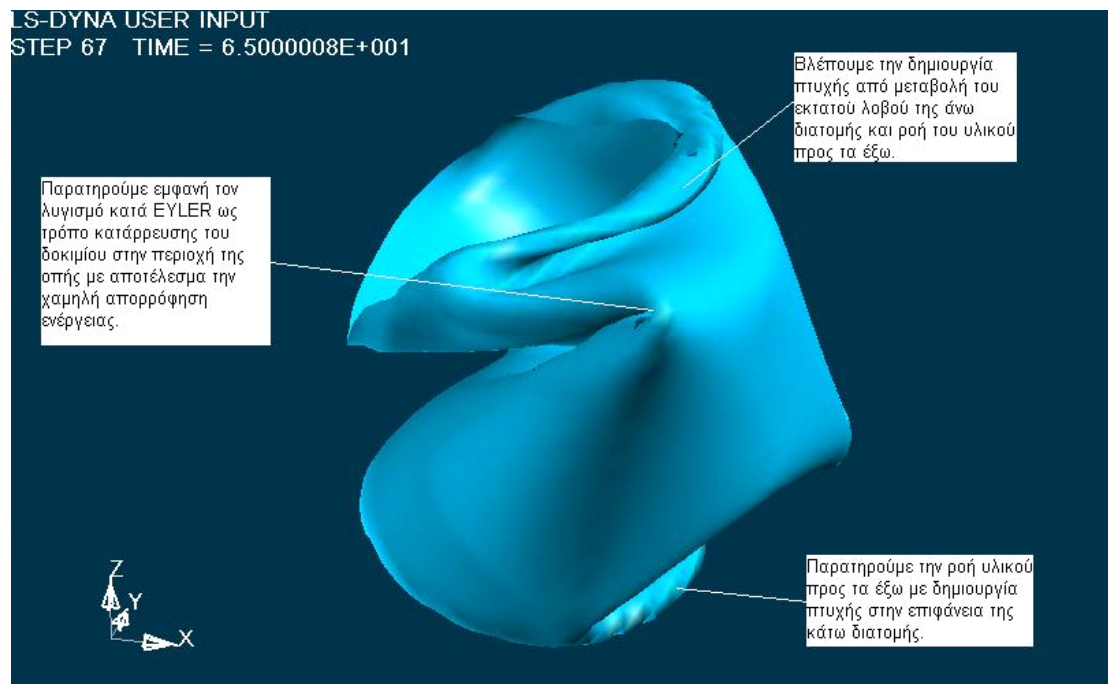


Τελική μορφή δοκιμίου αμέσως μετά το τέλος της διαδικασίας αξονικής κατάρρευσης στην πρέσα (δεξιά). Το ίδιο δοκίμιο μετά το τέλος της προσομοίωσης από το LS-DYNA, (αριστερή). Παρατηρούμε στο δοκίμιο του Is-dyna την αναδίπλωση του δοκιμίου στην θέση της οπής λόγω λυγισμού και την ροή του υλικού προς τα έξω στην άνω διατομή. Στο δοκίμιο της πρέσας διακρίνουμε τον 3D και 2D μη έκτατο λοβό. Τελικό πάτημα της πρέσας στα 65.0 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 65.0 mm:



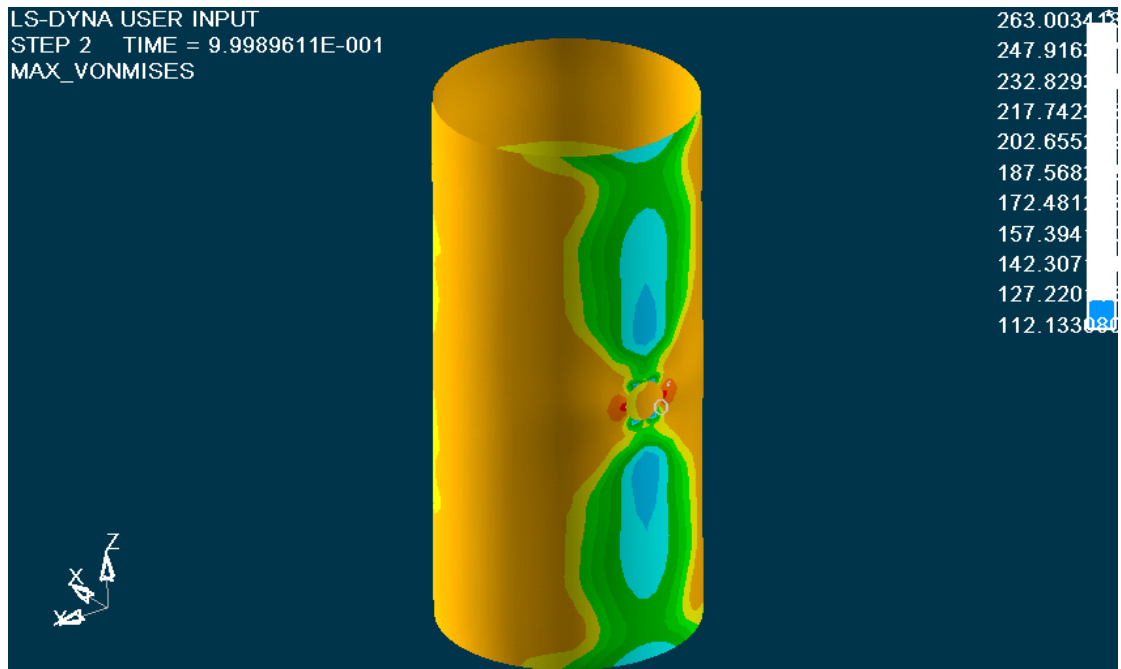
Η ολοκληρωμένη προσομοίωση κατάρρευσης του μοντέλου μας με το LS-DYNA, παρουσιάζεται και στα αρχεία βίντεο:

- Deformation isometric.Avi
- [Deformation side.Avi](#)
- Deformation rear.Avi

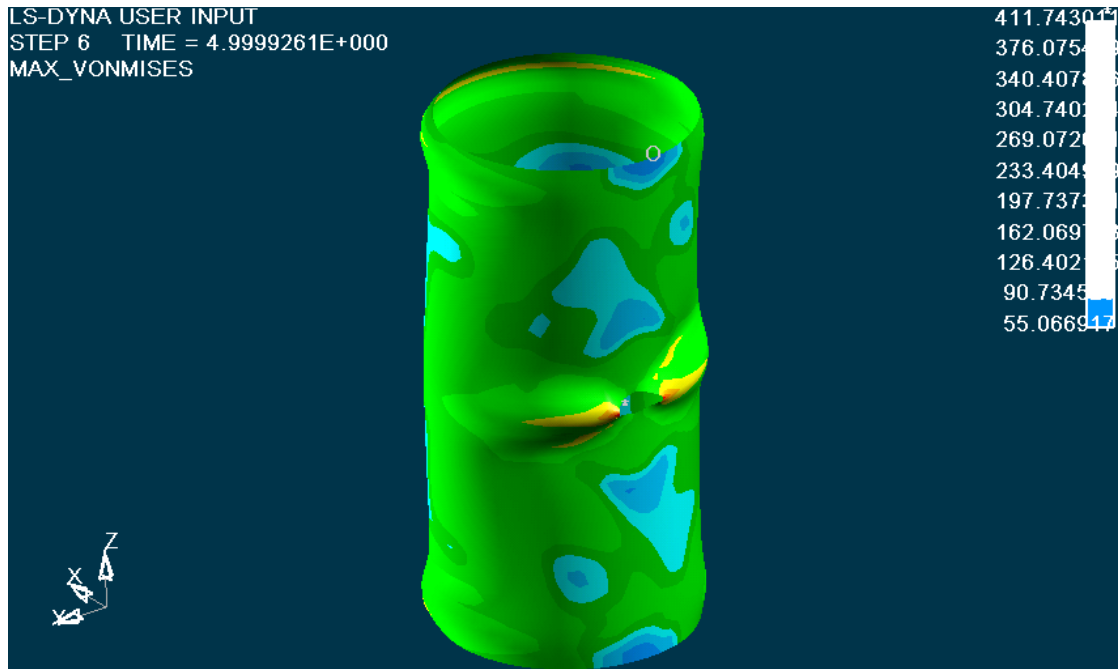
Ακολουθούν εικόνες από την κατανομή των τάσεων σε όλη την επιφάνεια του δοκιμίου κατά τα διάφορα στάδια της κατάρρευσής του:

Επιλέγοντας στον ETA POSTGL:

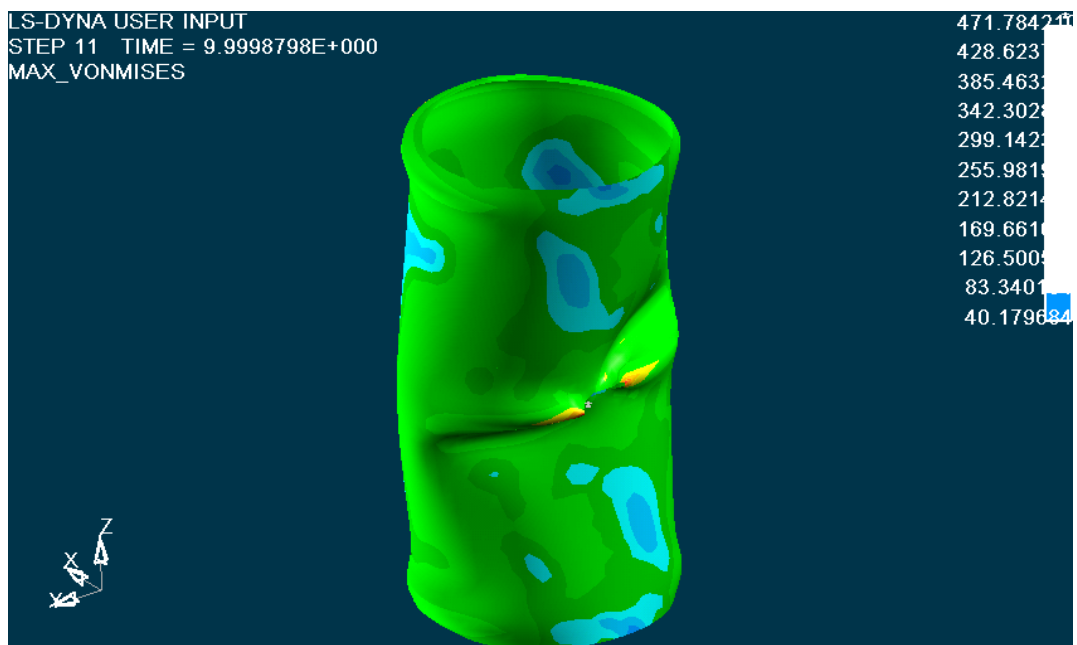
CONTOUR -> STRESS/STRAIN -> MAXIMUM VON MISES STRESSES:



Κατανομή των τάσεων στο 1mm. Έχουμε εμφάνιση τάσεων στην περιοχή γύρω από την οπή του δοκιμίου, που όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 2, για την θεωρία των τάσεων γύρω από οπές, βλέπουμε ότι γύρω από κάθε οπή του δοκιμίου, κατά την κατακόρυφη διεύθυνση που συμπίπτει με την διεύθυνση της αξονικής θλίψης του δοκιμίου, έχουμε τάσεις ίσες με $\sigma = 202 \text{ MPa}$, ενώ στο οριζόντιο μέσο επίπεδο της οπής, το οποίο είναι κάθετο ως προς το κατακόρυφο επίπεδο της αξονικής θλίψης του δοκιμίου, εκεί εμφανίζονται οι μέγιστες τάσεις για την κατάρρευση του δοκιμίου στη θέση της οπής, ίσες με $\sigma = 263 \text{ MPa}$. σε όλη την επιφάνειά τους, εμφανίζεται μια αντιδιαμετρική συμμετρία της κατανομής των τάσεων. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή 263 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.

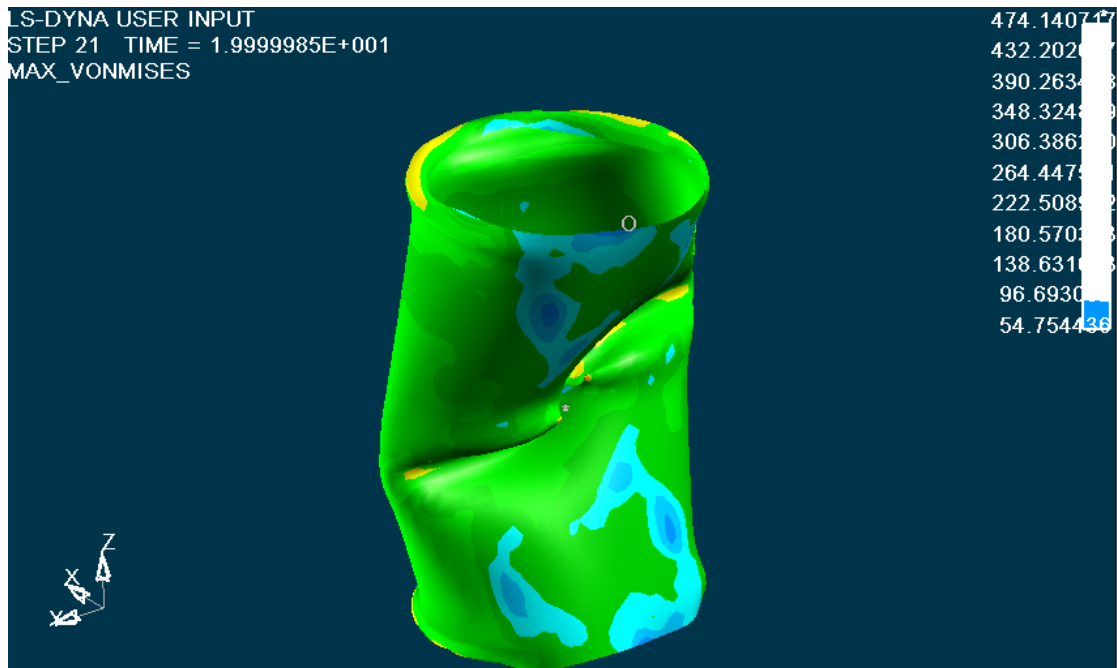


Κατανομή των τάσεων στο 5 mm. Έχουμε μέγιστες τάσεις στην περιοχή γύρω από την οπή του δοκιμίου. Ιδιαίτερα, στην περιοχή της οπής, οι τάσεις που εφαρμόζονται κατά την διεύθυνση της αξονικής θλίψης είναι $\sigma = 269 \text{ MPa}$, ενώ οι τάσεις που αναπτύσσονται στην οπή κάθετα προς την διεύθυνση αξονικής θλίψης του δοκιμίου, είναι $\sigma = 411 \text{ MPa}$. Στην θέση της οπής συνεχίζεται η κατάρρευση του δοκιμίου από την θέση αυτή και με διεύθυνση προς τα κάτω. Την ελάχιστη τιμή των τάσεων έχουμε στην περιοχή που συμβολίζεται με O ίση με $\sigma=90\text{MPa}$.

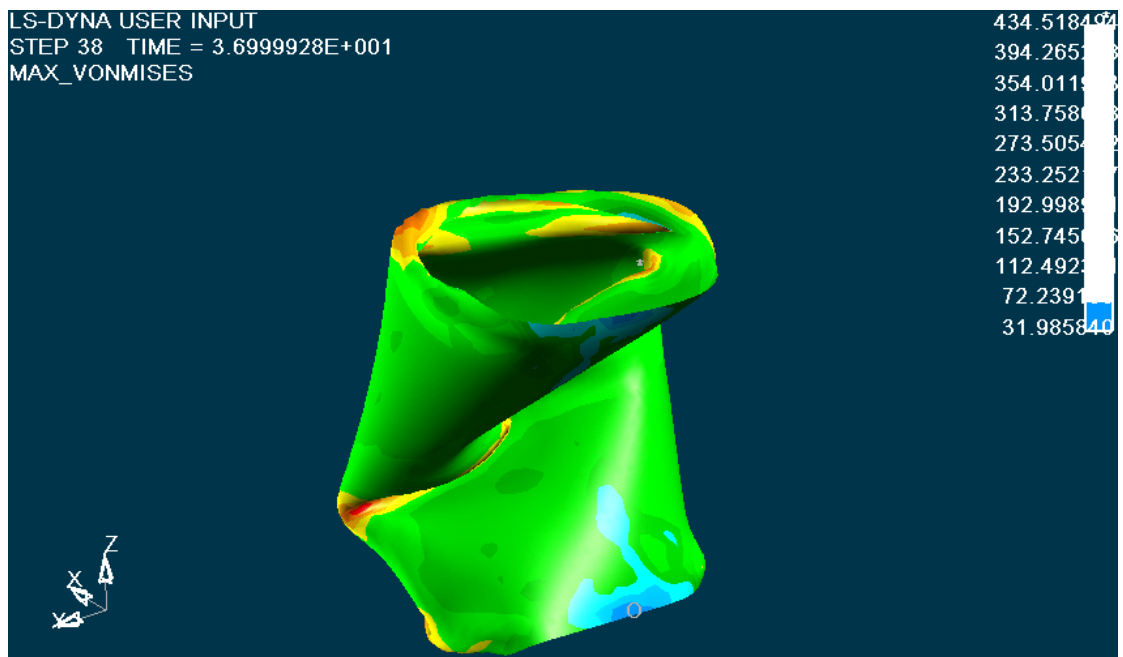


Κατανομή των τάσεων στο 10 mm. Έχουμε μέγιστες τάσεις στην περιοχή σχηματισμού των λοβών στα σημεία αναδίπλωσης της άνω διατομής του δοκιμίου αλλά και στην θέση της οπής όπου έχουμε λυγισμό κατά EYLER. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή 471 MPa. Στο υπόλοιπο μέρος του

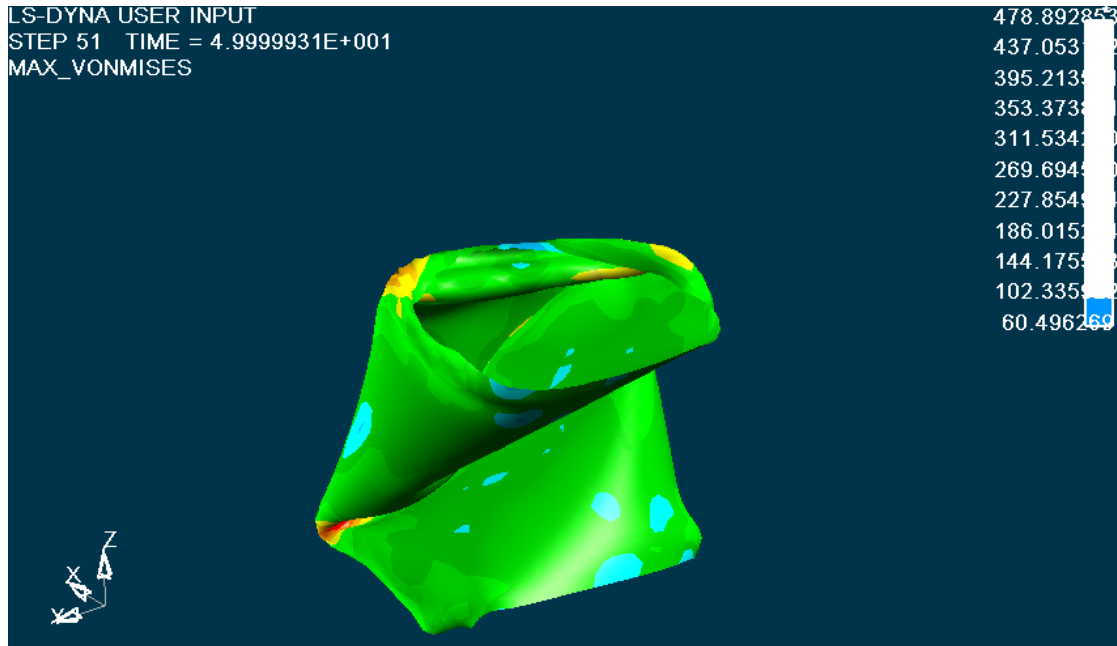
μοντέλου μας έχουμε εμφάνιση αντιδιαμετρικής συμμετρίας στην κατανομή των τάσεων.



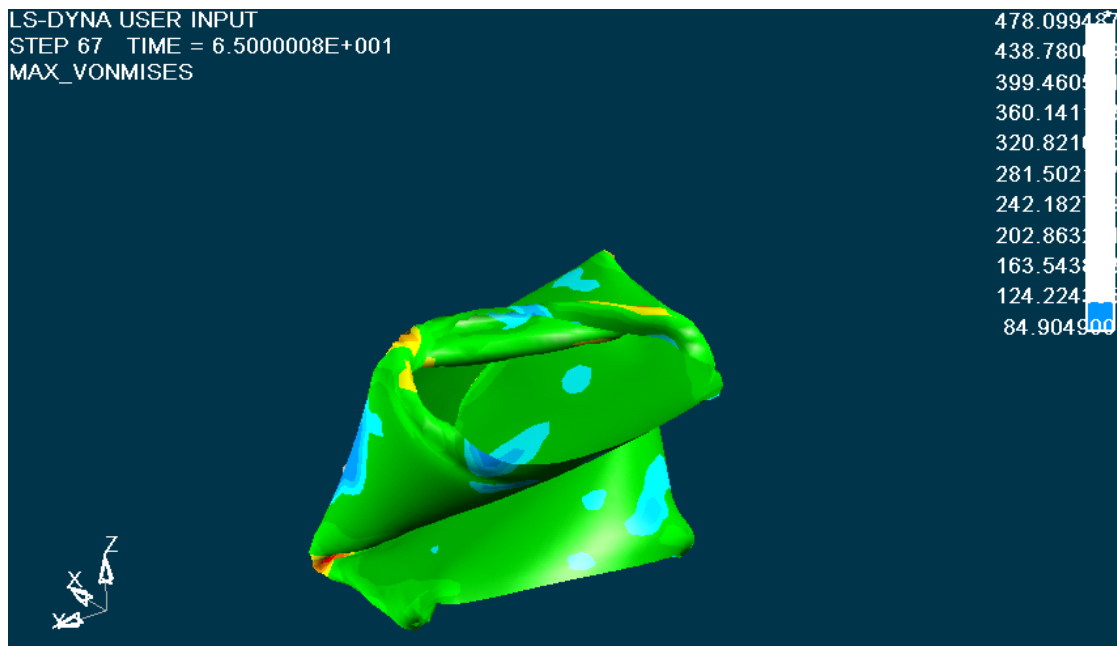
Κατανομή των τάσεων στο 20 mm. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή 474 MPa. Αρχίζει να σχηματίζεται εκτατός λοβός στην άνω και κάτω βάση, τάσεις σημαντικής τιμής $\sigma = 348\text{MPa}$, εμφανίζονται στις θέσεις αυτές. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με ελάχιστη τιμή τάσεων στην περιοχή που συμβολίζεται με O.



Κατανομή των τάσεων στο 37 mm. Το κάτω και το πάνω 1/4 μέρος του δοκιμίου έχει μικρότερες τάσεις από ότι συμβαίνει στο υπόλοιπο μέρος του δοκιμίου. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή **434 MPa**, που βλέπουμε ότι είναι μεγαλύτερη τιμή από την τάση αντοχής του δοκιμίου ($\sigma_{αντ} = 240 \text{ MPa}$), οπότε αστοχεί το υλικό στη θέση των άκρων της διαμέτρου στο ύψος της οπής, οπότε εμφανίζεται αστοχία του υλικού και κατόπιν αναδίπλωση του δοκιμίου, και συνεχίζεται η κατάρρευση του δοκιμίου με την μορφή λυγισμού.



Κατανομή των τάσεων στο 50 mm. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη εμφανιζόμενη τιμή 257 MPa στις θέσεις αναδίπλωσης. Στο κάτω μισό του δοκιμίου έχουμε μικρότερες τάσεις $\sigma = 72 \text{ MPa}$. Στην εικόνα η θέση με την ελάχιστη τάση συμβολίζεται με 0.

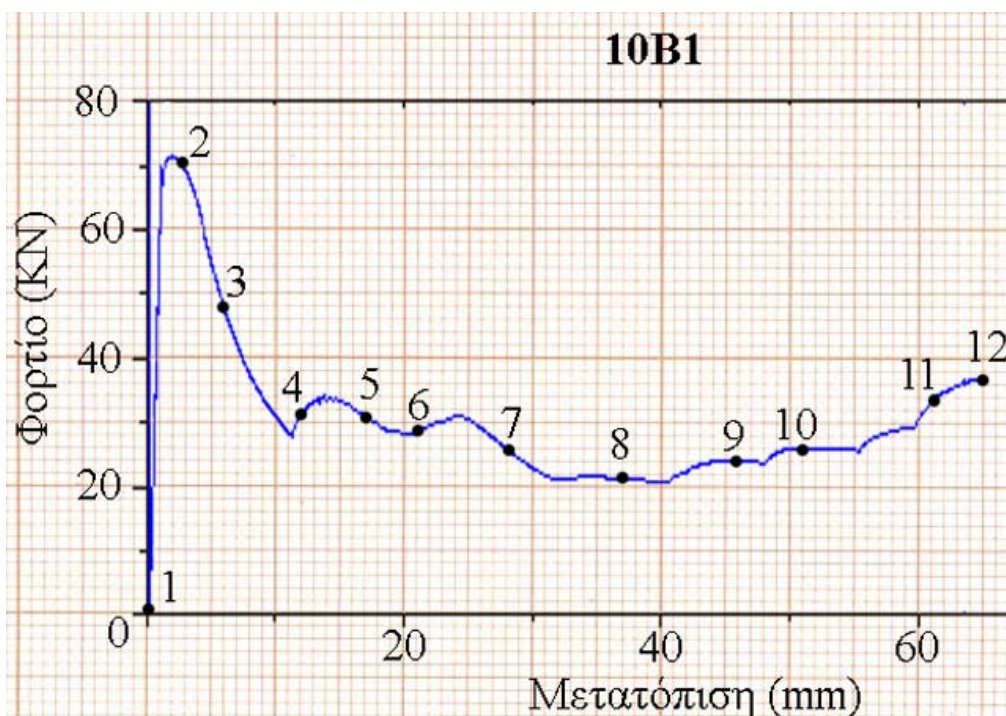


Κατανομή των τάσεων στο 65.0 mm. Οι τελικές τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη εμφανιζόμενη τιμή 478 MPa. Οι ελάχιστες τάσεις βρίσκονται στην άνω διατομή ίσες με 124MPa. Η κατάρρευση του δοκιμίου έχει πλέον ολοκληρωθεί.

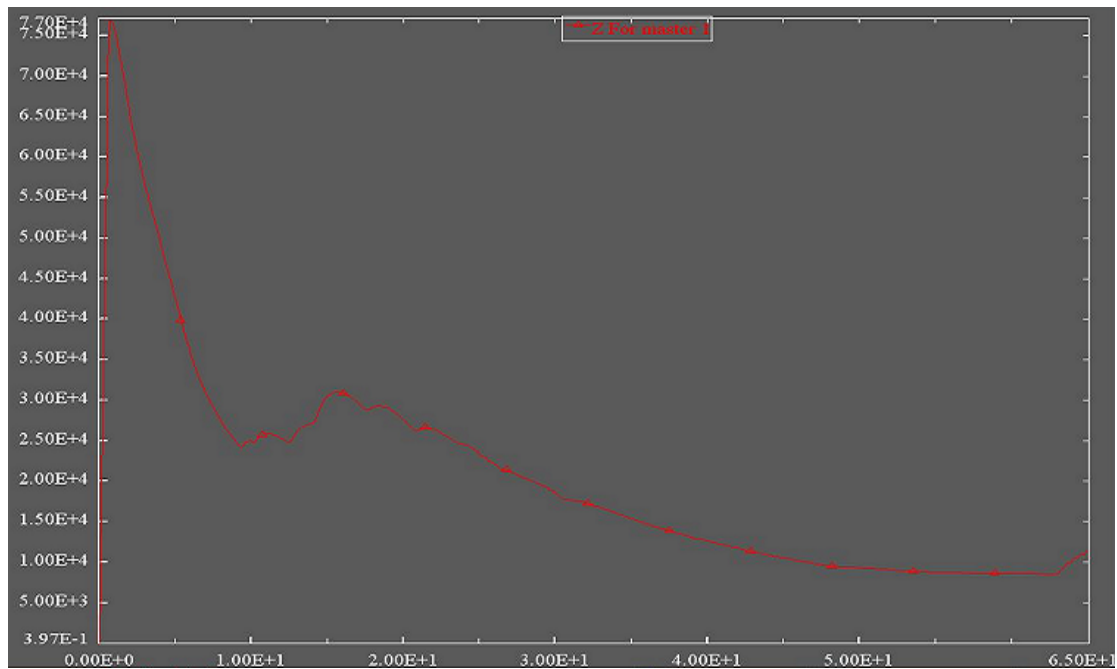
Η ολοκληρωμένη προσομοίωση της κατανομής των τάσεων του μοντέλου μας με το LS-DYNA, παρουσιάζεται και στο αρχείο βίντεο:

➤ [Contour Max Von Mises.Avi](#)

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



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

Το μέγιστο φορτίο $P_{max} = 71,22 \text{ KN}$,

Το μέσο φορτίο $P_{mean} = 29,64 \text{ KN}$,

Η ομοιομορφία φορτίου $P_{max}/P_{mean} = 2,40$

Η συνολική ενέργεια που δαπανήθηκε για την αξονική κατάρρευση του δοκιμίου είναι $E = 1927 \text{ KN mm}$

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

Το μέγιστο φορτίο $P_{max} = 77,00 \text{ KN}$,

Το μέσο φορτίο $P_{mean} = 20,62 \text{ KN}$,

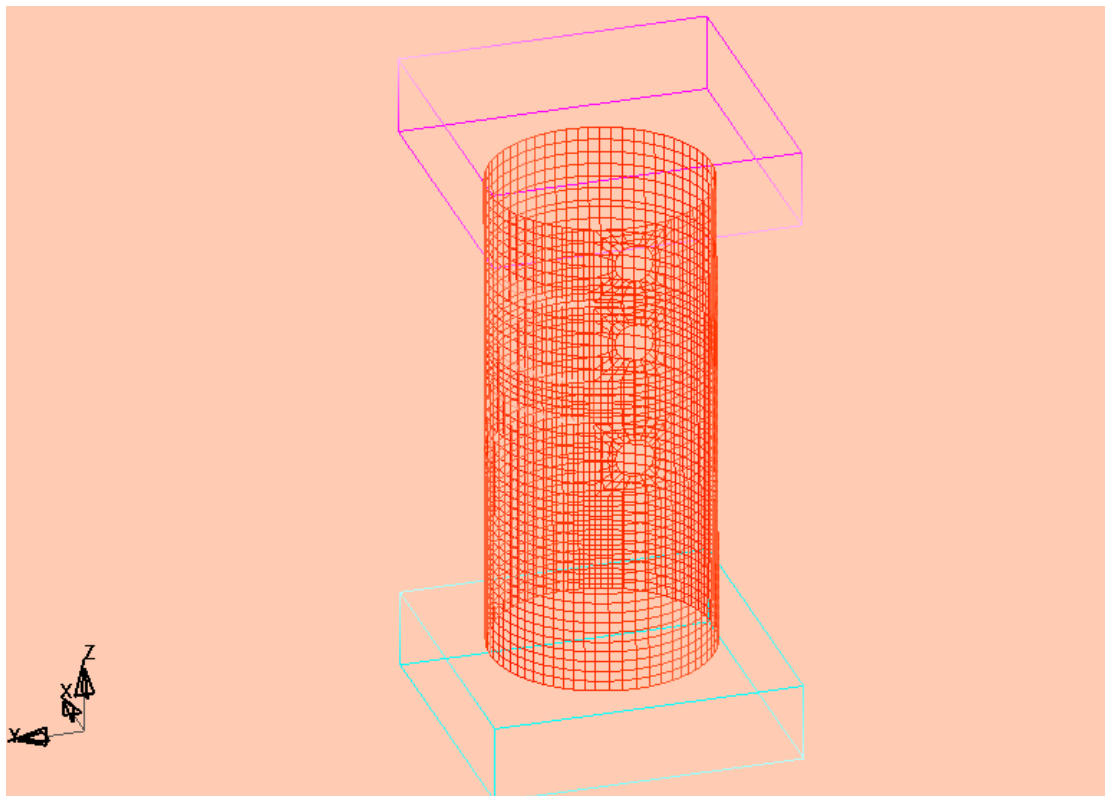
Η ομοιομορφία φορτίου $P_{max}/P_{mean} = 3,73$

Η συνολική ενέργεια που δαπανήθηκε για την αξονική κατάρρευση του δοκιμίου είναι $E = 1340 \text{ KN mm}$

ΕΝΟΤΗΤΑ 5-8 :

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΤΡΙΩΝ ΜΗ ΔΙΑΜΠΕΡΩΝ ΟΠΩΝ Φ10 (TYPE_10TMB1).

Το μοντέλο του δοκιμίου κυκλικής διατομής με τρεις οπές μη διαμπερείς, διαμέτρου Φ10 στο 1/2 , στο 1/4 του ύψους του δοκιμίου και 10mm από το χείλος της άνω διατομής και με πάχος τοιχώματος 2mm παρουσιάζεται στην ακόλουθη εικόνα:



Σχ.1, Απεικόνιση πλέγματος στο LS-DYNA 3D, για κυκλικής διατομής δοκίμιο με τρεις μη διαμπερείς οπές διαμέτρου Φ10.

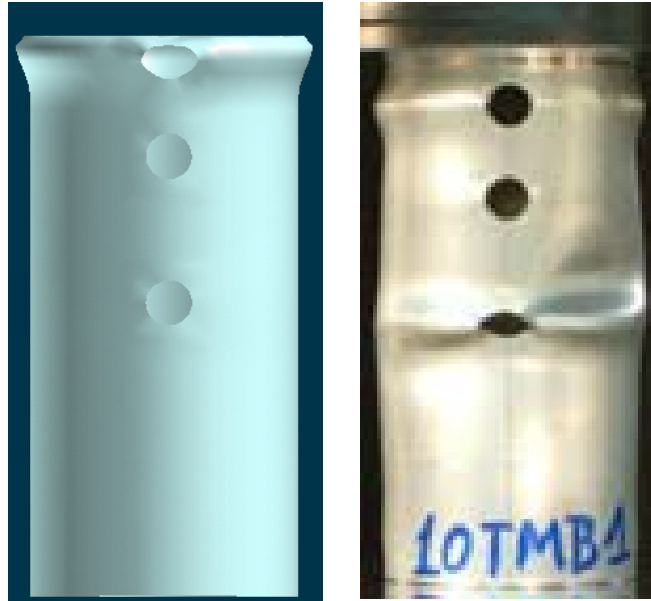
Οι αντίστοιχες φάσεις προσομοίωσης της κατάρρευσης του δοκιμίου αυτού, που κατέγραψα με τη χρήση του LS-DYNA, σε σύγκριση με τις φάσεις που έλαβα από την ελληνική βιβλιογραφία [1] με την χρήση πρέσας Instron, παρουσιάζονται στις επόμενες σελίδες:



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 (αριστερή).



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 περίπου του ύψους του (θέση τρίτης οπής), ενώ στο μοντέλο του Is-dyna, η αρχική κατάρρευση σημειώνεται στη θέση στην περιοχή της πρώτης οπής του δοκιμίου. Πάτημα της πρέσας στα 2 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 λοβού στην περιοχή της πάνω οπής για το δοκίμιο του ls-dyna. Στο δοκίμιο της πρέσας έχουμε συνέχιση του εκτατού λοβού στην τρίτη οπή και αρχή δημιουργίας νέου εκτατού λοβού στην πρώτη οπή. Πάτημα της πρέσας στα 6 mm.



3η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Παρατηρούμε στα δοκίμια συνέχιση του εκτατού λοβού στην περιοχή της πρώτης οπής ενώ στο δοκίμιο του ls-dyna η τρίτη οπή εξακολουθεί να παραμένει ανεπηρέαστη κατά την συμπίεση του δοκιμίου. Πάτημα της πρέσας στα 11 mm.



4η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Στο δοκίμιο της πρέσας έχουμε κίνηση του εκατατού λοβού της κάτω οπής προς τα πάνω με εμφάνιση λυγισμού και μικρή θραύση της πάνω οπής. Στο δοκίμιο του Is-dyna παρατηρούμε τελείωμα του πρώτου εκατατού λοβού και αρχή δημιουργίας νέου εκατατού λοβού στο ύψος της δεύτερης οπής του δοκιμίου. Πάτημα της πρέσας στα 23 mm.



5η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Στο δοκίμιο της πρέσας έχουμε δημιουργία 3D λοβού στην πάνω διατομή με ταυτόχρονη παραμόρφωση στην δεύτερη οπή με σχηματισμό μη εκατατού λοβού και στα δύο δοκίμια. Στο δοκίμιο του Is-dyna έχουμε τελείωμα του δεύτερου εκατατού λοβού και αρχή δημιουργίας νέου μη εκατατού 3D λοβού σε παράλληλο επίπεδο ως προς τον προηγούμενο εκατατό λοβό. Πάτημα της πρέσας στα 41 mm.



6η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Στο δοκίμιο της πρέσας είναι φανερός ο λυγισμός στην τρίτη οπή. Στο δοκίμιο του Is-dyna έχουμε τελείωμα του τρίτου μη εκτατού λοβού και αρχή νέου μη εκτατού λοβού σε παράλληλο επίπεδο και στραμμένος κατά $\pi/3$ ως προς τον προηγούμενο μη εκτατό λοβό. Πάτημα της πρέσας στα 56 mm.

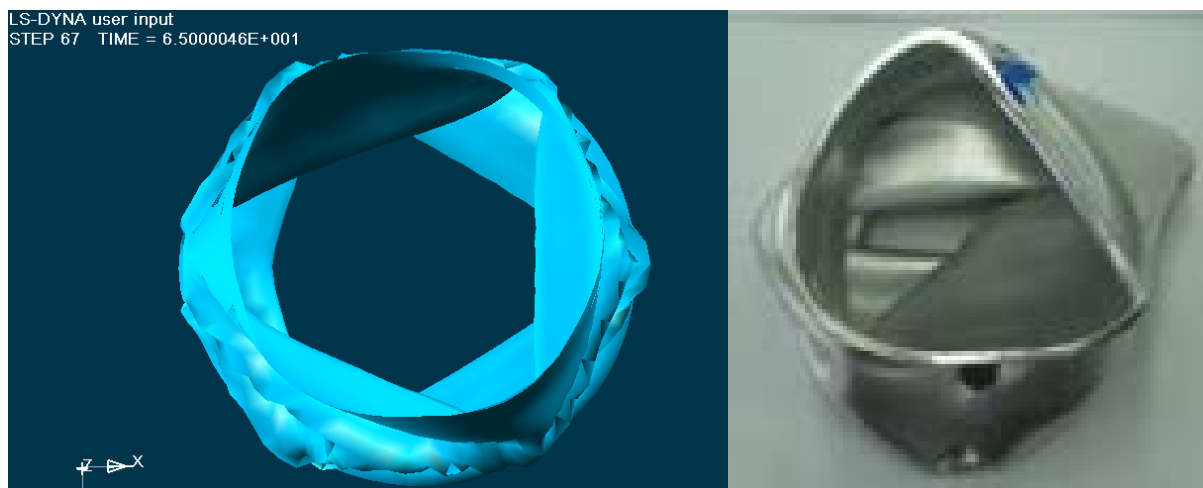


7η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Γενικά, μπορεί να χαρακτηριστεί ως mixed mode ο τρόπος κατάρρευσης του δοκιμίου. Τέλος αξονικής κατάρρευσης δοκιμίου στην πρέσα. Πάτημα της πρέσας στα 65.0 mm.

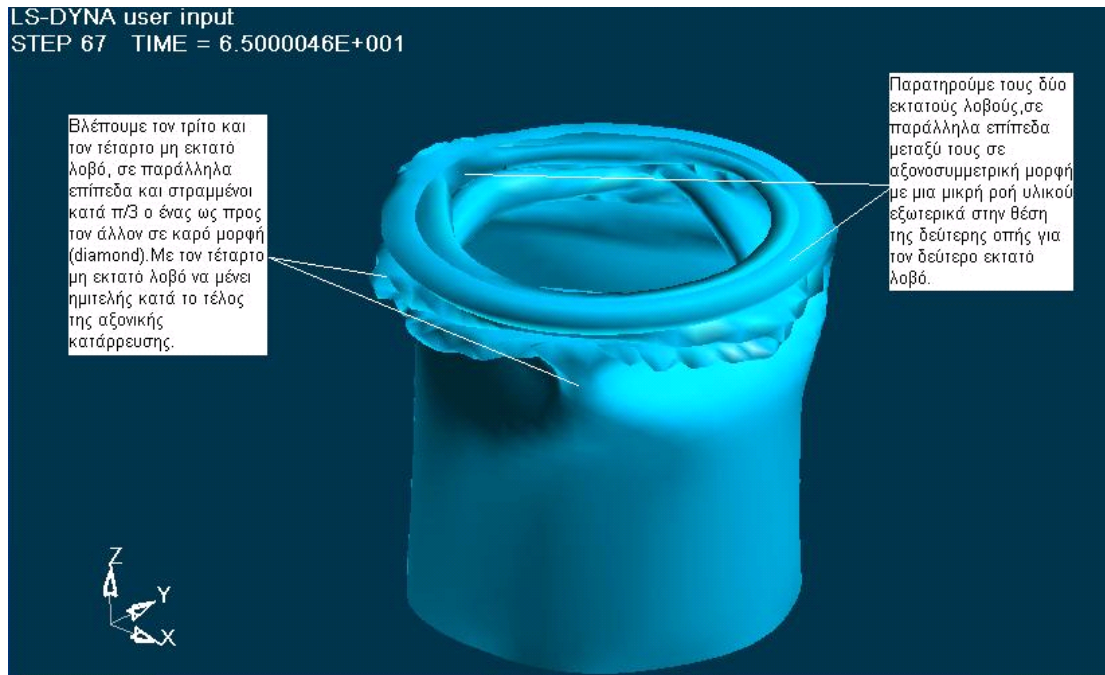


Τελική μορφή δοκιμίου αμέσως μετά το τέλος της διαδικασίας αξονικής κατάρρευσης στην πρέσα (δεξιά). Το ίδιο δοκίμιο μετά το τέλος της προσομοίωσης από το LS-DYNA, (αριστερή). Παρατηρούμε τον mixed mode ως τρόπο κατάρρευσης του δοκιμίου. Παρατηρούμε τους δύο εκτατούς και τους δύο μη εκτατούς λοβούς που είναι στραμμένοι μεταξύ τους κατά $\pi/3$. Τελικό πάτημα της πρέσας στα 65.0 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 65.0 mm:



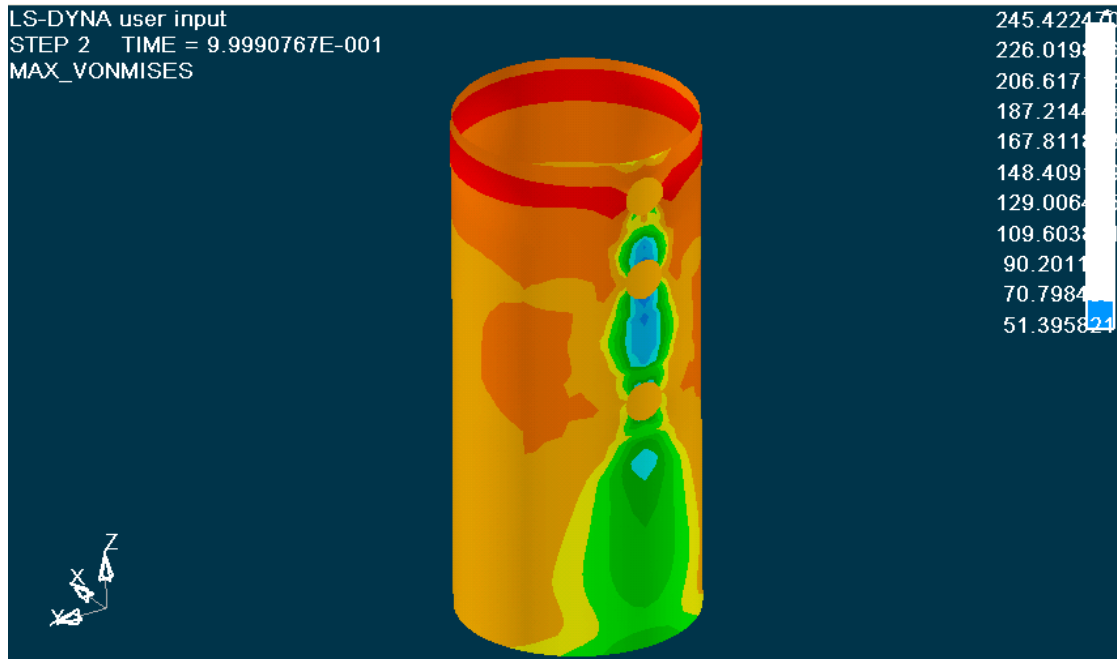
Η ολοκληρωμένη προσομοίωση κατάρρευσης του μοντέλου μας με το LS-DYNA, παρουσιάζεται και στα αρχεία βίντεο:

- Deformation isometric.Avi
- [Deformation side.Avi](#)
- Deformation rear.Avi

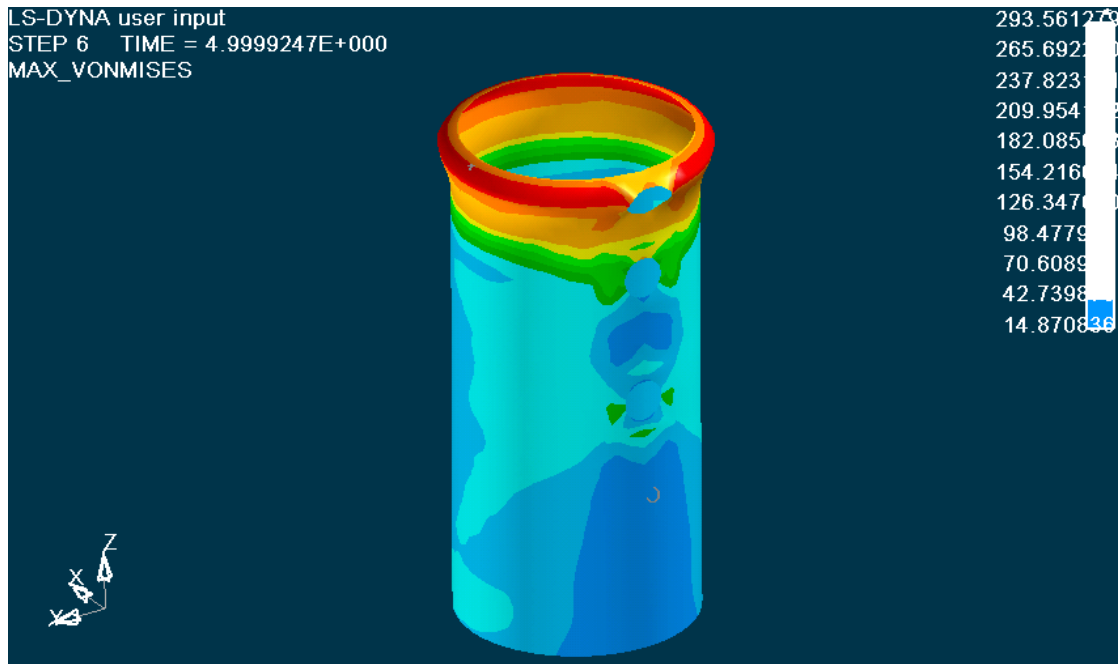
Ακολουθούν εικόνες από την κατανομή των τάσεων σε όλη την επιφάνεια του δοκιμίου κατά τα διάφορα στάδια της κατάρρευσής του:

Επιλέγοντας στον ETA POSTGL:

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

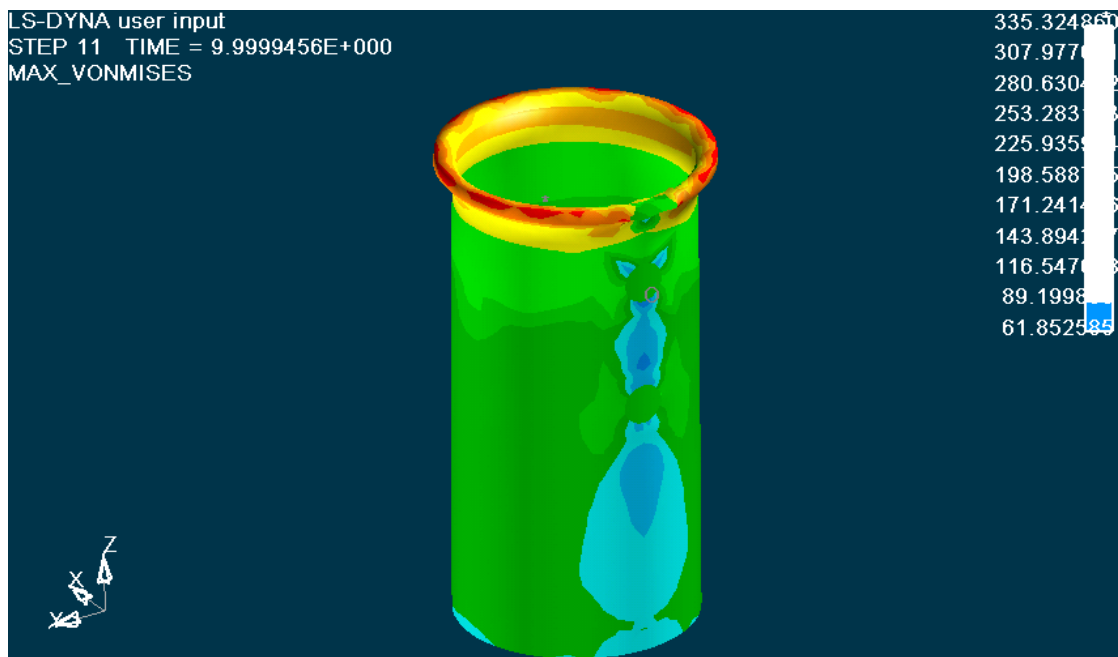


Κατανομή των τάσεων στο 1mm. Έχουμε εμφάνιση τάσεων στην περιοχή γύρω από τις τρεις οπές του δοκιμίου, που όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 2, για την θεωρία των τάσεων γύρω από οπές, βλέπουμε ότι γύρω από την πάνω οπή του δοκιμίου η οποία δέχεται και της μεγαλύτερες τάσεις, κατά την κατακόρυφη διεύθυνση που συμπίπτει με την διεύθυνση της αξονικής θλίψης του δοκιμίου, έχουμε τάσεις ίσες με $\sigma = 226 \text{ MPa}$, στην πάνω οπή, $\sigma=90 \text{ MPa}$ στην μέση οπή και $\sigma=148 \text{ MPa}$ στην κάτω οπή. Στο οριζόντιο μεσοεπίπεδο κάθε οπής, το οποίο είναι κάθετο ως προς το κατακόρυφο επίπεδο της αξονικής θλίψης του δοκιμίου, εκεί εμφανίζονται οι μέγιστες τάσεις για την κατάρρευση του δοκιμίου στη θέση των οπών, ίσες με $\sigma = 245 \text{ MPa}$ στην πάνω οπή, $\sigma=206 \text{ MPa}$ στην μέση οπή και $\sigma=187 \text{ MPa}$ στην κάτω οπή. Ακόμα, στο άλλο μισό του δοκιμίου, που δεν έχουμε εκεί οπές, βλέπουμε ότι σε όλη την επιφάνειά τους, εμφανίζονται μέγιστες τάσεις. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή 245 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.

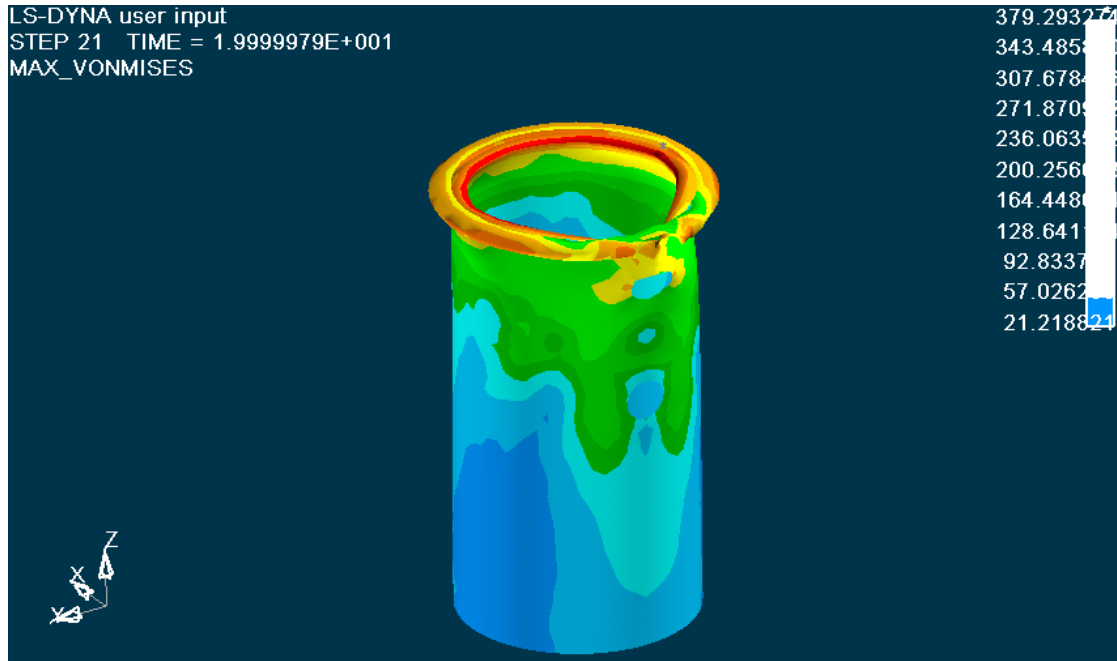


Κατανομή των τάσεων στο 5 mm. Έχουμε μέγιστες τάσεις στην περιοχή της πάνω οπής και στην επιφάνεια της πάνω διατομής του δοκιμίου που πιέζει το έμβολο της πρέσσας,. Το κάτω 3/4 μέρος του δοκιμίου έχει μικρότερες τάσεις από ότι συμβαίνει στο υπόλοιπο μέρος του δοκιμίου ενώ ελάχιστη τιμή $\sigma = 42\text{MPa}$ έχουμε κάτω από την μέση οπή και εκείνη η περιοχή συμβολίζεται με O.

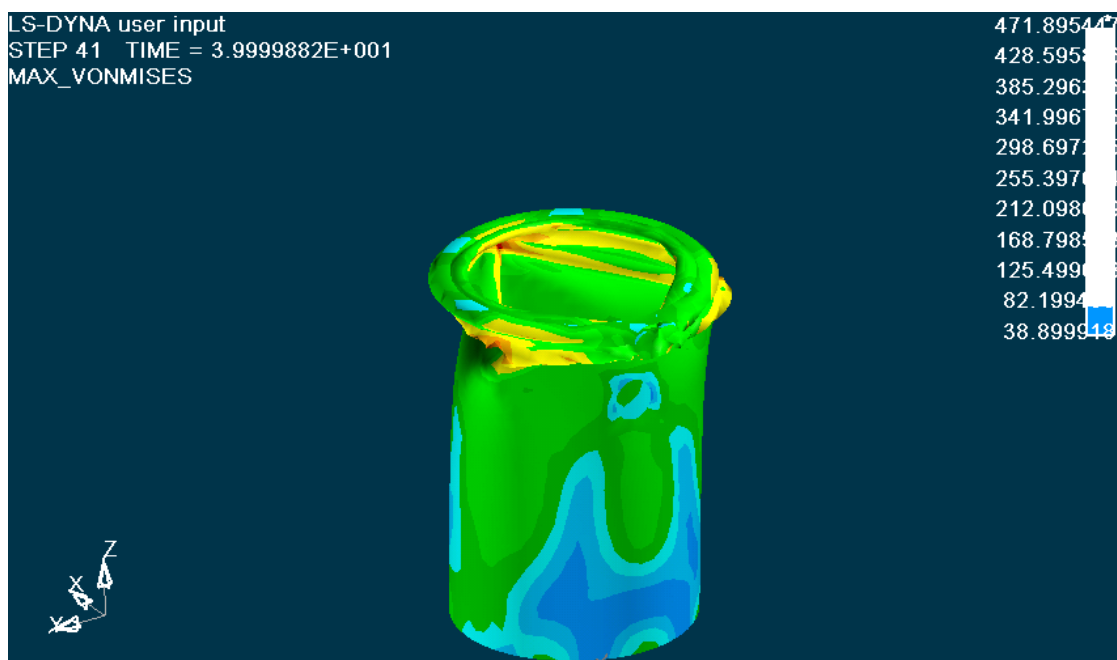
Έχουμε μέγιστη τάση στην περιοχή αναδίπλωσης για δημιουργία έκτατου λοβού ίση με **293MPa** που είναι μεγαλύτερη τιμή από την τάση αντοχής του δοκιμίου ($\sigma_A = 240\text{MPa}$), οπότε καταρρέει το υλικό στο μέσο της περιοχής της πάνω οπής δημιουργώντας έναν έκτατο λοβό στο επίπεδο αυτό, και συνεχίζεται η κατάρρευση του δοκιμίου από την θέση αυτή και με διεύθυνση προς τα πάνω.



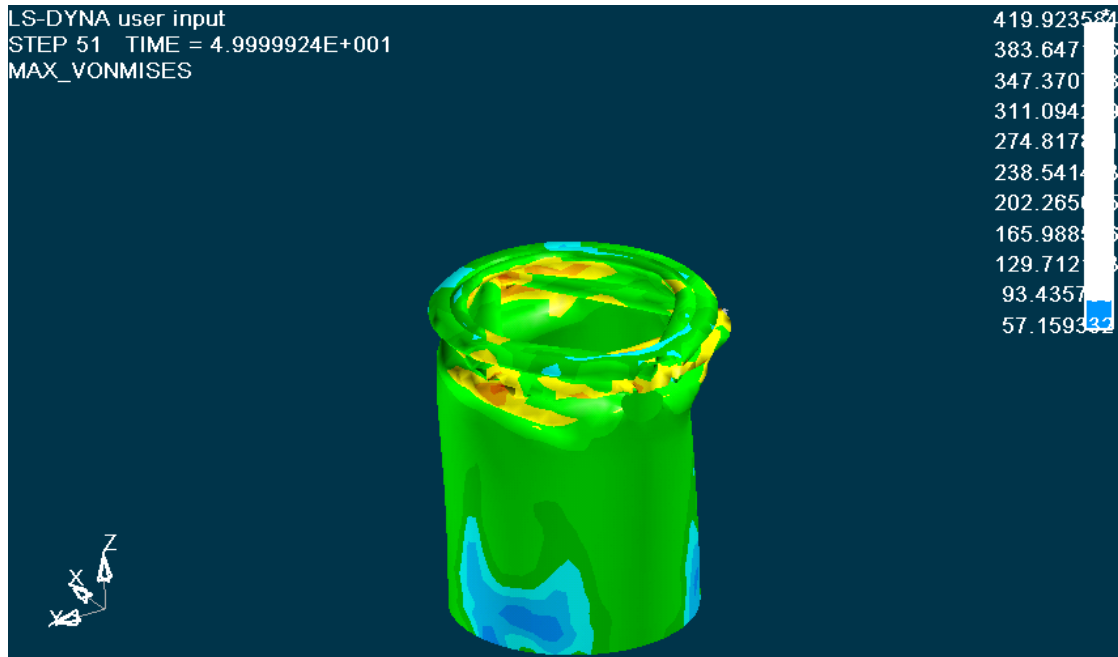
Κατανομή των τάσεων στο 10 mm. Έχουμε μέγιστες τάσεις στην περιοχή σχηματισμού του πρώτου λοβού στα σημεία αναδίπλωσης λόγω διαρροής του υλικού. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή **335MPa**. Στο κάτω 1/2 μέρος του μοντέλου μας εξακολουθούμε να έχουμε εμφάνιση μικρότερων τάσεων. Η ελάχιστη τιμή έχουμε στην μέση οπή και εκείνη η περιοχή συμβολίζεται με 0.



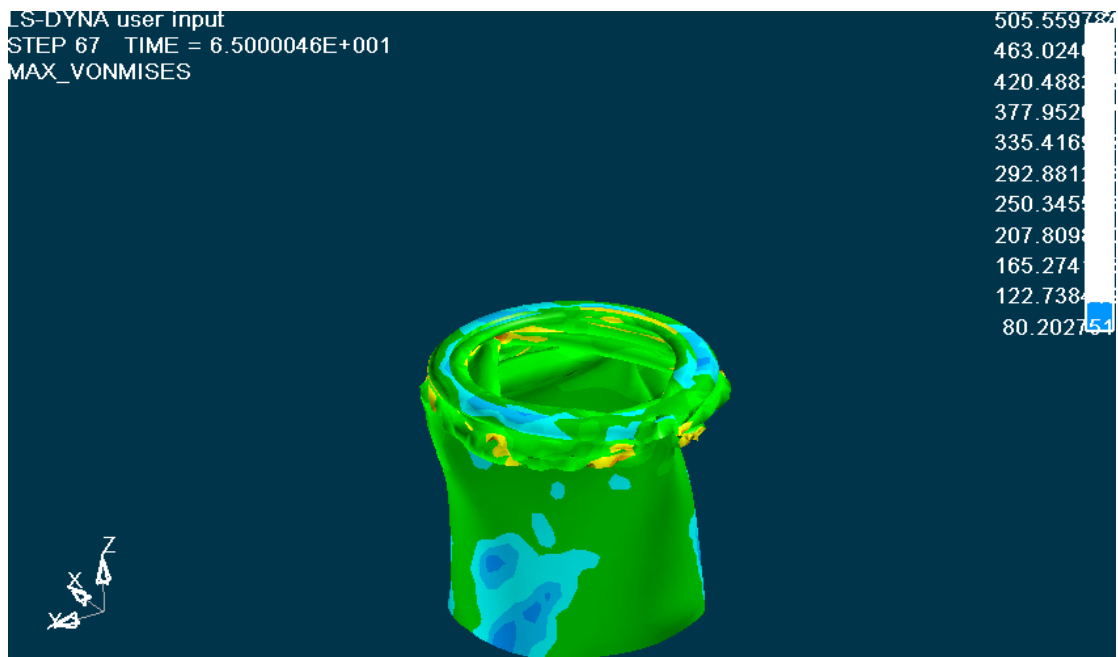
Κατανομή των τάσεων στο 20 mm. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή **379 MPa**. Η μέγιστη τάση παρατηρείται στην περιοχή δημιουργίας του δεύτερου εκτατού λοβού ίση με 379 MPa. Η ελάχιστη τιμή τάσεων στο δοκίμιο είναι στο χείλος της πάνω διατομής και συμβολίζεται με 0. Στο κάτω 1 / 2 του δοκιμίου υπάρχουν πολύ μικρότερες τάσεις με μέγιστη τιμή **57 MPa**.



Κατανομή των τάσεων στο 40 mm. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή **471 MPa** στις περιοχές αναδίπλωσης του υλικού του δοκιμίου, όπου δημιουργούνται και μη εκτατοί λοβοί. Η μέγιστη τάση που έχουμε είναι μεγαλύτερη της τάσης αντοχής $\sigma_A=240\text{MPa}$ οπότε αστοχεί το υλικό στο επίπεδο αυτό, και συνεχίζεται η κατάρρευση του δοκιμίου από την θέση αυτή και με διεύθυνση προς τα κάτω. Το κάτω 1 / 2 του δοκιμίου εξακολουθεί να έχει εμφάνιση των μικρότερων τάσεων.



Κατανομή των τάσεων στο 50 mm. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή **419 MPa**. Επικρατούσες τάσεις στο μεγαλύτερο μέρος του δοκιμίου είναι οι $\sigma = 238 \text{ MPa}$. Στην κάτω βάση του δοκιμίου έχουμε μικρότερες τάσεις της τάξης $\sigma = 93 \text{ MPa}$.

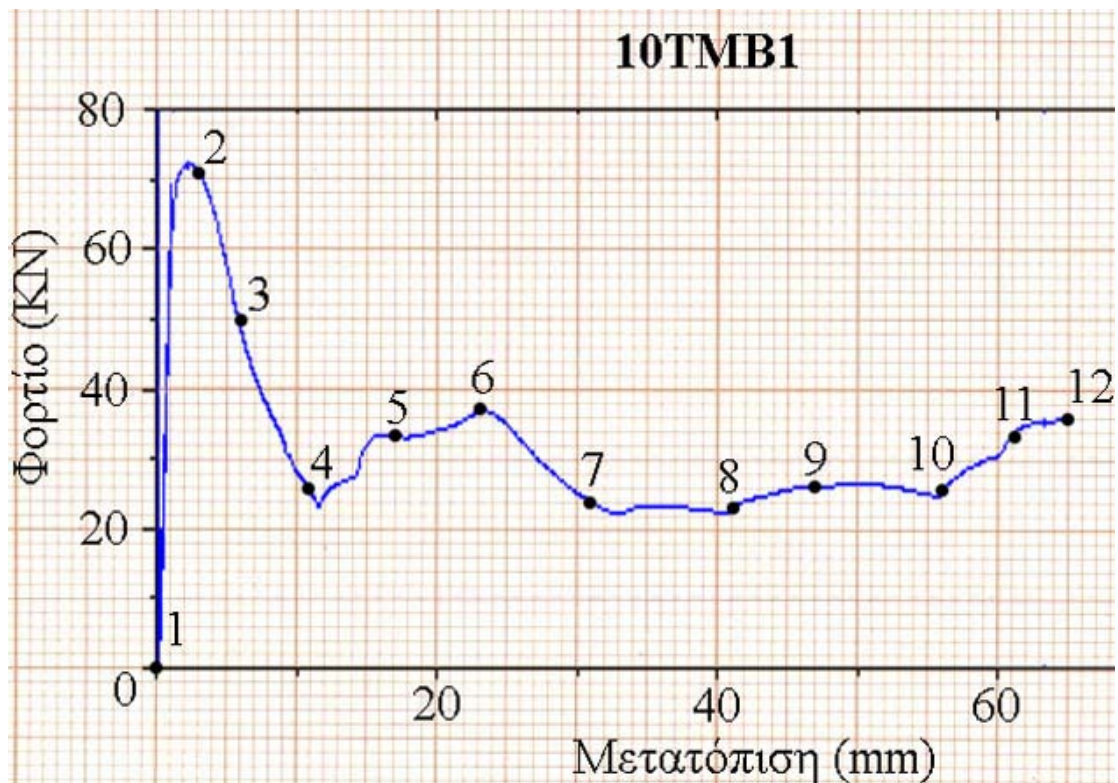


Κατανομή των τάσεων στο 65.0mm. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή **505 MPa**. Οι ελάχιστες τιμές τάσεων υπάρχουν στην επιφάνεια επαφής του δοκιμίου με την σταθερή πλάκα της πρέσας και είναι της τάξης των **122MPa**. Η κατάρρευση του δοκιμίου έχει πλέον ολοκληρωθεί .

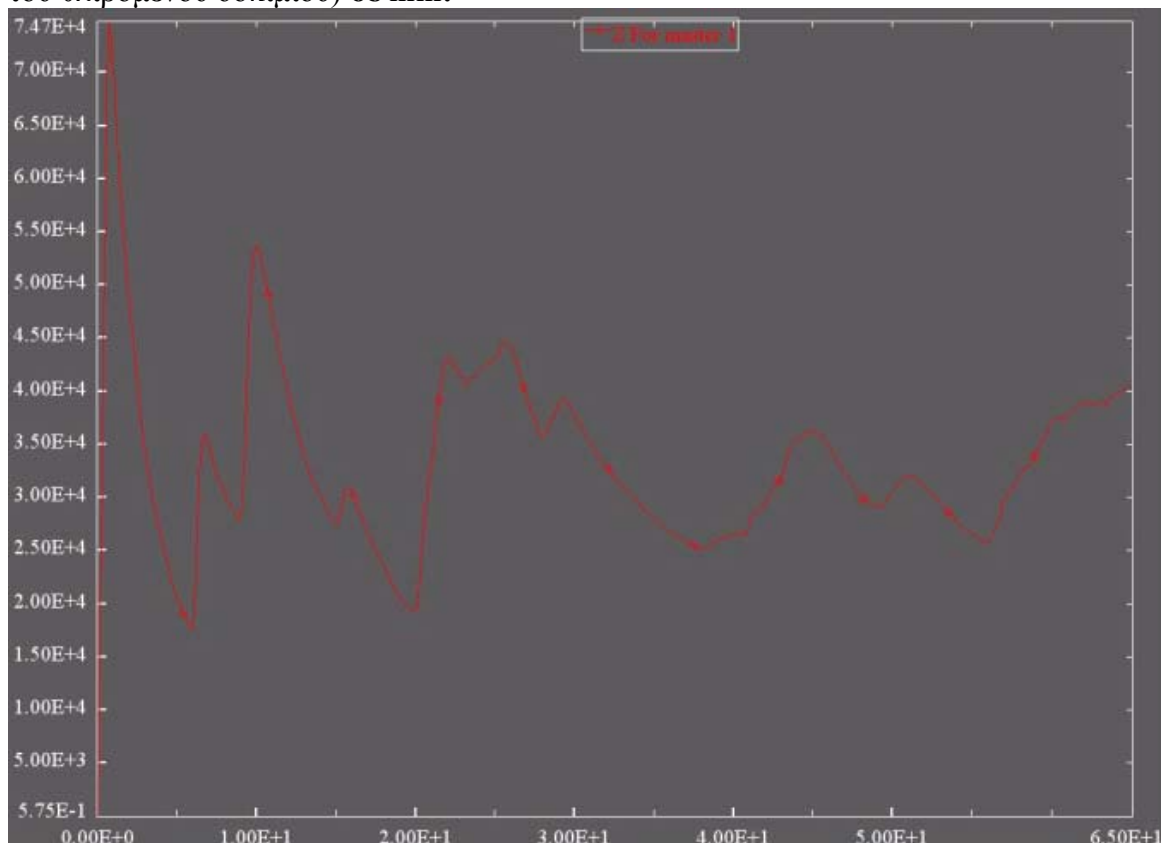
Η ολοκληρωμένη προσομοίωση της κατανομής των τάσεων του μοντέλου μας με το LS-DYNA, παρουσιάζεται και στο αρχείο βίντεο:

➤ [Contour Max Von Mises.Avi](#)

Ακόμα, το διάγραμμα των δυνάμεων μετά την επεξεργασία των στοιχείων που πάθησαν 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 N**, και με τον οριζόντιο άξονα να δείχνει τις **μετατοπίσεις** (βραχύνσεις του θλιβόμενου δοκιμίου) **σε mm**:



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

Το μέγιστο φορτίο $P_{max} = 72,19 \text{ KN}$,

Το μέσο φορτίο $P_{mean} = 30,6 \text{ KN}$,

Η ομοιομορφία φορτίου $P_{max}/P_{mean} = 2,36$

Η συνολική ενέργεια που δαπανήθηκε για την αξονική κατάρρευση του δοκιμίου είναι $E = 1989 \text{ KN mm}$

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

Το μέγιστο φορτίο $P_{max} = 74,7 \text{ KN}$,

Το μέσο φορτίο $P_{mean} = 33,2 \text{ KN}$,

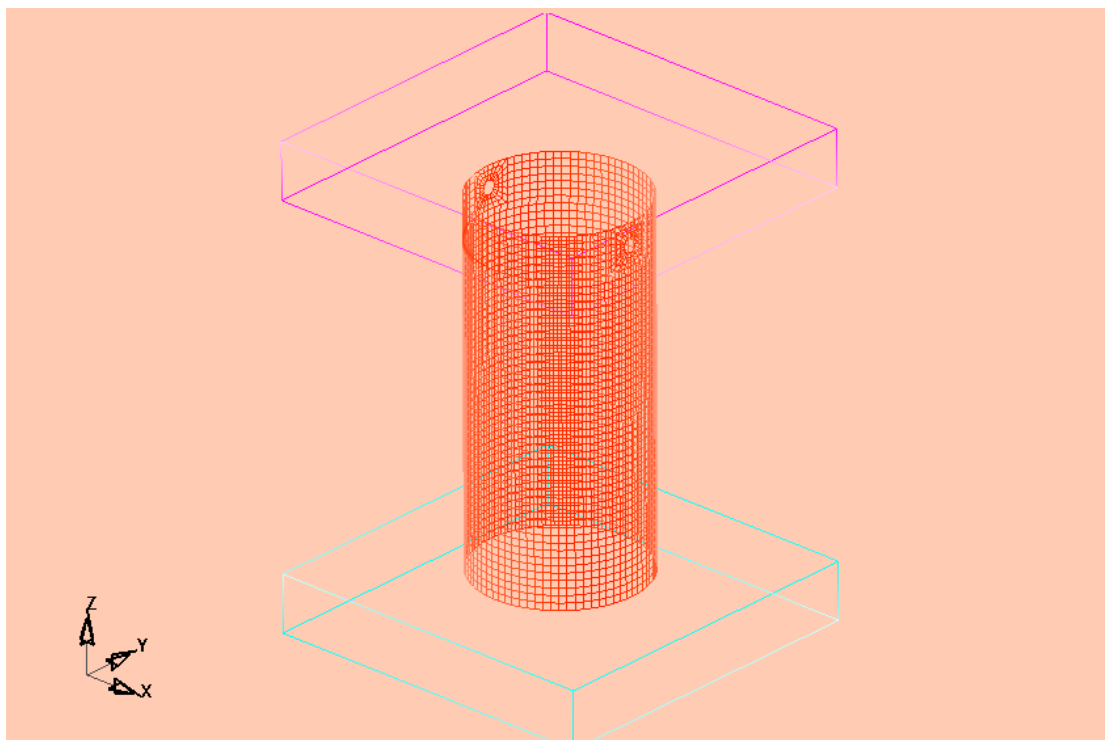
Η ομοιομορφία φορτίου $P_{max}/P_{mean} = 2,25$

Η συνολική ενέργεια που δαπανήθηκε για την αξονική κατάρρευση του δοκιμίου είναι $E = 2158 \text{ KN mm}$

ΕΝΟΤΗΤΑ 5-9 :

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΙΑΣ ΔΙΑΜΠΕΡΟΥΣ ΟΠΗΣ Φ5 ΜΕ ΚΕΝΤΡΟ ΣΤΑ 7.5mm ΑΠΟ ΤΟ ΑΝΩ ΧΕΙΛΟΣ ΤΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ (TYPE_5T2).

Το μοντέλο του δοκιμίου κυκλικής διατομής με μια οπή διαμπερή, διαμέτρου Φ5 σε ύψος 7.5mm από το άνω χείλος του δοκιμίου, και με πάχος τοιχώματος 2mm, παρουσιάζεται στην ακόλουθη εικόνα:



Σχ.1, Απεικόνιση πλέγματος στο LS-DYNA 3D, για κυκλικής διατομής δοκίμιο με μια διαμπερή οπή διαμέτρου Φ5 σε ύψος 7.5mm από το άνω χείλος του δοκιμίου.

Οι αντίστοιχες φάσεις προσομοίωσης της κατάρρευσης του δοκιμίου αυτού, που κατέγραψα με τη χρήση του LS-DYNA, σε σύγκριση με τις φάσεις που έλαβα από την ελληνική βιβλιογραφία [1] 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), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Δημιουργία αρχικού εκτατού λοβού στην περιοχή της οπής αφού εκεί ο κώδικας του LS-DYNA εκλαμβάνει πως υπάρχει η ανωμαλία στη δομή του δοκίμιο. Ομοίως συμβαίνει και στο πραγματικό δοκίμιο. Πάτημα πρέσας στα 2mm.



2^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Τελείωμα αρχικού εκτατού λοβού στην περιοχή της οπής. Πάτημα πρέσας στα 8mm.



3^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Στο δοκίμιο του LS-DYNA έχουμε δημιουργία δεύτερου μη εκτατού λοβού σε καρό μορφή (diamond) σε παράλληλο επίπεδο με διεύθυνση προς τα κάτω. Στο δοκίμιο του πειράματος έχουμε αρχή δημιουργίας και δεύτερου εκτατού λοβού. Πάτημα πρέσας στα 18mm.



4^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Στο δοκίμιο του LS-DYNA έχουμε τελείωμα του δεύτερου μη εκτατού λοβού όπου είναι εμφανής η καρό μορφή στην εικόνα. Επιπλέον ξεκινά η ύπαρξη λαιμού για δημιουργία τρίτου μη εκτατού λοβού. Στο πραγματικό δοκίμιο έχουμε τελείωμα του δεύτερου εκτατού λοβού και αρχή του τρίτου εκτατού λοβού σε παράλληλο επίπεδο προς τα κάτω. Πάτημα πρέσας στα 34mm.



5^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Στο δοκίμιο του LS-DYNA έχουμε τελείωμα του τρίτου μη εκτατού λοβού σε καρό μορφή, που είναι σε παράλληλο επίπεδο στραμμένο κατά $\pi/4$ ως προς τον προηγούμενο λοβό. Στο πραγματικό δοκίμιο έχουμε τελείωμα του τρίτου εκτατού λοβού. Πάτημα της πρέσας στα 50mm.



6^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Στο δοκίμιο του LS-DYNA έχουμε δημιουργία τέταρτου μη εκτατού λοβού που είναι σε παράλληλο επίπεδο στραμμένο κατά $\pi/4$ από τον προηγούμενο λοβό όπως και ο δεύτερος μη εκτατός λοβός. Στο πραγματικό δοκίμιο έχουμε τελίωμα τέταρτου εκτατού λοβού. Πάτημα πρέσας στα 65mm.

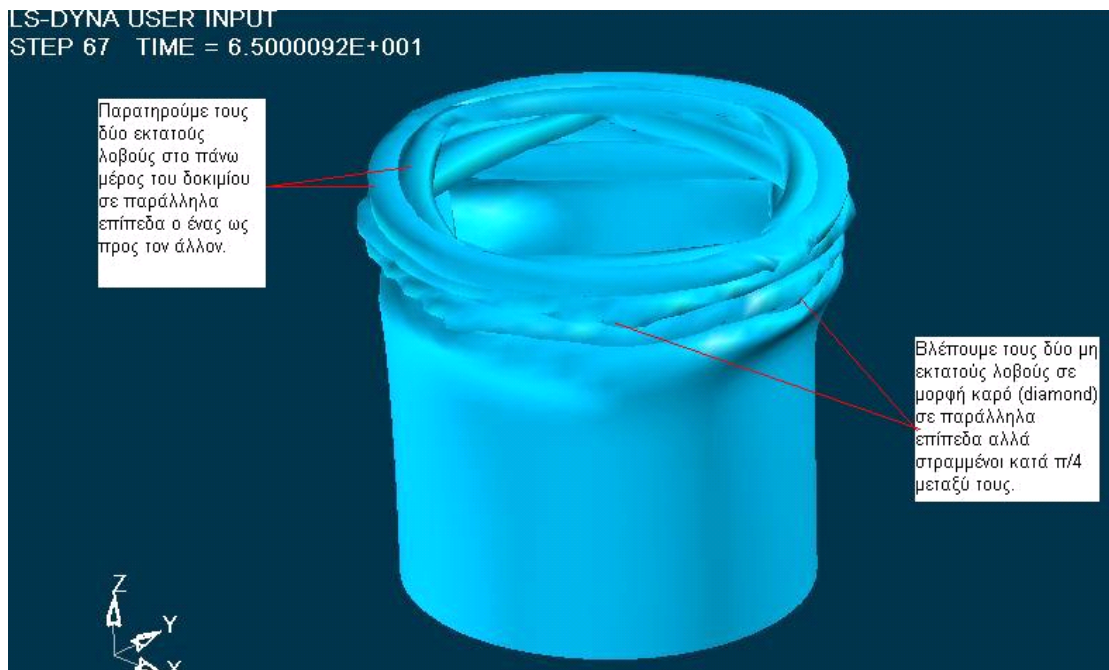


Τελική μορφή δοκιμίου αμέσως μετά το τέλος της διαδικασίας αξονικής κατάρρευσης στην πρέσα (δεξιά). Το ίδιο δοκίμιο μετά το τέλος της προσομοίωσης από το LS-DYNA, (αριστερά). Παρατηρούμε έναν εκτατό λοβό και τρεις μη εκτατούς λοβούς σε επίπεδα εναλλάξ κατά 45^0 . Τελικό πάτημα της πρέσας στα 65.0 mm.

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 65.0 mm:



Η ολοκληρωμένη προσομοίωση κατάρρευσης του μοντέλου μας με το LS-DYNA, παρουσιάζεται και στα αρχεία βίντεο:

- Deformation isometric.Avi
- [Deformation side.Avi](#)
- Deformation rear.Avi

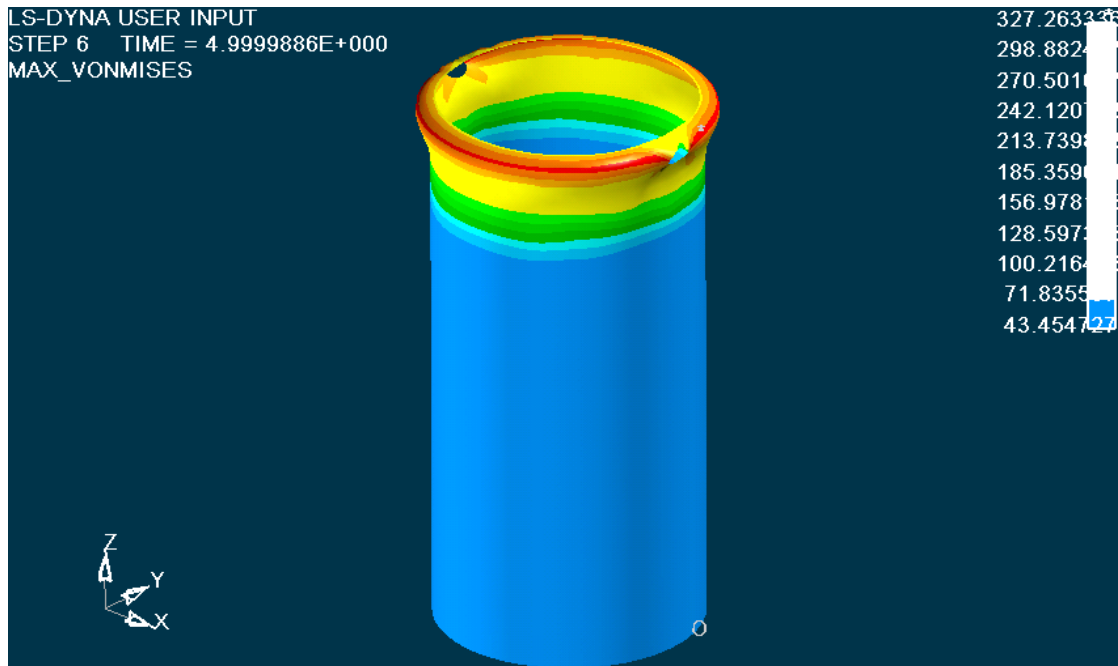
Ακολουθούν εικόνες από την κατανομή των τάσεων σε όλη την επιφάνεια του δοκιμίου κατά τα διάφορα στάδια της κατάρρευσής του:

Επιλέγοντας στον ETA POSTGL:

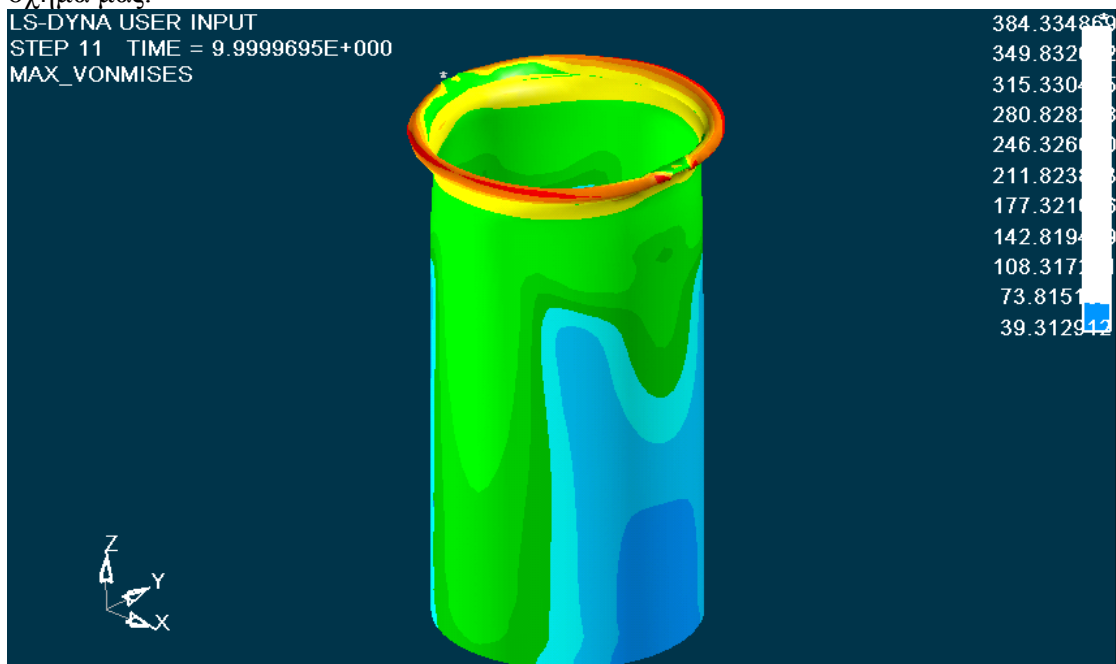
CONTOUR -> STRESS/STRAIN -> MAXIMUM VON MISES STRESSES:



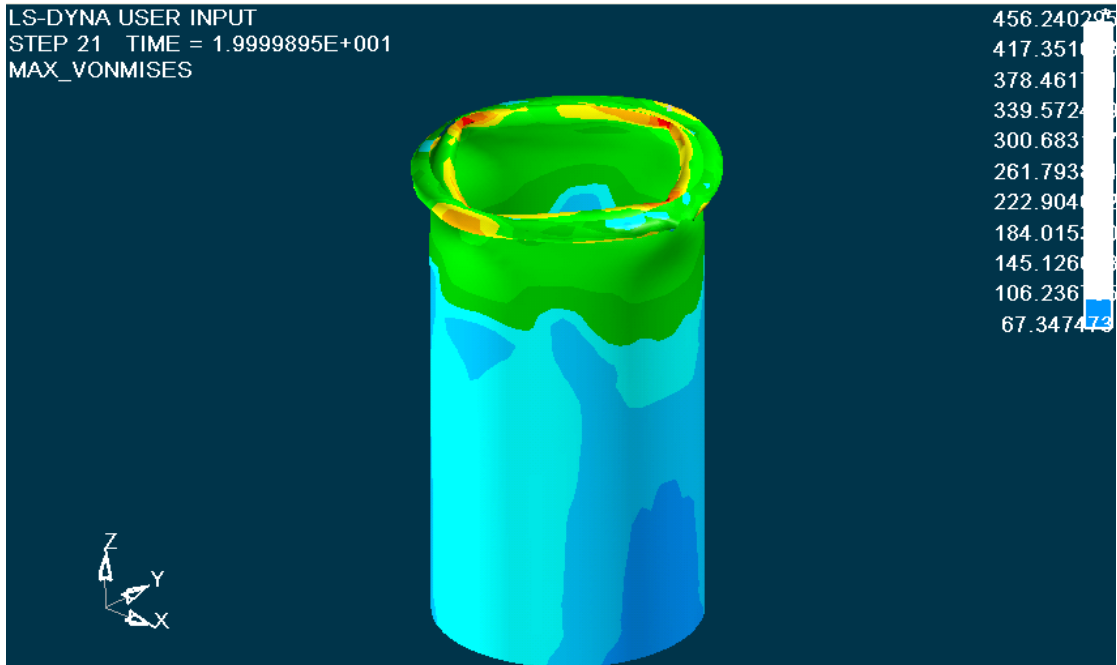
Κατανομή των τάσεων στο 1mm. Έχουμε εμφάνιση τάσεων στην περιοχή γύρω από την οπή του δοκιμίου, που όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 2, για την θεωρία των τάσεων γύρω από οπές, βλέπουμε ότι γύρω από την οπή του δοκιμίου, κατά την κατακόρυφη διεύθυνση που συμπίπτει με την διεύθυνση της αξονικής θλίψης του δοκιμίου, έχουμε τάσεις ίσες με $\sigma = 220 \text{ MPa}$, ενώ στο οριζόντιο μέσο επίπεδο της οπής, το οποίο είναι κάθετο ως προς το κατακόρυφο επίπεδο της αξονικής θλίψης του δοκιμίου, εκεί εμφανίζονται οι μέγιστες τάσεις για την κατάρρευση του δοκιμίου στη θέση της οπής, ίσες με $\sigma = 260 \text{ MPa}$. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή 260 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.



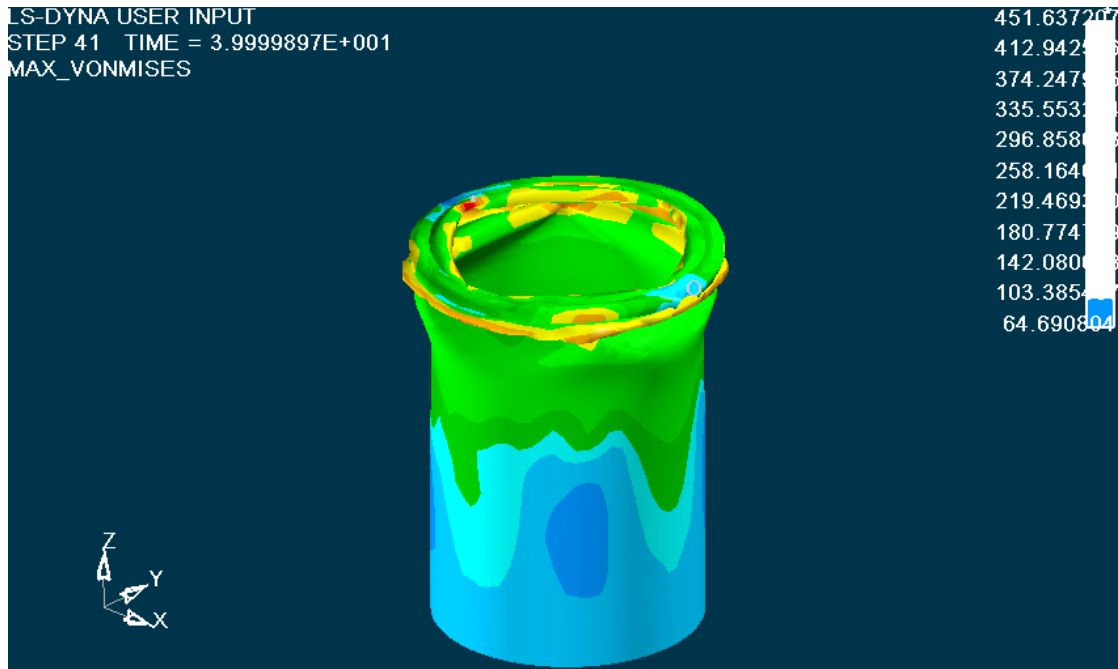
Κατανομή των τάσεων στο 5 mm. Έχουμε μέγιστες τάσεις στην περιοχή γύρω από την οπή του δοκιμίου, που πιέζει το έμβολο της πρέσσας, Ιδιαίτερα, στην περιοχή της οπής, οι τάσεις που εφαρμόζονται κατά την διεύθυνση της αξονικής θλίψης είναι $\sigma = 242 \text{ MPa}$, ενώ οι τάσεις που αναπτύσσονται στην οπή κάθετα προς την διεύθυνση αξονικής θλίψης του δοκιμίου, είναι $\sigma = 327 \text{ MPa}$. Το κάτω μέρος του δοκιμίου στα $\frac{3}{4}$ του ύψους έχει μικρότερες τάσεις από ότι συμβαίνει στο υπόλοιπο μέρος του δοκιμίου ίσες με 71 MPa . Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή 327 MPa , που βλέπουμε ότι είναι μεγαλύτερη τιμή από την τάση αντοχής του δοκιμίου ($\sigma_A = 240 \text{ MPa}$), οπότε καταρρέει το υλικό στη θέση της οπής, οπότε σχηματίζεται ο πρώτος εκτατός λοβός στο επίπεδο αυτό, και συνεχίζεται η κατάρρευση του δοκιμίου από την θέση αυτή και με διεύθυνση προς τα κάτω. Η περιοχή του δοκιμίου με τις ελάχιστες τάσεις συμβολίζεται με Ο στο σχήμα μας.



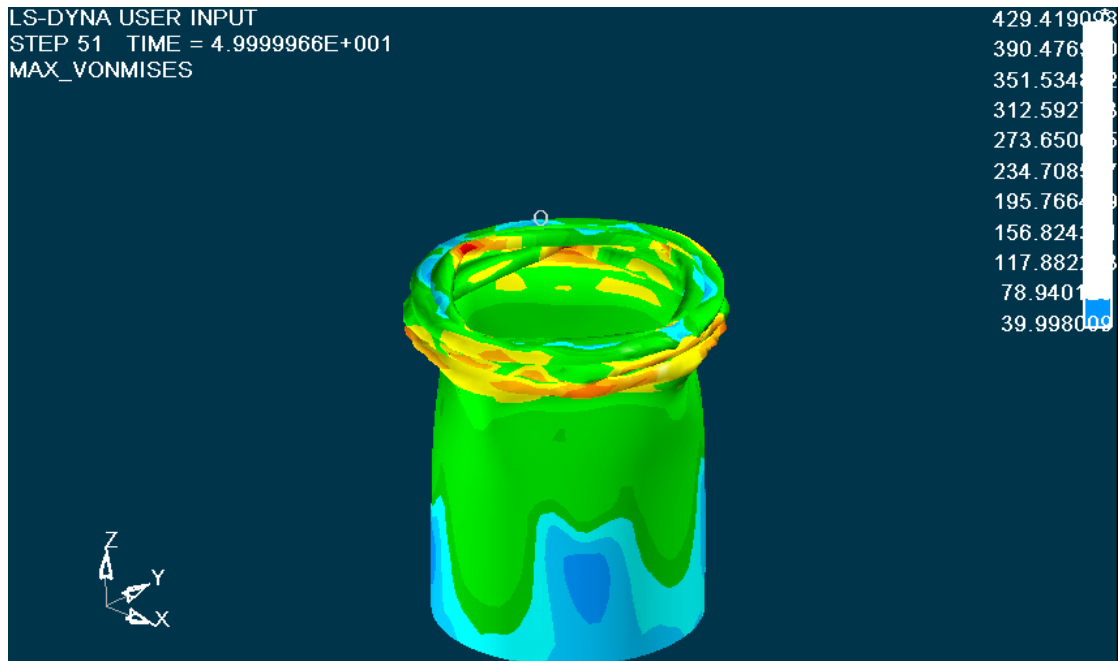
Κατανομή των τάσεων στο 10 mm. Έχουμε μέγιστες τάσεις στην περιοχή σχηματισμού του πρώτου λοβού στα σημεία αναδίπλωσης. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με **μέγιστη τιμή 384 MPa**. Στο υπόλοιπο μέρος του μοντέλου μας εξακολουθούμε να έχουμε εμφάνιση μικρότερων τάσεων στο κάτω μισό του δοκιμίου μας.



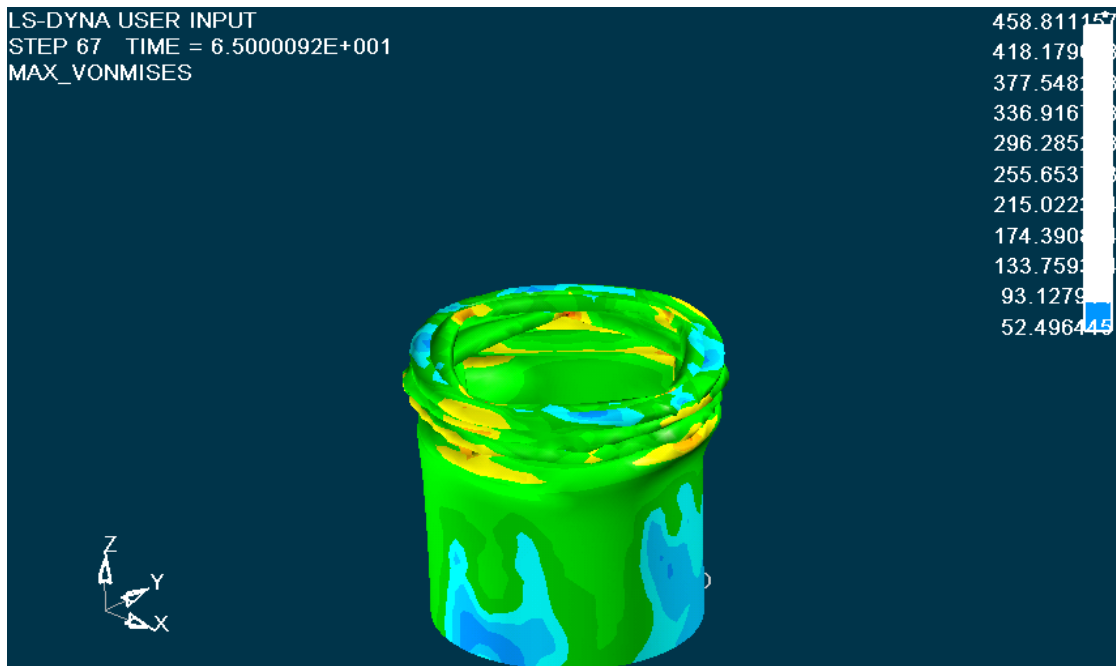
Κατανομή των τάσεων στο 20 mm. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με **μέγιστη τιμή 456 MPa** που βλέπουμε ότι είναι μεγαλύτερη τιμή από την τάση αντοχής του δοκιμίου ($\sigma_A = 240 \text{ MPa}$), οπότε αστοχεί το υλικό στη θέση της οπής. Ο πρώτος εκατοστός λοβός έχει σχηματιστεί πλήρως, και ξεκινά και ο σχηματισμός του δεύτερου μη εκατατού λοβού, σε επίπεδο παράλληλο προς τα κάτω σε σχέση με του αρχικού λοβού. Τάσεις σημαντικής τιμής, εμφανίζονται τώρα μόνο στις θέσεις που δημιουργείται λοβός. Στο κάτω 1/4 μέρος του δοκιμίου σημειώνονται μικρότερες τάσεις που φαίνονται και στο σχήμα, με τον αριθμό 0.



Κατανομή των τάσεων στο 40 mm. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή **451 MPa**. Στο πάνω μέρος του δοκιμίου στην περιοχή των οπών έχουμε την ελάχιστη τιμή των τάσεων που φαίνεται στην εικόνα με τον αριθμό μηδέν.



Κατανομή των τάσεων στο 50 mm. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη εμφανιζόμενη τιμή 429 MPa στις θέσεις των οπών. Έχουν σχηματιστεί και οι δύο μη εκτατοί λοβοί, και ήδη δημιουργείται και ο τρίτος μη εκτατός λοβός. Στο κάτω μέρος του δοκιμίου έχουμε μικρότερες τάσεις $\sigma = 117\text{MPa}$.

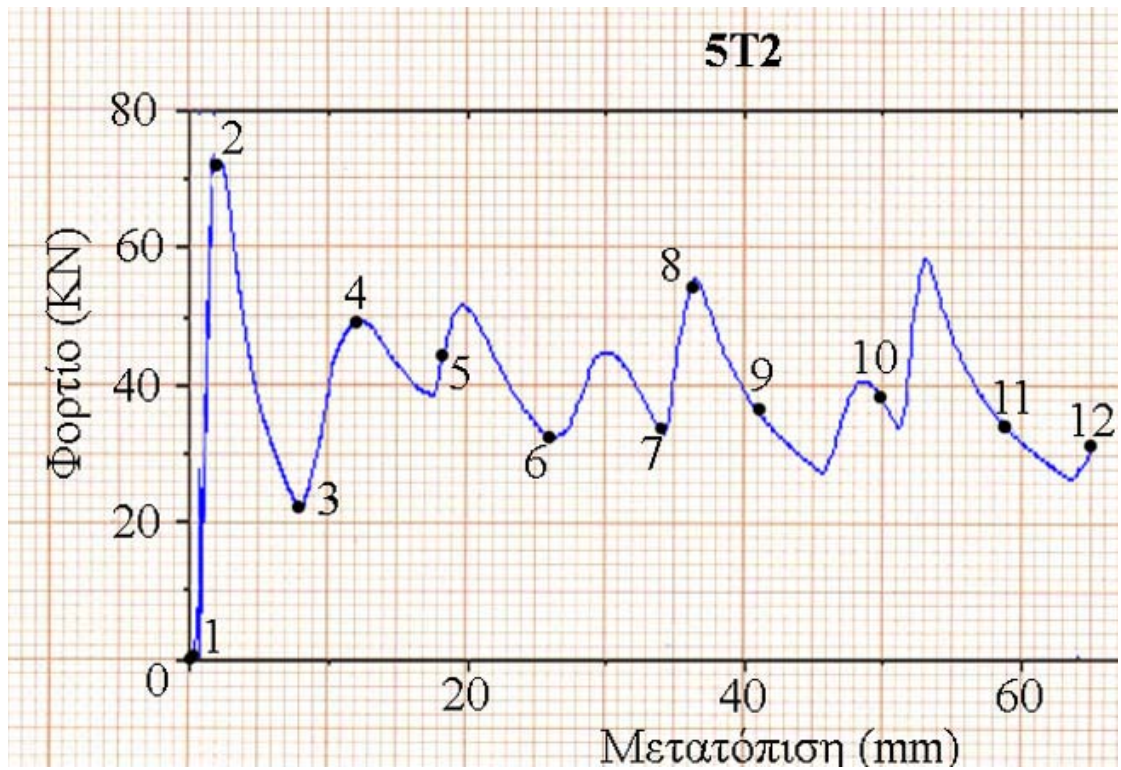


Κατανομή των τάσεων στο 65.0 mm. Οι τελικές τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη εμφανιζόμενη τιμή 458 MPa. Η κατάρρευση του δοκιμίου έχει πλέον ολοκληρωθεί, και οι τέσσερις τελικοί λοβοί έχουν σχηματιστεί πλήρως. Παρατηρούμε ότι οι μη εκτατοί λοβοί είναι στραμμένοι κατά $\pi/4$.

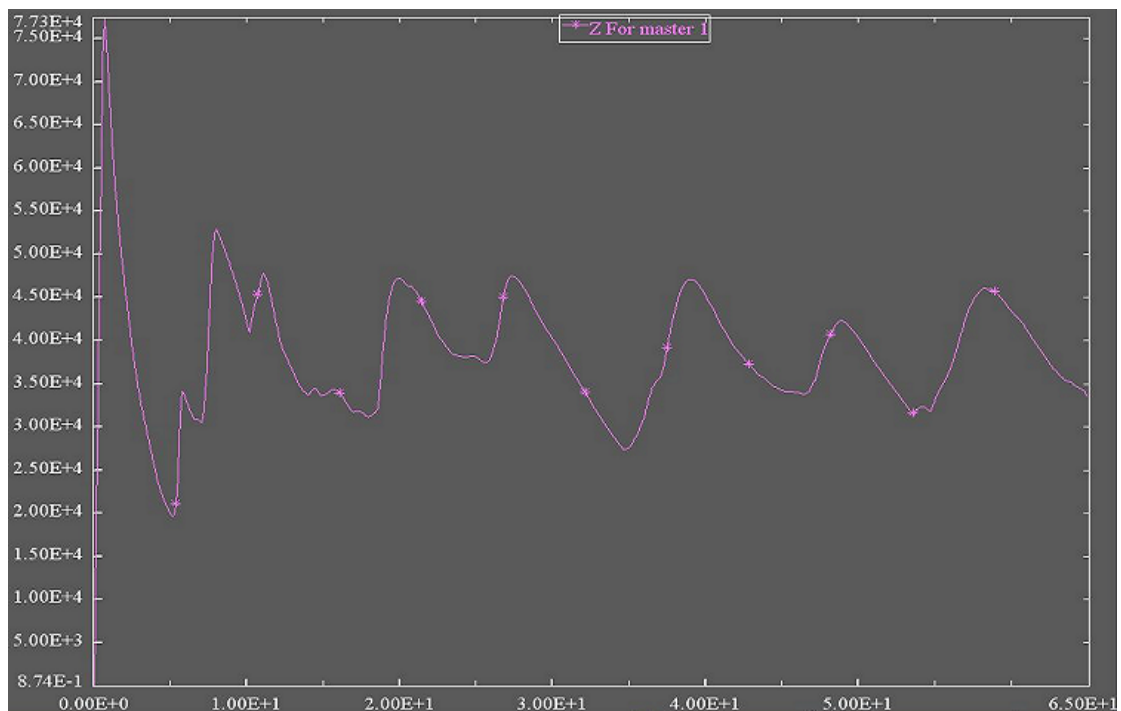
Η ολοκληρωμένη προσομοίωση της κατανομής των τάσεων του μοντέλου μας με το LS-DYNA, παρουσιάζεται και στο αρχείο βίντεο:

➤ [Contour Max Von Mises.Avi](#)

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



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

Το μέγιστο φορτίο $P_{max} = 72,54 \text{ KN}$,

Το μέσο φορτίο $P_{mean} = 39,14 \text{ KN}$,

Η ομοιομορφία φορτίου $P_{max}/P_{mean} = 1,85$

Η συνολική ενέργεια που δαπανήθηκε για την αξονική κατάρρευση του δοκιμίου είναι $E = 2544 \text{ KN mm}$

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

Το μέγιστο φορτίο $P_{max} = 77,30 \text{ KN}$,

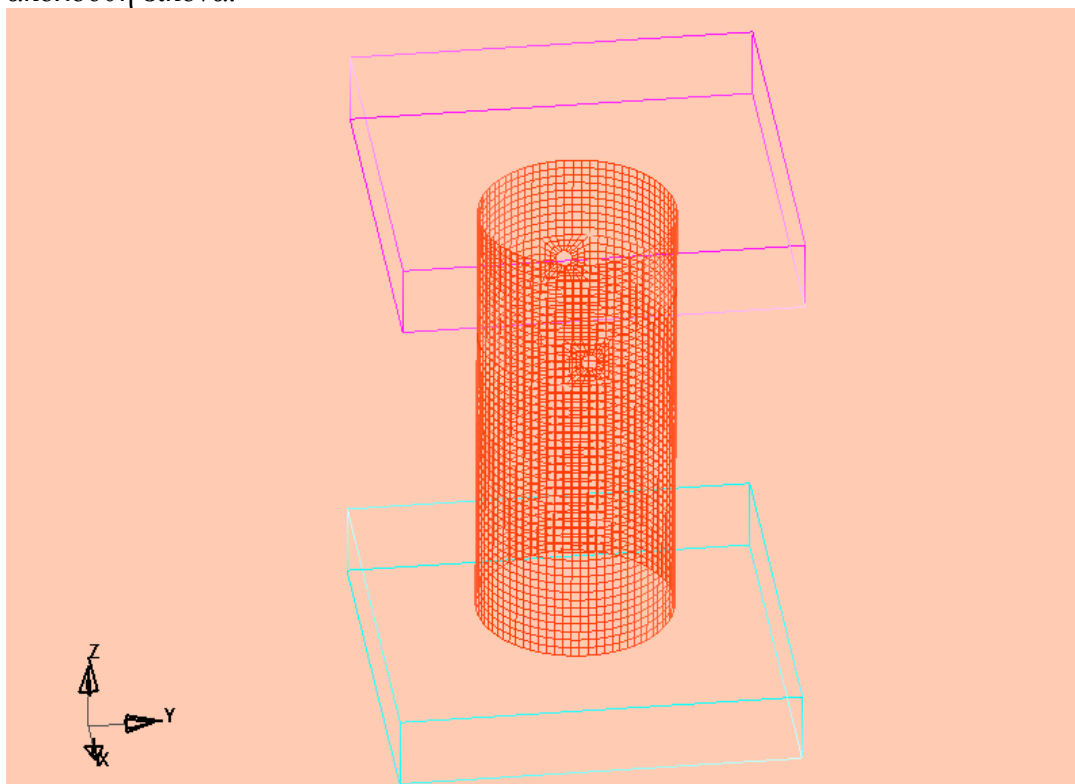
Το μέσο φορτίο $P_{mean} = 38,46 \text{ KN}$,

Η ομοιομορφία φορτίου $P_{max}/P_{mean} = 2,01$

Η συνολική ενέργεια που δαπανήθηκε για την αξονική κατάρρευση του δοκιμίου είναι $E = 2500 \text{ KN mm}$

ΕΝΟΤΗΤΑ 5-10 : ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΙΑΣ ΔΙΑΜΠΕΡΟΥΣ ΟΠΗΣ Φ5 ΣΤΟ ¼ ΤΟΥ ΥΨΟΥΣ Η (TYPE_5M2).

Το μοντέλο του δοκιμίου κυκλικής διατομής με μια οπή διαμετρή, διαμέτρου Φ5 σε ύψος 1/4 του δοκιμίου, και με πάχος τοιχώματος 2mm, παρουσιάζεται στην ακόλουθη εικόνα:



Σχ.1, Απεικόνιση πλέγματος στο LS-DYNA 3D, για κυκλικής διατομής δοκίμιο με μια διαμερή οπή διαμέτρου Φ5 στο ¼ του ύψους του.

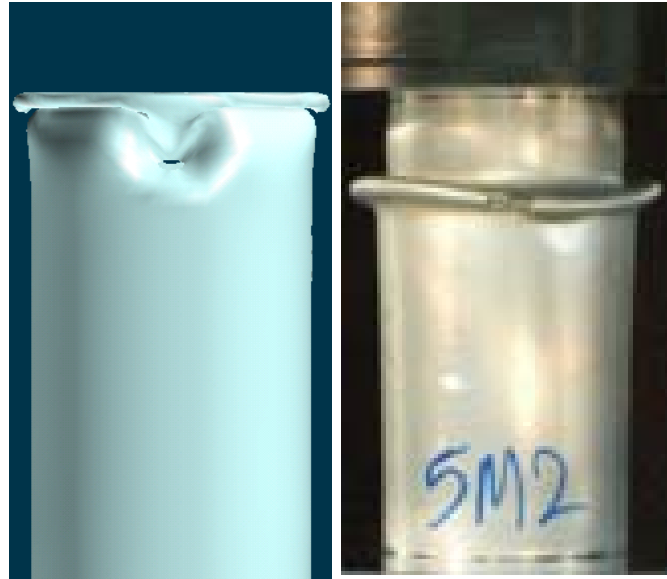
Οι αντίστοιχες φάσεις προσομοίωσης της κατάρρευσης του δοκιμίου αυτού, που κατέγραψα με τη χρήση του LS-DYNA, σε σύγκριση με τις φάσεις που έλαβα από την ελληνική βιβλιογραφία [1] με την χρήση πρέσας Instron, παρουσιάζονται στις επόμενες σελίδες:



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 1/4 του ύψους του (θέση οπής), ενώ στο μοντέλο του Is-dyna, η αρχική κατάρρευση σημειώνεται στη θέση επαφής του δοκιμίου με το έμβολο της πρέσας. Πάτημα της πρέσας στα 2 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 λοβού, και δημιουργία επόμενου μη εκτατού λοβού σε μορφή καρό (diamond), στο επόμενο παράλληλο επίπεδο προς τα κάτω στην περιοχή της οπής. Επίσης παρατηρούμε ροή του υλικού της περιοχής των οπών προς το εσωτερικό του δοκιμίου. Στο πραγματικό δοκίμιο έχουμε αξονοσυμμετρικό λοβό στη θέση της οπής. Πάτημα της πρέσας στα 19 mm.



3η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Στο δοκίμιο του ls-dyna βλέπουμε συνέχιση του δεύτερου μη εκτατού λοβού και είναι εμφανής η άρθρωση του που σχηματίζει το υλικό στην περιοχή των οπών. Στο πραγματικό δοκίμιο έχουμε αρχή θραύσης του υλικού στις θέσεις των οπών. 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). Τελείωμα δεύτερου μη εκτατού λοβού και αρχή τρίτου μη εκτατού λοβού. Στο δοκίμιο του πειράματος συνεχίζεται η θραύση του υλικού και έχουμε μετατόπιση του αξονοσυμμετρικού λοβού προς τα πάνω και ακουμπάει το πάνω έμβολο της πρέσας. Πάτημα της πρέσας στα 36mm.



5η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Παρατηρούμε την δημιουργία νέου μη έκτατου λοβού στο παράλληλο επίπεδο κάτω από τον προηγούμενο λοβό στραμμένο κατά $\pi/4$ ως προς τον προηγούμενο μη εκτατό λοβό. Επιπλέον στην διατομή του δοκιμίου στην σταθερή πλάκα της πρέσας έχουμε διαρροή του υλικού για δημιουργία εκτατού λοβού. Στο

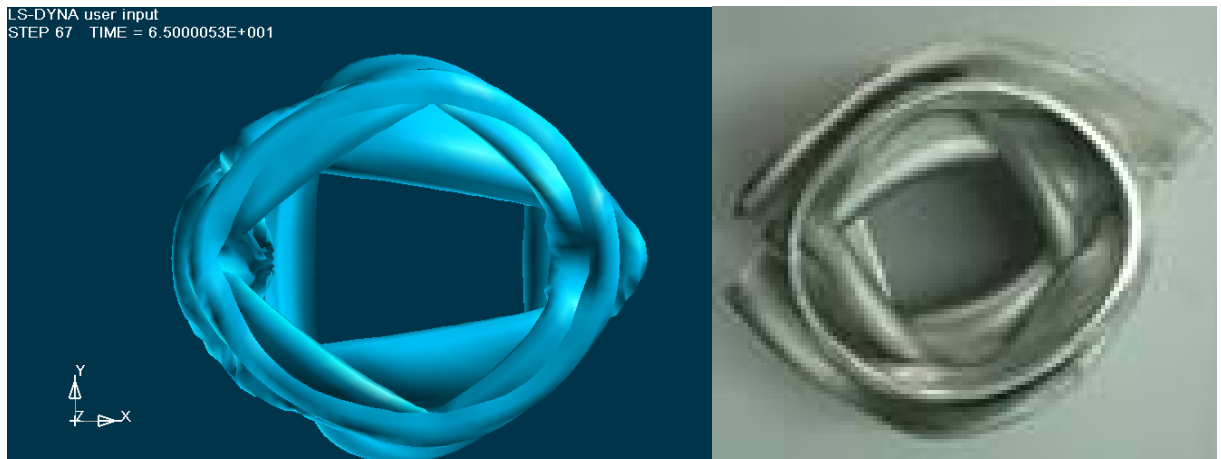
δοκίμιο του εργαστηρίου έχουμε δημιουργία και μη εκτατού λοβού. Πάτημα της πρέσας στα 45mm.



6η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Στο δοκίμιο του Is-dyna έχει σχηματιστεί και ο τρίτος μη εκτατός λοβός και στην κάτω διάμετρο που έρχεται σε επαφή με την πλάκα φαίνεται ξεκίνημα αξονοσυμμετρικού λοβού. Πάτημα της πρέσας στα 56mm.

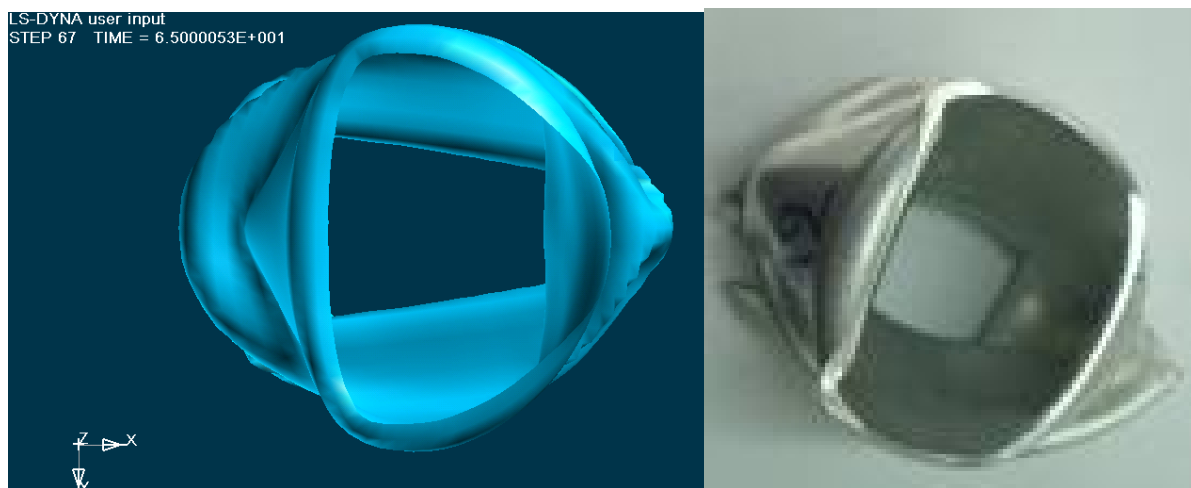


7η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Ολοκλήρωση και τρίτου μη εκτατού λοβού στραμμένος κατά $\pi/2$ σε σχέση με τον προηγούμενο μη εκτατό λοβό. Ενώ η αύξηση υλικού στην πάνω επιφάνεια φανερώνει την αύξηση ενέργειας. Στην κάτω διάμετρο έχουμε ανύψωση του υλικού του δοκιμίου με αποτέλεσμα να παρατηρούμε αρχή του φαινόμενου λυγισμού. Τέλος αξονικής κατάρρευσης δοκιμίου στην πρέσα. Πάτημα της πρέσας στα 65.0mm.

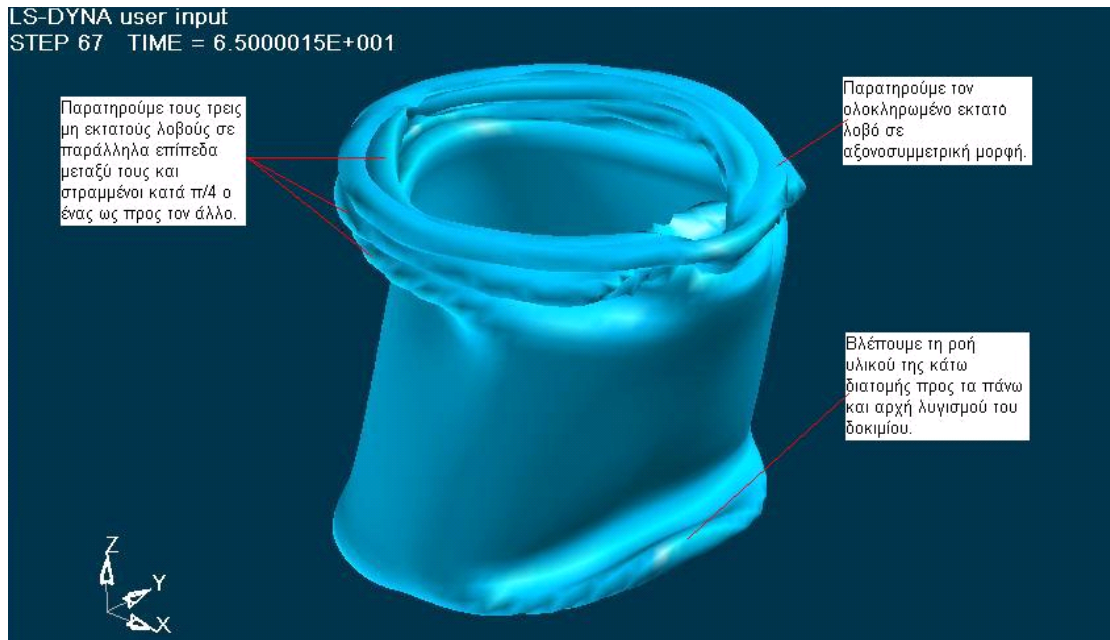


Τελική μορφή δοκιμίου αμέσως μετά το τέλος της διαδικασίας αξονικής κατάρρευσης στην πρέσα (δεξιά). Το ίδιο δοκίμιο μετά το τέλος της προσομοίωσης από το LS-DYNA,(αριστερά).

Παρατηρούμε έναν εκτατό λοβό και τρεις μη εκτατούς λοβούς σε επίπεδο στραμμένο κατά 45° μοίρες ο πρώτος με τον δεύτερο και κατά 90° ο δεύτερος με τον τρίτο στο δοκίμιο του LS-DYNA ενώ στο δοκίμιο του εργαστηρίου κατά 90° μοίρες. 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 65.0 mm:



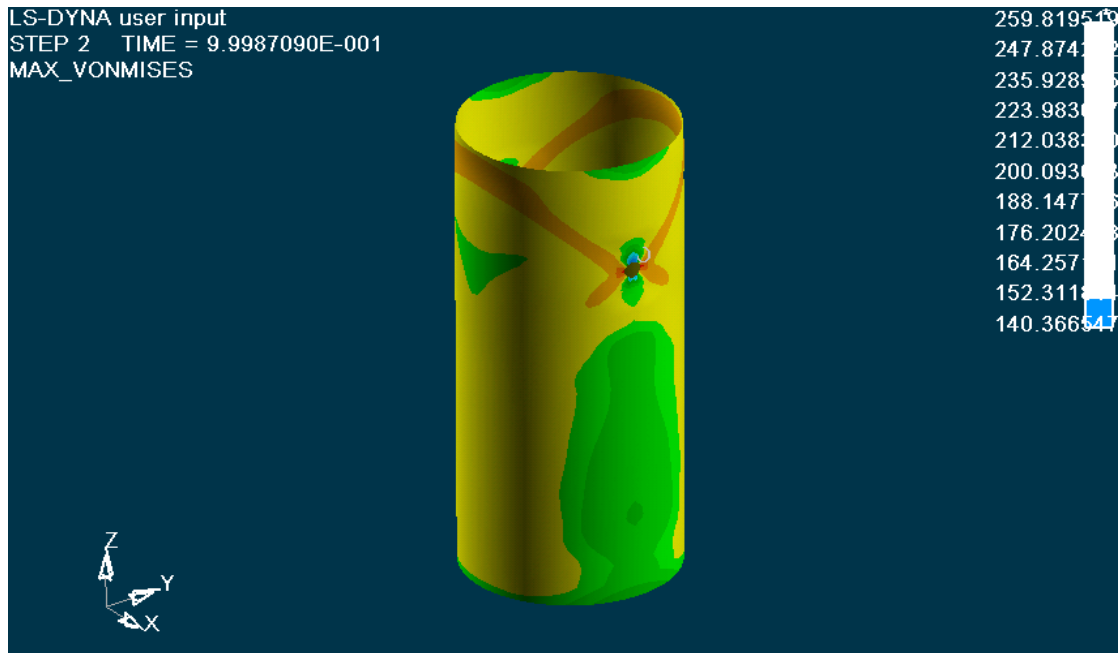
Η ολοκληρωμένη προσομοίωση κατάρρευσης του μοντέλου μας με το LS-DYNA, παρουσιάζεται και στα αρχεία βίντεο:

- Deformation isometric.Avi
- [Deformation side.Avi](#)
- Deformation rear.Avi

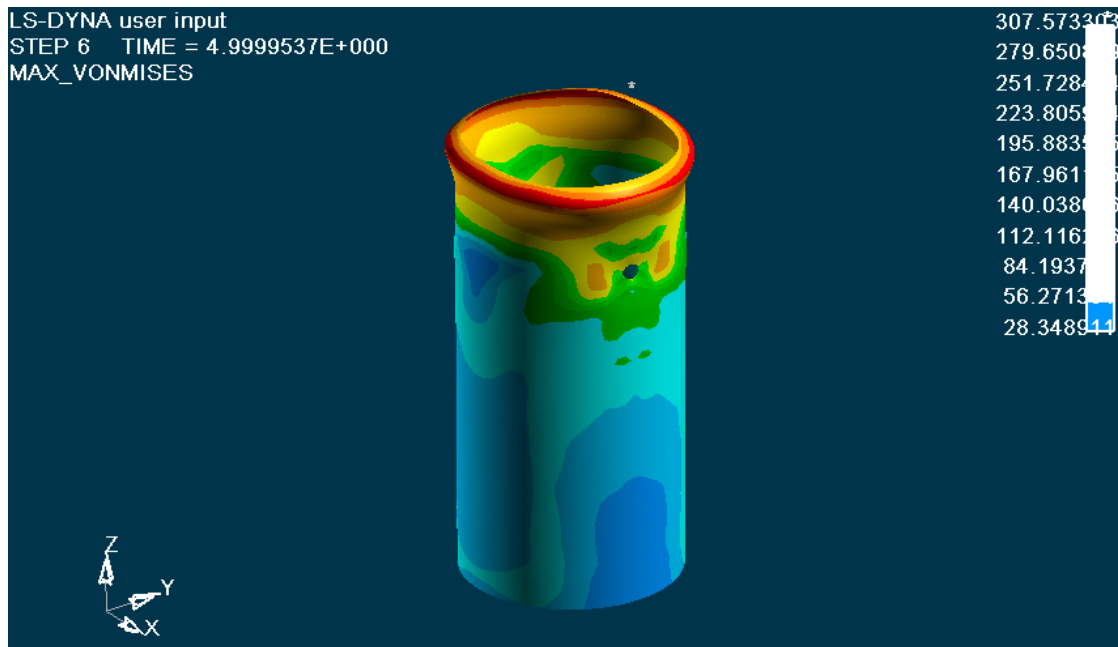
Ακολουθούν εικόνες από την κατανομή των τάσεων σε όλη την επιφάνεια του δοκιμίου κατά τα διάφορα στάδια της κατάρρευσής του:

Επιλέγοντας στον ETA POSTGL:

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



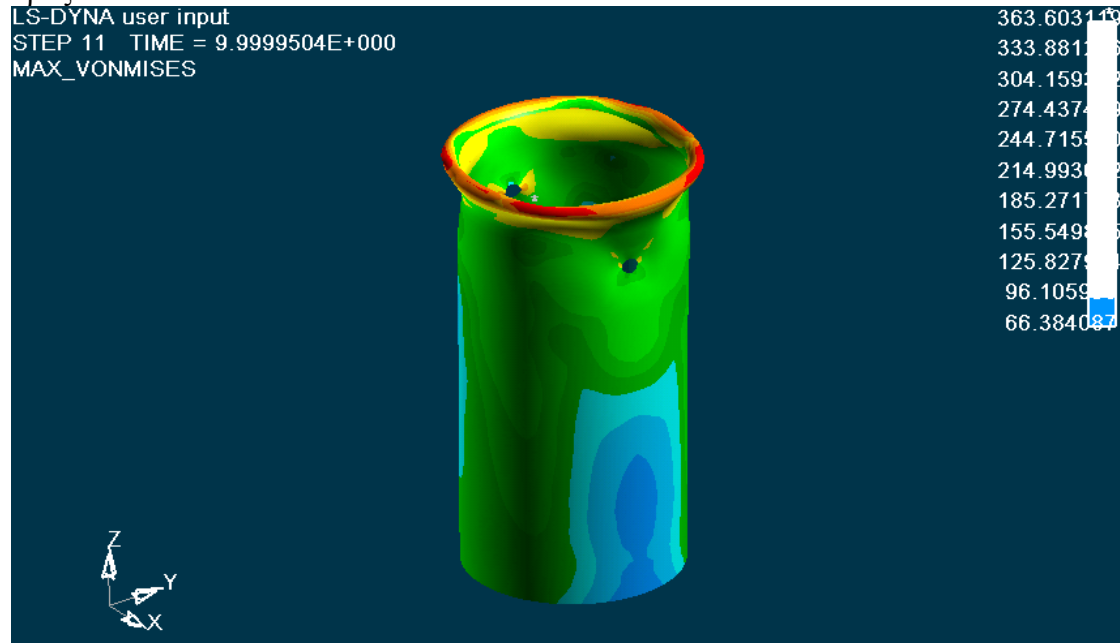
Κατανομή των τάσεων στο 1mm. Έχουμε εμφάνιση τάσεων στην περιοχή γύρω από την οπή του δοκιμίου, που όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 2, για την θεωρία των τάσεων γύρω από οπές, βλέπουμε ότι γύρω από την οπή του δοκιμίου, κατά την κατακόρυφη διεύθυνση που συμπίπτει με την διεύθυνση της αξονικής θλίψης του δοκιμίου, έχουμε τάσεις ίσες με $\sigma = 200\text{MPa}$, ενώ στο οριζόντιο μέσο επίπεδο της οπής, το οποίο είναι κάθετο ως προς το κατακόρυφο επίπεδο της αξονικής θλίψης του δοκιμίου, εκεί εμφανίζονται οι μέγιστες τάσεις για την κατάρρευση του δοκιμίου στη θέση της οπής, ίσες με $\sigma = 259\text{MPa}$.



Κατανομή των τάσεων στο 5 mm. Έχουμε μέγιστες τάσεις στην περιοχή γύρω από την οπή του δοκιμίου, που πιέζει το έμβολο της πρέσας. Ιδιαίτερα, στην περιοχή της οπής, οι τάσεις που εφαρμόζονται κατά την διεύθυνση της αξονικής θλίψης είναι

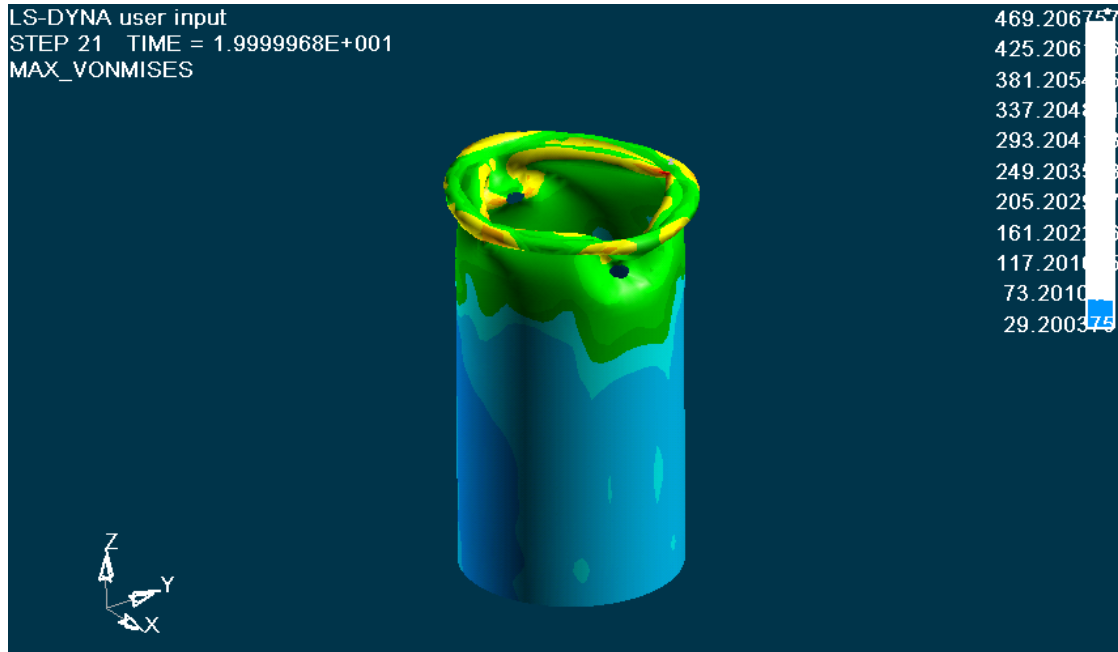
$\sigma = 195\text{MPa}$, ενώ οι τάσεις που αναπτύσσονται στην οπή κάθετα προς την διεύθυνση αξονικής θλίψης του δοκιμίου, είναι $\sigma = 223\text{MPa}$.

Το κάτω 3/4 μέρος του δοκιμίου έχει μικρότερες τάσεις από ότι συμβαίνει στο υπόλοιπο μέρος του δοκιμίου. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με **μέγιστη τιμή 307 MPa** η οποία είναι μεγαλύτερη από το όριο αντοχής του υλικού ($\sigma_A=240\text{ MPa}$), στην επιφάνεια πίεσης του εμβόλου και συνεχίζεται η κατάρρευση του δοκιμίου από την θέση αυτή και με διεύθυνση προς τα κάτω.



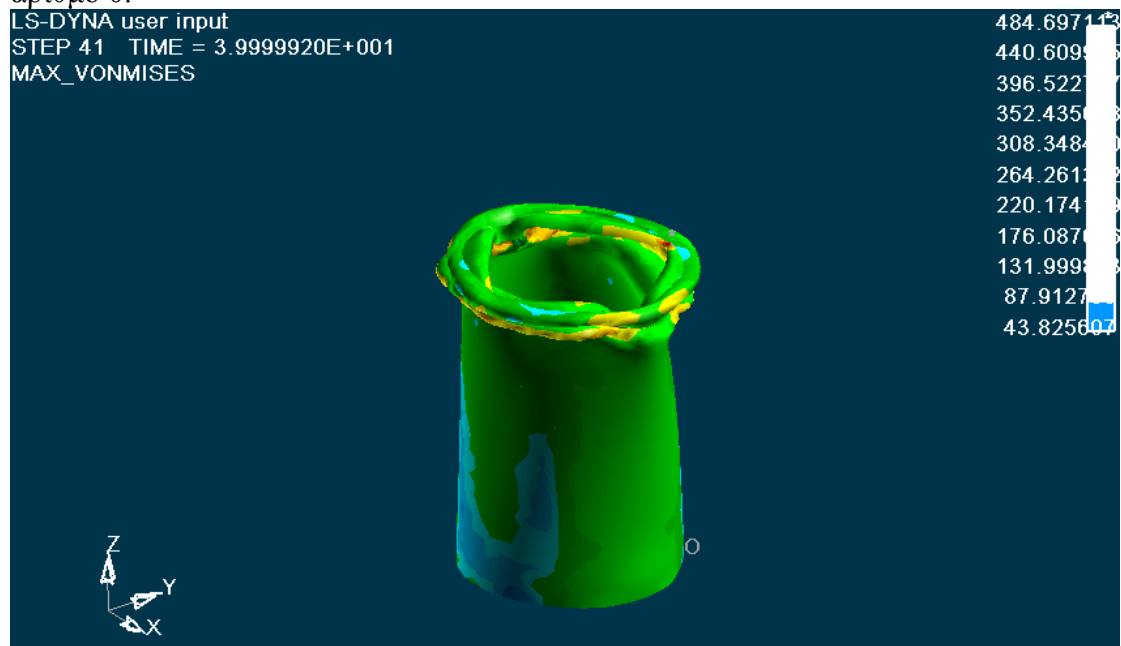
Κατανομή των τάσεων στο 10 mm. Έχουμε μέγιστες τάσεις στην περιοχή σχηματισμού του πρώτου λοβού στα σημεία αναδίπλωσης. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με **μέγιστη τιμή 363 MPa**, η οποία είναι μεγαλύτερη από το όριο αντοχής του υλικού ($\sigma_A=240\text{ MPa}$), οπότε ξεκινάει η πλαστική παραμόρφωση του δοκιμίου, με εμφάνιση μονίμων παραμορφώσεων σε αυτό.

Στο υπόλοιπο μέρος του μοντέλου μας εξακολουθούμε να έχουμε εμφάνιση μικρότερων τάσεων στο κάτω 3/4 του δοκιμίου μας. Η περιοχή των ελάχιστων τάσεων συμβολίζεται με 0 στην εικόνα.

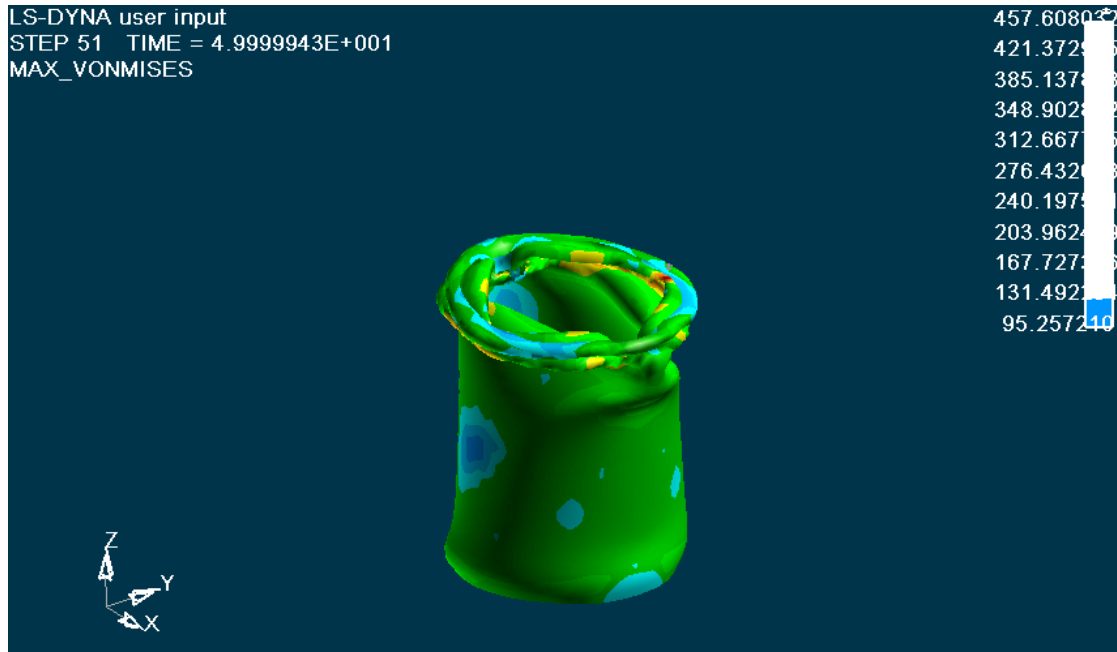


Κατανομή των τάσεων στο 20 mm. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με **μέγιστη τιμή 469 MPa** που είναι μεγαλύτερη της τάσης αντοχής που $\sigma_{avt}=240\text{MPa}$ και εμφανίζεται στις ακμές του μη εκτατού λοβού που περιλαμβάνει και τις περιοχές υλικού πάνω από τις οπές.

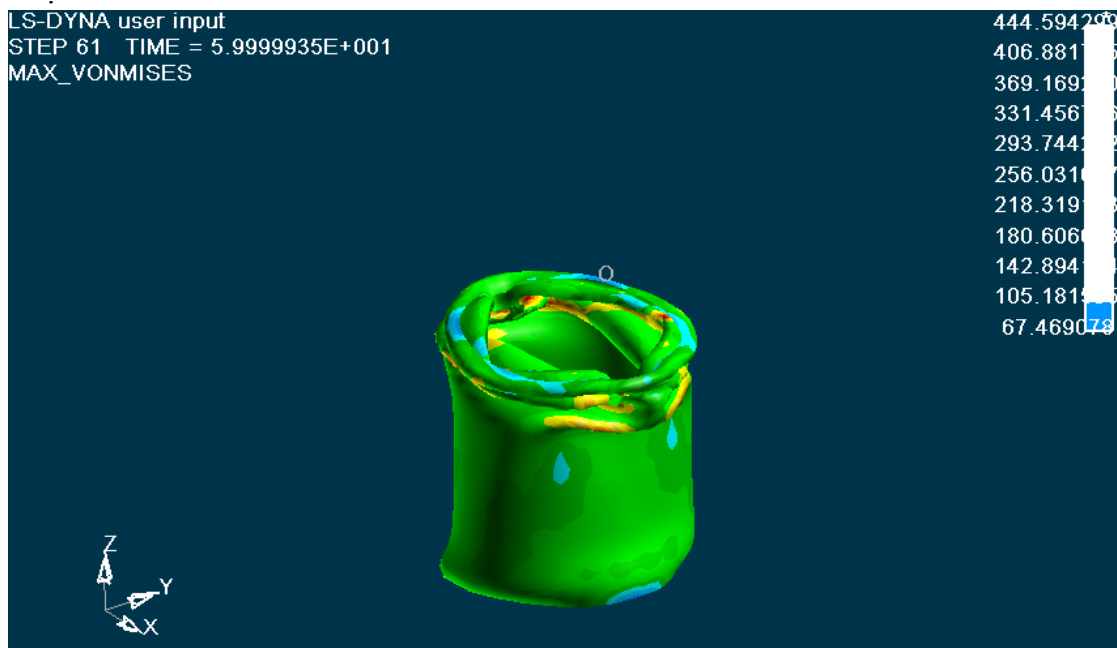
Ο πρώτος μη εκτατός λοβός έχει σχηματιστεί πλήρως, και ξεκινά και ο σχηματισμός του δεύτερου μη εκτατού λοβού, σε επίπεδο παράλληλο προς τα κάτω, και στραμμένο κατά γωνία $\pi/4$ ως προς το προηγούμενο επίπεδο του αρχικού λοβού. Τάσεις σημαντικής τιμής, εμφανίζονται τώρα σχεδόν σε όλο το μήκος καθ' ύψος του δοκιμίου. Στο κάτω 1/2 του δοκιμίου σημειώνονται μικρότερες τάσεις της τάξης των **73MPa**, που φαίνονται και στο σχήμα, με τον αριθμό 0.



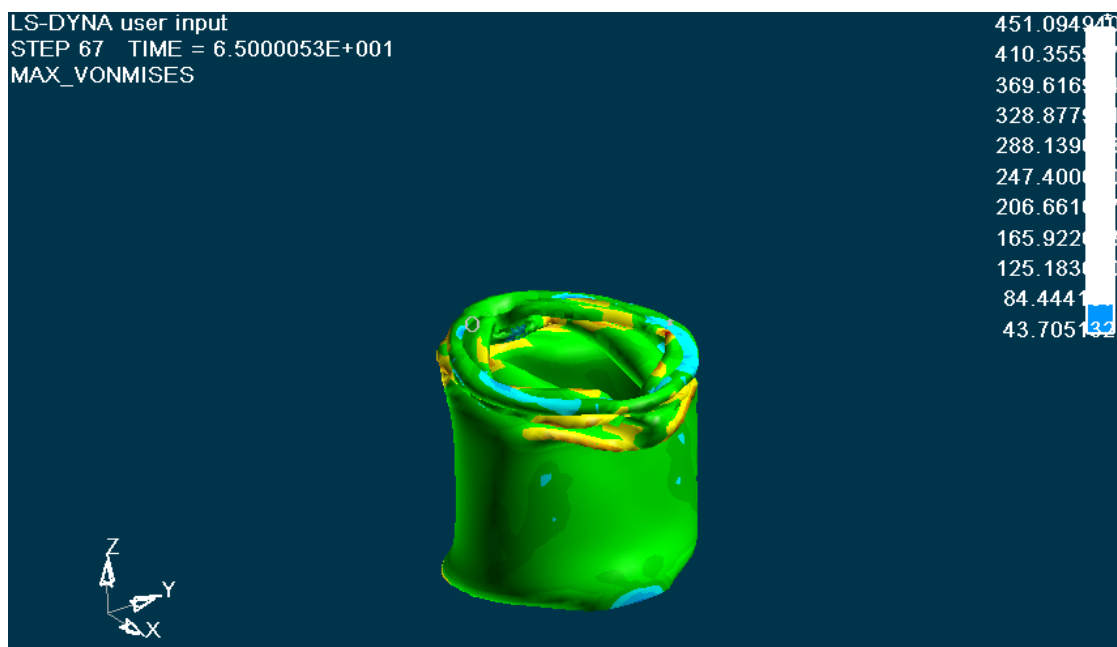
Κατανομή των τάσεων στο 40 mm. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με **μέγιστη τιμή 484 MPa**. Στο κάτω μέρος του δοκιμίου που έρχεται σε επαφή με την σταθερή πλάκα, έχουμε την ελάχιστη τιμή των τάσεων που φαίνεται στην εικόνα της τάξης των **87MPa** στην περιοχή που συμβολίζεται με O.



Κατανομή των τάσεων στο 50 mm. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη εμφανιζόμενη τιμή **457 MPa**. Έχουν σχηματιστεί και οι τρεις λοβοί, και ήδη δημιουργείται και ο τρίτος μη εκτατός λοβός. Στο κάτω μέρος του δοκιμίου έχουμε μικρότερες τάσεις $\sigma = 131 \text{ MPa}$.



Κατανομή των τάσεων στο 60 mm. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη εμφανιζόμενη τιμή **444 MPa**. Η κατάρρευση του δοκιμίου, και η εμφάνιση των τεσσάρων εκτατών και μη εκτατών λοβών, σε επίπεδα εναλλάξ στραμμένα μεταξύ τους κατά γωνία $\pi/4$ και $\pi/2$ αντίστοιχα, αρχίζει να είναι πλέον εμφανής σε όλο το δοκίμιο

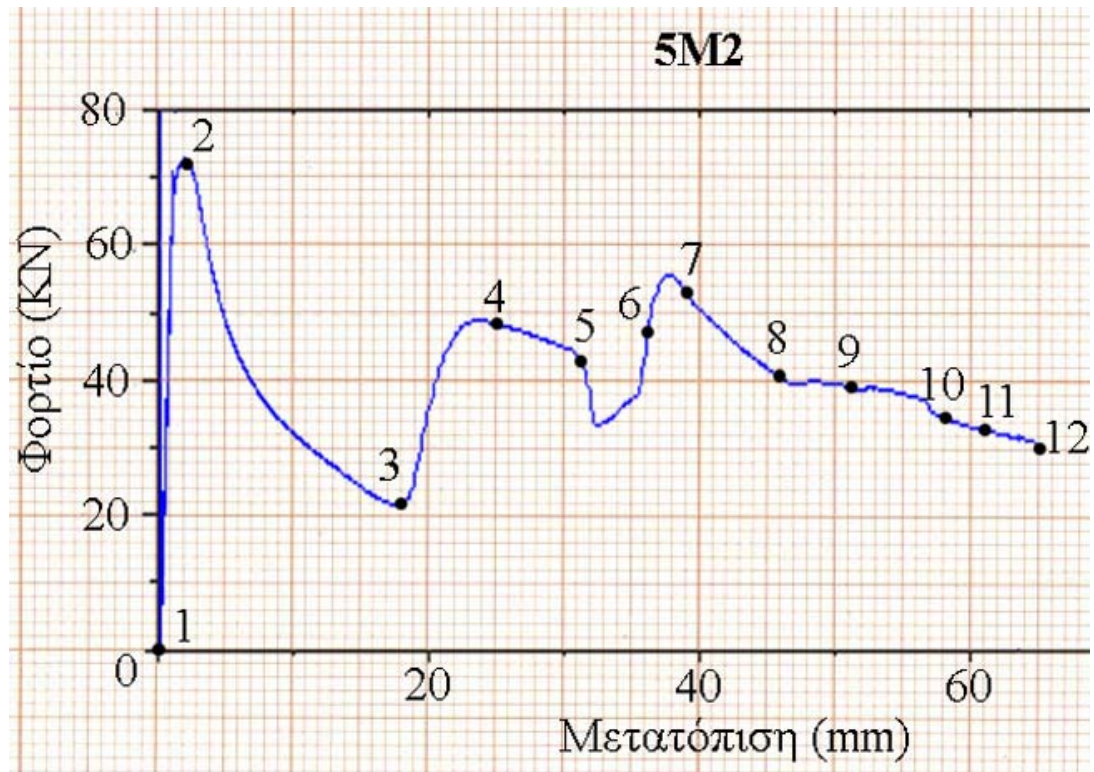


Κατανομή των τάσεων στο 65.0mm. Οι τελικές τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη εμφανιζόμενη τιμή 451 MPa. Η κατάρρευση του δοκιμίου έχει πλέον ολοκληρωθεί, και οι τέσσερις τελικοί εκτατοί και μη εκτατοί λοβοί έχουν σχηματιστεί πλήρως.

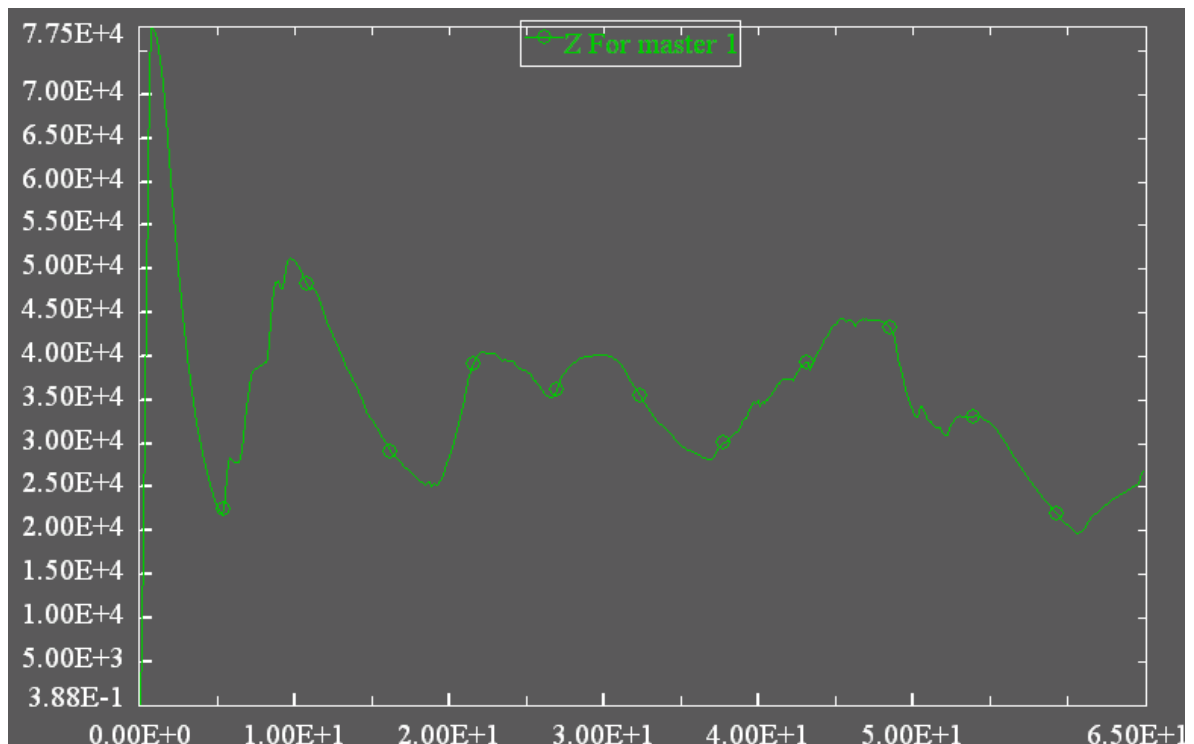
Η ολοκληρωμένη προσομοίωση της κατανομής των τάσεων του μοντέλου μας με το LS-DYNA, παρουσιάζεται και στο αρχείο βίντεο:

➤ [Contour Max Von Mises.Avi](#)

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



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

Το μέγιστο φορτίο $P_{max} = 72,43 \text{ KN}$

Το μέσο φορτίο $P_{mean} = 39,29 \text{ KN}$,

Η ομοιομορφία φορτίου $P_{max}/P_{mean} = 1,84$

Η συνολική ενέργεια που δαπανήθηκε για την αξονική κατάρρευση του δοκιμίου είναι $E = 2554 \text{ KN mm}$

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

Το μέγιστο φορτίο $P_{max} = 77,50 \text{ KN}$,

Το μέσο φορτίο $P_{mean} = 35,08 \text{ KN}$,

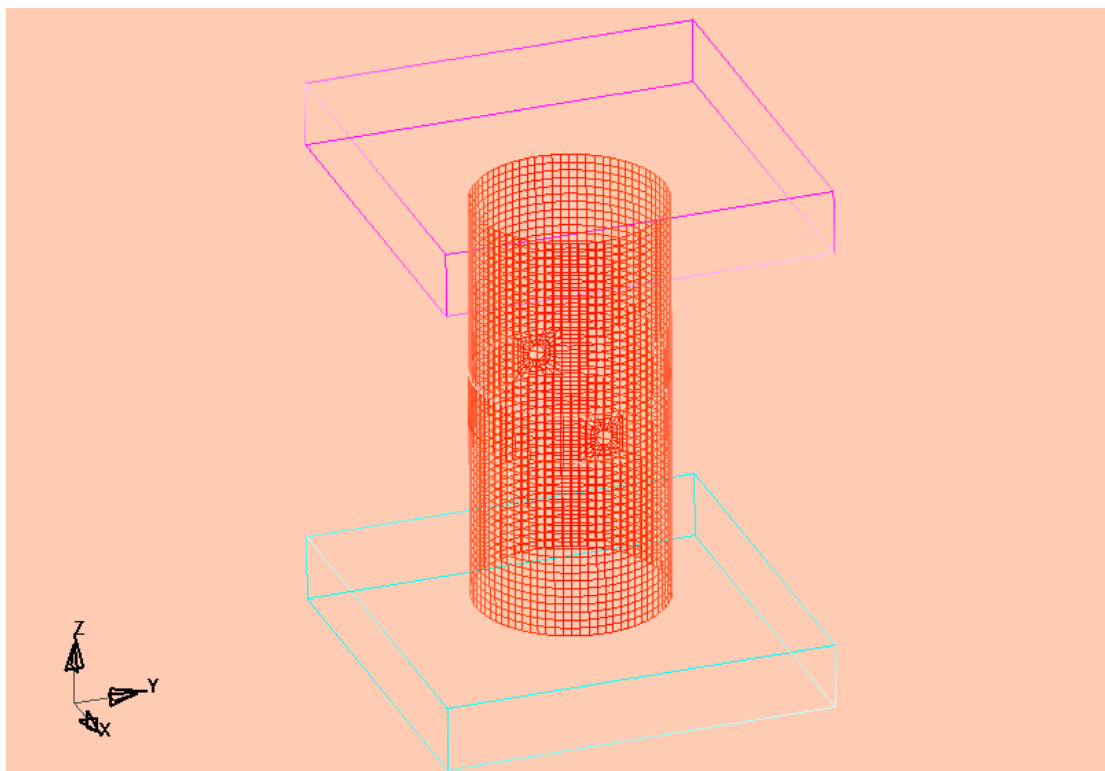
Η ομοιομορφία φορτίου $P_{max}/P_{mean} = 2,21$

Η συνολική ενέργεια που δαπανήθηκε για την αξονική κατάρρευση του δοκιμίου είναι $E = 2280 \text{ KN mm}$

ΕΝΟΤΗΤΑ 5-11:

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΙΑΣ ΔΙΑΜΠΕΡΟΥΣ ΟΠΗΣ Φ5 ΣΤΟ 1/2 ΤΟΥ ΥΨΟΥΣ Η (TYPE_5B2).

Το μοντέλο του δοκιμίου κυκλικής διατομής με μια οπή διαμπερή, διαμέτρου Φ5, στο 1/2 του ύψους του δοκιμίου και με πάχος τοιχώματος 2mm, παρουσιάζεται στην ακόλουθη εικόνα:



Σχ.1, Απεικόνιση πλέγματος στο LS-DYNA 3D, για κυκλικής διατομής δοκίμιο με μια διαμπερή οπή διαμέτρου Φ5.

Οι αντίστοιχες φάσεις προσομοίωσης της κατάρρευσης του δοκιμίου αυτού, που κατέγραψα με τη χρήση του LS-DYNA, σε σύγκριση με τις φάσεις που έλαβα από την ελληνική βιβλιογραφία [1] 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 μη εκτατού λοβού. Παρατηρούμε ότι το πραγματικό δοκίμιο στην πρέσα, αρχίζει να καταρρέει στο μισό του ύψους του (θέση οπής), ενώ και στο μοντέλο του ls-dyna, η αρχική κατάρρευση σημειώνεται στη θέση αυτή του δοκιμίου με στένεμα της διατομής και εμφάνιση φαινομένου λυγισμού. Πάτημα της πρέσας στα 2 mm.



2^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Δημιουργία αρχικού μη εκτατού λοβού. Παρατηρούμε στο δοκίμιο του Is-dyna την ροή υλικού από τις θέσεις των οπών στο εσωτερικό να είναι εντονότερη, καθώς και οι πάνω και κάτω διατομή τείνουν να δημιουργήσουν αξονοσυμμετρικούς λοβούς. Στο πραγματικό δοκίμιο ο εκτατός λοβός στις περιοχές των οπών έχει πλέον σχηματιστεί πλήρως. Πάτημα της πρέσας στα 9 mm.



3^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Στο δοκίμιο του Is-dyna έχουμε δημιουργία μη εκτατού 2D λοβού στην πάνω διατομή και στο μέσο του δοκιμίου και εκτατού λοβού στην κάτω διατομή ο καθένας στραμμένος

κατά π/2. Στο δοκίμιο της πρέσας έχουμε θραύση στις θέσεις των οπών. Πάτημα της πρέσας στα 24 mm.



4^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το Is-dyna (αριστερή εικόνα). Στο δοκίμιο του Is-dyna έχουμε στένεμα της πάνω διατομής με μετατόπιση υλικού προς το κέντρο της διατομής και το υλικό πάνω από την οπή μετατοπίζεται στο εσωτερικό του δοκιμίου. Στο δοκίμιο στην πρέσα έχουμε θραύση του εκατού λοβού και μετατόπιση των δύο μερών προς τα πάνω και κάτω αντίστοιχα. Πάτημα της πρέσας στα 38 mm.

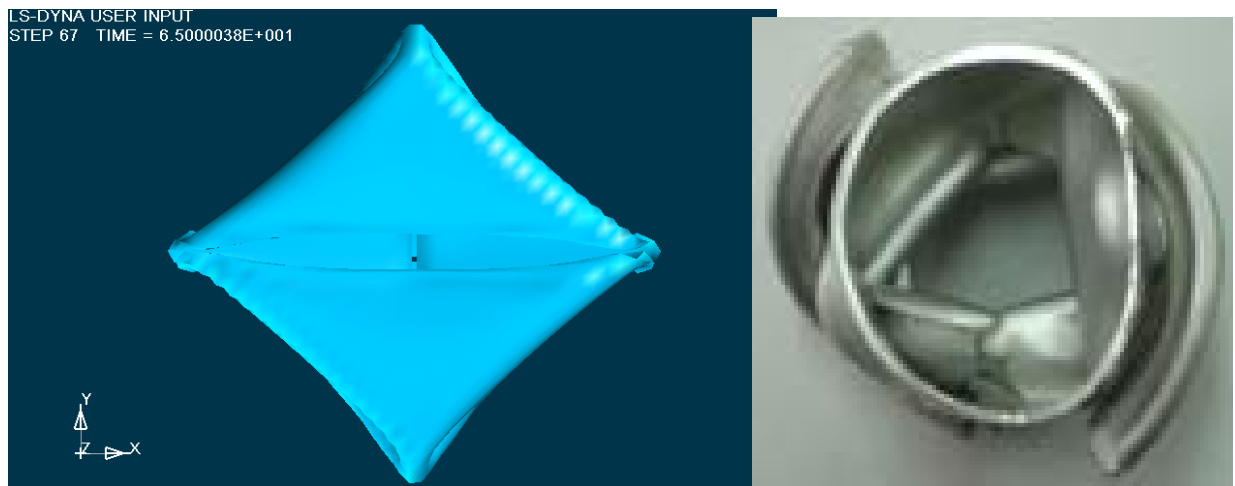


5^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Στο δοκίμιο του Is-dyna έχουμε σχηματισμό επίπεδης επιφάνειας στην πάνω διατομή με

εισχώρηση υλικού της περιφέρειας στο εσωτερικό του δοκιμίου, μέγιστη πλάτυνση της διαμέτρου στο μέσο και στένεμα της κάτω διαμέτρου με δημιουργία μη έκτατου λοβού. Στο δοκίμιο της πρέσας έχουμε συνέχιση της θραύσης καθ' ύψος του δοκιμίου. Πάτημα της πρέσας στα 55 mm.



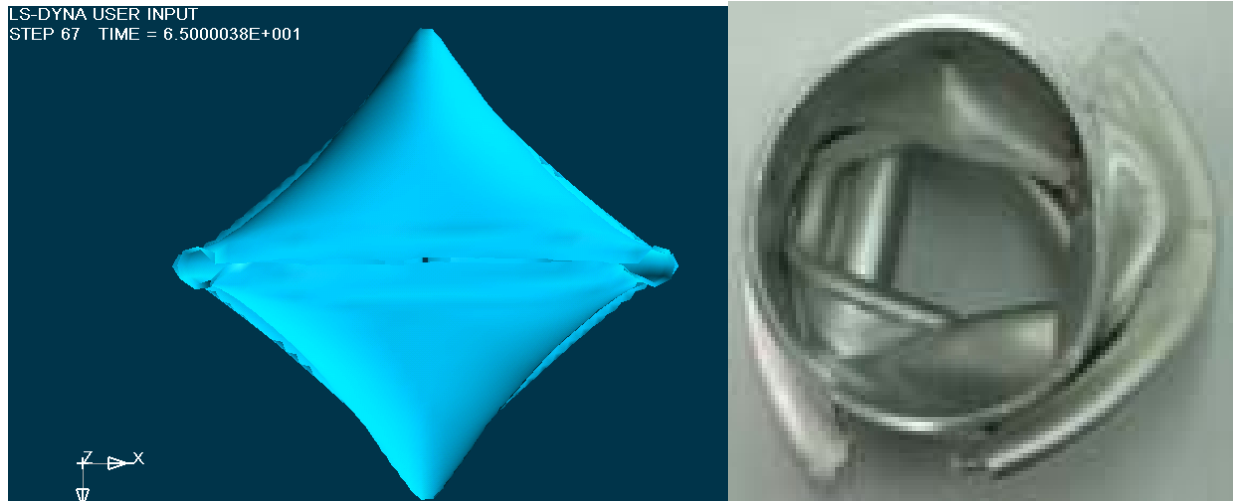
6^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Στο δοκίμιο του ls-dyna παρατηρούμε στην κάτω διατομή εισχώρηση υλικού στο εσωτερικό μονομερώς, με αποτέλεσμα στρέψη του δοκιμίου κατά την συμπίεση. Στο δοκίμιο της πρέσας η θραύση είναι τόσο έντονη που δεν είναι πλέον διακριτές οι οπές. Τέλος αξονικής κατάρρευσης δοκιμίου στην πρέσα. Πάτημα της πρέσας στα 65.0 mm.



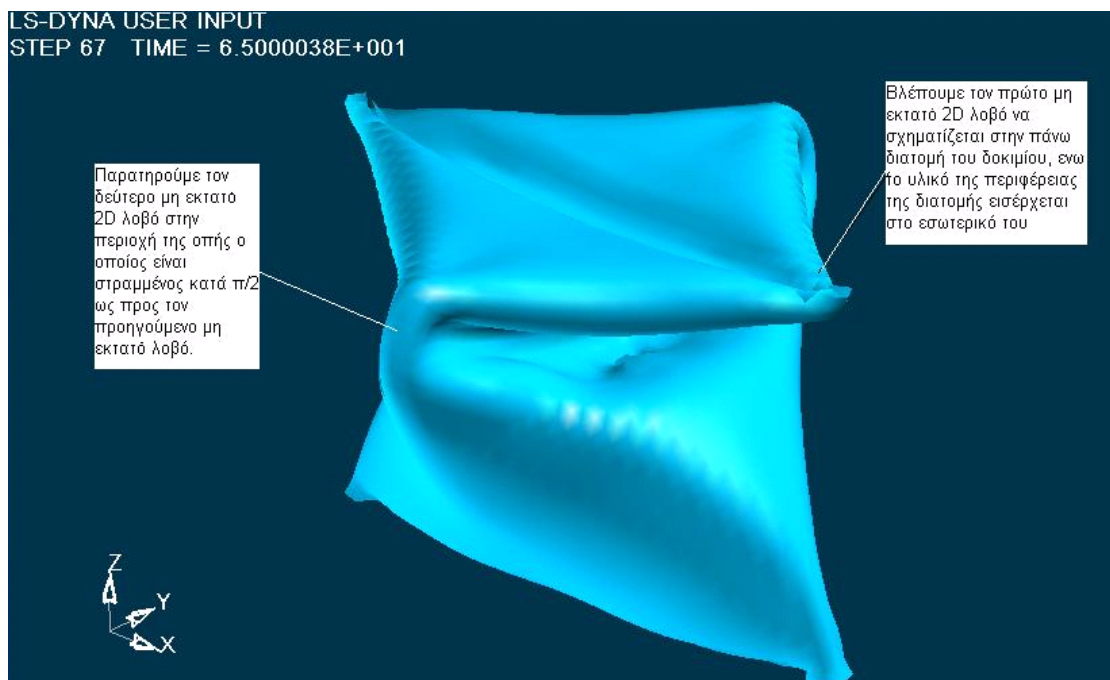
Τελική μορφή δοκιμίου αμέσως μετά το τέλος της διαδικασίας αξονικής κατάρρευσης στην πρέσα (δεξιά). Το ίδιο δοκίμιο μετά το τέλος της προσομοίωσης από το LS-DYNA, (αριστερά). Παρατηρούμε τρία ζεύγη μη εκτατών λοβών σε επίπεδα εναλλάξ κατά 90^0 . Επίσης βλέπουμε τις κορυφές που δημιουργηθήκαν και την επίπεδη μορφή που πήρε η πάνω διατομή κατά την θλίψη. Στο πραγματικό

δοκίμιο εμφανής είναι η θραύση και η μετατόπιση του έκτατου λοβού. Τελικό πάτημα της πρέσας στα 65.0 mm.

Σε αντιστραμμένη όψη έχουμε:



Σε τρισδιάστατη ισομετρική όψη, παρουσιάζεται στην επόμενη σελίδα, η τελική μορφή του δοκιμίου όπως προσομοιώθηκε στο LS-DYNA, με κατάρρευση του δοκιμίου έως τα 65.0 mm:



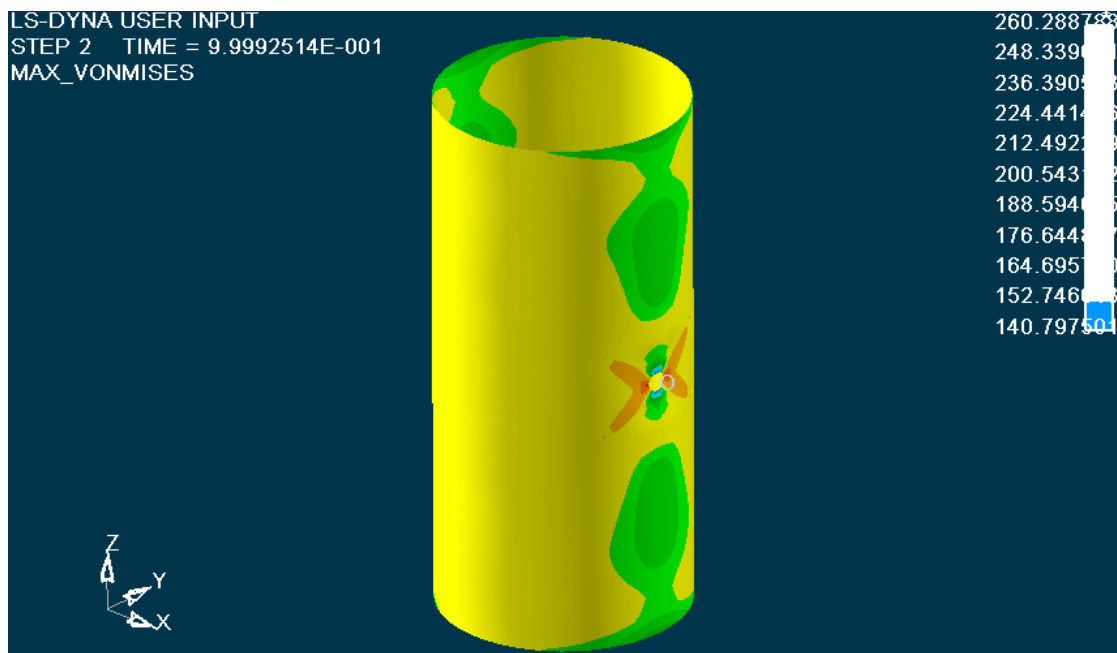
Η ολοκληρωμένη προσομοίωση κατάρρευσης του μοντέλου μας με το LS-DYNA, παρουσιάζεται και στα αρχεία βίντεο:

- Deformation isometric.Avi
- [Deformation side.Avi](#)
- Deformation rear.Avi

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

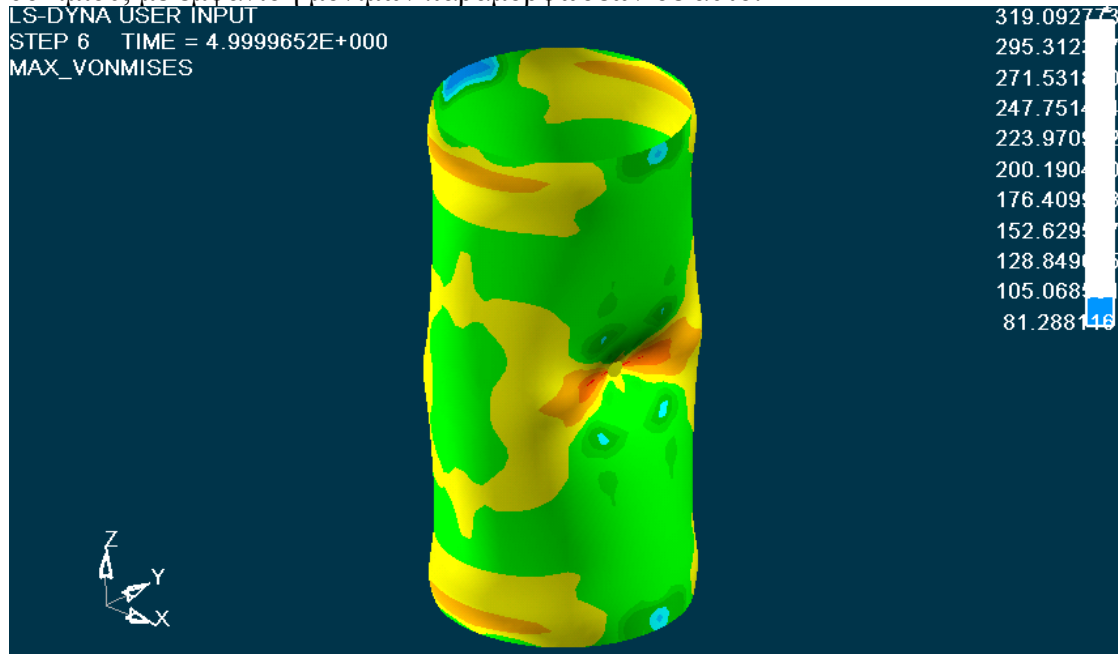
Επιλέγοντας στον ETA POSTGL:

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

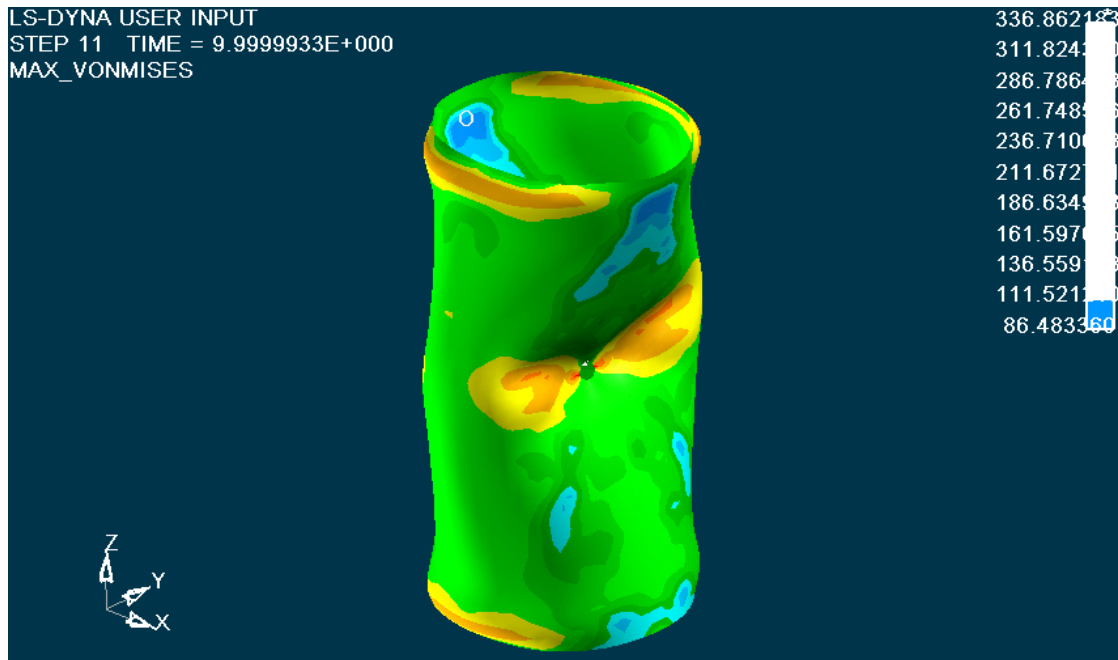


Κατανομή των τάσεων στο 1mm. Έχουμε εμφάνιση τάσεων στην περιοχή γύρω από την οπή του δοκιμίου, που όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 2, για την θεωρία των τάσεων γύρω από οπές, βλέπουμε ότι γύρω από κάθε οπή του δοκιμίου, κατά την κατακόρυφη διεύθυνση που συμπίπτει με την διεύθυνση της αξονικής θλίψης του δοκιμίου, έχουμε τάσεις ίσες με $\sigma = 176 \text{ MPa}$, ενώ στο οριζόντιο μέσο επίπεδο κάθε οπής, το οποίο είναι κάθετο ως προς το κατακόρυφο επίπεδο της αξονικής θλίψης του δοκιμίου, εκεί εμφανίζονται οι μέγιστες τάσεις για την κατάρρευση του δοκιμίου στη θέση της οπής, ίσες με $\sigma = 260 \text{ MPa}$.

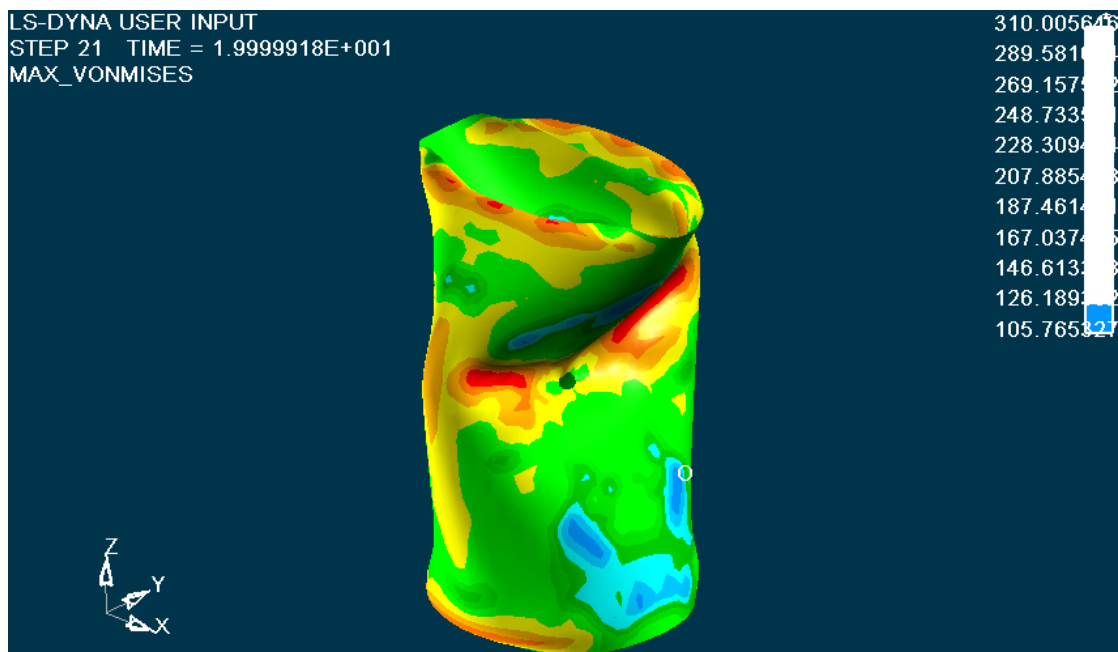
Ακόμα, στις παράπλευρη επιφάνεια του δοκιμίου, που δεν έχουμε εκεί οπές, βλέπουμε ότι σε όλη την επιφάνειά τους, εμφανίζεται μια αντιδιαμετρική συμμετρία της κατανομής των τάσεων. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή 260 MPa, η οποία είναι μεγαλύτερη από το όριο αντοχής του υλικού ($\sigma_A=240$ MPa), οπότε ξεκινάει η πλαστική παραμόρφωση του δοκιμίου, με εμφάνιση μονίμων παραμορφώσεων σε αυτό.



Κατανομή των τάσεων στο 5 mm. Έχουμε μέγιστες τάσεις στην περιοχή γύρω από την οπή του δοκιμίου, που πιέζει το έμβολο της πρέσας, Ιδιαίτερα, στην περιοχή της οπής, οι τάσεις που εφαρμόζονται κατά την διεύθυνση της αξονικής θλίψης είναι $\sigma = 176$ MPa, ενώ οι τάσεις που αναπτύσσονται στην οπή κάθετα προς την διεύθυνση αξονικής θλίψης του δοκιμίου, είναι $\sigma = 319$ MPa. Όσον αφορά το υπόλοιπο μέρος του δοκιμίου παρουσιάζεται κατανομή τάσεων με αντιδιαμετρική συμμετρία. Στο κάτω, στο πάνω μέρος του δοκιμίου όπως και στο μέσο έχει τις μεγαλύτερες τάσεις από ότι συμβαίνει στο υπόλοιπο μέρος του δοκιμίου, κυμαίνονται από 223MPa ως 319MPa. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή 319 MPa, που βλέπουμε ότι είναι μεγαλύτερη τιμή από την τάση αντοχής του δοκιμίου ($\sigma_A= 240$ MPa), οπότε διαρρέει το υλικό στη θέση της οπής, οπότε σχηματίζεται ο πρώτος μη εκτατός λοβός στο επίπεδο αυτό, και συνεχίζεται η κατάρρευση του δοκιμίου από την θέση αυτή και με διεύθυνση προς τα κάτω.

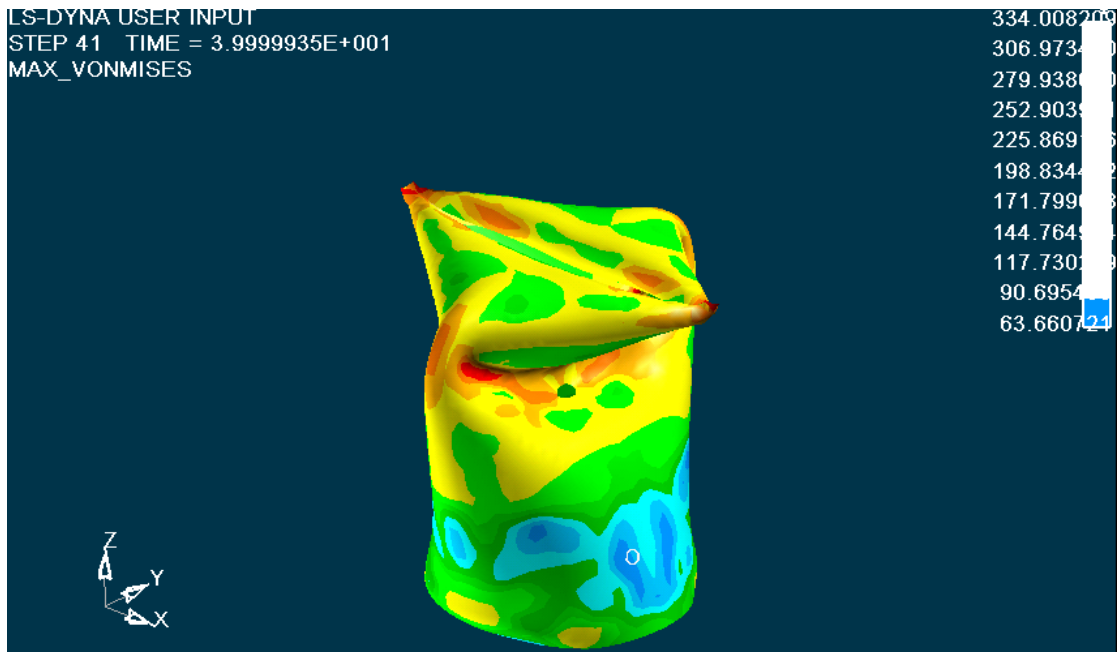


Κατανομή των τάσεων στο 10 mm. Έχουμε μέγιστες τάσεις στην περιοχή σχηματισμού του πρώτου λοβού στα σημεία αναδίπλωσης. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή **336 MPa**. Στο υπόλοιπο μέρος του μοντέλου μας παρουσιάζεται κατανομή τάσεων με αντιδιαμετρική συμμετρία. Εξακολουθούμε να έχουμε εμφάνιση πολύ μικρότερων τάσεων όπως φαίνεται στο σχήμα ίσες με 111 MPa στην περιοχή που συμβολίζεται με O.

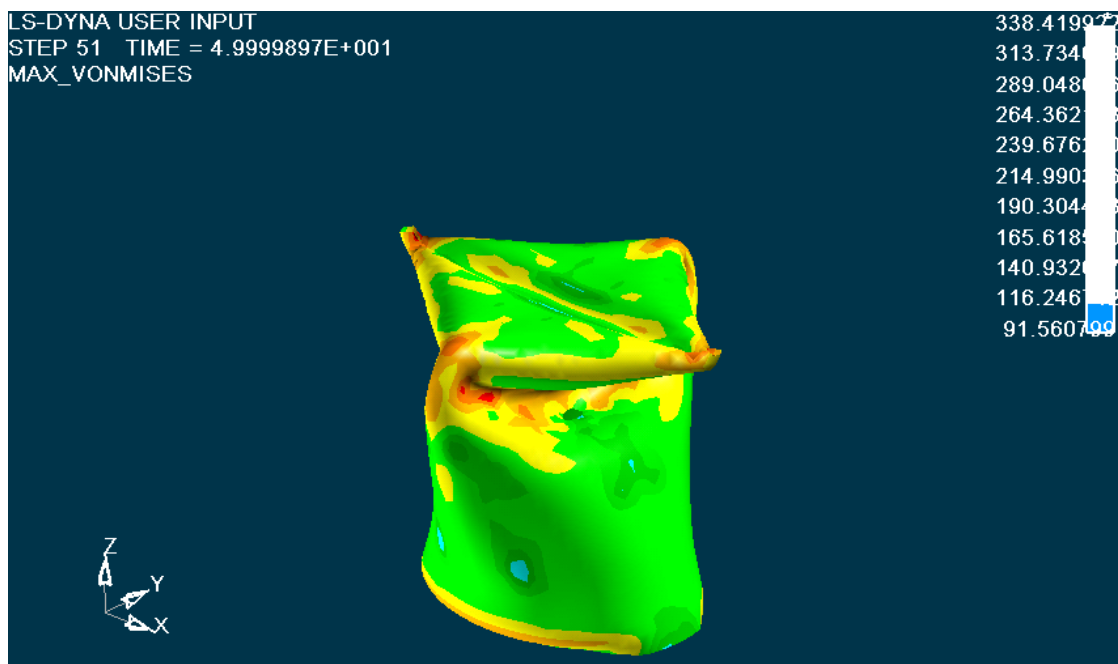


Κατανομή των τάσεων στο 20 mm. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή 310 MPa. Σχηματίζεται μη εκτατός 2D λοβός στην πάνω διάμετρο στην κάτω και στην μέση που είναι οι οπές. Ο καθένας σε επίπεδο παράλληλο προς τα κάτω, και στραμμένο κατά γωνία $\pi/2$ ως προς το προηγούμενο επίπεδο

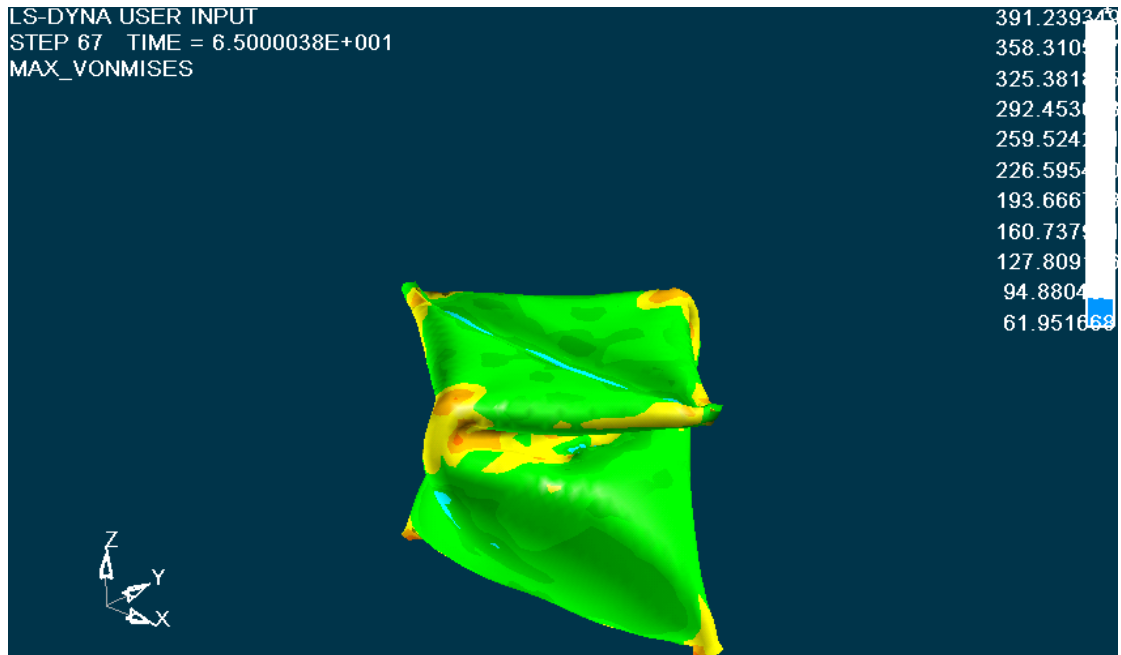
του αρχικού λοβού. Τάσεις σημαντικής τιμής, εμφανίζονται τώρα σχεδόν σε όλα τα σημεία αναδίπλωσης του δοκιμίου. Στις περιοχές μη εμφάνισης λοβών του δοκιμίου σημειώνονται μικρότερες τάσεις που φαίνονται και στο σχήμα, με τον αριθμό 0.



Κατανομή των τάσεων στο 40 mm. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή 334 MPa που βρίσκουμε στις θέσεις όπου το υλικό σχηματίζει κορυφές κατά την αναδίπλωση. Στο κάτω μισό του δοκιμίου που έρχεται σε επαφή με την σταθερή πλάκα, έχουμε την ελάχιστη τιμή των τάσεων που φαίνεται στην εικόνα ίσες με 90MPa..



Κατανομή των τάσεων στο 50 mm. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή 338 MPa, που βλέπουμε ότι είναι μεγαλύτερη τιμή από την τάση αντοχής του δοκιμίου ($\sigma_A = 240$ MPa), οπότε αστοχεί το υλικό στη θέση των κορυφών στην πάνω διατομή, οπότε σχηματίζεται ο πρώτος μη εκτατός λοβός στο επίπεδο αυτό, και συνεχίζεται η κατάρρευση του δοκιμίου από την θέση αυτή και με διεύθυνση προς τα κάτω. Στο κάτω μέρος του δοκιμίου έχουμε μικρότερες τάσεις $\sigma = 116$ MPa.

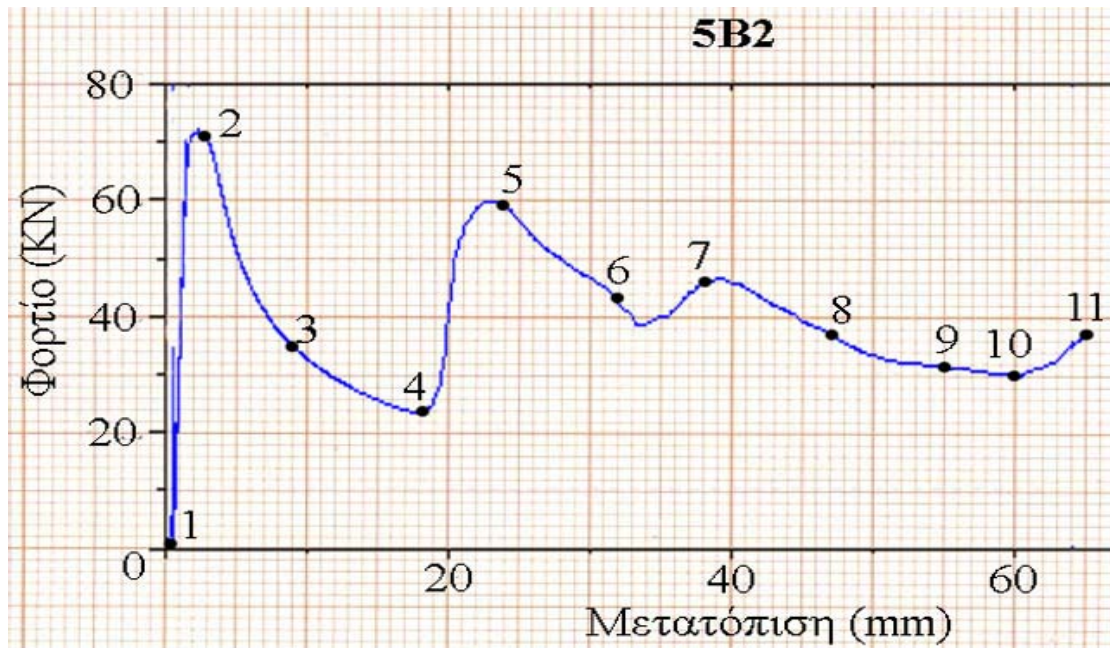


Κατανομή των τάσεων στο 65.0 mm. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη εμφανιζόμενη τιμή 391 MPa. Η κατάρρευση του δοκιμίου, και η εμφάνιση των τριών μη εκτατών λοβών, σε επίπεδα εναλλάξ στραμμένα μεταξύ τους κατά γωνία $\pi/2$, αρχίζει να είναι πλέον εμφανής σε όλο το δοκίμιο. Η κατάρρευση του δοκιμίου έχει πλέον ολοκληρωθεί, και οι τρεις τελικοί μη εκτατοί λοβοί έχουν σχηματιστεί πλήρως.

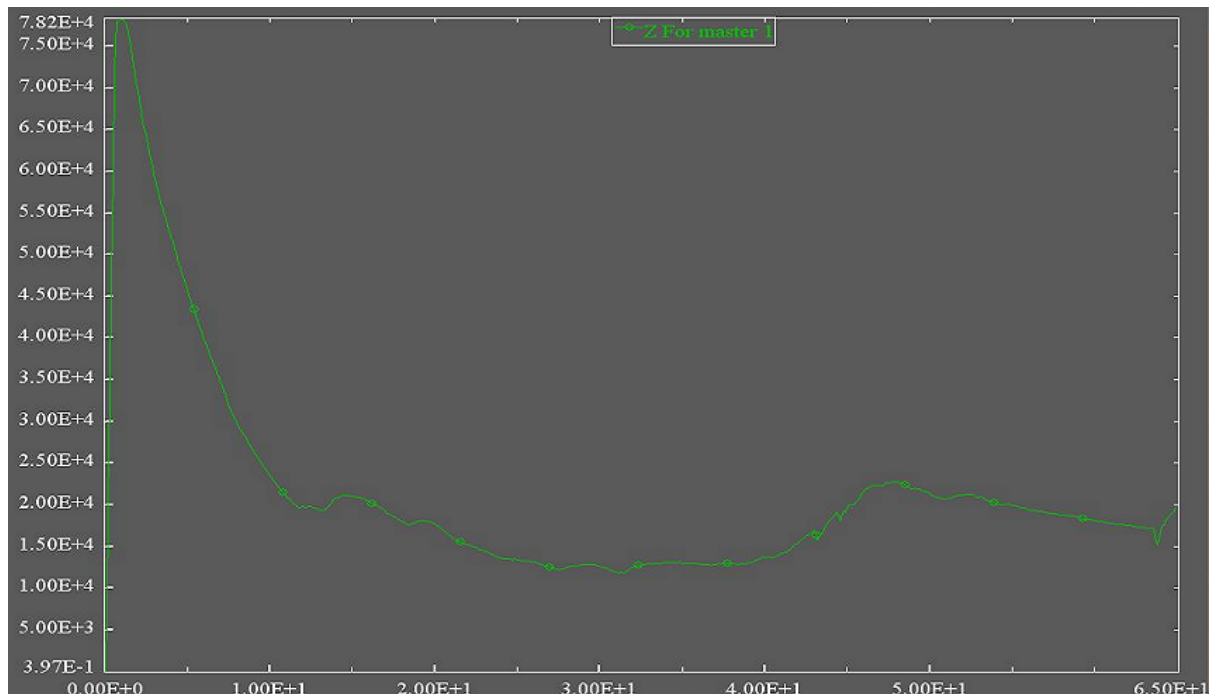
Η ολοκληρωμένη προσομοίωση της κατανομής των τάσεων του μοντέλου μας με το LS-DYNA, παρουσιάζεται και στο αρχείο βίντεο:

➤ [Contour Max Von Mises.Avi](#)

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



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

Το μέγιστο φορτίο $P_{max} = 71,65 \text{ KN}$,

Το μέσο φορτίο $P_{mean} = 39,03 \text{ KN}$,

Η ομοιομορφία φορτίου $P_{max}/P_{mean} = 1,83$

Η συνολική ενέργεια που δαπανήθηκε για την αξονική κατάρρευση του δοκιμίου είναι $E = 2537 \text{ KN mm}$

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

Το μέγιστο φορτίο $P_{max} = 78,20 \text{ KN}$,

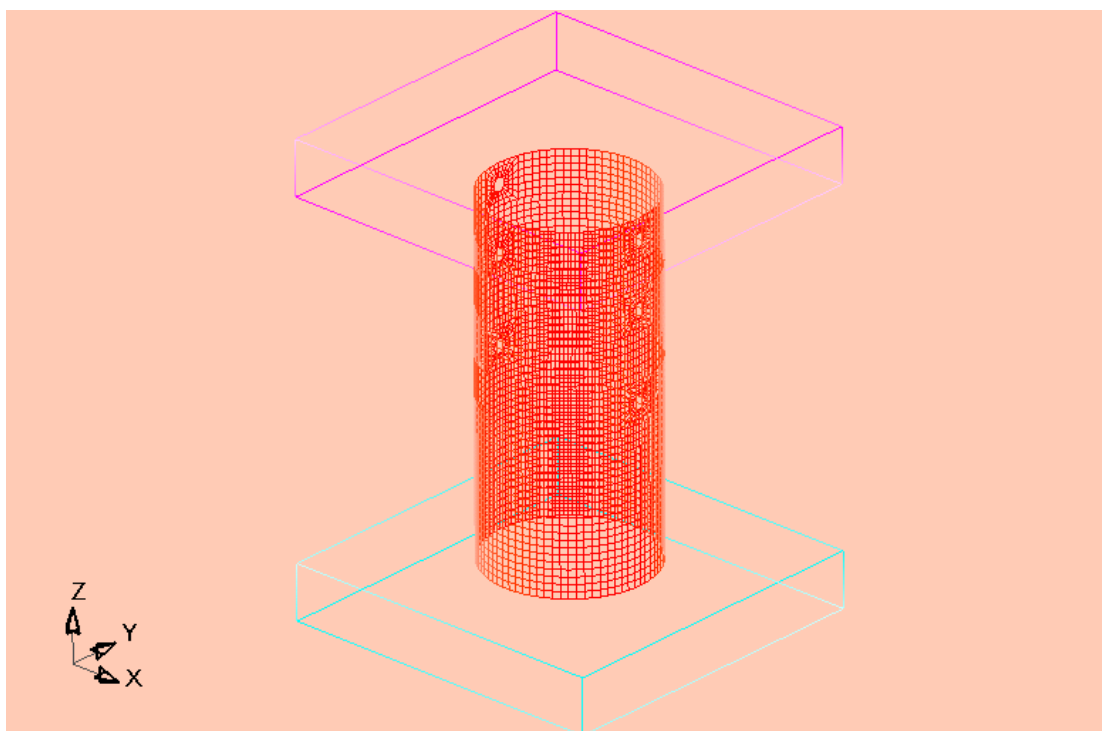
Το μέσο φορτίο $P_{mean} = 21,38 \text{ KN}$,

Η ομοιομορφία φορτίου $P_{max}/P_{mean} = 3.66$

Η συνολική ενέργεια που δαπανήθηκε για την αξονική κατάρρευση του δοκιμίου είναι $E = 1390 \text{ KN mm}$

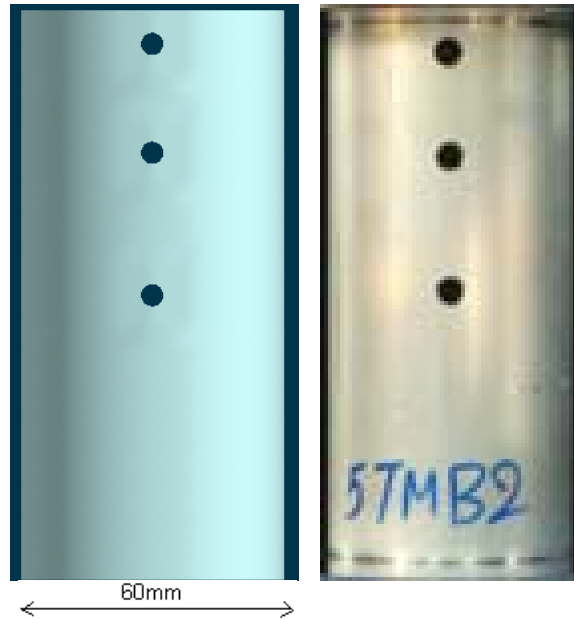
ΕΝΟΤΗΤΑ 5-12 : ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΤΡΙΩΝ ΔΙΑΜΠΕΡΩΝ ΟΠΩΝ Φ5 (TYPE_5TMB2).

Το μοντέλο του δοκιμίου κυκλικής διατομής με τρεις οπές διαμπερείς, διαμέτρου Φ5 στο 1/2 , στο 1/4 του ύψους του δοκιμίου και 7.5 mm από το χείλος της άνω διατομής, με πάχος τοιχώματος 2mm, παρουσιάζεται στην ακόλουθη εικόνα:



Σχ.1. Απεικόνιση πλέγματος στο LS-DYNA 3D, για κυκλικής διατομής δοκίμιο με τρεις διαμπερείς οπές διαμέτρου Φ5 στο 1/2 , στο 1/4 του ύψους του δοκιμίου και 7.5 mm από το χείλος της άνω διατομής αντιστοιχα.

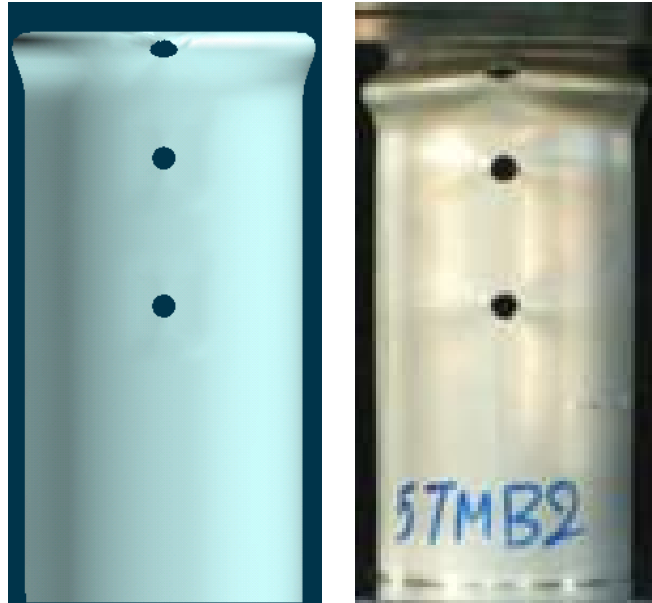
Οι αντίστοιχες φάσεις προσομοίωσης της κατάρρευσης του δοκιμίου αυτού, που κατέγραψα με τη χρήση του LS-DYNA, σε σύγκριση με τις φάσεις που έλαβα από την ελληνική βιβλιογραφία [1] με την χρήση πρέσας Instron, παρουσιάζονται στις επόμενες σελίδες:



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).



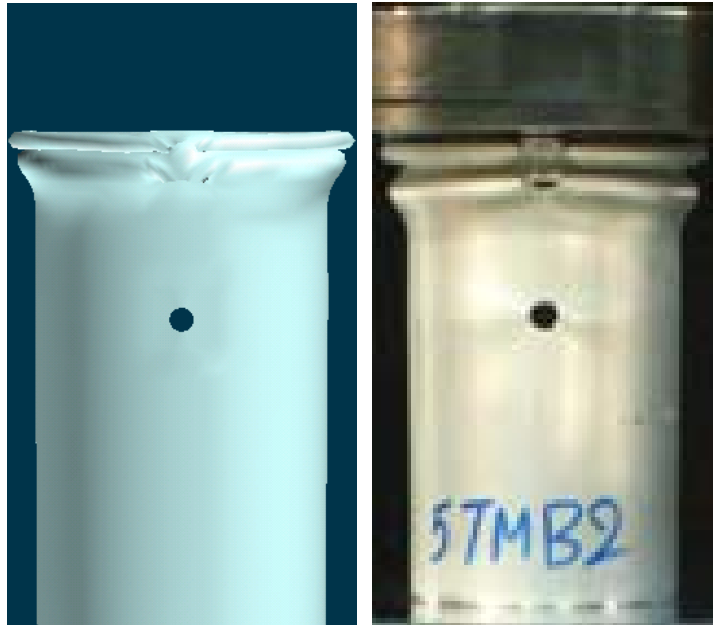
1^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Δημιουργία αρχικού εκτατού λοβού στη θέση της πρώτης οπής. Παρατηρούμε ότι το πραγματικό δοκίμιο στην πρέσα, αρχίζει να καταρρέει στη θέση της πάνω οπής αλλά παρατηρούμε παραμόρφωση και στις περιοχές των άλλων δύο οπών, ενώ στο μοντέλο του ls-dyna, η αρχική κατάρρευση σημειώνεται μόνο στη θέση της πάνω οπής του δοκιμίου. Πάτημα της πρέσας στα 2 mm.



2^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Παρατηρούμε ότι ο έκτατος λοβός στην θέση της πάνω οπής και στα δύο δοκίμια φαίνεται εντονότερος. Στο δοκίμιο του ls-dyna οι θέσεις των άλλων οπών δεν επηρεάζονται από την συμπίεση του δοκιμίου. Πάτημα της πρέσας στα 5 mm.



3^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Παρατηρούμε το τελείωμα του πάνω εκτατού λοβού και αρχή νέου μη εκτατού λοβού σε καρό μορφή (diamond) στο κάτω παράλληλο επίπεδο. Πάτημα της πρέσας στα 15 mm.

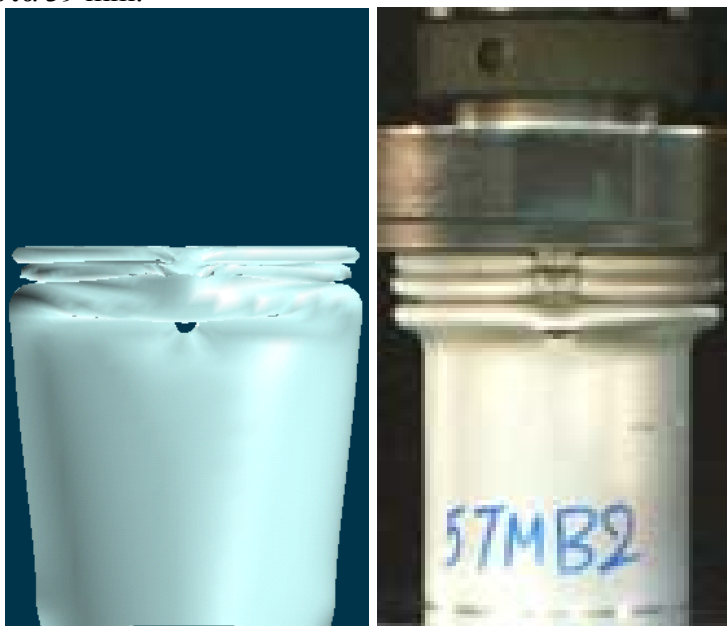


4^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Παρατηρούμε στο δοκίμιο του Is-dyna συνέχεια της δημιουργίας μη εκτατού λοβού με παραμόρφωση της περιοχής πάνω από την δεύτερη οπή ενώ στο δοκίμιο της πρέσας έχουμε αντίστοιχα δημιουργία εκτατού λοβού στην θέση της δεύτερης οπής. Πάτημα της πρέσας στα 25 mm.



5^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Αρχή δημιουργίας και δεύτερου μη εκτατού λοβού στην θέση της δεύτερης οπής σε παράλληλο επίπεδο στραμμένο κατά $\pi/4$ σε σχέση με τον προηγούμενο. Στο δοκίμιο

της πρέσας έχουμε και τέλος του δεύτερου εκτατού λοβού και αρχή τρίτου εκτατού λοβού. Πάτημα της πρέσας στα 39 mm.



6^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Τελείωμα του δεύτερου μη εκτατού λοβού, αρχή δημιουργίας και τρίτου μη εκτατού 2D λοβού στην θέση πάνω από την τρίτη οπή σε παράλληλο επίπεδο στραμμένο κατά $\pi/2$ σε σχέση με τον προηγούμενο λοβό και κατά $\pi/4$ σε ίδιο επίπεδο με τον πρώτο μη εκτατό λοβό. Στο πραγματικό δοκίμιο έχουμε τελείωμα του τρίτου εκτατού λοβού στην θέση της τρίτης οπής. Πάτημα πρέσας 48mm.



7^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Τελείωμα τρίτου μη εκτατού λοβού στην θέση πάνω από την τρίτη οπή και παραμόρφωση της

περιοχής της διατομής του δοκιμίου που είναι σε επαφή με την σταθερή πλάκα. Επίσης βλέπουμε το στένεμα της διατομής στο 1/2 κάτω μέρος του δοκιμίου. Πάτημα πρέσας 58mm.



8^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Εχουμε ολοκλήρωση του μη εκτατού λοβού στην περιοχή της τρίτης σπής ενώ στο δοκίμιο της πρέσας ο τέταρτος εκτατός λοβός μένει ατελής. Τέλος αξονικής κατάρρευσης δοκιμίου στην πρέσα. Πάτημα πρέσας στα 65.0 mm.



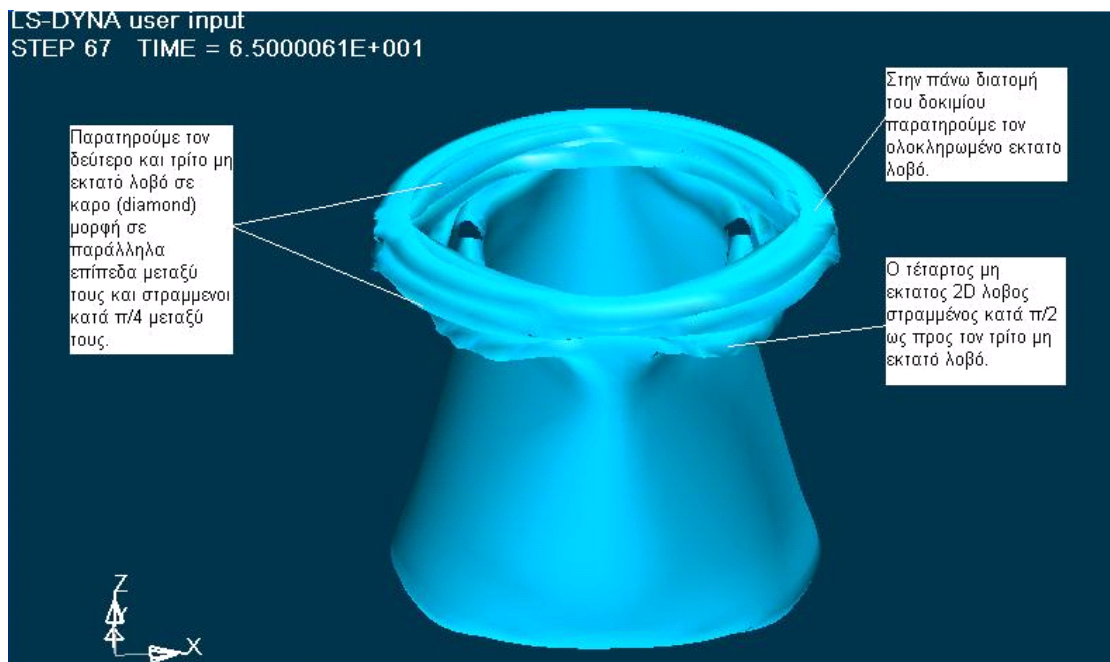
Τελική μορφή δοκιμίου αμέσως μετά το τέλος της διαδικασίας αξονικής κατάρρευσης στην πρέσα (δεξιά). Το ίδιο δοκίμιο μετά το τέλος της προσομοίωσης από το LS-DYNA,(αριστερά).

Παρατηρούμε έναν εκτατό λοβό και τρεις μη έκτατους στραμμένους ο πρώτος με τον δεύτερο κατά $\pi/4$ και ο δεύτερος με τον τρίτο κατά $\pi/2$. Πάτημα πρέσας στα 65.0mm.

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 65.0 mm:



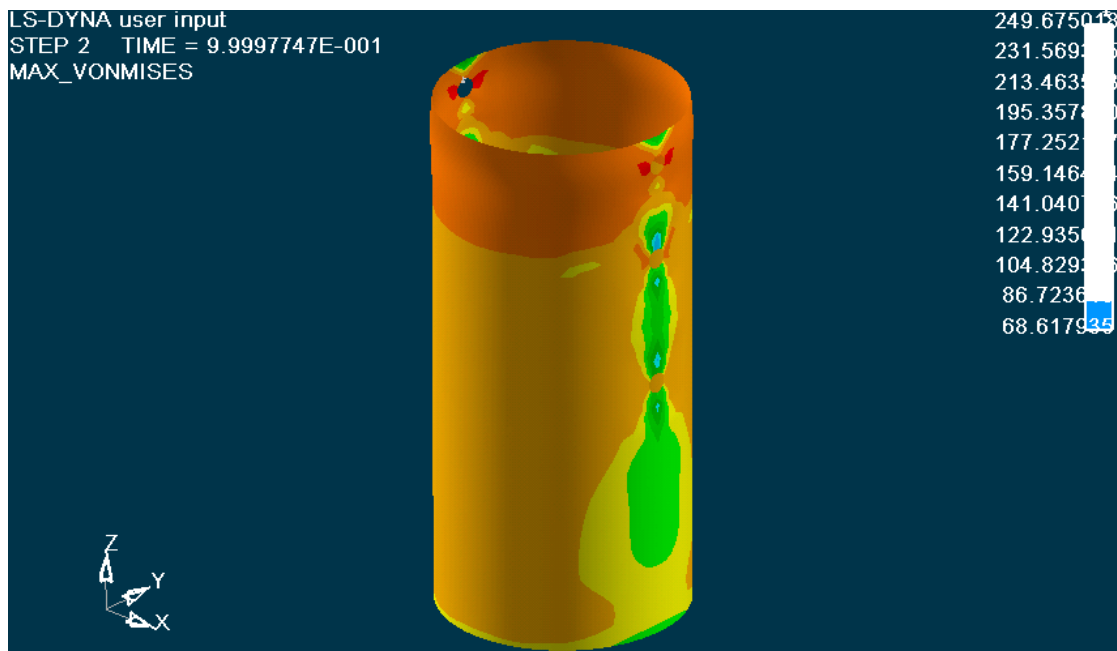
Η ολοκληρωμένη προσομοίωση κατάρρευσης του μοντέλου μας με το LS-DYNA, παρουσιάζεται και στα αρχεία βίντεο:

- Deformation isometric.Avi
- [Deformation side.Avi](#)
- Deformation rear.Avi

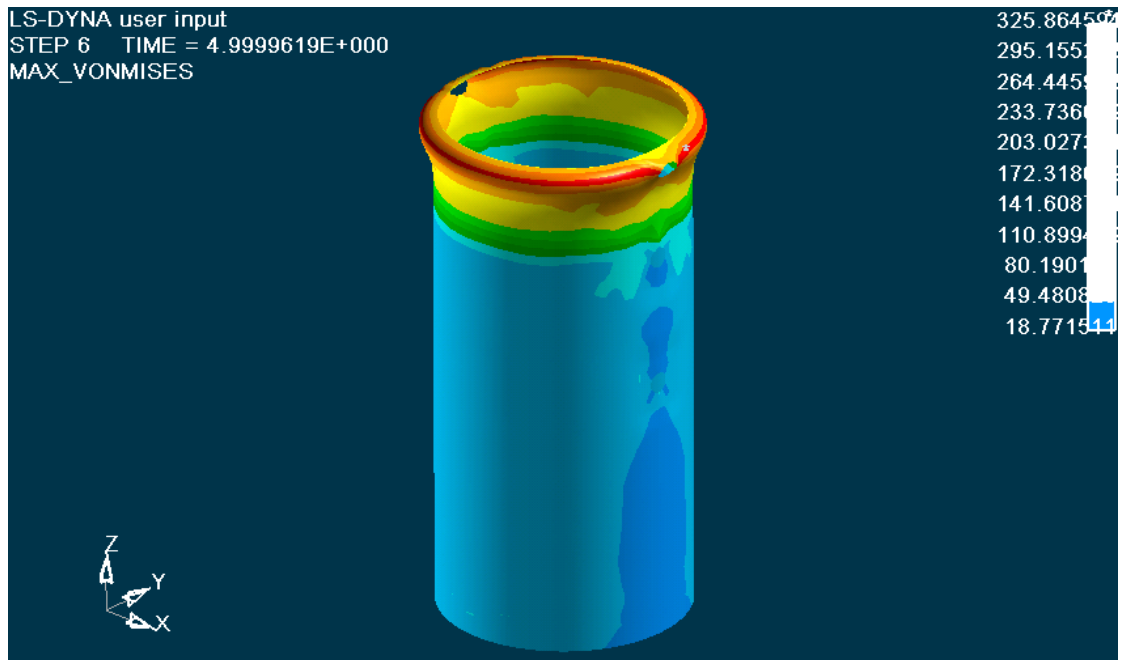
Ακολουθούν εικόνες από την κατανομή των τάσεων σε όλη την επιφάνεια του δοκιμίου κατά τα διάφορα στάδια της κατάρρευσής του:

Επιλέγοντας στον ETA POSTGL:

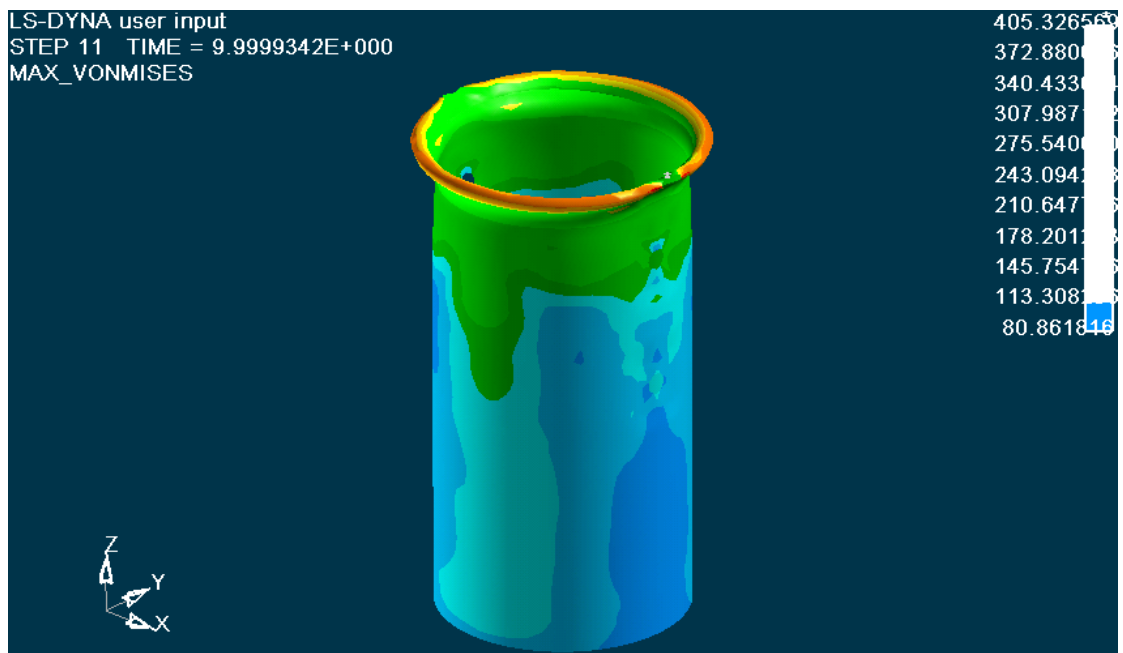
CONTOUR -> STRESS/STRAIN -> MAXIMUM VON MISES STRESSES:



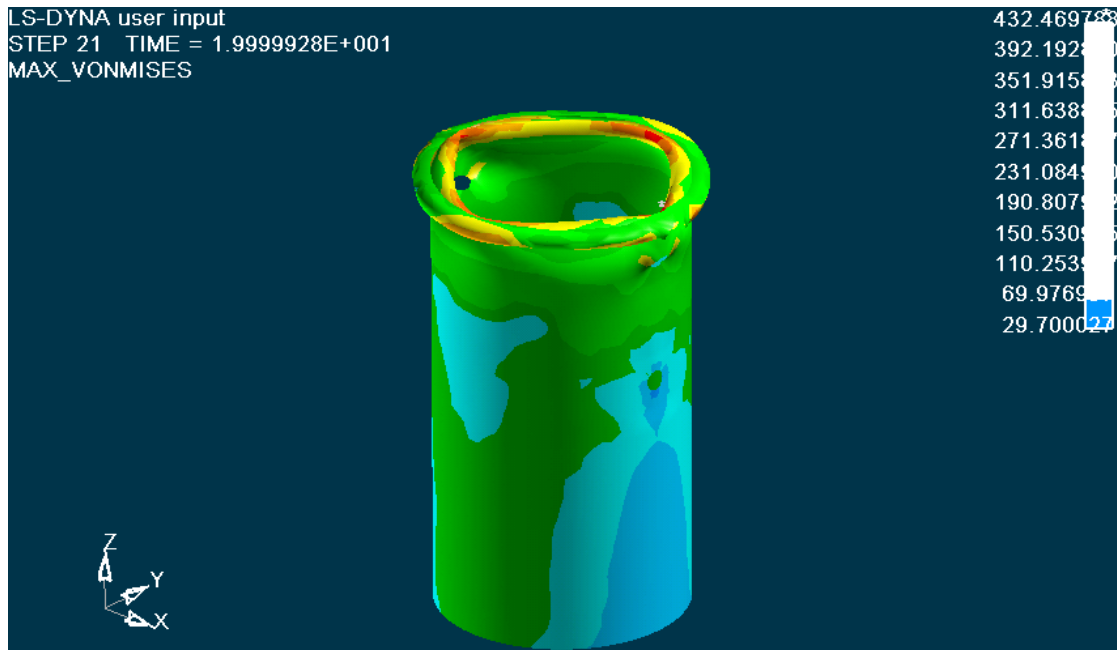
Κατανομή των τάσεων στο 1mm. Έχουμε εμφάνιση τάσεων στην περιοχή γύρω από τις τρεις οπές του δοκιμίου, που όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 2, για την θεωρία των τάσεων γύρω από οπές, βλέπουμε ότι γύρω από την πάνω οπή του δοκιμίου, κατά την κατακόρυφη διεύθυνση που συμπίπτει με την διεύθυνση της αξονικής θλίψης του δοκιμίου, έχουμε τάσεις ίσες με $\sigma = 213\text{MPa}$, όσο είναι η τάση που εμφανίζεται στο μεγαλύτερο μέρος της παράπλευρης επιφάνειας του δοκιμίου, ενώ στο οριζόντιο μέσο επίπεδο κάθε οπής, το οποίο είναι κάθετο ως προς το κατακόρυφο επίπεδο της αξονικής θλίψης του δοκιμίου, εκεί εμφανίζονται οι μέγιστες τάσεις για την κατάρρευση του δοκιμίου στη θέση της πάνω οπής, ίσες με $\sigma = 249\text{MPa}$ που είναι μεγαλύτερη από την τάση αντοχής του δοκιμίου ($\sigma_A=240\text{MPa}$) επομένως αρχίζει η κατάρρευση του δοκιμίου στην περιοχή αυτή. Ακόμα, εμφανίζονται υψηλές τάσεις της τάξης των 231MPa σε όλη την περιοχή της άνω διατομής του δοκιμίου που πιέζει το έμβολο της πρέσας.



Κατανομή των τάσεων στο 5 mm. Έχουμε μέγιστες τάσεις στην περιοχή γύρω από την πρώτη οπή του δοκιμίου, που πιέζει το έμβολο της πρέσας, Ιδιαίτερα, στην περιοχή της πρώτης οπής, οι τάσεις που εφαρμόζονται κατά την διεύθυνση της αξονικής θλίψης είναι $\sigma = 233 \text{ MPa}$, ενώ οι τάσεις που αναπτύσσονται στην οπή κάθετα προς την διεύθυνση αξονικής θλίψης του δοκιμίου, είναι $\sigma = 325 \text{ MPa}$. Όσον αφορά την δεύτερη και τρίτη οπή, εκεί βλέπουμε ότι οι τάσεις που εφαρμόζονται κατά την διεύθυνση της αξονικής θλίψης είναι $\sigma = 80 \text{ MPa}$, ενώ οι τάσεις που αναπτύσσονται στην οπή κάθετα προς την διεύθυνση αξονικής θλίψης του δοκιμίου, είναι $\sigma = 110 \text{ MPa}$. Το κάτω 3/4 μέρος του δοκιμίου έχει μικρότερες τάσεις από ότι συμβαίνει στο υπόλοιπο μέρος του δοκιμίου.

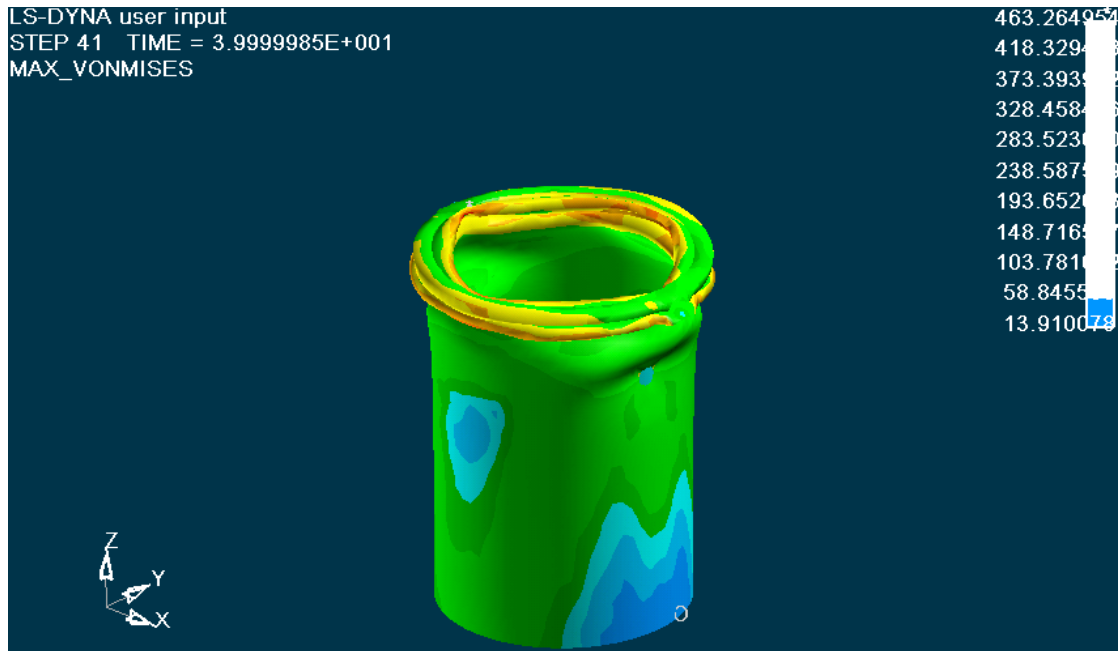


Κατανομή των τάσεων στο 10 mm. Έχουμε μέγιστες τάσεις στην περιοχή σχηματισμού του πρώτου λοβού στα σημεία αναδίπλωσης. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή 405 MPa που είναι μεγαλύτερη από την τάση αντοχής του δοκιμίου ($\sigma_A=240\text{MPa}$) οπότε αστοχεί το υλικό και αρχίζει η κατάρρευση του δοκιμίου. Στο κάτω 1/2 μέρος του μοντέλου μας εξακολουθούμε να έχουμε εμφάνιση μικρότερων τάσεων.

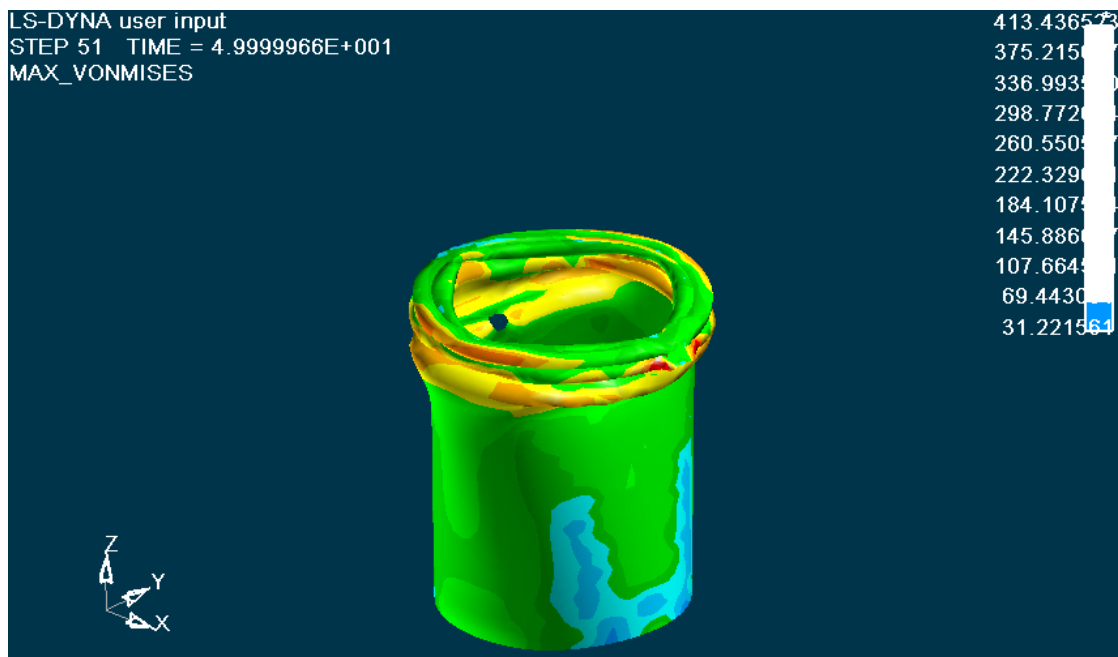


Κατανομή των τάσεων στο 20 mm. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή 432 MPa. Ο πρώτος εκτατός λοβός έχει σχηματιστεί πλήρως, και ξεκινά και ο σχηματισμός του δεύτερου μη εκτατού λοβού, σε επίπεδο παράλληλο προς τα κάτω, ως προς το προηγούμενο επίπεδο του αρχικού λοβού. Τάσεις σημαντικής τιμής, εμφανίζονται τώρα σχεδόν σε όλο το μήκος καθ' ύψος του δοκιμίου. Γύρω από την πρώτη οπή έχουμε **μέγιστη τάση ίση με 351MPa που είναι μεγαλύτερη της τάσης αντοχής του υλικού ($\sigma_{αντ}=240\text{MPa}$) οπότε αστοχεί το υλικό** στη θέση της πρώτης οπής, οπότε σχηματίζεται ο πρώτος εκτατός λοβός στο επίπεδο αυτό, και συνεχίζεται η κατάρρευση του δοκιμίου από την θέση αυτή και με διεύθυνση προς τα κάτω.

.Γύρω από την περιοχή της δεύτερης οπής, οι τάσεις που εφαρμόζονται κατά την διεύθυνση της αξονικής θλίψης είναι $\sigma = 231\text{MPa}$, ενώ οι τάσεις που αναπτύσσονται στην οπή κάθετα προς την διεύθυνση αξονικής θλίψης του δοκιμίου, είναι $\sigma = 311\text{MPa}$.

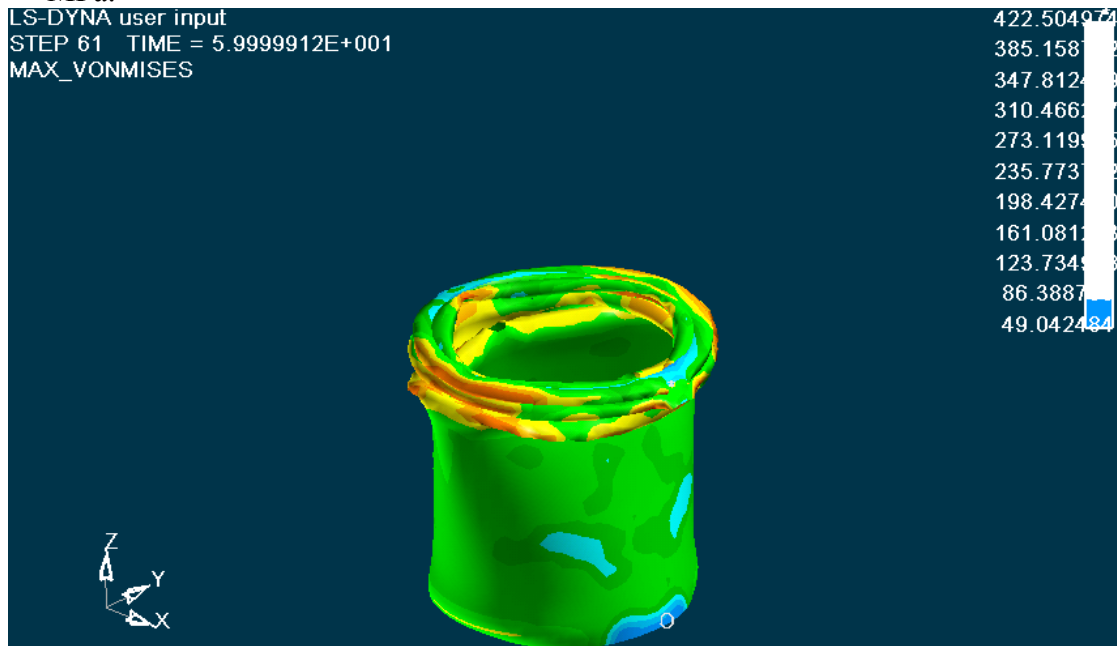


Κατανομή των τάσεων στο 40 mm. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με **μέγιστη τιμή 463 MPa που είναι μεγαλύτερη της τάσης αντοχής του υλικού ($\sigma_{αντ}=240\text{MPa}$)** στις κορυφές των πλευρών του δεύτερου μη εκτατού λοβού. Στο πάνω μισό μέρος του δοκιμίου που έρχεται σε επαφή με το έμβολο της πρέσας, έχουμε την μέγιστη τιμή των τάσεων όπως φαίνεται στην εικόνα. Στο κάτω μισό του δοκιμίου εμφανίζονται οι μικρότερες τάσεις. Στην περιοχή που συμβολίζεται με O έχουμε τις ελάχιστες τάσεις της τάξης των 58MPa.

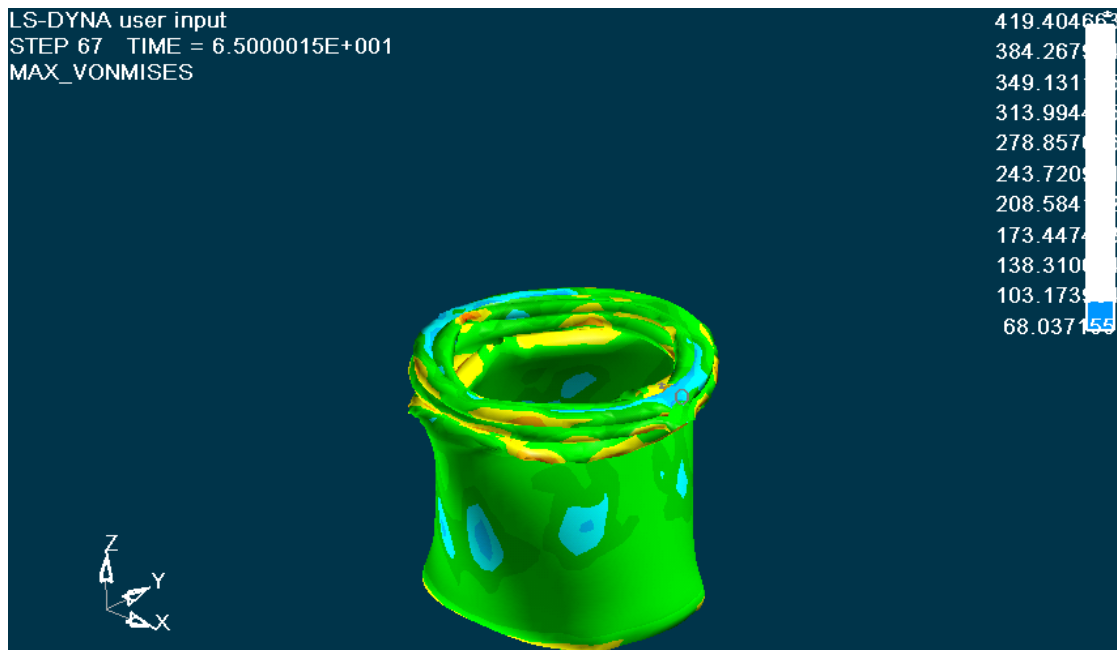


Κατανομή των τάσεων στο 50 mm. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με **μέγιστη τιμή 413 MPa** στις θέσεις αναδίπλωσης του δεύτερου μη έκτατου λοβού. Έχουν σχηματιστεί και οι δυο μη εκτατοί λοβοί, και ήδη δημιουργείται και

ο τρίτος λοβός. Στην κάτω βάση του δοκιμίου έχουμε μικρότερες τάσεις $\sigma = 69$ MPa.



Κατανομή των τάσεων στο 60 mm. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με **μέγιστη τιμή 422 MPa**. Σε ελάχιστα μέρη του δοκιμίου, έχουμε την ελάχιστη τιμή των τάσεων που φαίνεται στην εικόνα με τον αριθμό μηδέν (κυρίως στην κάτω βάση του δοκιμίου). Η κατάρρευση του δοκιμίου, και η εμφάνιση των τριών μη εκτατών λοβών, σε επίπεδα εναλλάξ στραμμένα μεταξύ τους κατά γωνία $\pi/4$ και $\pi/2$ αντίστοιχα, αρχίζει να είναι πλέον εμφανής σε όλο το δοκίμιο.

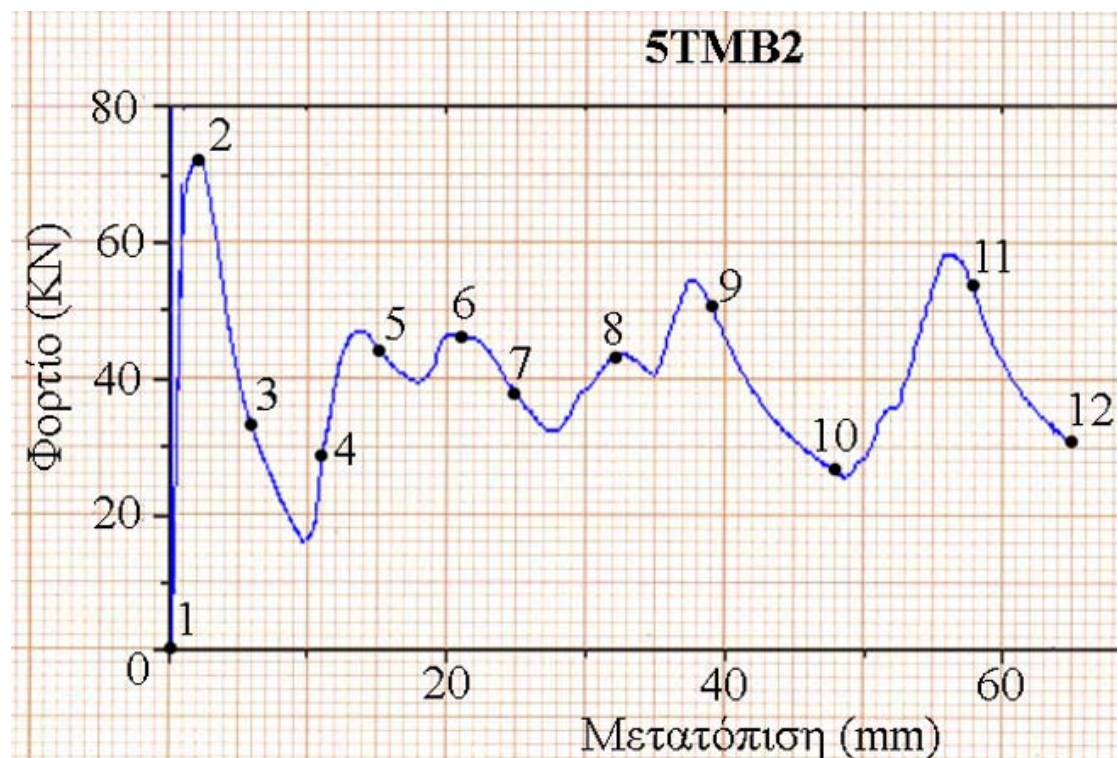


Κατανομή των τάσεων στο 65.0 mm. Οι τελικές τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή 419 MPa. Η κατάρρευση του δοκιμίου έχει πλέον ολοκληρωθεί, και οι τέσσερις τελικοί εκτατοί και μη εκτατοί λοβοί έχουν σχηματιστεί πλήρως.

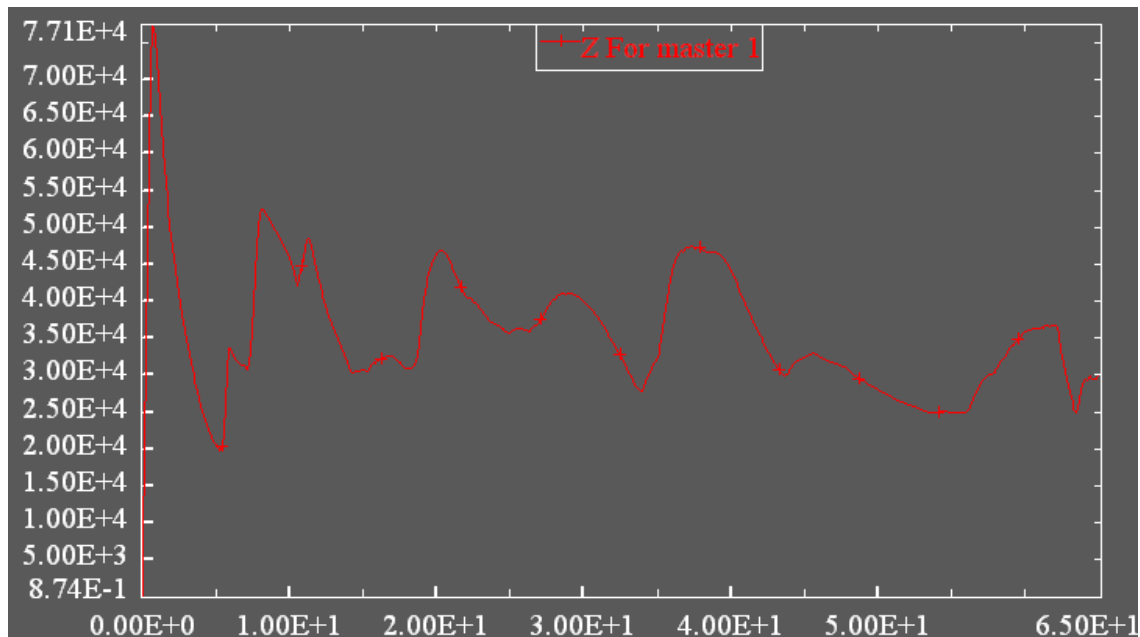
Η ολοκληρωμένη προσομοίωση της κατανομής των τάσεων του μοντέλου μας με το LS-DYNA, παρουσιάζεται και στο αρχείο βίντεο:

➤ [Contour Max Von Mises.Avi](#)

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 ls-dyna, και με την χρήση του Excel, είναι αυτό που παρουσιάζεται στην επόμενη σελίδα, με τον κατακόρυφο άξονα να δείχνει τις **δυνάμεις σε N**, και με τον οριζόντιο άξονα να δείχνει τις **μετατοπίσεις** (βραχύνσεις του θλιβόμενου δοκιμίου) **σε mm**:



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

Το μέγιστο φορτίο $P_{max} = 71,81 \text{ KN}$,

Το μέσο φορτίο $P_{mean} = 39,48 \text{ KN}$,

Η ομοιομορφία φορτίου $P_{max}/P_{mean} = 1,82$

Η συνολική ενέργεια που δαπανήθηκε για την αξονική κατάρρευση του δοκιμίου είναι $E = 2566 \text{ KN mm}$

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

Το μέγιστο φορτίο $P_{max} = 77,1 \text{ KN}$,

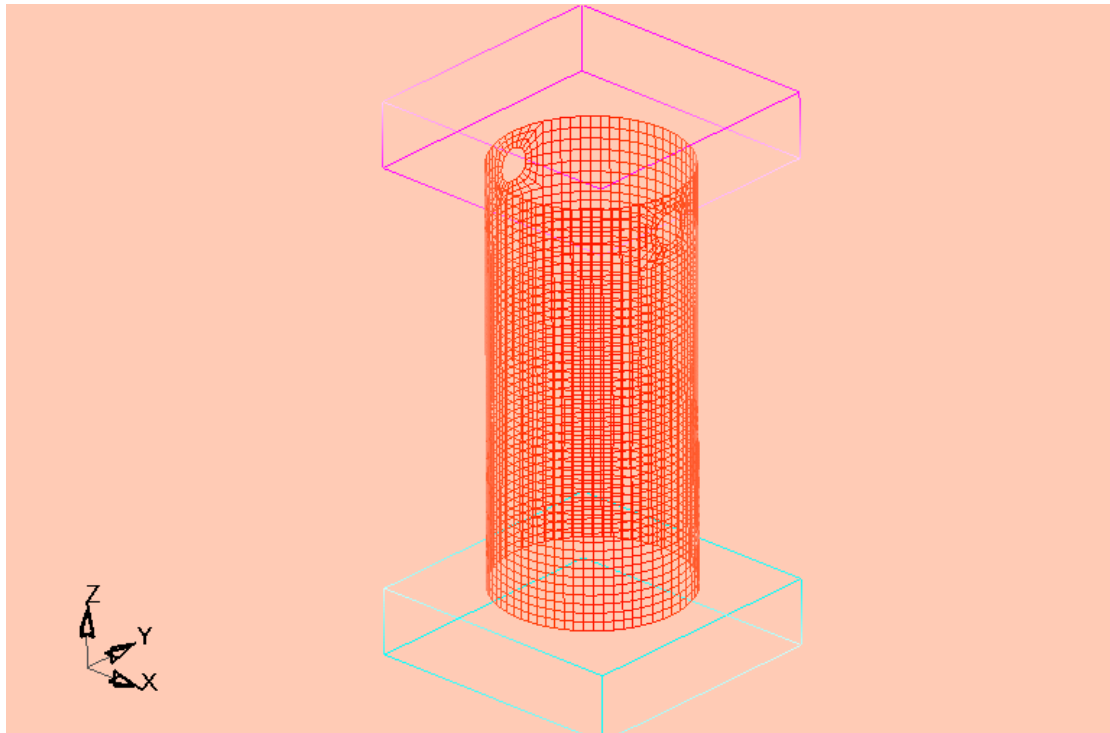
Το μέσο φορτίο $P_{mean} = 35,53 \text{ KN}$,

Η ομοιομορφία φορτίου $P_{max}/P_{mean} = 2,17$

Η συνολική ενέργεια που δαπανήθηκε για την αξονική κατάρρευση του δοκιμίου είναι $E = 2310 \text{ KN mm}$

ΕΝΟΤΗΤΑ 5-13 : ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΙΑΣ ΔΙΑΜΠΕΡΟΥΣ ΟΠΗΣ Φ10 ΜΕ ΚΕΝΤΡΟ ΣΤΑ 10mm ΑΠΟ ΤΟ ΑΝΩ ΧΕΙΛΟΣ ΤΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ (TYPE_10T2).

Το μοντέλο του δοκιμίου κυκλικής διατομής με μια οπή διαμπερή, διαμέτρου Φ10 σε ύψος 10mm από το άνω χείλος του δοκιμίου, και με πάχος τοιχώματος 2mm, παρουσιάζεται στην ακόλουθη εικόνα:



Σχ.1. Απεικόνιση πλέγματος στο LS-DYNA 3D, για κυκλικής διατομής δοκίμιο με μια διαμπερή οπή διαμέτρου Φ10 σε ύψος 10mm από το άνω χείλος του δοκιμίου.

Οι αντίστοιχες φάσεις προσομοίωσης της κατάρρευσης του δοκιμίου αυτού, που κατέγραψα με τη χρήση του LS-DYNA, σε σύγκριση με τις φάσεις που έλαβα από την ελληνική βιβλιογραφία [1] 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 περίπου στο μέσο της οπής, ενώ στο μοντέλο του ls-dyna, η αρχική κατάρρευση σημειώνεται στη θέση της άνω διατομής του δοκιμίου. Πάτημα της πρέσας στα 2 mm.



2^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Συνέχεια αρχικού εκτατού(αξονοσυμμετρικού) λοβού. Πάτημα της πρέσας στα 9 mm.



3^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το ls-dyna (αριστερή εικόνα). Τελείωμα αρχικού εκτατού λοβού και αρχή νέου μη εκτατού λοβού. Πάτημα της πρέσας στα 19 mm.



4^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Στο δοκίμιο του ls-dyna έχουμε αρχή δημιουργίας μη εκτατού λοβού στο παράλληλο κάτω επίπεδο ενώ στο δοκίμιο της πρέσας δημιουργείται αντίστοιχα δεύτερος εκτατός λοβός. Πάτημα της πρέσας στα 29 mm.



5^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Στο δοκίμιο του ls-dyna έχουμε τελείωμα του δεύτερου μη εκτατού λοβού στραμμένος κατά $\pi/4$ ως προς τον προηγούμενο μη εκτατό λοβό ενώ στο δοκίμιο της πρέσας τελειώνει αντίστοιχα ο τρίτος εκτατός λοβός. Πάτημα της πρέσας στα 51 mm.



6^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Στο δοκίμιο του Is-dyna έχουμε αρχή τρίτου μη εκατατού λοβού στραμμένος κατά $\pi/4$ ως προς τον προηγούμενο μη έκτατο λοβό ενώ στο δοκίμιο της πρέσας δημιουργείται αντίστοιχα τέταρτος εκτατός λοβός. Πάτημα της πρέσας στα 58 mm.



7^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Στο δοκίμιο του Is-dyna παρατηρούμε τελείωμα του τρίτου μη εκατατού λοβού. Στο δοκίμιο της

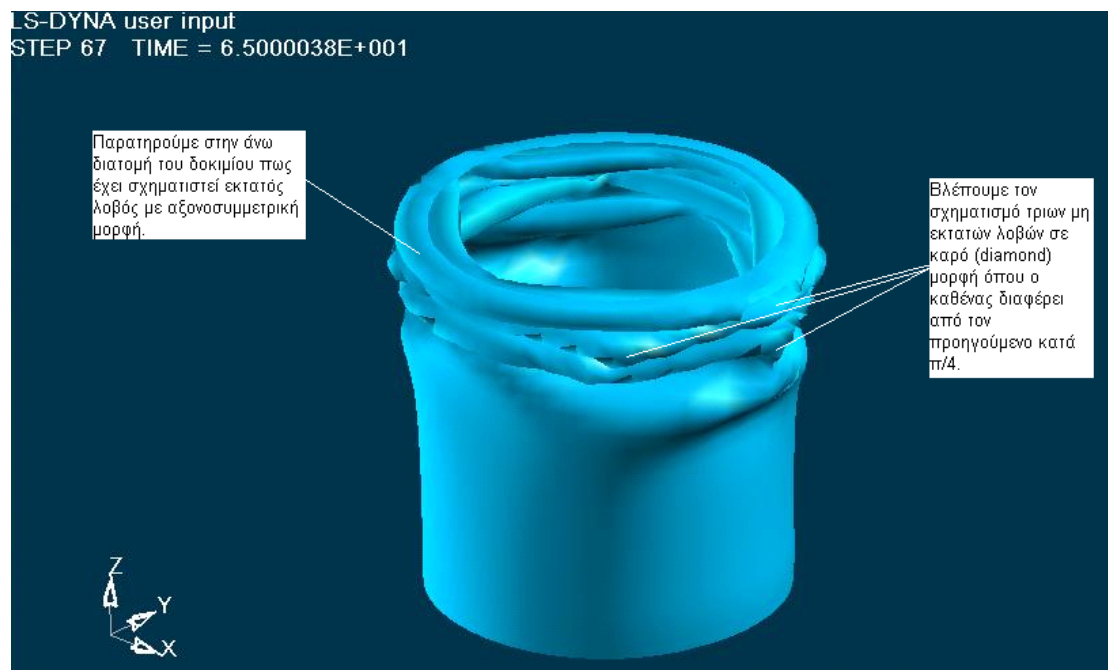
πρέσας έχουμε τελείωμα του τέταρτου εκατοού λοβού. Τέλος αξονικής κατάρρευσης. Πάτημα της πρέσας στα 65.0 mm.



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 ένα εκατό λοβό στην πάνω διατομή και τρεις μη εκατούς λοβούς στραμμένους ο καθένας ως προς τον προηγούμενο κατά 45° μοίρες. Στο δοκίμιο της πρέσας παρατηρούμε τέσσερις αξονοσυμμετρικούς λοβούς ενώ βλέπουμε πως ο λοβός στο ύψος της οπής τείνει να πάρει καρό μορφή (diamond). Τελικό πάτημα της πρέσας στα 65.0 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 65.0 mm:



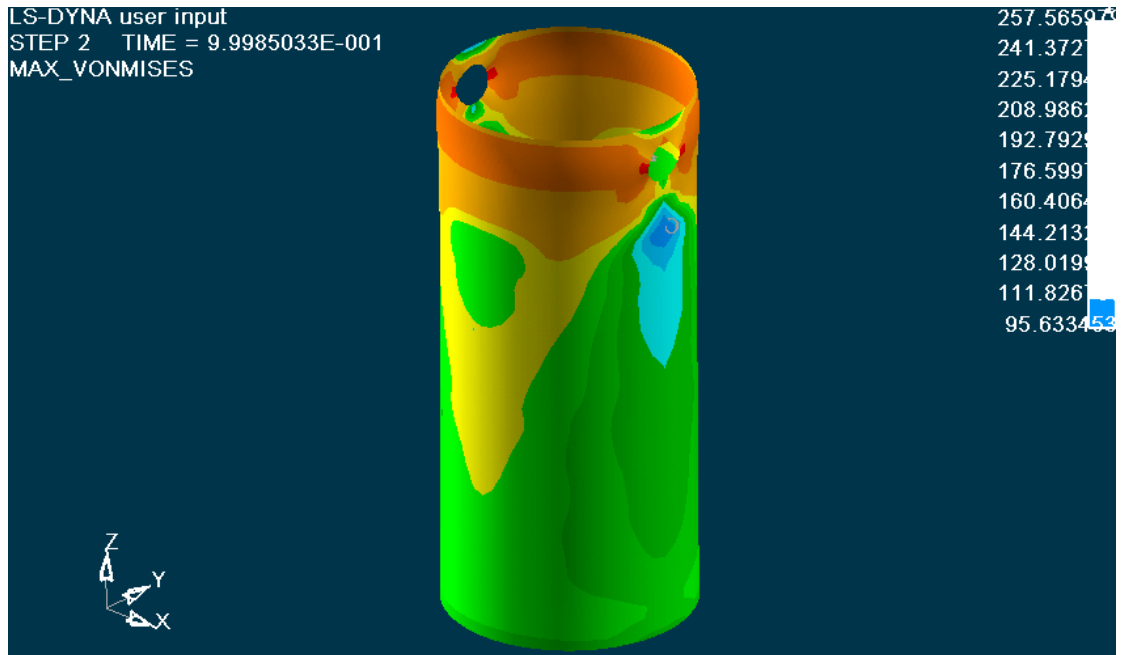
Η ολοκληρωμένη προσομοίωση κατάρρευσης του μοντέλου μας με το LS-DYNA, παρουσιάζεται και στα αρχεία βίντεο:

- Deformation isometric.Avi
- [Deformation side.Avi](#)
- Deformation rear.Avi

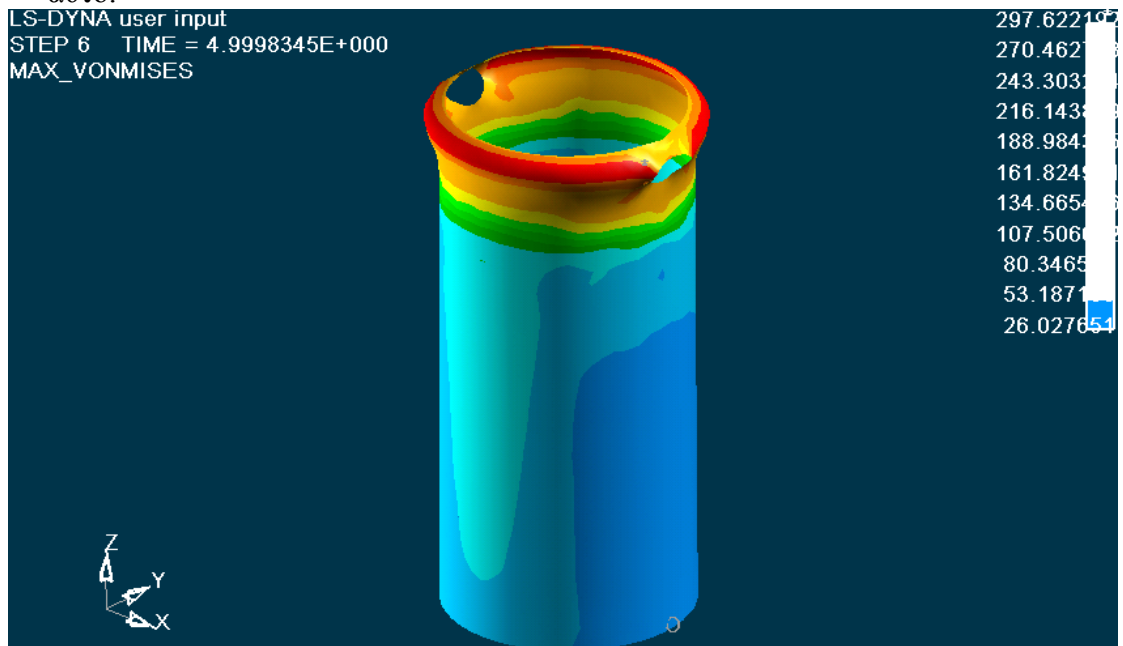
Ακολουθούν εικόνες από την κατανομή των τάσεων σε όλη την επιφάνεια του δοκιμίου κατά τα διάφορα στάδια της κατάρρευσής του:

Επιλέγοντας στον ETA POSTGL:

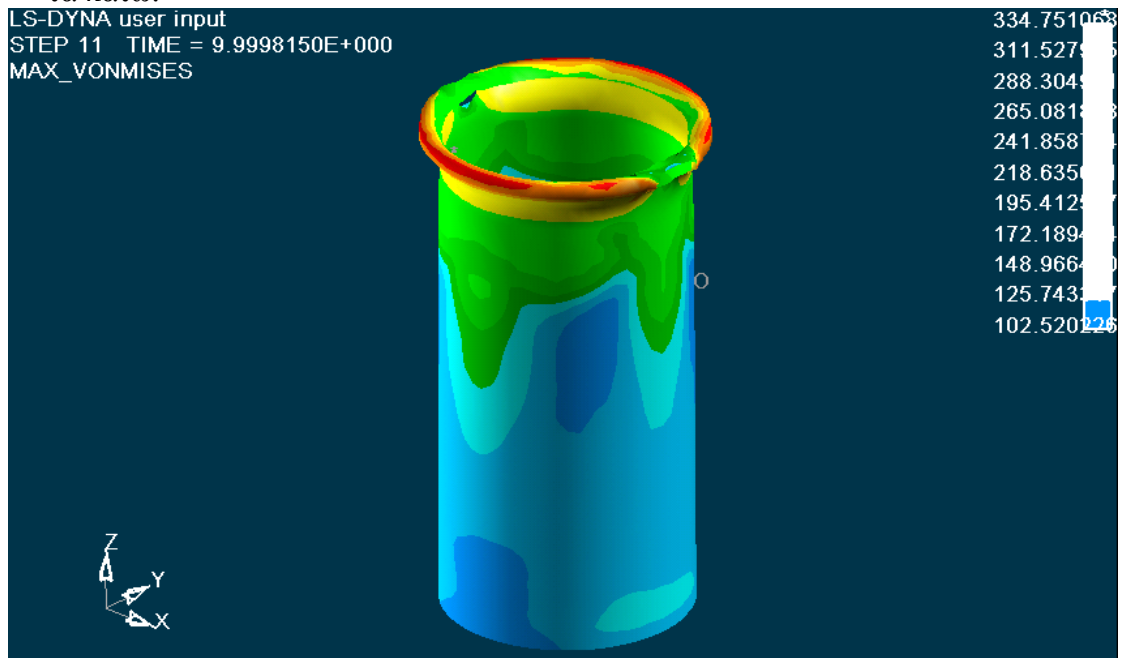
CONTOUR -> STRESS/STRAIN -> MAXIMUM VON MISES STRESSES:



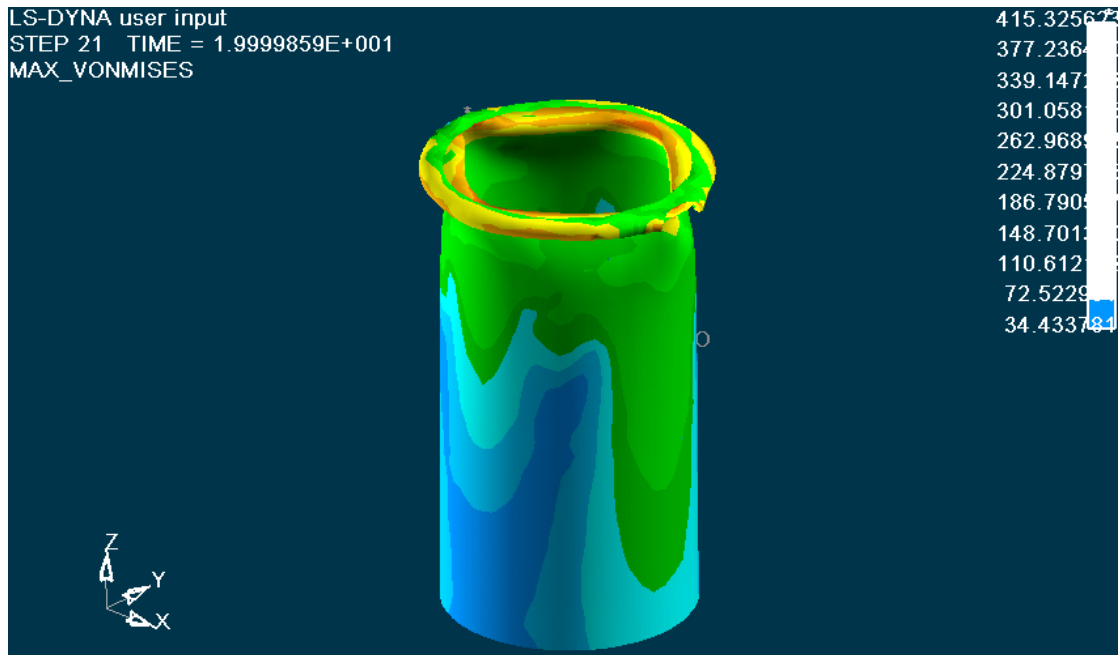
Κατανομή των τάσεων στο 1mm. Έχουμε εμφάνιση τάσεων στην περιοχή γύρω από την οπή του δοκιμίου, που όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 2, για την θεωρία των τάσεων γύρω από οπές, βλέπουμε ότι γύρω από την οπή του δοκιμίου, κατά την κατακόρυφη διεύθυνση που συμπίπτει με την διεύθυνση της αξονικής θλίψης του δοκιμίου, έχουμε τάσεις ίσες με $\sigma = 225 \text{ MPa}$, ενώ στο οριζόντιο μέσο επίπεδο της οπής, το οποίο είναι κάθετο ως προς το κατακόρυφο επίπεδο της αξονικής θλίψης του δοκιμίου, εκεί εμφανίζονται οι μέγιστες τάσεις για την κατάρρευση του δοκιμίου στη θέση της οπής, ίσες με $\sigma = 257 \text{ MPa}$. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή 257 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.



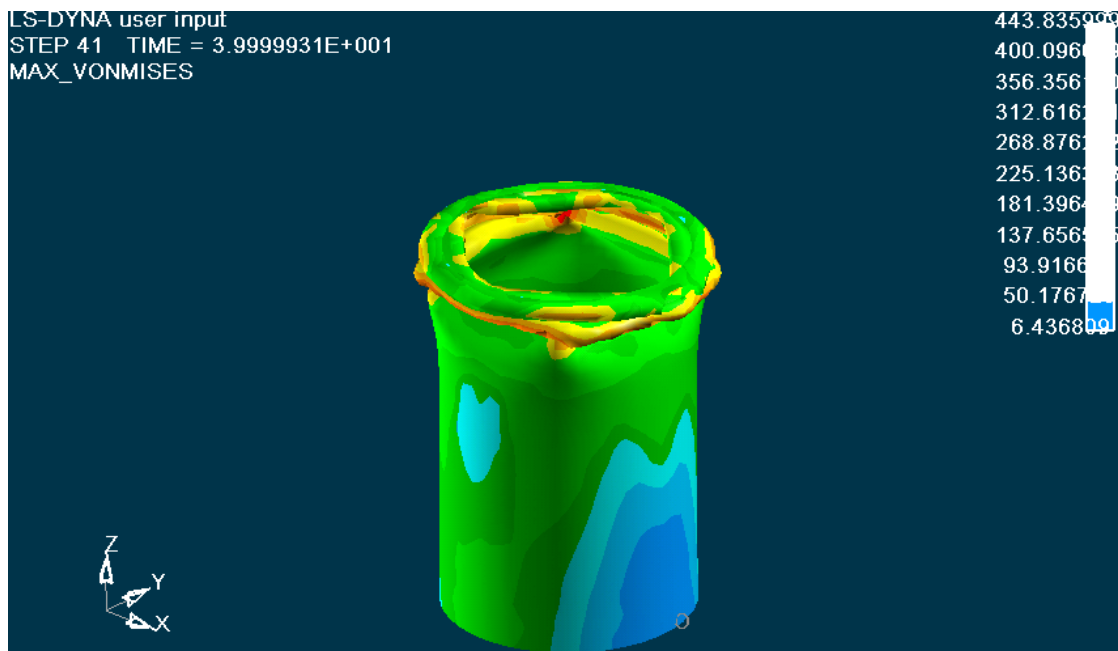
Κατανομή των τάσεων στο 5 mm. Έχουμε μέγιστες τάσεις στην περιοχή κάτω από την οπή του δοκιμίου, που πιέζει το έμβολο της πρέσσας, Ιδιαίτερα, στην περιοχή της οπής, οι τάσεις που εφαρμόζονται κατά την διεύθυνση της αξονικής θλίψης είναι $\sigma = 243 \text{ MPa}$, ενώ οι τάσεις που αναπτύσσονται στην οπή κάθετα προς την διεύθυνση αξονικής θλίψης του δοκιμίου, είναι $\sigma' = 297 \text{ MPa}$. Το κάτω μισό μέρος του δοκιμίου έχει μικρότερες τάσεις από ότι συμβαίνει στο υπόλοιπο μέρος του δοκιμίου που κυμαίνονται από 53-107 Mpa. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή 297 MPa, που βλέπουμε ότι είναι μεγαλύτερη τιμή από την τάση αντοχής του δοκιμίου ($\sigma_A = 240 \text{ MPa}$), οπότε καταρρέει το υλικό στη θέση της οπής, οπότε σχηματίζεται ο πρώτος εκτατός λοβός στο επίπεδο αυτό, και συνεχίζεται η κατάρρευση του δοκιμίου από την θέση αυτή και με διεύθυνση προς τα κάτω.



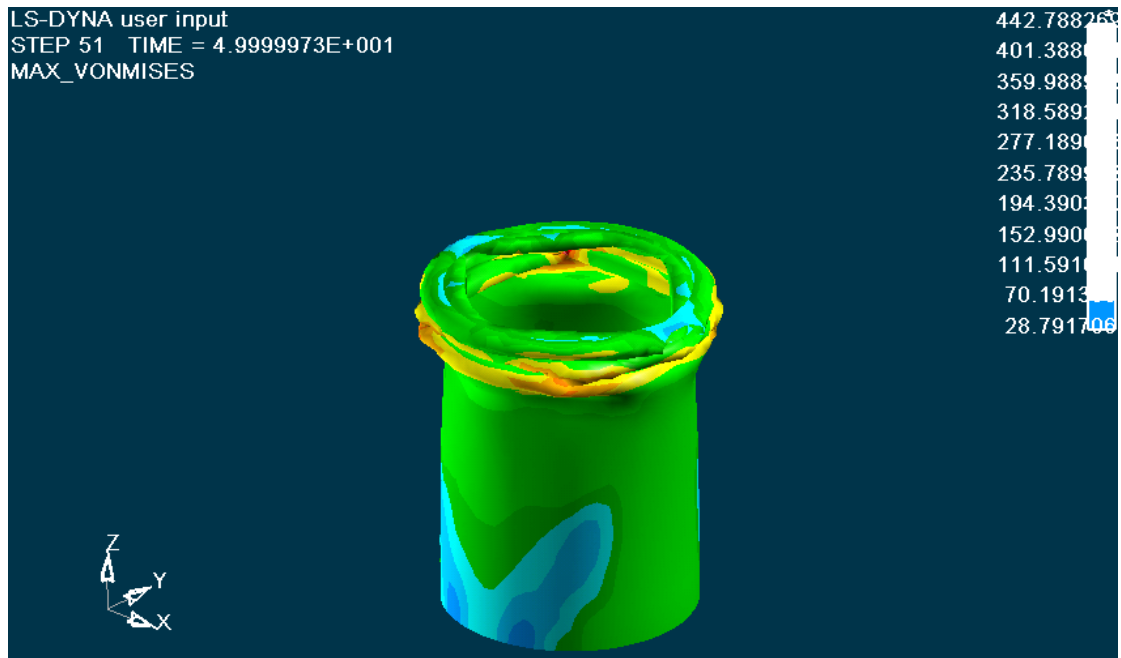
Κατανομή των τάσεων στο 10 mm. Έχουμε μέγιστες τάσεις στην περιοχή σχηματισμού του πρώτου λοβού στις περιοχές αναδίπλωσης. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή 334 MPa. Στο υπόλοιπο μέρος του μοντέλου μας εξακολουθούμε να έχουμε εμφάνιση μικρότερων τάσεων στο κάτω μισό του δοκιμίου μας, με την περιοχή ελάχιστων τάσεων να συμβολίζεται με O.



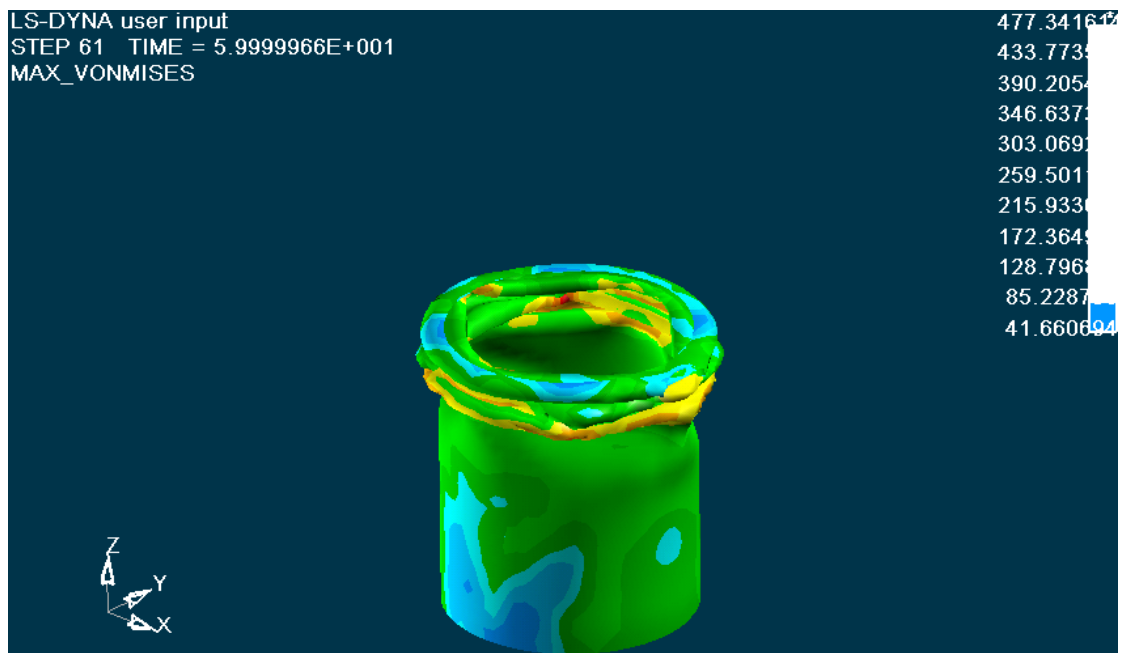
Κατανομή των τάσεων στο 20 mm. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή 415 MPa στις περιοχές αναδίπλωσης του υλικού του δοκιμίου. Ο πρώτος εκτατός λοβός έχει σχηματιστεί πλήρως, και ξεκινά και ο σχηματισμός του δεύτερου μη εκτατού λοβού, σε επίπεδο παράλληλο προς τα κάτω ως προς το προηγούμενο επίπεδο του αρχικού λοβού. Τάσεις σημαντικής τιμής, εμφανίζονται τώρα σχεδόν σε όλο το μήκος καθ' ύψος της τάξης των 186 MPa. Στο μέσο του δοκιμίου σημειώνονται οι μικρότερες τάσεις που φαίνονται και στο σχήμα, με τον αριθμό 0.



Κατανομή των τάσεων στο 40 mm. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή 443 MPa. Στο κάτω μέρος του δοκιμίου που έρχεται σε επαφή με την σταθερή πλάκα, έχουμε την ελάχιστη τιμή των τάσεων που φαίνεται στην εικόνα με τον αριθμό μηδέν 0.

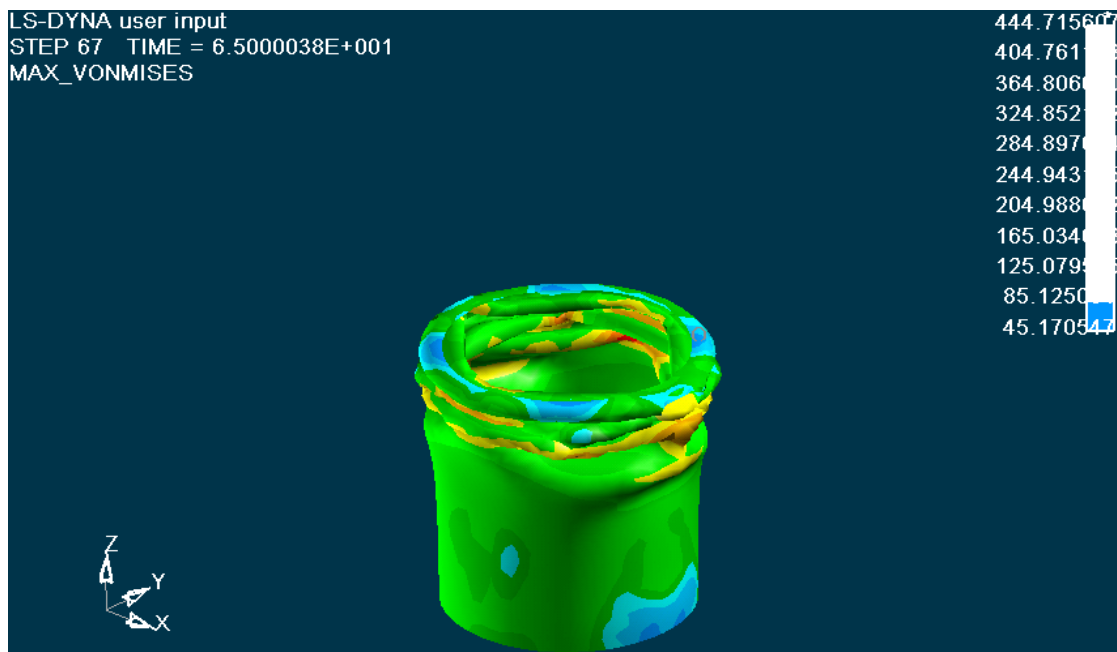


Κατανομή των τάσεων στο 50 mm. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη εμφανιζόμενη τιμή 442 MPa. Έχουν σχηματιστεί και οι δύο μη εκτατοί λοβοί που διαφέρουν κατά $\pi/4$ μεταξύ τους. Στο κάτω μέρος του δοκιμίου στην επιφάνεια επαφής με την σταθερή πλάκα έχουμε μικρότερες τάσεις $\sigma = 70$ MPa.



Κατανομή των τάσεων στο 60 mm. Έχουμε μέγιστες τάσεις στην περιοχή κάτω από την οπή του δοκιμίου στις περιοχές αναδίπλωσης για την δημιουργία του τρίτου μη έκτατου λοβού που πιέζει το έμβολο της πρέσας. Το κάτω μισό μέρος του δοκιμίου έχει μικρότερες τάσεις από ότι συμβαίνει στο υπόλοιπο μέρος του δοκιμίου. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή 477 MPa, που βλέπουμε ότι είναι μεγαλύτερη τιμή από την τάση αντοχής του δοκιμίου ($\sigma_{αντ} = 240$ MPa), οπότε αστοχεί το υλικό στη θέση της οπής, οπότε σχηματίζεται ο τρίτος μη εκτατός λοβός στο επίπεδο αυτό και στραμμένος κατά $\pi/4$ ως προς τον

προηγούμενο μη εκτατό λοβό, και συνεχίζεται η κατάρρευση του δοκιμίου από την θέση αυτή και με διεύθυνση προς τα κάτω.

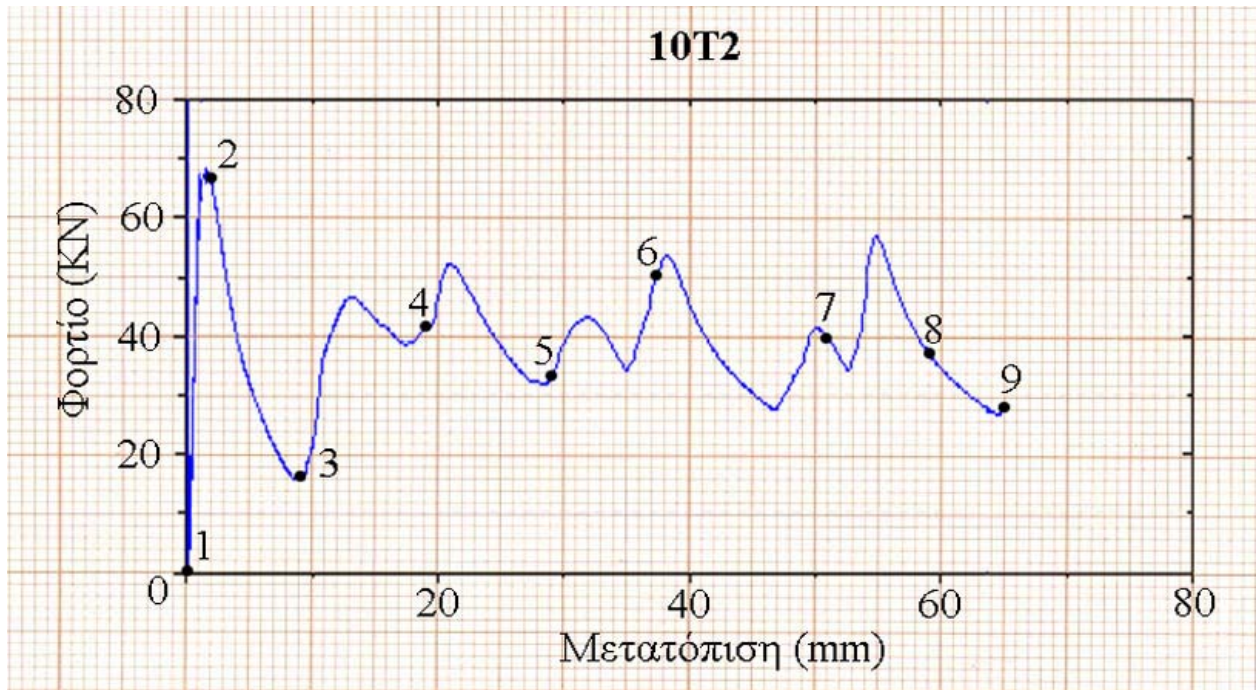


Κατανομή των τάσεων στο 65.0 mm. Οι τελικές τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη εμφανιζόμενη τιμή 444 MPa. Η κατάρρευση του δοκιμίου έχει πλέον ολοκληρωθεί, και οι τέσσερις τελικοί λοβοί ένας εκτατός και τρεις μη εκτατοί λοβοί έχουν σχηματιστεί πλήρως.

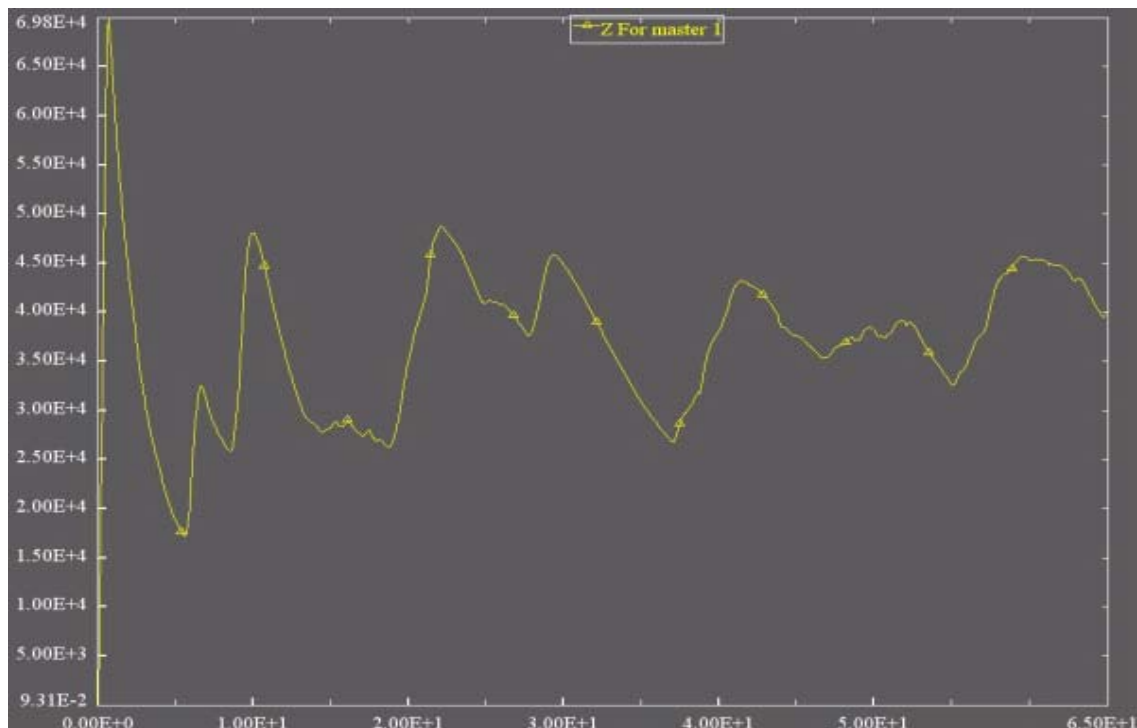
Η ολοκληρωμένη προσομοίωση της κατανομής των τάσεων του μοντέλου μας με το LS-DYNA, παρουσιάζεται και στο αρχείο βίντεο:

➤ [_Contour Max Von Mises.Avi](#)

Ακόμα, το διάγραμμα των δυνάμεων μετά την επεξεργασία των στοιχείων που πάθησαν 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 στην επόμενη σελίδα, με τον κατακόρυφο άξονα να δείχνει τις δυνάμεις σε N, και με τον οριζόντιο άξονα να δείχνει τις μετατοπίσεις (βραχύνσεις του θλιβόμενου δοκιμίου) σε mm:



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

Το μέγιστο φορτίο $P_{max} = 67,65 \text{ KN}$,

Το μέσο φορτίο $P_{mean} = 37,91 \text{ KN}$,

Η ομοιομορφία φορτίου $P_{max} / P_{mean} = 1,78$

Η συνολική ενέργεια που δαπανήθηκε για την αξονική κατάρρευση του δοκιμίου είναι $E = 2464 \text{ KN mm}$

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

Το μέγιστο φορτίο $P_{max} = 69,80 \text{ KN}$,

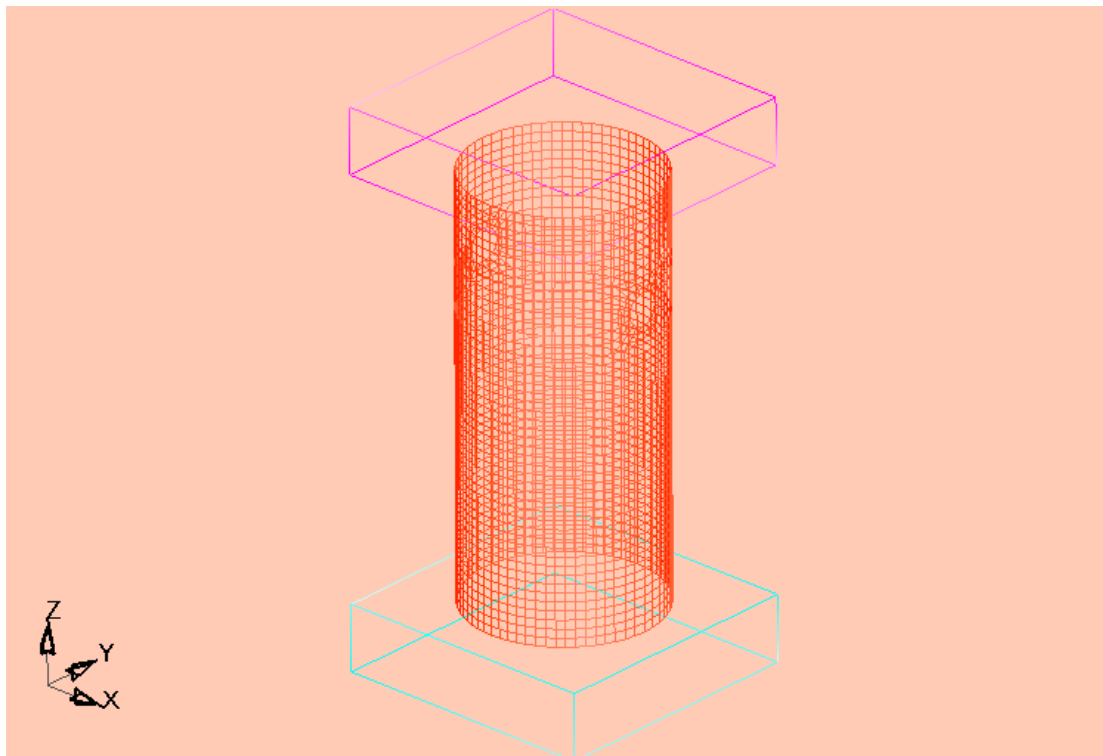
Το μέσο φορτίο $P_{mean} = 36,92 \text{ KN}$,

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

Η συνολική ενέργεια που δαπανήθηκε για την αξονική κατάρρευση του δοκιμίου είναι $E = 2400 \text{ KN mm}$

ΕΝΟΤΗΤΑ 5-14: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΙΑΣ ΔΙΑΜΠΕΡΟΥΣ ΟΠΗΣ Φ10 ΣΤΟ ¼ ΤΟΥ ΥΨΟΥΣ Η (TYPE_10M2).

Το μοντέλο του δοκιμίου κυκλικής διατομής με μια οπή διαμπερή, διαμέτρου Φ10 στο 1/4 του ύψους Η του δοκιμίου, και με πάχος τοιχώματος 2mm, παρουσιάζεται στην ακόλουθη εικόνα:



Σχ.1, Απεικόνιση πλέγματος στο LS-DYNA 3D, για κυκλικής διατομής δοκίμιο με μια διαμπερή οπή διαμέτρου Φ10 στο ¼ του ύψους του.

Οι αντίστοιχες φάσεις προσομοίωσης της κατάρρευσης του δοκιμίου αυτού, που κατέγραψα με τη χρήση του LS-DYNA, σε σύγκριση με τις φάσεις που έλαβα από την ελληνική βιβλιογραφία [1] 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 (αριστερή).



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 $\frac{1}{4}$ του ύψους του (θέση οπής), ενώ στο μοντέλο του ls-dyna, η αρχική κατάρρευση σημειώνεται στη θέση επαφής του δοκιμίου με την κινούμενη πλάκα . Πάτημα της πρέσας στα 2 mm.



2^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Στο δοκίμιο στο Is-dyna έχουμε δημιουργία μη εκτατού λοβού στην περιοχή της διαμπερούς οπής ενώ στο δοκίμιο της πρέσας στην ίδια περιοχή δημιουργείται εκτατός λοβός. Πάτημα της πρέσας στα 10 mm.



3^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Στο δοκίμιο του Is-dyna έχουμε δημιουργία ακόμα έναν μη εκτατό λοβό στο παράλληλο επίπεδο πάνω από το επίπεδο του προηγούμενο λοβού και στραμμένο κατά $\pi/2$ ως προς αυτόν. Ενώ ο εκτατός λοβός στο δοκίμιο της πρέσας έχει φτάσει στο μέγιστο δυνατό πλάτος και αρχίζει πλέον να παραμορφώνεται. Πάτημα της πρέσας στα 23 mm.



4^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Στο δοκίμιο του Is-dyna έχουμε τελείωμα του δεύτερου μη εκτατού λοβού και αρχή δημιουργίας επόμενου μη εκτατού λοβού στο παράλληλο επίπεδο κάτω από τον πρώτο μη εκτατό λοβό και στραμμένο κατά $\pi/2$. Στο δοκίμιο της πρέσας έχουμε σχηματισμό σχεδόν αξονοσυμμετρικού λοβού κάτω από τον προηγούμενο αλλά η παραμόρφωση του λοβού από επάνω του, επηρεάζει την μορφή του. Πάτημα της πρέσας στα 39 mm.



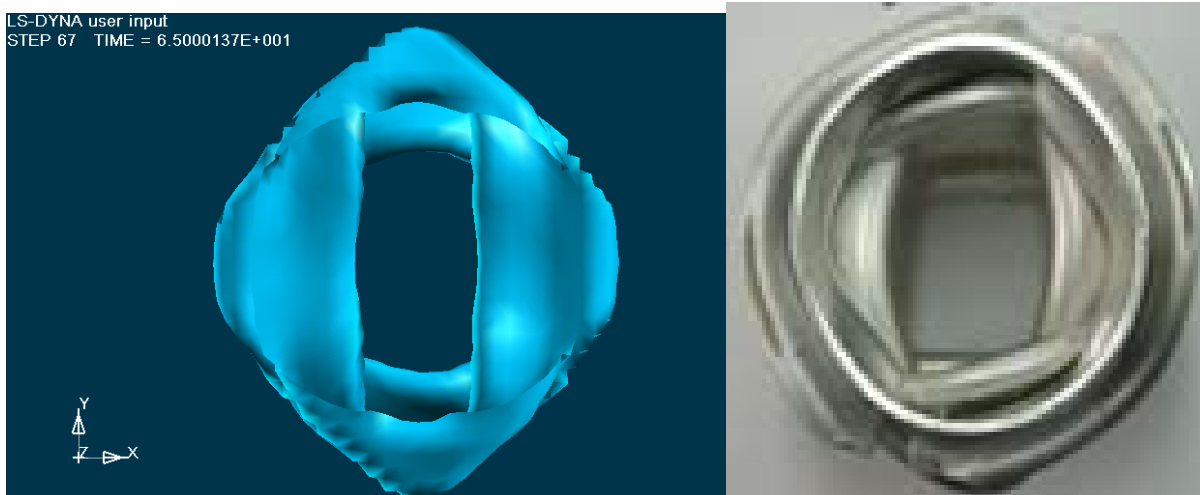
5^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Στο δοκίμιο του Is-dyna έχουμε τελείωμα του τρίτου μη εκτατού λοβού που είναι στραμμένος

κατά $\pi/2$ από τον προηγούμενο και παραμόρφωση της κάτω διατομής του δοκιμίου που είναι σε επαφή με την σταθερή πλάκα της πρέσας για δημιουργία επόμενου εκτατού λοβού. Στο δοκίμιο τη πρέσας παρατηρούμε δημιουργία μη εκτατού 2D λοβού από τον εκτατό λοβό. Πάτημα της πρέσας στα 55 mm.



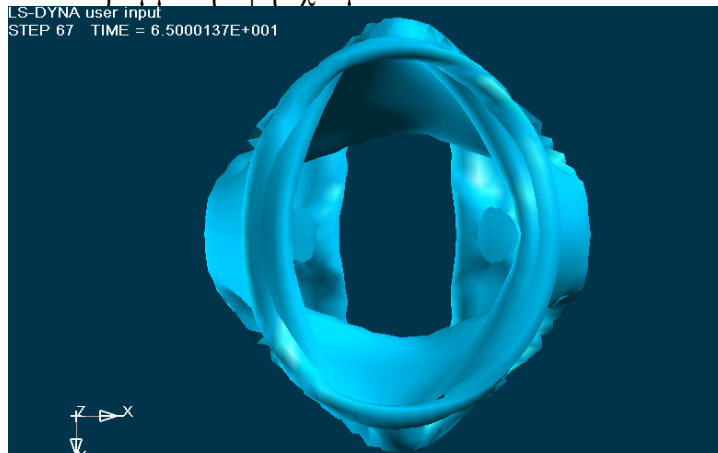
6^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Στο δοκίμιο του ls-dyna έχουμε ημιτελή τέταρτο εκτατό λοβό. Στο δοκίμιο της πρέσας έχουμε θραύση της οπής και έναν ακόμη μη εκτατό λοβό στραμμένο κατά $\pi/2$ από τον προηγούμενο. Τέλος αξονικής κατάρρευσης δοκιμίου στην πρέσα. Πάτημα της πρέσας στα 65.0 mm.

LS-DYNA user input
STEP 67 TIME = 6.5000137E+001

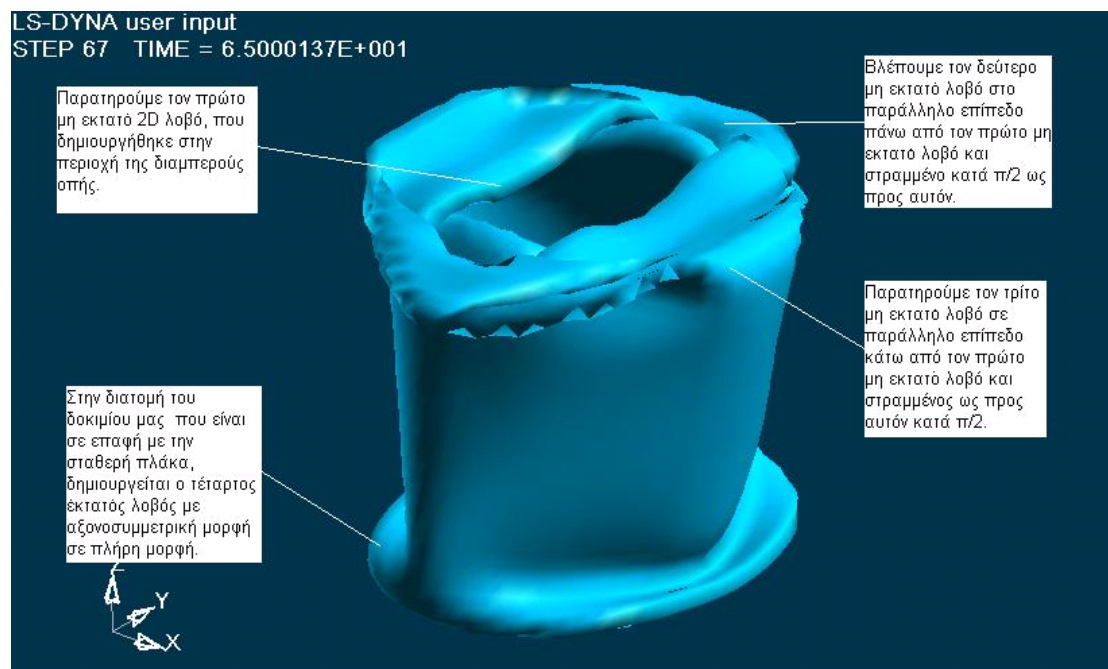


Τελική μορφή δοκιμίου αμέσως μετά το τέλος της διαδικασίας αξονικής κατάρρευσης στην πρέσα (δεξιά). Το ίδιο δοκίμιο μετά το τέλος της προσομοίωσης από το ls-dyna, (αριστερά). Παρατηρούμε τρεις μη εκτατούς λοβούς, σε επίπεδα εναλλάξ κατά 90° στο δοκίμιο του ls-dyna ενώ στο δοκίμιο της πρέσας κατά 90° . Τελικό πάτημα της πρέσας στα 65.0 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 65.0 mm:



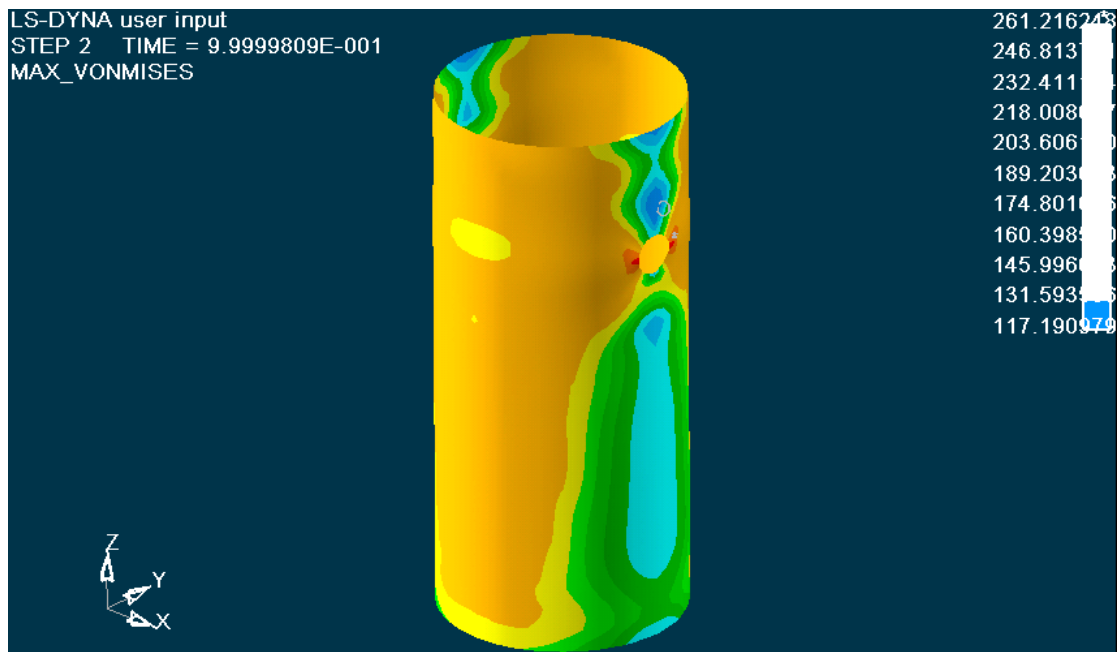
Η ολοκληρωμένη προσομοίωση κατάρρευσης του μοντέλου μας με το LS-DYNA, παρουσιάζεται και στα αρχεία βίντεο:

- Deformation isometric.Avi
- [Deformation side.Avi](#)
- Deformation rear.Avi

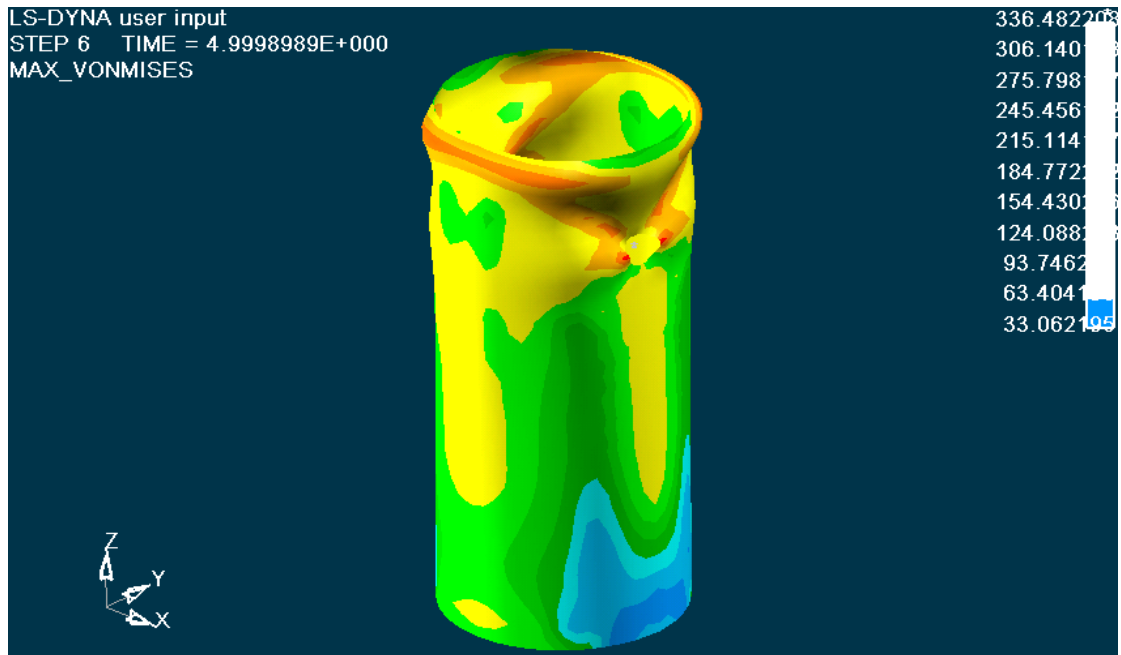
Ακολουθούν εικόνες από την κατανομή των τάσεων σε όλη την επιφάνεια του δοκιμίου κατά τα διάφορα στάδια της κατάρρευσής του:

Επιλέγοντας στον ETA POSTGL:

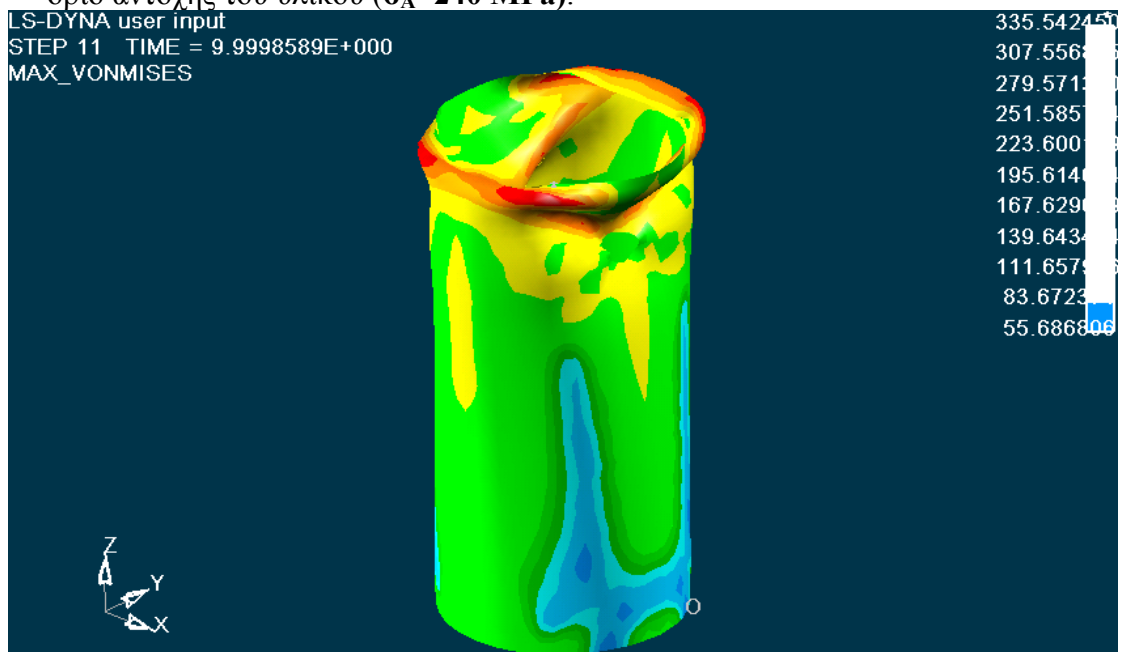
CONTOUR -> STRESS/STRAIN -> MAXIMUM VON MISES STRESSES:



Κατανομή των τάσεων στο 1mm. Έχουμε εμφάνιση τάσεων στην περιοχή γύρω από την οπή του δοκιμίου, που όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 2, για την θεωρία των τάσεων γύρω από οπές, βλέπουμε ότι γύρω από την οπή του δοκιμίου, κατά την κατακόρυφη διεύθυνση που συμπίπτει με την διεύθυνση της αξονικής θλίψης του δοκιμίου, έχουμε τάσεις ίσες με $\sigma = 189 \text{ MPa}$, ενώ στο οριζόντιο μεσεπίπεδο της οπής, το οποίο είναι κάθετο ως προς το κατακόρυφο επίπεδο της αξονικής θλίψης του δοκιμίου, εκεί εμφανίζονται οι μέγιστες τάσεις για την κατάρρευση του δοκιμίου στη θέση της οπής, ίσες με $\sigma = 261 \text{ MPa}$. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή 261 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.

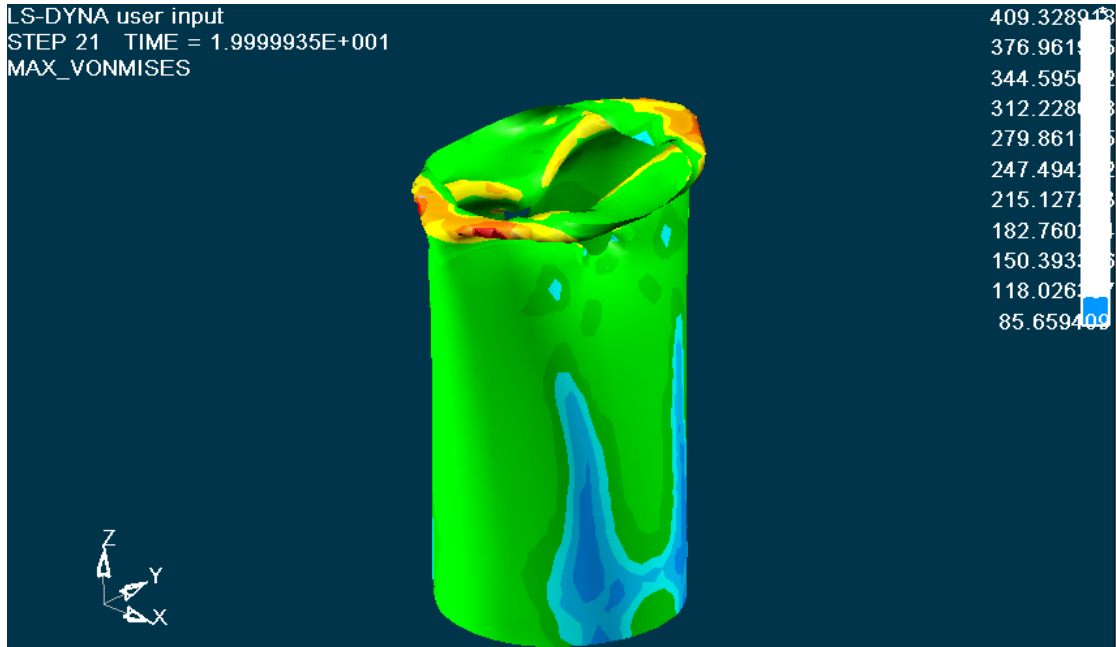


Κατανομή των τάσεων στο 5 mm. Έχουμε εμφάνιση υψηλών τάσεων στην περιοχή της πάνω διατομής όπου αναδιπλώνεται το υλικό για δημιουργία έκτατου λοβού και την περιοχή περιμετρικά της οπής ίσες με **191 MPa**. Συνεχίζεται η κατάρρευση του δοκιμίου από την θέση αυτή και με διεύθυνση προς τα πάνω. Γύρω από την οπή του δοκιμίου, κατά την κατακόρυφη διεύθυνση που συμπίπτει με την διεύθυνση της αξονικής θλίψης του δοκιμίου, έχουμε τάσεις ίσες με **$\sigma = 245 \text{ MPa}$** , ενώ στο οριζόντιο μέσο επίπεδο της οπής, το οποίο είναι κάθετο ως προς το κατακόρυφο επίπεδο της αξονικής θλίψης του δοκιμίου, εκεί εμφανίζονται μεγαλύτερες τάσεις ίσες με **$\sigma = 336 \text{ MPa}$** η οποία επίσης είναι μεγαλύτερη από το όριο αντοχής του υλικού (**$\sigma_A=240 \text{ MPa}$**).

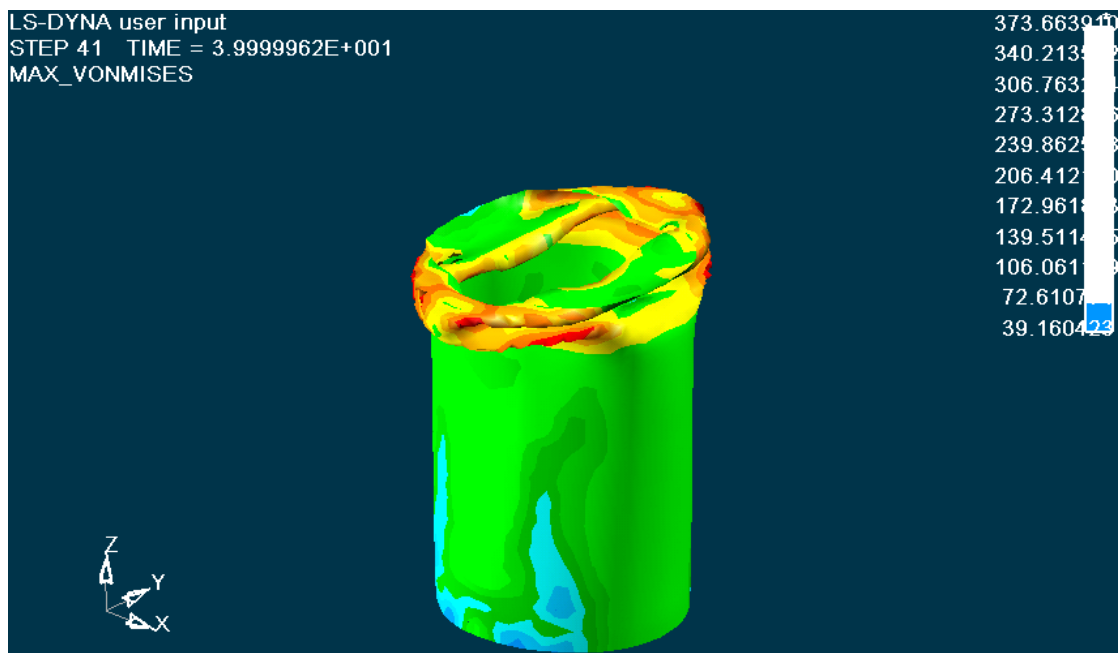


Κατανομή των τάσεων στο 10 mm. Έχουμε μέγιστες τάσεις στην περιοχή σχηματισμού του πρώτου λοβού στα σημεία αναδίπλωσης. Οι τιμές των τάσεων

φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή 335 MPa. Στο υπόλοιπο μέρος του μοντέλου μας εξακολουθούμε να έχουμε εμφάνιση μικρότερων τάσεων στο κάτω 3/4 του δοκιμίου μας με μέγιστη τάση μόλις 223 MPa. Στην περιοχή επαφής του δοκιμίου με την σταθερή πλάκα σημειώνονται μικρότερες τάσεις ίσες με 83 MPa, που φαίνονται και στο σχήμα με το σύμβολο O.

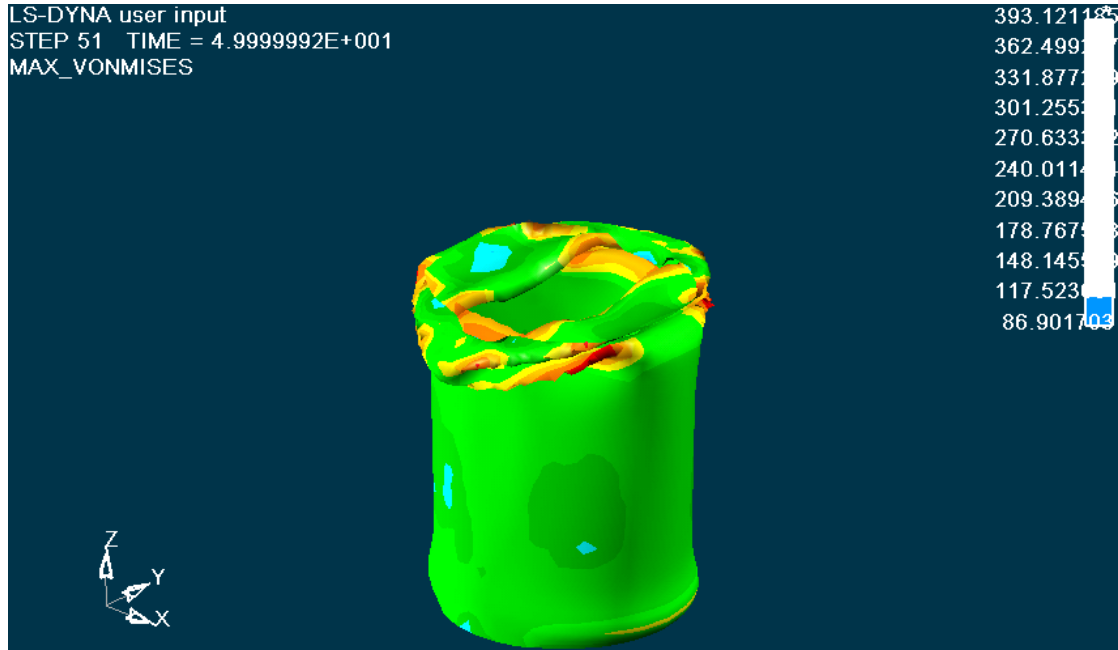


Κατανομή των τάσεων στο 20 mm. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή 409 MPa. Η μορφή του πρώτου έκτατου λοβού αλλοιώνεται με ροή του υλικού στο εσωτερικό του δοκιμίου ενώ έχουμε δημιουργία μη εκτατού 2D λοβού στο ύψος των οπών. Τάσεις σημαντικής τιμής, εμφανίζονται στις περιοχές του έκτατου λοβού όπου εμφανίζεται πτυχή του υλικού.

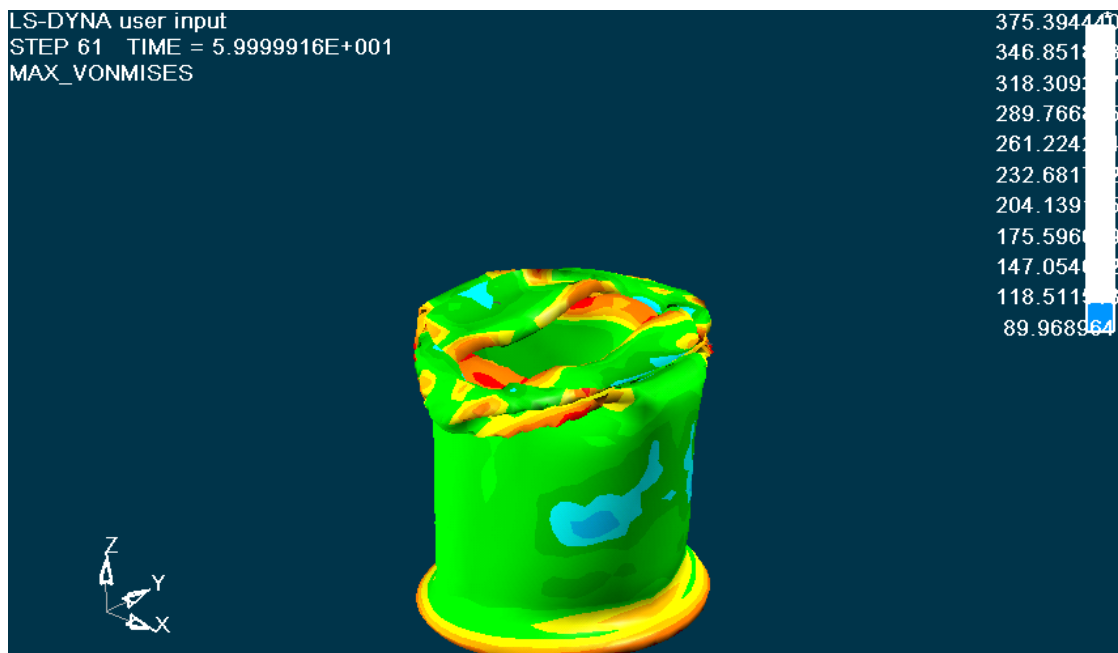


Κατανομή των τάσεων στο 40 mm. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή 373 MPa. Την μέγιστη τιμή των τάσεων συναντάμε στην περιοχή δημιουργίας του τρίτου μη εκτατού λοβού.

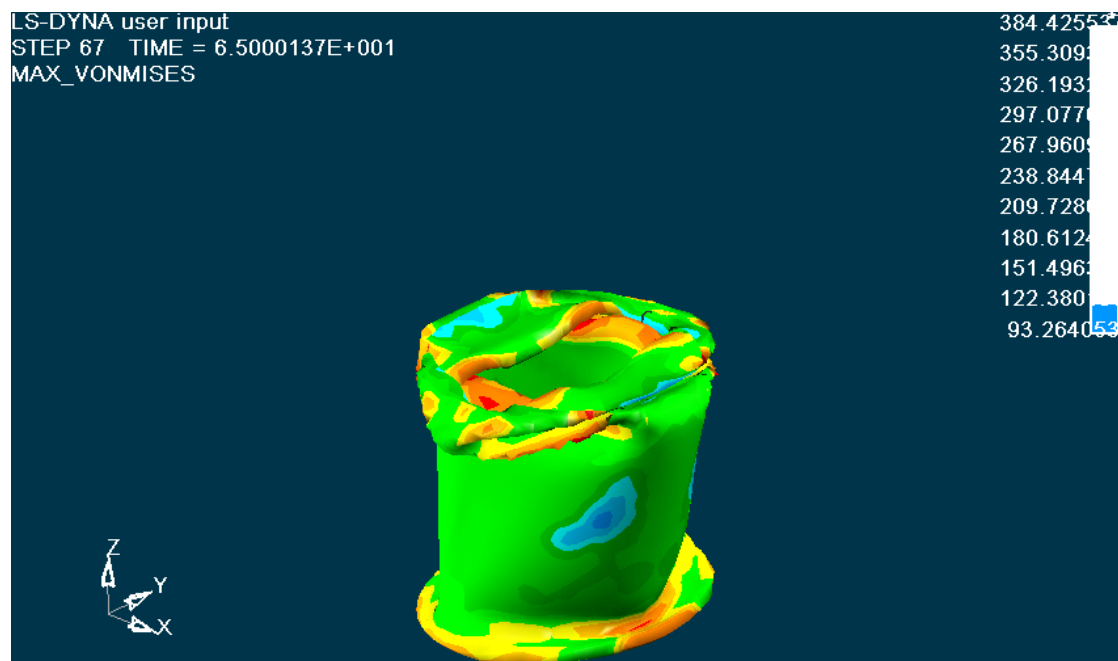
Στο κάτω μέρος του δοκιμίου που έρχεται σε επαφή με την σταθερή πλάκα, έχουμε την ελάχιστη τιμή των τάσεων ίση με 72 MPa.



Κατανομή των τάσεων στο 50 mm. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη εμφανιζόμενη τιμή 393 MPa. Έχουν σχηματιστεί και οι τρεις μη εκτατοί λοβοί, και ήδη δημιουργείται και ο τέταρτος λοβός ενώ στην κάτω διατομή του δοκιμίου έχουμε αρχή δημιουργίας εκτατού λοβού με εμφάνιση τάσεων ίσες με $\sigma=301$ MPa.



Κατανομή των τάσεων στο 60 mm. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη εμφανιζόμενη τιμή 375 MPa. Η κατάρρευση του δοκιμίου, και η εμφάνιση των τριών μη εκτατών λοβών, σε επίπεδα εναλλάξ στραμμένα μεταξύ τους κατά γωνία $\pi/2$, αρχίζει να είναι πλέον εμφανής σε όλο το δοκίμιο. Στην κάτω διατομή ο εκτατός λοβός εμφανίζει τάσεις ίσες με 318 MPa.

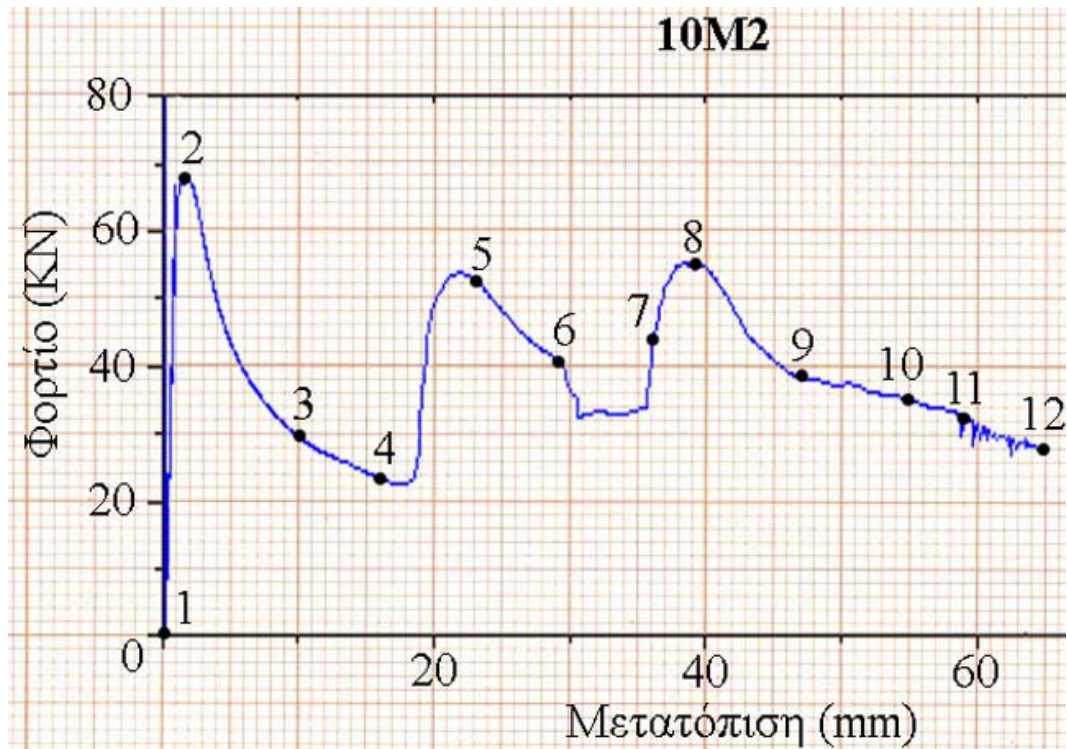


Κατανομή των τάσεων στο 65.0 mm. Οι τελικές τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη εμφανιζόμενη τιμή 384 MPa. Η κατάρρευση του δοκιμίου έχει πλέον ολοκληρωθεί, και οι τρεις τελικοί μη εκτατοί λοβοί έχουν σχηματιστεί πλήρως όπως και ο εκτατός λοβός στην κάτω διατομή, ενώ ο τέταρτος μη εκτατός λοβός είναι ατελής.

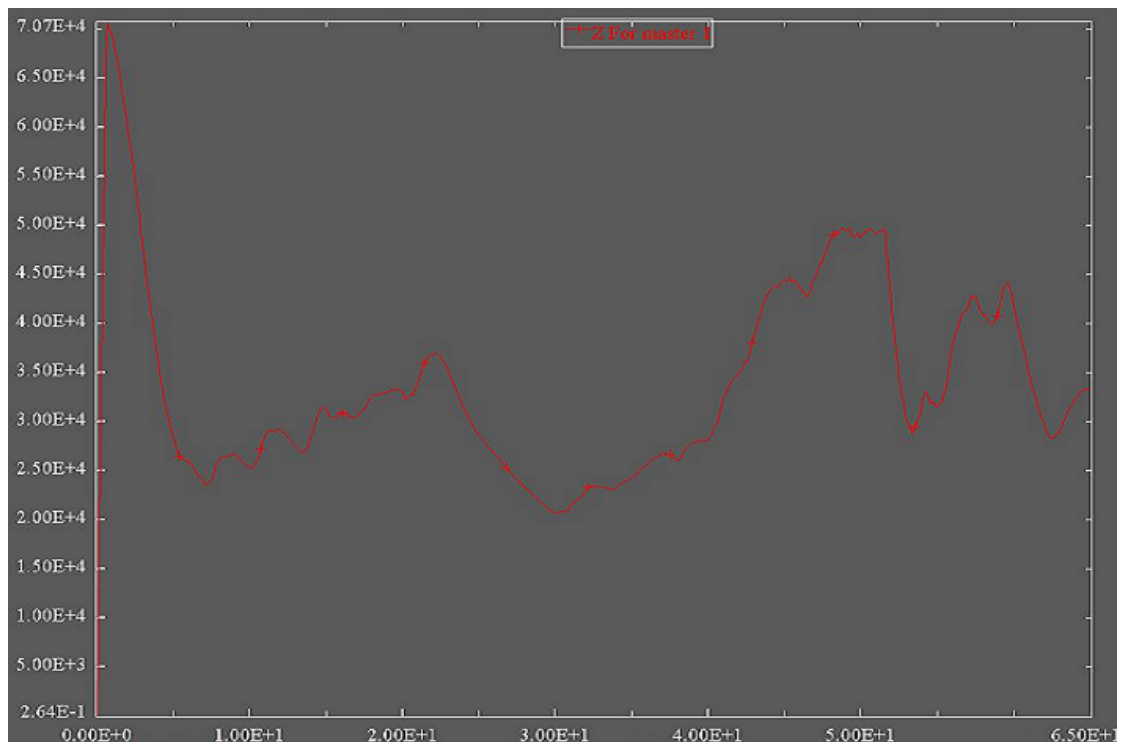
Η ολοκληρωμένη προσομοίωση της κατανομής των τάσεων του μοντέλου μας με το LS-DYNA, παρουσιάζεται και στο αρχείο βίντεο:

➤ [_Contour Max Von Mises.Avi](#)

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



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

Το μέγιστο φορτίο $P_{max} = 67,73 \text{ KN}$,

Το μέσο φορτίο $P_{mean} = 37,91 \text{ KN}$,

Η ομοιομορφία φορτίου $P_{max}/P_{mean} = 1,79$

Η συνολική ενέργεια που δαπανήθηκε για την αξονική κατάρρευση του δοκιμίου είναι $E = 2464 \text{ KN mm}$

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

Το μέγιστο φορτίο $P_{max} = 70.7 \text{ KN}$,

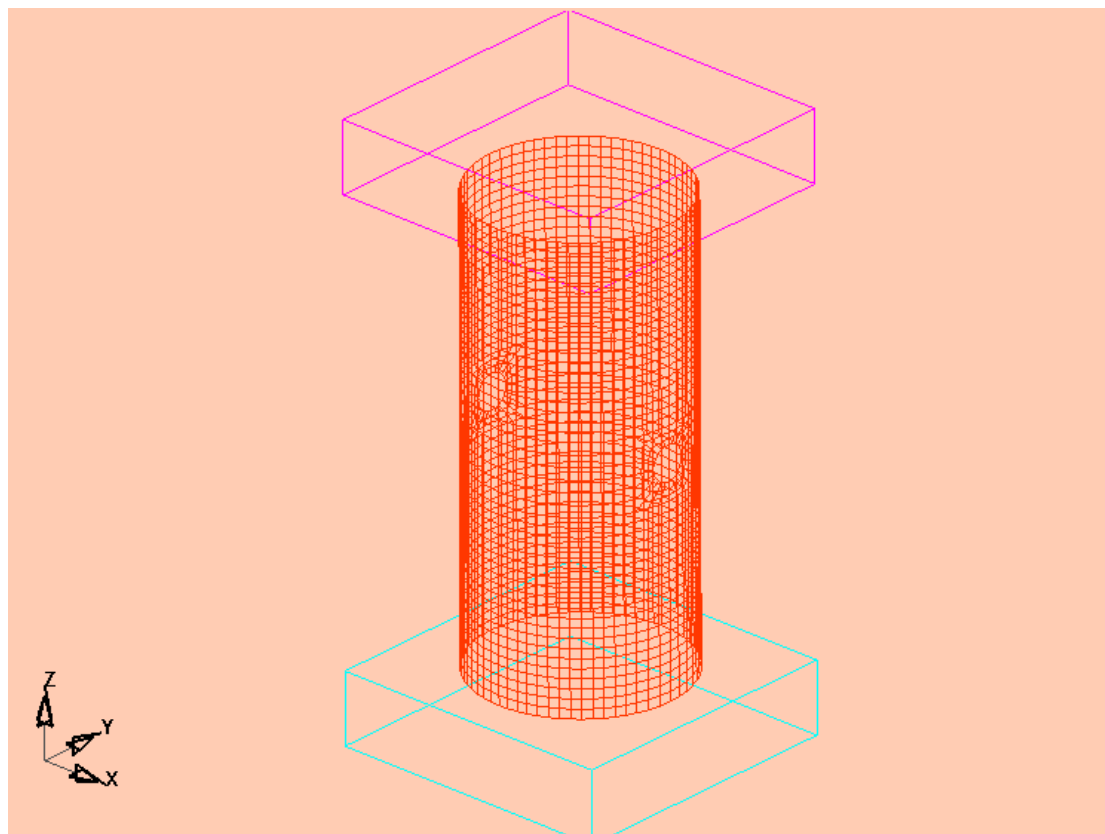
Το μέσο φορτίο $P_{mean} = 33.54 \text{ KN}$,

Η ομοιομορφία φορτίου $P_{max}/P_{mean} = 2,11$

Η συνολική ενέργεια που δαπανήθηκε για την αξονική κατάρρευση του δοκιμίου είναι $E = 2180 \text{ KN mm}$

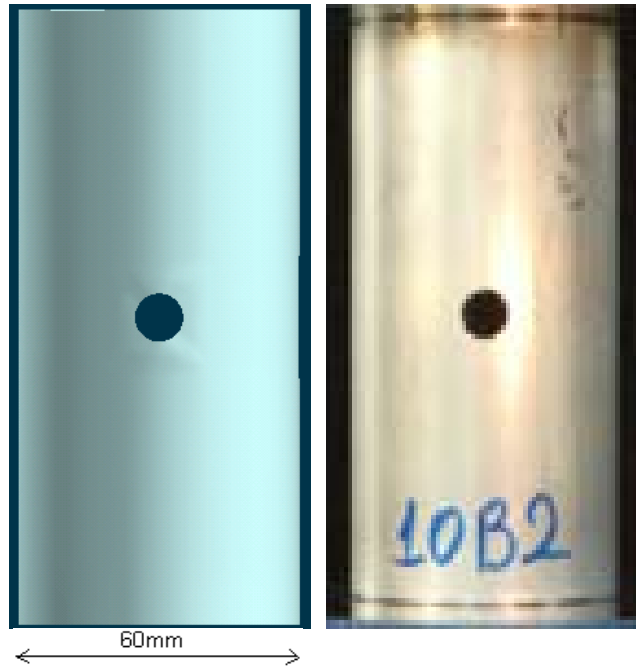
ΕΝΟΤΗΤΑ 5-15: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΙΑΣ ΔΙΑΜΠΕΡΟΥΣ ΟΠΗΣ Φ10 ΣΤΟ 1/2 ΤΟΥ ΥΨΟΥΣ Η ΤΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ (TYPE_10B2)

Το μοντέλο κυκλικής διατομής με μια οπή διαμπερή διαμέτρου Φ10 στο 1/2 του ύψους Η του δοκιμίου, με πάχος τοιχώματος 2mm, παρουσιάζεται στην ακόλουθη εικόνα:

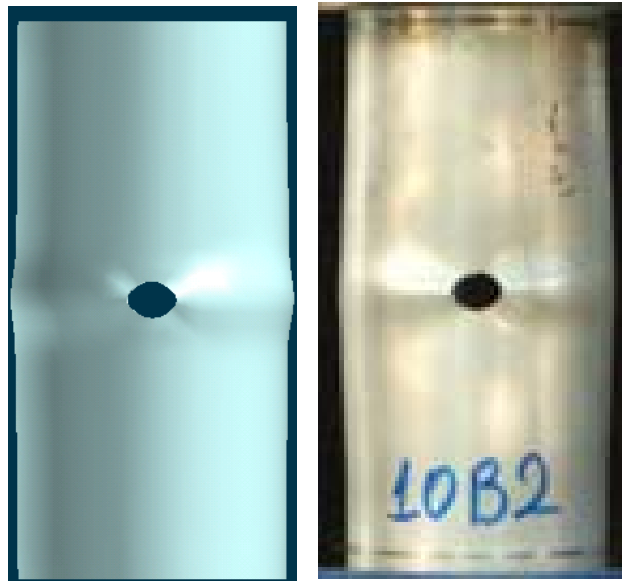


Σχ.1, Απεικόνιση πλέγματος στο LS-DYNA 3D, για κυκλικής διατομής δοκίμιο με μια διαμπερή οπή διαμέτρου Φ10 στο 1/2 του ύψους του δοκιμίου.

Οι αντίστοιχες φάσεις προσομοίωσης της κατάρρευσης του δοκιμίου αυτού, που κατέγραψα με τη χρήση του LS-DYNA, σε σύγκριση με τις φάσεις που έλαβα από την ελληνική βιβλιογραφία [1] 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 έκτατου λοβού. Παρατηρούμε ότι το πραγματικό δοκίμιο στην πρέσα, αρχίζει να καταρρέει στο μισό του ύψους του (θέση οπή), ενώ και στο μοντέλο του ls-dyna , η αρχική κατάρρευση σημειώνεται στη θέση της οπής. Πάτημα της πρέσας στα 2 mm.



2^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Στο δοκίμιο της πρέσας όπως και στο δοκίμιο του Is-dyna έχουμε συνέχεια του εκτατού λοβού και επιπλέον μετακίνηση του άνω μέρους σε σχέση με το κάτω. Πάτημα πρέσας στα 8mm.



3^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Στο δοκίμιο της πρέσας και στο Is-dyna είναι εντονότερη η μετατόπιση του άνω μέρους και παρατηρούμε σχετική αναδίπλωση του εκτατού λοβού στο εσωτερικό του δοκιμίου και αρχή θραύσης της οπής. Πάτημα πρέσας στα 20 mm.



4^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Στο δοκίμιο της πρέσας όπως και στο Is-dyna έχουμε συμμετρική αναδίπλωση στην περιοχή του εκατατού λοβού. Πάτημα της πρέσας στα 34 mm.



5^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Στο δοκίμιο της πρέσας και του Is-dyna παρατηρούμε πως η μεγάλη μετατόπιση του πάνω μέρους σε σχέση με το κάτω μέρος έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία δύο πλαστικών αρθρώσεων που διαφέρουν κατά $\pi/2$, με μεγάλη πυκνότητα υλικού που είναι ο λόγος για την μεγάλη απορρόφηση ενέργειας από το δοκίμιο. Πάτημα της πρέσας στα 47 mm.

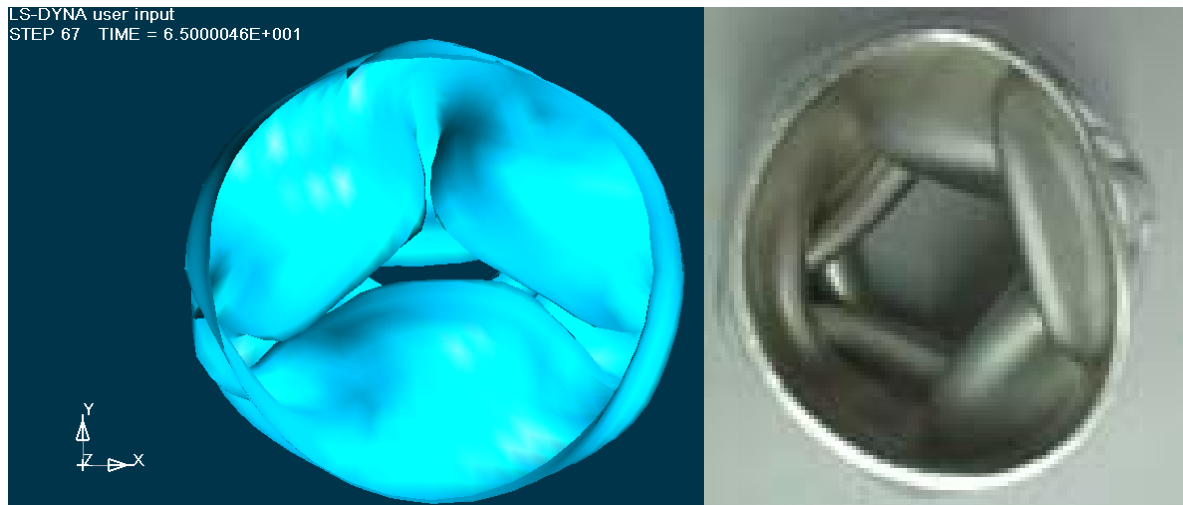


6^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Στο δοκίμιο του ls-dyna όπως και του δοκιμίου της πρέσας οι αρθρώσεις που σχηματίζονται να είναι εντονότερες με ροή του υλικού προς το εσωτερικό του δοκιμίου. Πάτημα της πρέσας στα 55 mm.



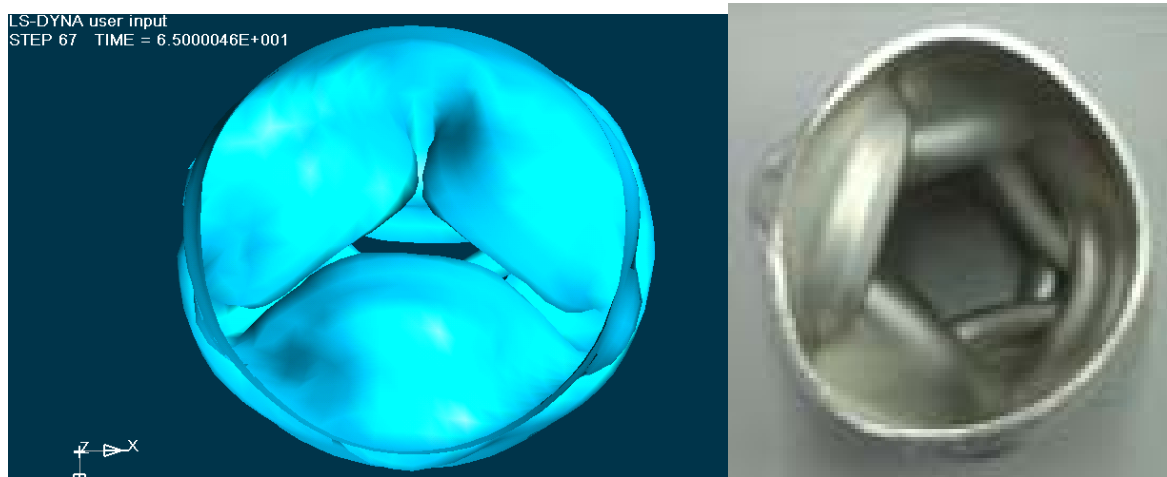
7^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Στα δύο δοκίμια παρατηρούμε την αξονική μετατόπιση των αρθρώσεων προς την σταθερή

βάση της πρέσας. Τέλος αξονικής κατάρρευσης δοκιμίου στην υδραυλική πρέσα. Πάτημα της πρέσας στα 65.0mm.



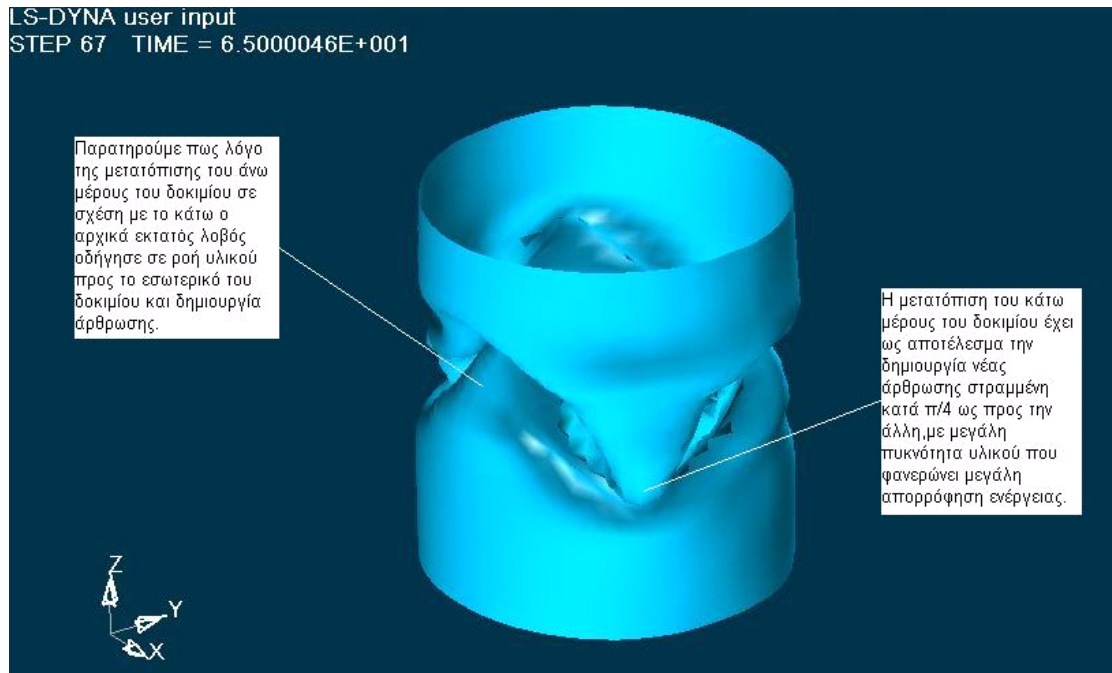
Τελική μορφή δοκιμίου αμέσως μετά το τέλος της διαδικασίας αξονικής κατάρρευσης στην πρέσα (δεξιά). Το ίδιο δοκίμιο μετά το τέλος της προσομοίωσης από το LS-DYNA, (αριστερά). Παρατηρούμε ένα ζεύγος μη εκτατών λοβών σε επίπεδα εναλλάξ κατά 45° . Τελικό πάτημα της πρέσας στα 65.0mm.

Σε αντιστραμμένη όψη έχουμε:



Παρατηρούμε και στα δύο δοκίμια παραμόρφωση της κάτω διατομής με σχηματισμό ημιτελούς μη εκτατού λοβού.

Ακόμα, σε τρισδιάστατη ισομετρική όψη, παρουσιάζεται παρακάτω η τελική μορφή του δοκιμίου όπως προσομοιώθηκε στο LS-DYNA, με κατάρρευση του δοκιμίου έως τα 65.0 mm:



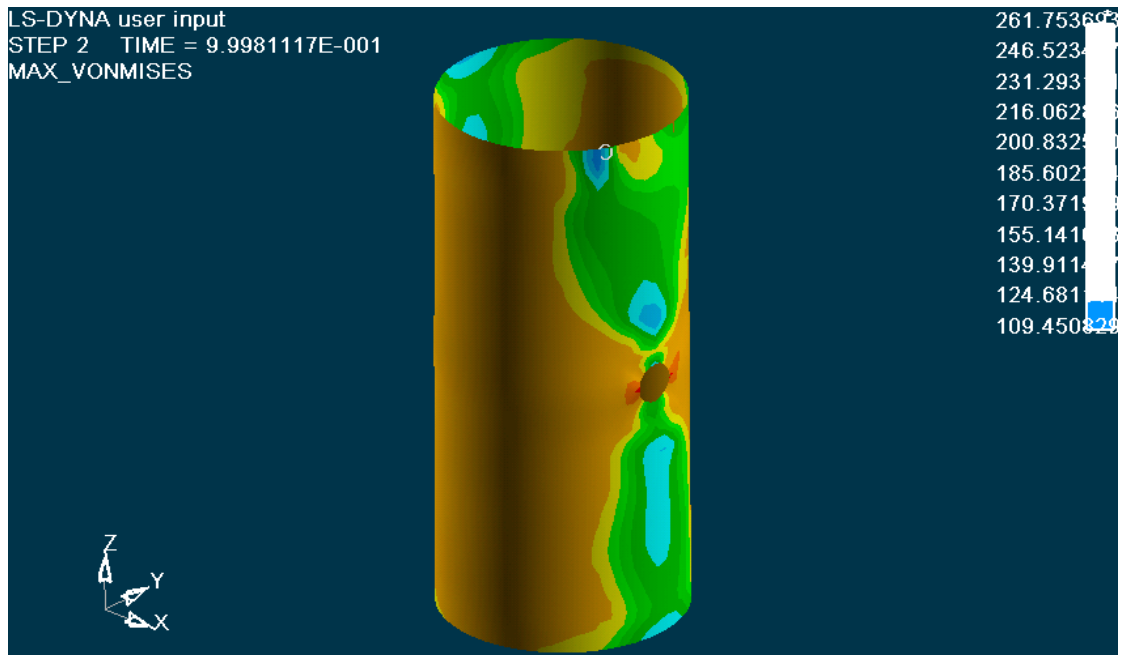
Η ολοκληρωμένη προσομοίωση κατάρρευσης του μοντέλου μας με το LS-DYNA, παρουσιάζεται και στα αρχεία βίντεο:

- Deformation isometric.Avi
- [Deformation side.Avi](#)
- Deformation rear.Avi

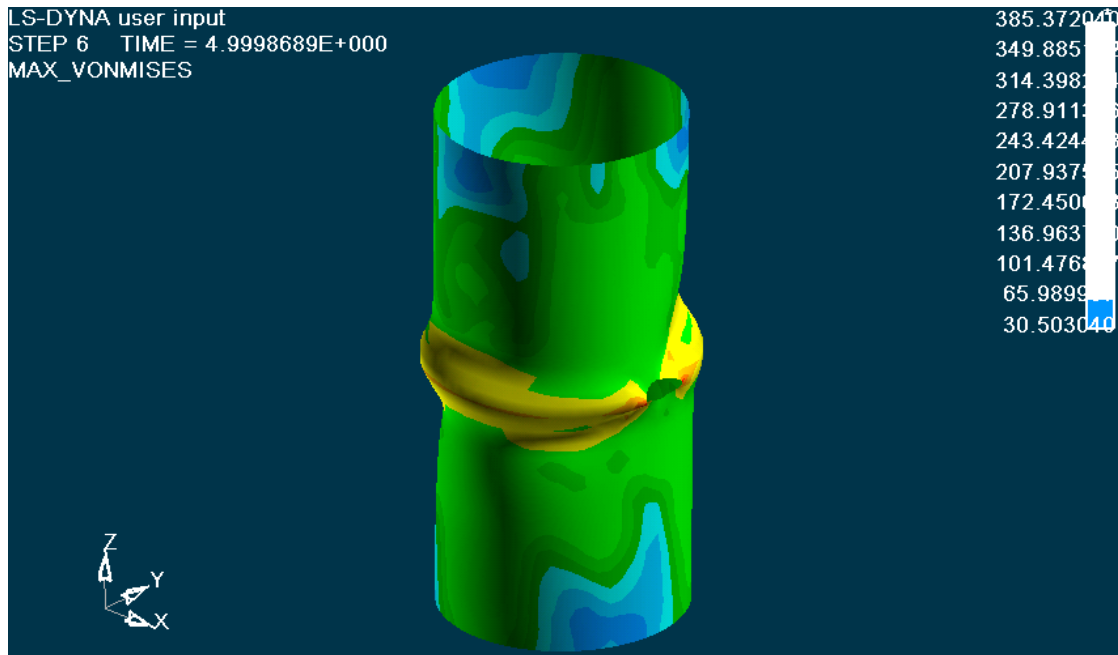
Ακολουθούν εικόνες από την κατανομή των τάσεων σε όλη την επιφάνεια του δοκιμίου κατά τα διάφορα στάδια της κατάρρευσής του:

Επιλέγοντας στον ETA POSTGL:

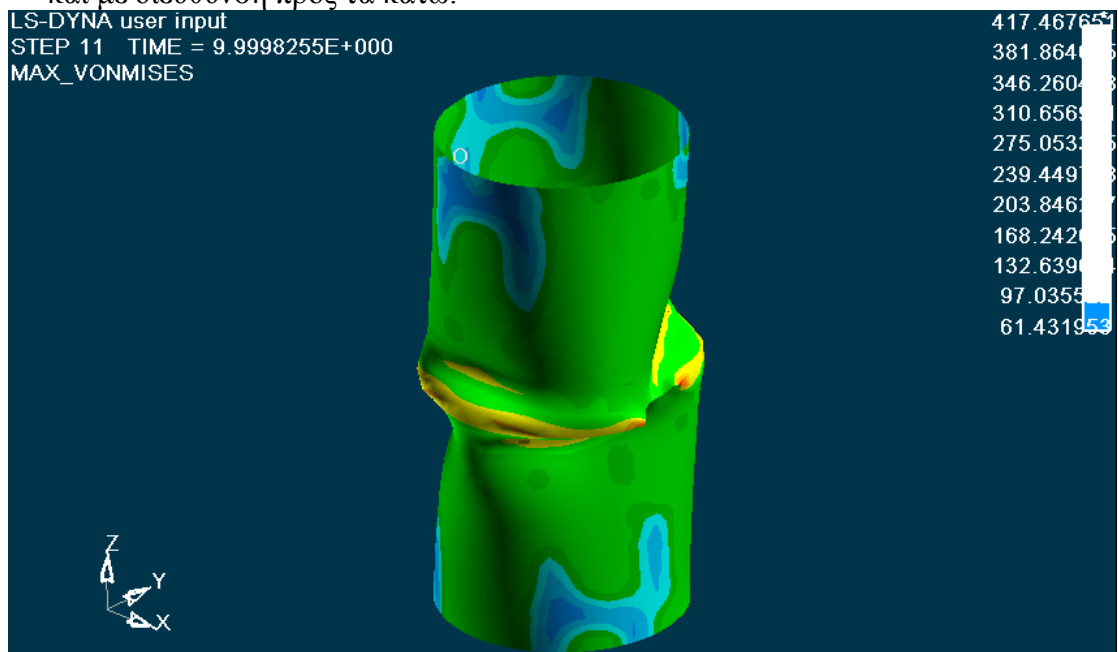
CONTOUR -> STRESS/STRAIN -> MAXIMUM VON MISES STRESSES:



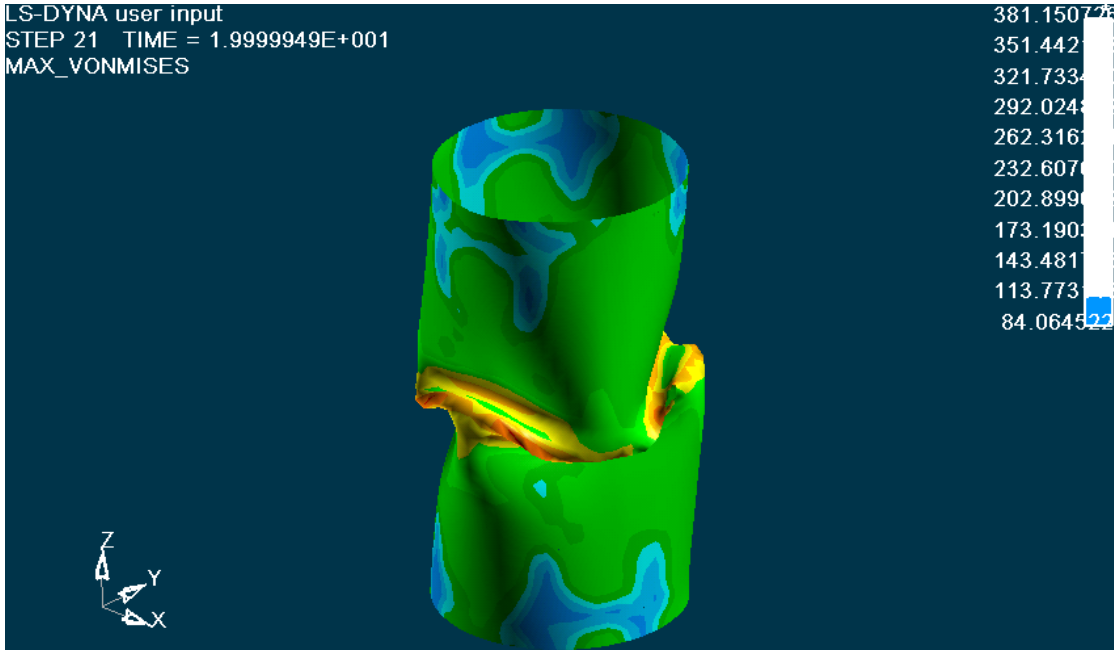
Κατανομή των τάσεων στο **1mm**. Έχουμε εμφάνιση τάσεων στην περιοχή γύρω από την οπή του δοκιμίου, που όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 2, για την θεωρία των τάσεων γύρω από οπές, βλέπουμε ότι γύρω από κάθε οπή του δοκιμίου, κατά την κατακόρυφη διεύθυνση που συμπίπτει με την διεύθυνση της αξονικής θλίψης του δοκιμίου, έχουμε τάσεις ίσες με $\sigma = 200 \text{ MPa}$, όσο είναι η τάση που εμφανίζεται στο μέρος της έδρας του δοκιμίου που περιέχει την οπή, ενώ στο οριζόντιο μέσο επίπεδο κάθε οπής, το οποίο είναι κάθετο ως προς το κατακόρυφο επίπεδο της αξονικής θλίψης του δοκιμίου, εκεί εμφανίζονται οι μέγιστες τάσεις για την κατάρρευση του δοκιμίου στη θέση της οπής, ίσες με $\sigma = 261 \text{ MPa}$. Ακόμα, παρατηρούμε το φαινόμενο της αντιδιαμετρικής συμμετρίας της κατανομής των τάσεων στο δοκίμιο. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή **261 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 μόνιμων παραμορφώσεων σε αυτό.



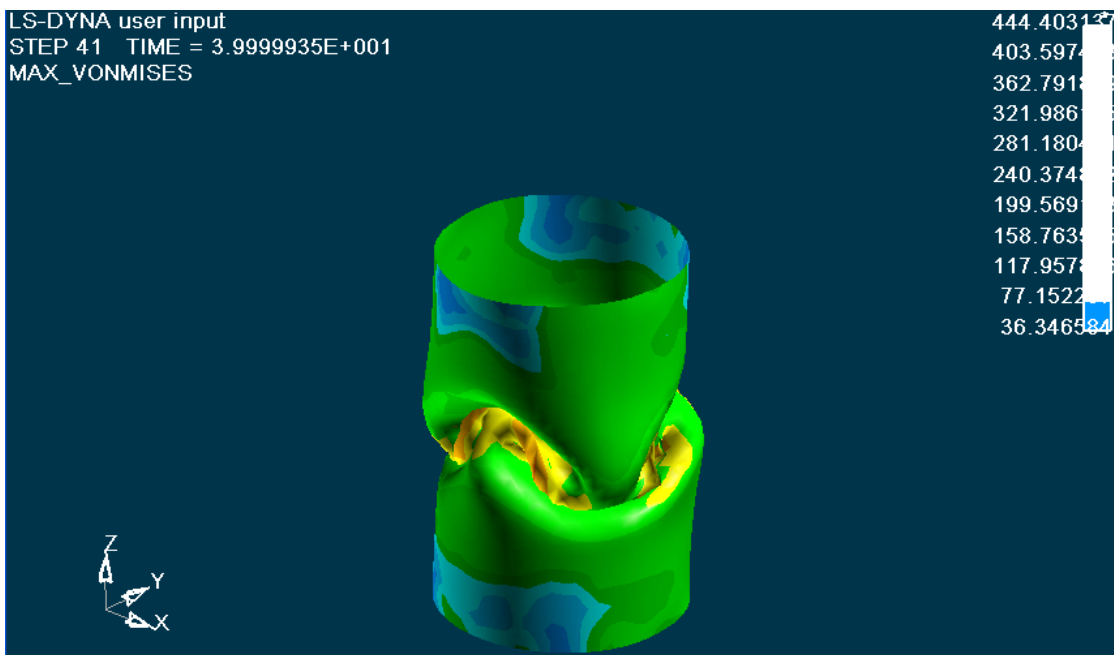
Κατανομή των τάσεων στο 5 mm. Έχουμε μέγιστες τάσεις στην περιοχή γύρω από την πάνω διατομή που πιέζει το έμβολο της πρέσας. Ιδιαίτερα, στην περιοχή της οπής, οι τάσεις που εφαρμόζονται κατά την διεύθυνση της αξονικής θλίψης είναι $\sigma = 243 \text{ MPa}$, ενώ οι τάσεις που αναπτύσσονται στην οπή κάθετα προς την διεύθυνση αξονικής θλίψης του δοκιμίου, είναι $\sigma = 385 \text{ MPa}$. Όσον αφορά το υπόλοιπο μέρος του δοκιμίου παρουσιάζεται κατανομή τάσεων με αντιδιαμετρική συμμετρία. Το πάνω και το κάτω 1/2 μέρος του δοκιμίου έχει μικρότερες τάσεις από ότι συμβαίνει στην περιοχή στο μέσο του δοκιμίου. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή 385 MPa, που βλέπουμε ότι είναι μεγαλύτερη τιμή από την τάση διαρροής του δοκιμίου ($\sigma_A = 240 \text{ MPa}$), οπότε αστοχεί το υλικό στη θέση της οπής, οπότε σχηματίζεται ο πρώτος εκτατός λοβός στο επίπεδο αυτό, και συνεχίζεται η κατάρρευση του δοκιμίου από την θέση αυτή και με διεύθυνση προς τα κάτω.



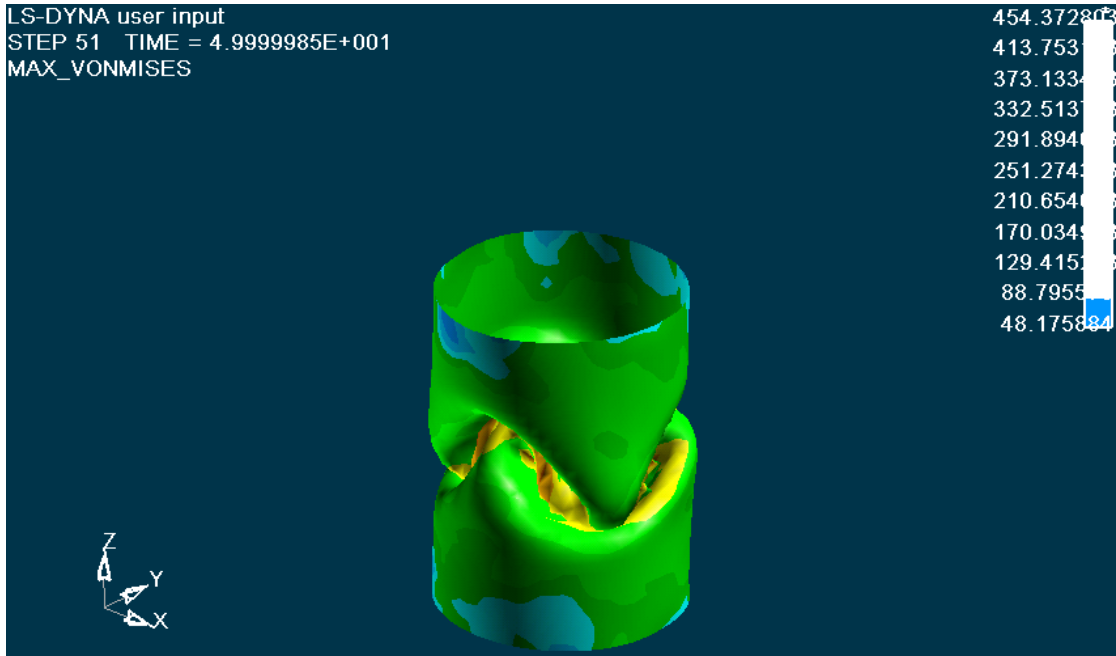
Κατανομή των τάσεων στο 10 mm. Έχουμε μέγιστες τάσεις στην περιοχή σχηματισμού του πρώτου λοβού στα σημεία αναδίπλωσης και γύρω από την οπή. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή **417 MPa**. Στο υπόλοιπο μέρος του μοντέλου μας εξακολουθούμε να έχουμε εμφάνιση αντιδιαμετρικής συμμετρίας στην κατανομή των τάσεων.



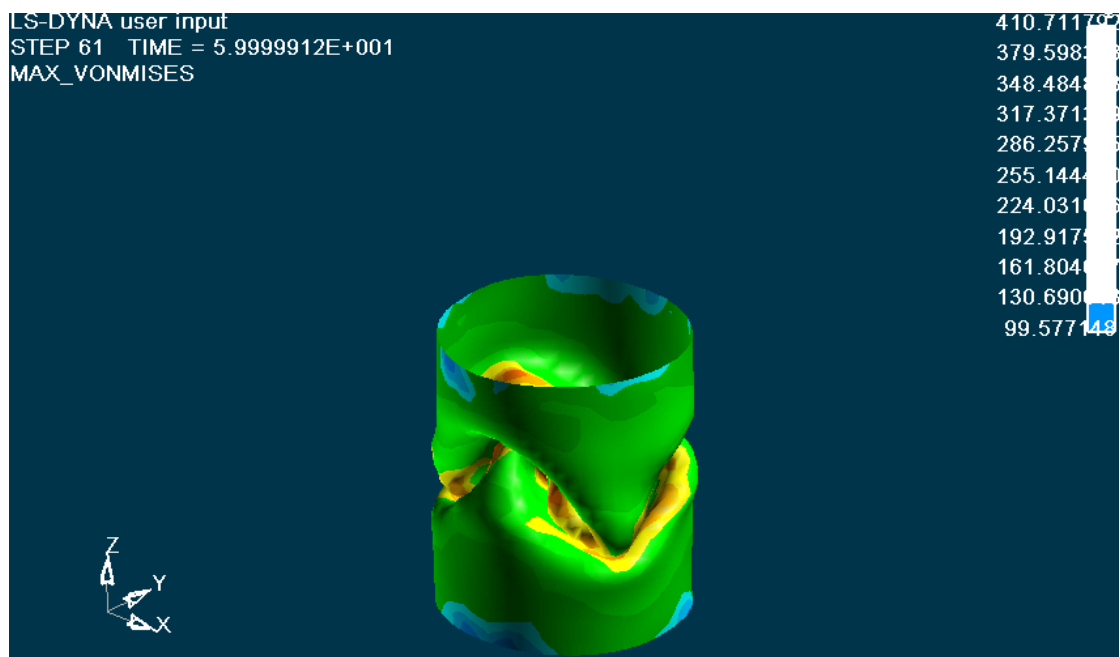
Κατανομή των τάσεων στο 20 mm. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή **381 MPa**. Ο πρώτος εκτατός λοβός έχει σχηματιστεί πλήρως και έχουμε αναδίπλωση του λοβού με ροή υλικού προς το εσωτερικό του δοκιμίου και μετατόπιση του πάνω μέρους σε σχέση με το κάτω. Τάσεις σημαντικής τιμής της τάξης των 232-262 MPa εμφανίζονται τώρα σχεδόν σε όλο το μήκος καθ' ύψος του δοκιμίου.



Κατανομή των τάσεων στο 40 mm. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή **444 MPa**. Στο κάτω μέρος του δοκιμίου που έρχεται σε επαφή με την σταθερή πλάκα, έχουμε την ελάχιστη τιμή των τάσεων που φαίνεται στην εικόνα με τον αριθμό μηδέν ίσες με 77MPa. Στην πάνω και κάτω διατομή του δοκιμίου εμφανίζονται σχεδόν ομοιόμορφες τάσεις.

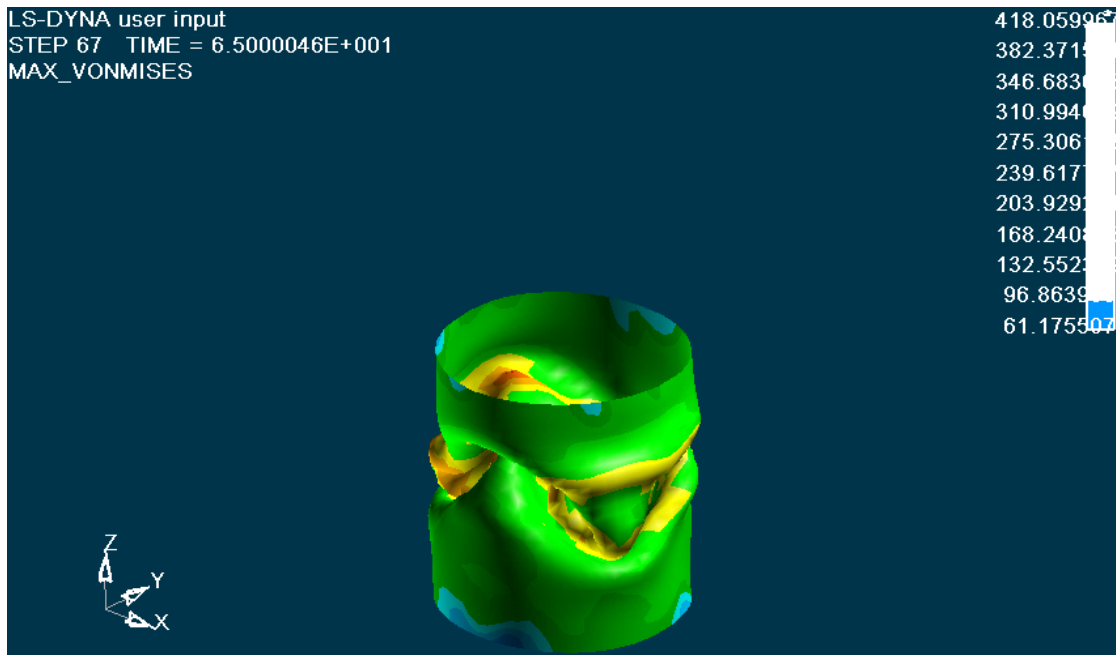


Κατανομή των τάσεων στο 50 mm. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή **454 MPa**. Έχουν σχηματιστεί δύο πλαστικές αρθρώσεις που είναι στραμμένες κατά $\pi/4$ η μία σε σχέση με την άλλη. Στην πάνω διατομή του δοκιμίου έχουμε μικρότερες τάσεις ίσες με $\sigma = 88$ MPa.



Κατανομή των τάσεων στο 60 mm. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή 410 MPa που είναι μεγαλύτερη από την τάση αντοχής του υλικού

$\sigma_A=240$ MPa. Στο κάτω μισό του δοκιμίου έχουμε μικρότερες τάσεις ίσες με $\sigma = 130$ MPa.

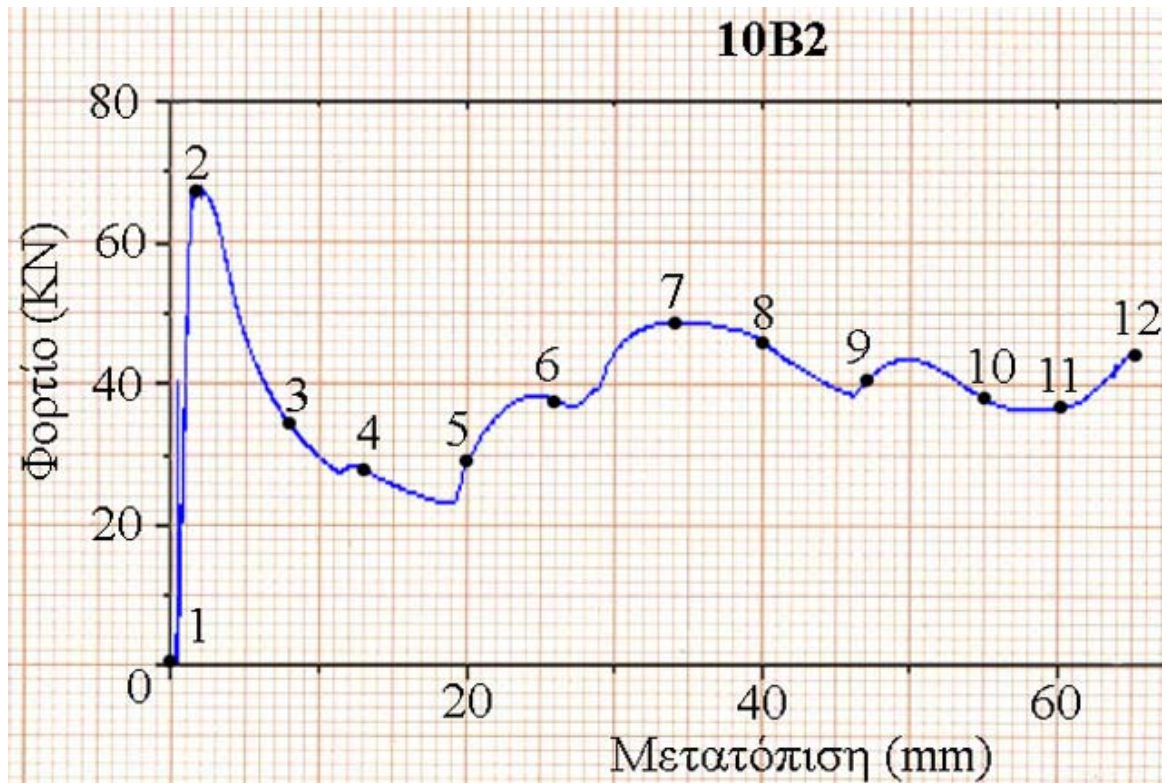


Κατανομή των τάσεων στο 65.0mm. Οι τελικές τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή 418 MPa. Η κατάρρευση του δοκιμίου έχει πλέον ολοκληρωθεί, παρατηρούμε πως ο τρόπος κατάρρευσης είναι ανάμεικτος (mixed mode).

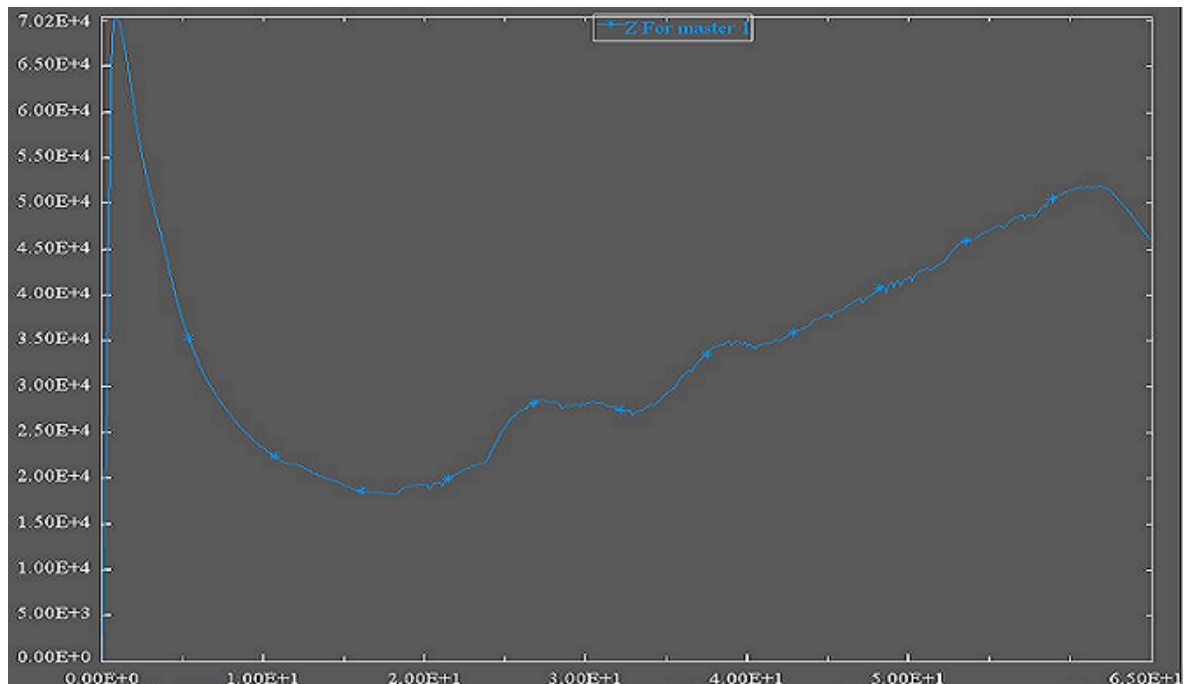
Η ολοκληρωμένη προσομοίωση της κατανομής των τάσεων του μοντέλου μας με το LS-DYNA, παρουσιάζεται και στο αρχείο βίντεο:

➤ [Contour Max Von Mises.Avi](#)

Ακόμα, το διάγραμμα των δυνάμεων μετά την επεξεργασία των στοιχείων που πάθησαν 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 N**, 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 N**, και με τον οριζόντιο άξονα να δείχνει τις **μετατοπίσεις** (βραχύνσεις του θλιβόμενου δοκιμίου) **σε mm**:



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

Το μέγιστο φορτίο $P_{max} = 67,41KN$

Το μέσο φορτίο $P_{mean} = 38,49KN$

Η ομοιομορφία φορτίου $P_{max}/P_{mean} = 1,75$

Η συνολική ενέργεια που δαπανήθηκε για την αξονική κατάρρευση του δοκιμίου είναι $E = 2502 KN mm$

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

Το μέγιστο φορτίο $P_{max} = 70,20KN$

Το μέσο φορτίο $P_{mean} = 34,46KN$

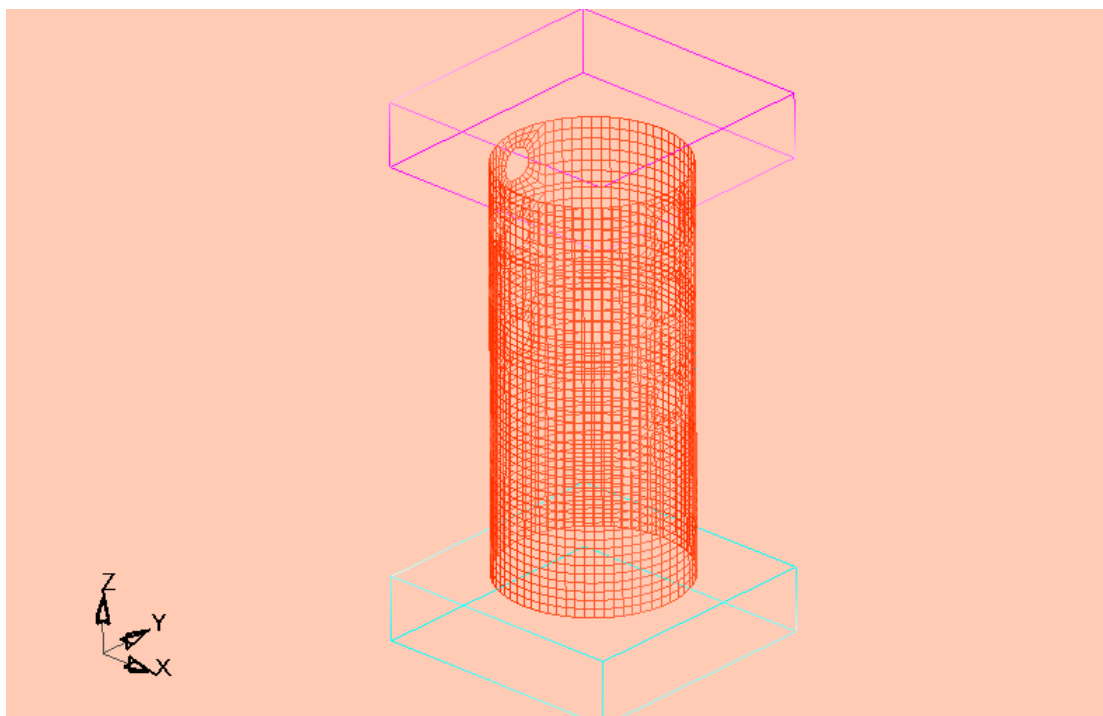
Η ομοιομορφία φορτίου $P_{max}/P_{mean} = 2,04$

Η συνολική ενέργεια που δαπανήθηκε για την αξονική κατάρρευση του δοκιμίου είναι $E = 2240 KN mm$

ΕΝΟΤΗΤΑ 5-16:

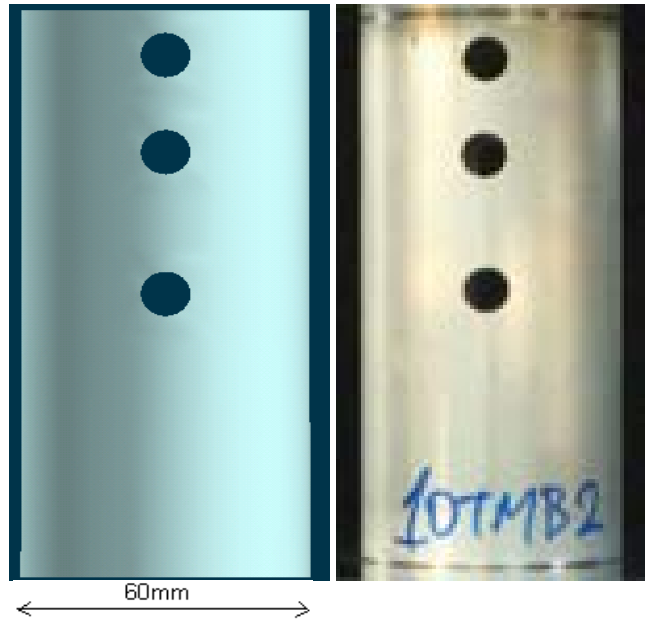
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΤΡΙΩΝ ΔΙΑΜΠΕΡΩΝ ΟΠΩΝ Φ10 (TYPE_10TMB2).

Το μοντέλο του δοκιμίου κυκλικής διατομής με τρεις οπές διαμπερείς, διαμέτρου Φ10 στο 1/2 , στο 1/4 του ύψους H του δοκιμίου και 10mm από το άνω χείλος της διατομής με πάχος τοιχώματος 2mm, παρουσιάζεται στην ακόλουθη εικόνα:



Σχ.1. Απεικόνιση πλέγματος στο LS-DYNA 3D, για κυκλικής διατομής δοκίμιο με τρεις διαμπερείς οπές διαμέτρου Φ10 στο 1/2 , στο 1/4 του ύψους H του δοκιμίου και 10mm από το άνω χείλος της διατομής

Οι αντίστοιχες φάσεις προσομοίωσης της κατάρρευσης του δοκιμίου αυτού, που κατέγραψα με τη χρήση του LS-DYNA, σε σύγκριση με τις φάσεις που έλαβα από την ελληνική βιβλιογραφία [1] 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 (αριστερή).



1^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Στο δοκίμιο του ls-dyna παρατηρούμε αρχική κατάρρευση στην θέση ανάμεσα στην δεύτερη και τρίτη οπή. Στο πραγματικό δοκίμιο της πρέσας παρατηρούμε κατάρρευση στην θέση της πρώτης οπής. Πάτημα της πρέσας στα 2 mm.



2^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Στο μοντέλο μας στο ls-dyna σχηματίζεται εκτατός λοβός (αξονοσυμμετρικός) στο πάνω μέρος του δοκιμίου στην περιοχή της πρώτης οπής αντίστοιχα στο πραγματικό δοκίμιο δημιουργείται εκτατός λοβός (αξονοσυμμετρικός) στην θέση της τρίτης οπής. Πάτημα της πρέσας στα 7 mm.



3^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Στο δοκίμιο του ls-dyna έχουμε τελείωμα του πρώτου εκτατού λοβού και αρχή δημιουργίας δεύτερου μη εκτατού λοβού σε καρό μορφή (diamond) στο παράλληλο επίπεδο κατά την διεύθυνση της συμπίεσης. Στο δοκίμιο της πρέσας ο εκτατός λοβός έχει φτάσει στην τελική του μορφή με το μέγιστο πλάτος. Πάτημα πρέσας 17 mm.



4^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Στο μοντέλο του DYNA παρατηρούμε παραμόρφωση στη θέση της δεύτερης οπής και αρχή δημιουργίας δεύτερου μη εκτατού λοβού στραμμένος κατά $\pi/4$ ως προς τον προηγούμενο μη εκτατό λοβό. Στο δοκίμιο της πρέσας έχουμε μικρή θραύση στην θέση της τρίτης οπής. Πάτημα πρέσας 32 mm.



5^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Στο πραγματικό δοκίμιο έχουμε θραύση στα σημεία των κάτω οπών, ένα μέρος του εκτατού λοβού έχει κατεύθυνση κάτω και το άλλο προς τα κάτω. Στο δοκίμιο στο Is-dyna η δεύτερη οπή δεν είναι πλέον εμφανής γιατί έχει παραμορφωθεί και στραφεί

προς το εσωτερικό του δοκιμίου. Αρχίζει να παραμορφώνεται και η περιοχή της τρίτης οπής στο μέσο του δοκιμίου. Πάτημα πρέσας στα 45 mm .



6^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Στο δοκίμιο του Is-dyna δημιουργείται και τρίτος μη εκτατός λοβός στραμμένος κατά $\pi/2$ ως προς τον προηγούμενο μη εκτατό λοβό . Στο δοκίμιο της πρέσας η θραύση συνεχίζεται και στη δεύτερη οπή. Πάτημα πρέσας στα 57 mm .



7^η Φάση κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην πρέσα (δεξιά εικόνα), και αντίστοιχη φάση της προσομοίωσης με το LS-DYNA (αριστερή εικόνα). Στο μοντέλο

του Is-dyna έχουμε τελείωμα του τρίτου μη εκτατού λοβού και μερική παραμόρφωση της κάτω διατομής καθώς φτάνουμε στο τελείωμα της συμπίεσης.

Στο πραγματικό δοκίμιο η μόνη ορατή οπή λόγω της θραύσης είναι η πρώτη οπή. Τα μέρη στα οποία χωρίστηκε ο εκτατός λοβός τείνουν να ακουμπήσουν την άνω και κάτω πλάκα αντίστοιχα. Τέλος αξονικής κατάρρευσης στην πρέσα. Πάτημα πρέσας στα 65.0 mm.

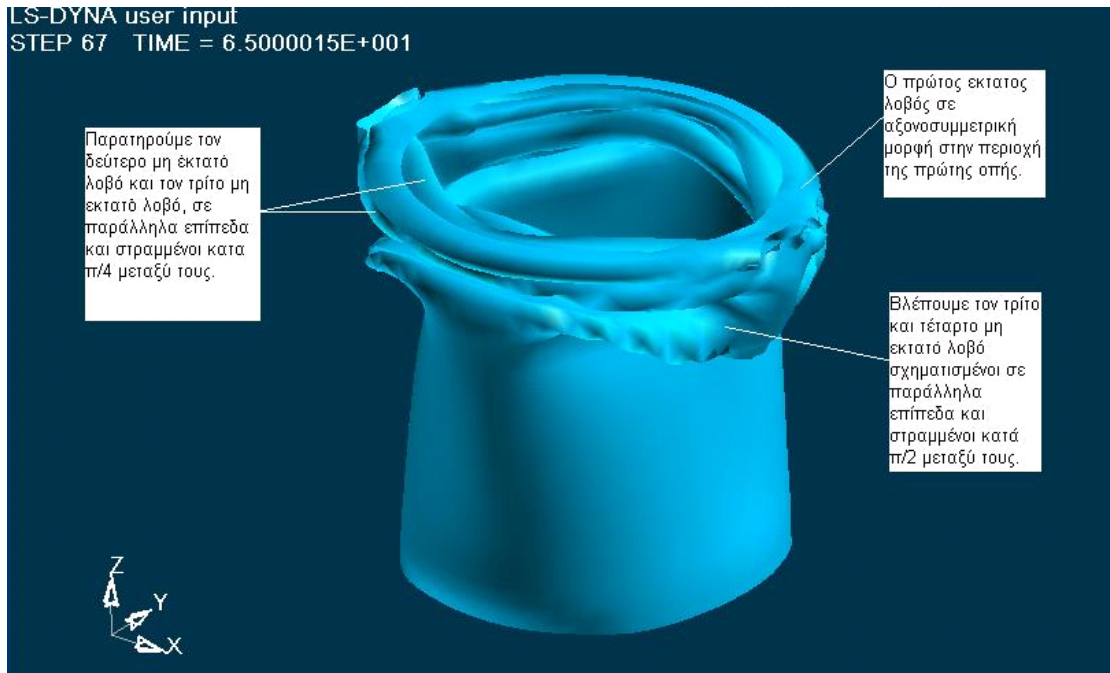


Τελική μορφή δοκιμίου αμέσως μετά το τέλος της διαδικασίας αξονικής κατάρρευσης στην πρέσα (δεξιά). Το ίδιο δοκίμιο μετά το τέλος της προσομοίωσης από το LS-DYNA, (αριστερή). Τελικό πάτημα της πρέσας στα 65.0mm.

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 65.0 mm:



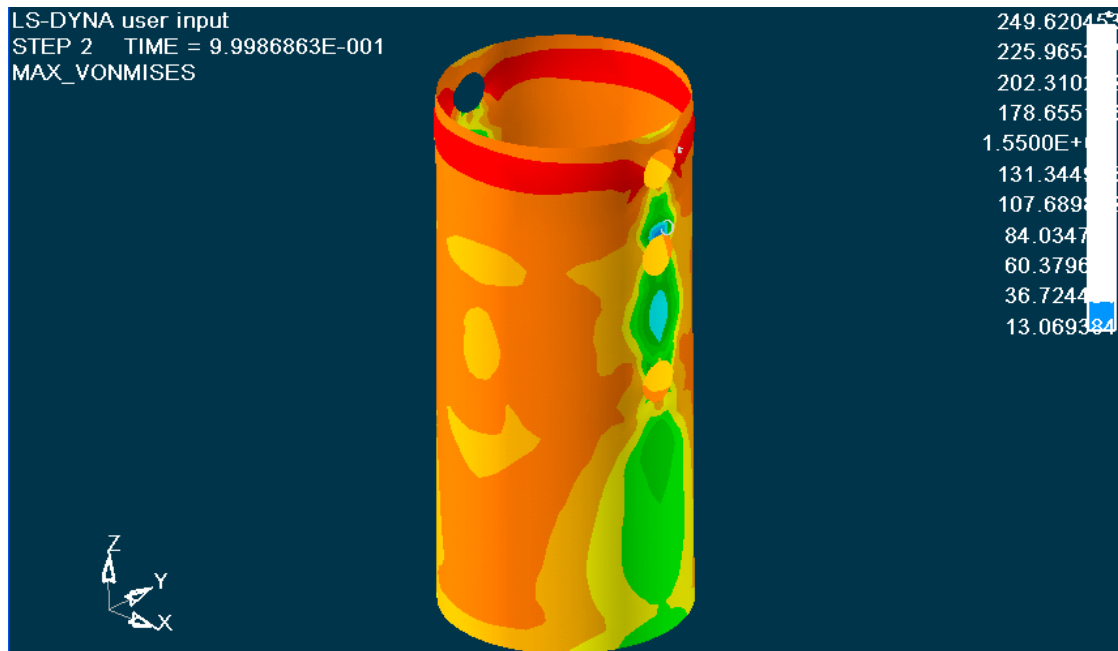
Η ολοκληρωμένη προσομοίωση κατάρρευσης του μοντέλου μας με το LS-DYNA, παρουσιάζεται και στα αρχεία βίντεο:

- Deformation isometric.Avi
- [Deformation side.Avi](#)
- Deformation rear .Avi

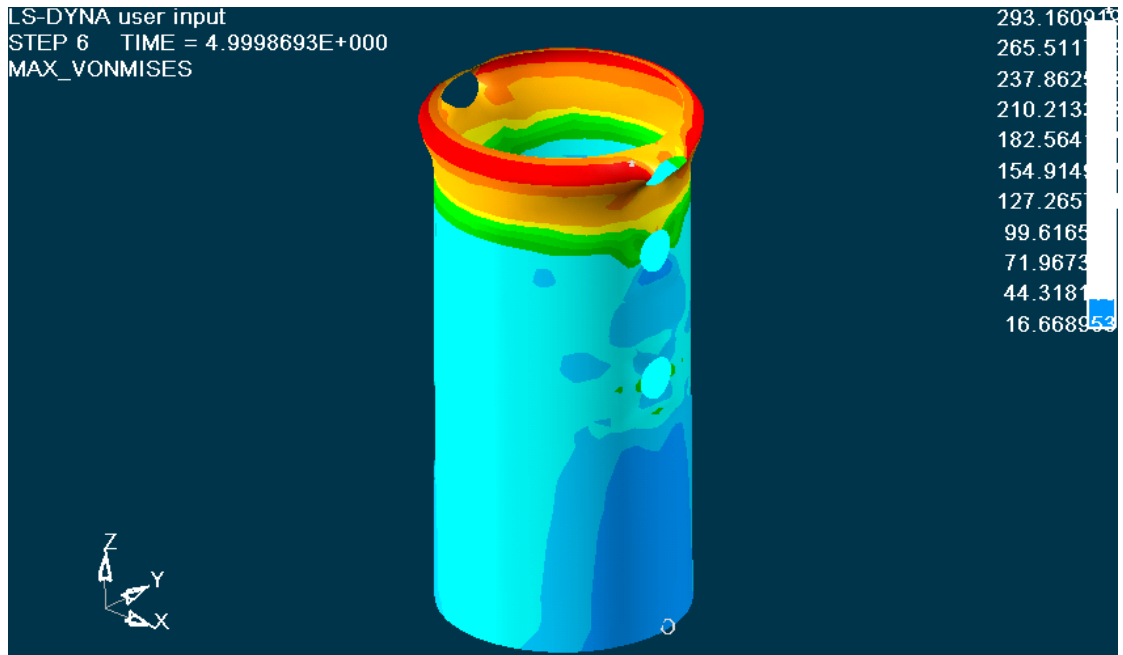
Ακολουθούν εικόνες από την κατανομή των τάσεων σε όλη την επιφάνεια του δοκιμίου κατά τα διάφορα στάδια της κατάρρευσής του:

Επιλέγοντας στον ETA POSTGL:

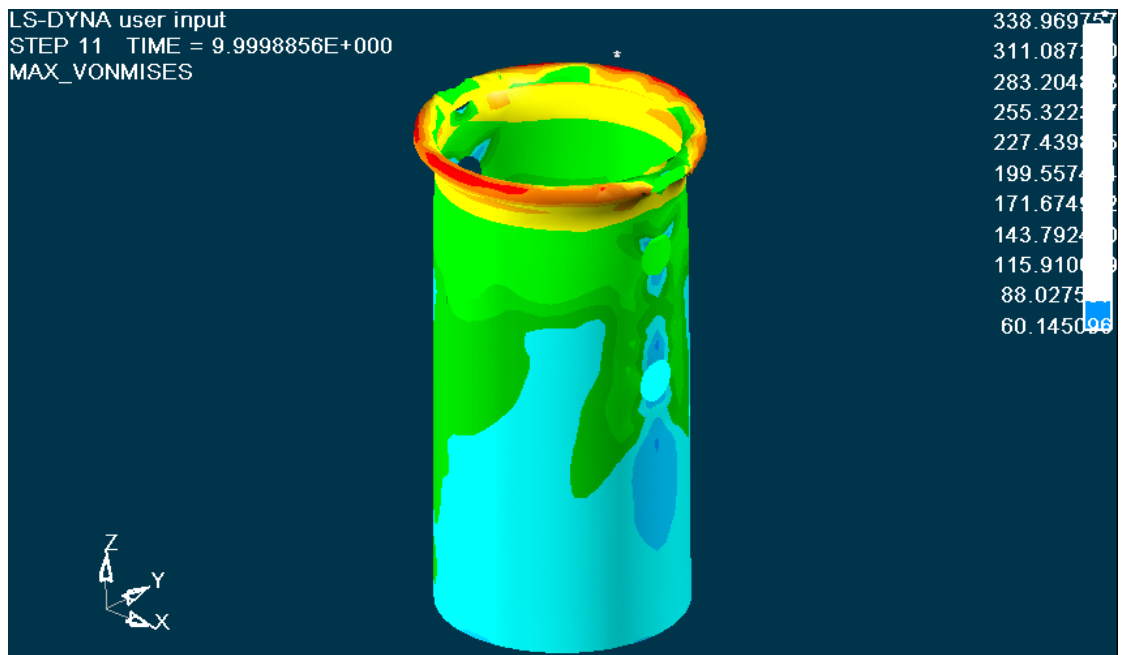
CONTOUR -> STRESS/STRAIN -> MAXIMUM VON MISES STRESSES:



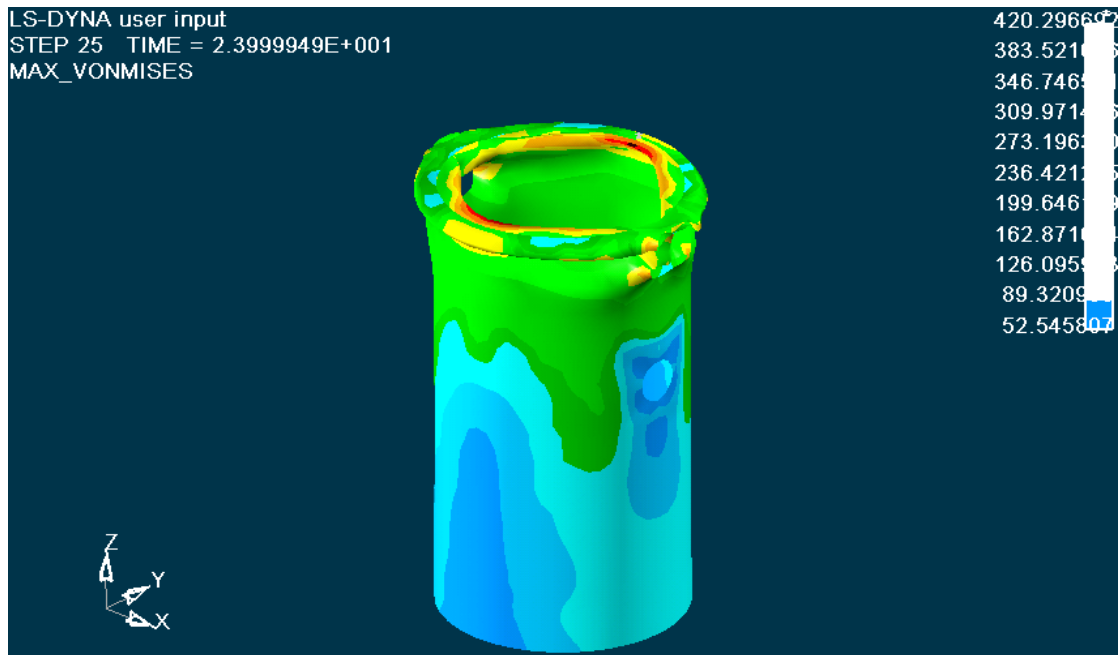
Κατανομή των τάσεων στο 1mm. Έχουμε εμφάνιση τάσεων στην περιοχή γύρω από τις τρεις οπές του δοκιμίου, που όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 2, για την θεωρία των τάσεων γύρω από οπές, βλέπουμε ότι γύρω από την πάνω οπή του δοκιμίου, κατά την κατακόρυφη διεύθυνση που συμπίπτει με την διεύθυνση της αξονικής θλίψης του δοκιμίου, έχουμε τάσεις ίσες με $\sigma = 225 \text{ MPa}$, ενώ στο οριζόντιο μέσο επίπεδο κάθε οπής, το οποίο είναι κάθετο ως προς το κατακόρυφο επίπεδο της αξονικής θλίψης του δοκιμίου, εκεί εμφανίζονται οι μέγιστες τάσεις για την κατάρρευση του δοκιμίου στη θέση των οπών, ίσες με $\sigma = 249 \text{ MPa}$. Ακόμα, στην παράπλευρη επιφάνεια του δοκιμίου εμφανίζονται μέγιστες τάσεις που κυμαίνονται από 202-225MPa. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα, με μέγιστη τιμή 249 MPa, η οποία είναι μεγαλύτερη από το όριο αντοχής του υλικού ($\sigma_A=220 \text{ MPa}$), οπότε ξεκινάει η κατάρρευση του δοκιμίου, με εμφάνιση μονίμων παραμορφώσεων σε αυτό.



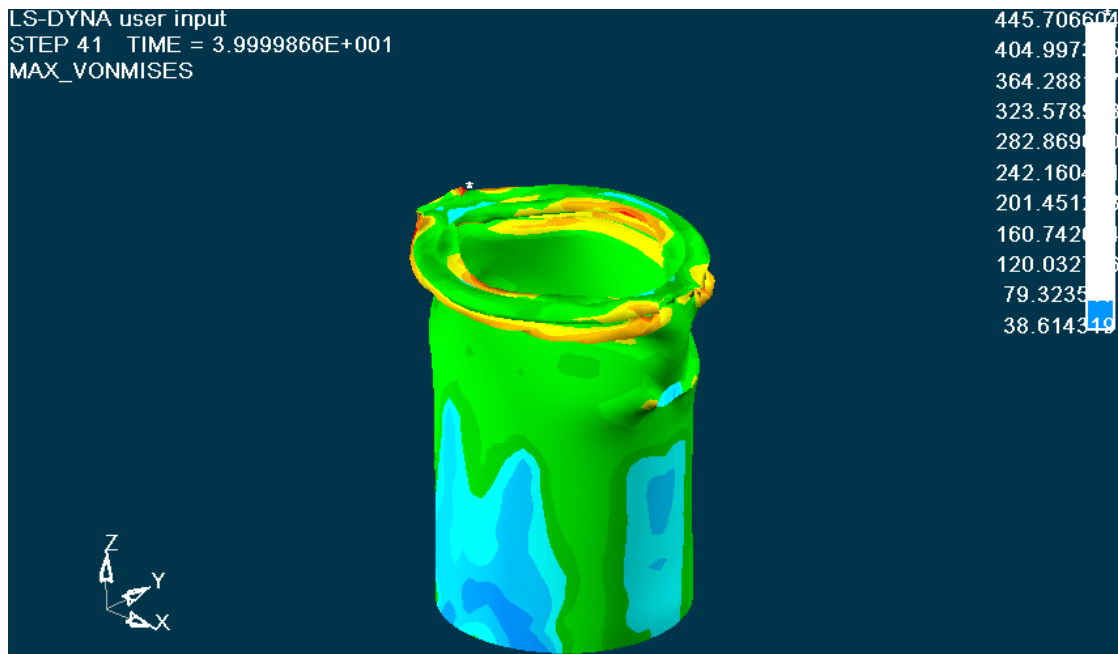
Κατανομή των τάσεων στα 5mm. Στο οριζόντιο επίπεδο της πάνω οπής έχουμε τάσεις ίσες με **293 MPa** ενώ στο κάθετο επίπεδο που είναι παράλληλο της αξονικής θλίψης είναι ίση με **237MPa**. Οι μέγιστες τάσεις βρίσκονται στις θέσεις δημιουργίας του εκατοού λοβού που είναι ίσες με 293 MPa. Οι ελάχιστες τάσεις βρίσκονται στην κάτω διατομή και συμβολίζονται με 0.



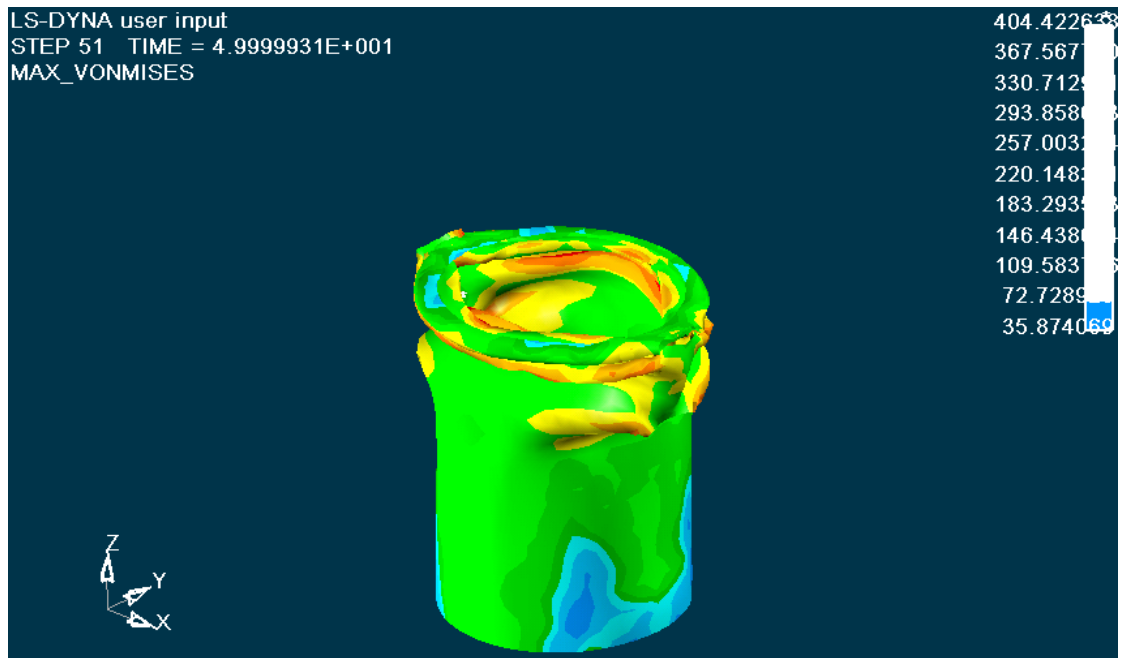
Κατανομή τάσεων στα 10mm. Στην περιοχή σχηματισμού του λοβού έχουμε μέγιστες τάσεις ίσες με 338 MPa. Κάτω στην δεύτερη οπή έχουμε τάσεις ίσες με 227MPa. Οι ελάχιστες τάσεις βρίσκονται γύρω από την μέση οπή και στην κάτω διατομή.



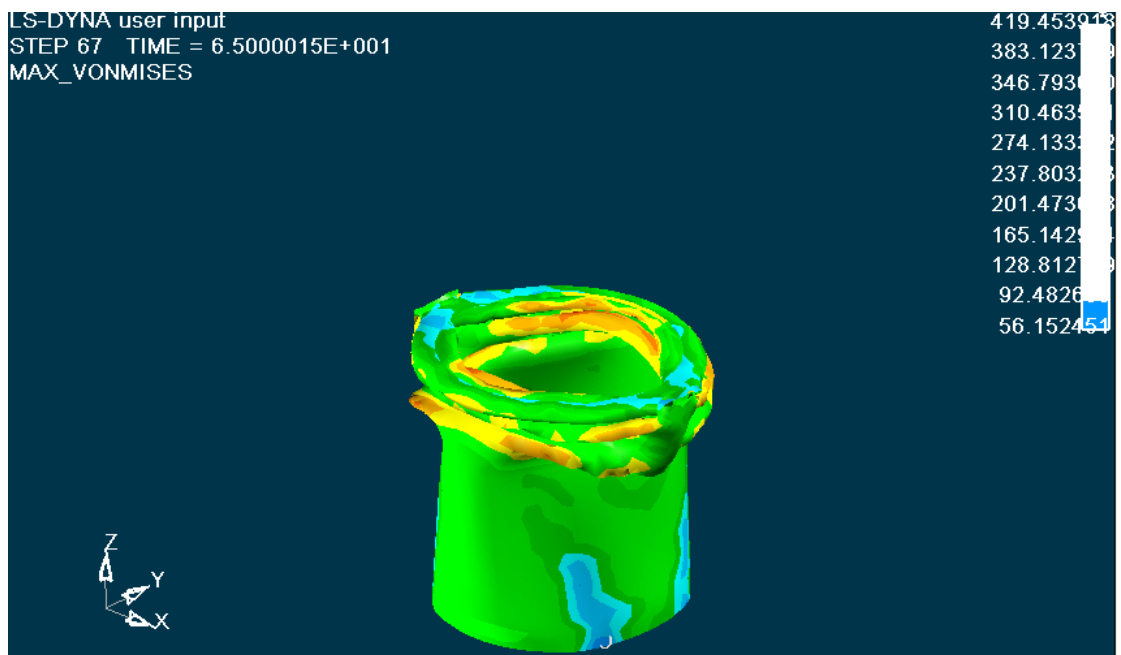
Κατανομή τάσεων στα 24mm. Έχουμε μέγιστη τάση ίση με **420 MPa** που είναι μεγαλύτερη από την τάση αντοχής του υλικού $\sigma_{αντ}=240$ οπότε έχουμε δημιουργία του έκτατου λοβού και συνέχεια της κατάρρευσης του δοκιμίου από την θέση αυτή και με διεύθυνση προς τα κάτω. Στην βάση του δοκιμίου που είναι σε επαφή με την σταθερή πλάκα και γύρω από την τρίτη οπή έχουμε τις ελάχιστες τάσεις όπως φαίνεται στο σχήμα.



Κατανομή των τάσεων στα 40mm. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα με μέγιστη ίση με **445 MPa**. Στο κάτω μέρος του δοκιμίου που έρχεται σε επαφή με την σταθερή πλάκα εμφανίζονται οι μικρότερες τάσεις.



Κατανομή τάσεων στα 50 mm. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα με μέγιστη ίση με **404 MPa**. Στο πάνω μέρος του δοκιμίου επικρατούσες τάσεις είναι $\sigma=257 \text{ MPa}$. Στο κάτω μέρος του δοκιμίου που έρχεται σε επαφή με την σταθερή πλάκα εμφανίζονται οι μικρότερες τάσεις που κυμαίνονται από 72-146 MPa.

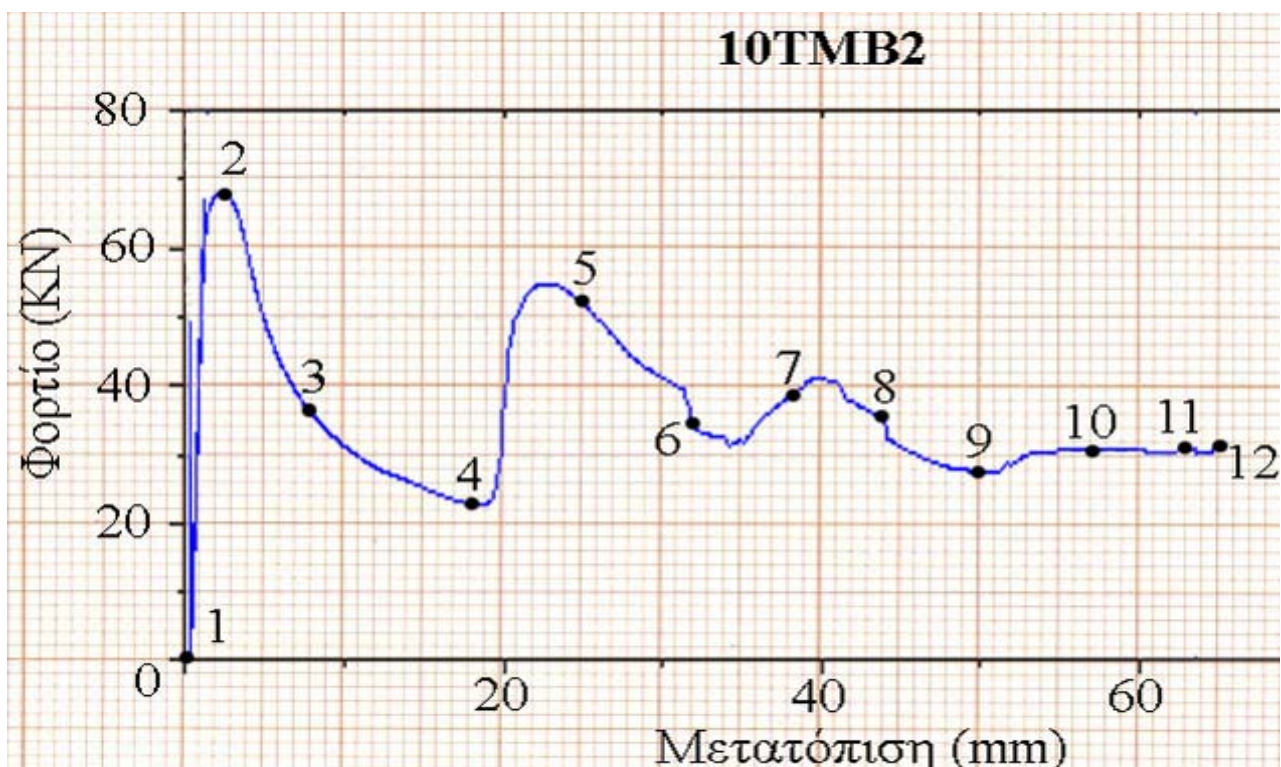


Κατανομή τάσεων στα 65.0mm. Οι τιμές των τάσεων φαίνονται στην εικόνα με μέγιστη ίση με **419 MPa**. Οι μικρότερες τάσεις βρίσκονται στο κάτω 1/2 του δοκιμίου. Η κατάρρευση του δοκιμίου, και η ολοκλήρωση του εκατοού και των τριών μη εκατών λοβών, αρχίζει να είναι πλέον εμφανής σε όλο το δοκίμιο.

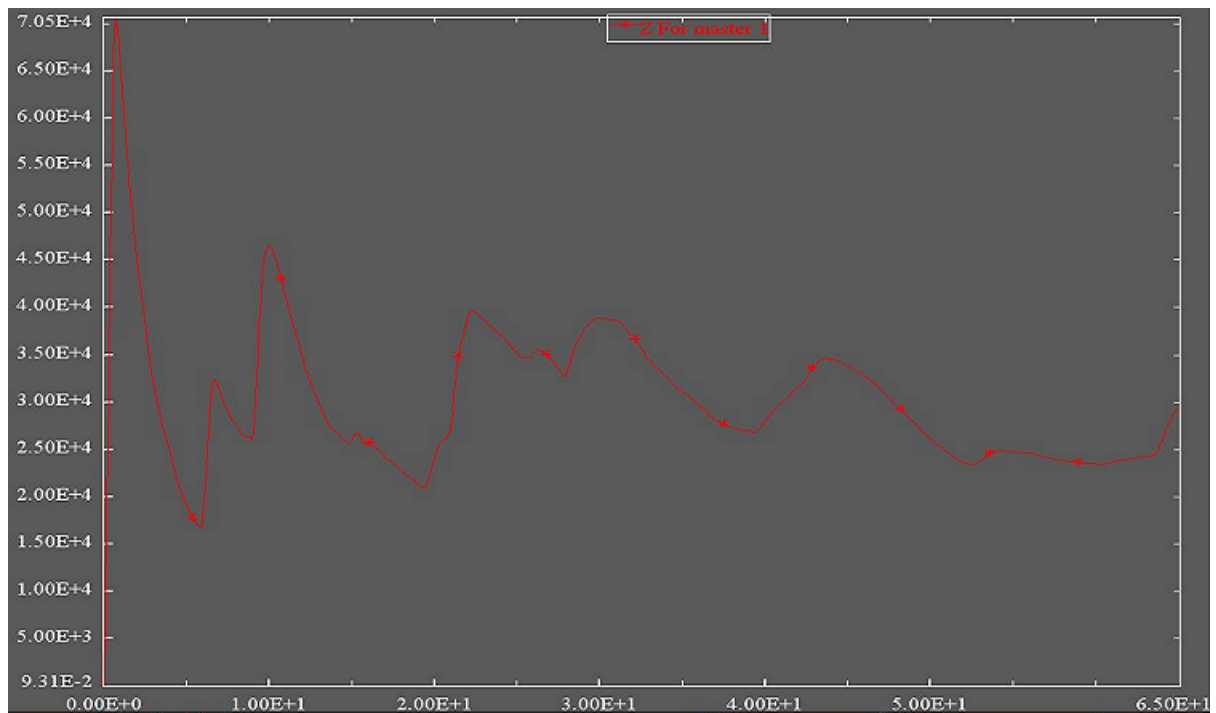
Η ολοκληρωμένη προσομοίωση της κατανομής των τάσεων του μοντέλου μας με το LS-DYNA, παρουσιάζεται και στο αρχείο βίντεο:

➤ [Contour Max Von Mises.Avi](#)

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 στην επόμενη σελίδα, με τον κατακόρυφο άξονα να δείχνει τις **δυνάμεις σε N**, και με τον οριζόντιο άξονα να δείχνει τις **μετατοπίσεις** (βραχύνσεις του θλιβόμενου δοκιμίου) **σε mm**:



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

Το μέγιστο φορτίο $P_{max} = 67,92 \text{ KN}$,

Το μέσο φορτίο $P_{mean} = 35,52 \text{ KN}$,

Η ομοιομορφία φορτίου $P_{max}/P_{mean} = 1,91$

Η συνολική ενέργεια που δαπανήθηκε για την αξονική κατάρρευση του δοκιμίου είναι $E = 2309 \text{ KN mm}$

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

Το μέγιστο φορτίο $P_{max} = 70,50 \text{ KN}$,

Το μέσο φορτίο $P_{mean} = 30,15 \text{ KN}$,

Η ομοιομορφία φορτίου $P_{max}/P_{mean} = 2,34$

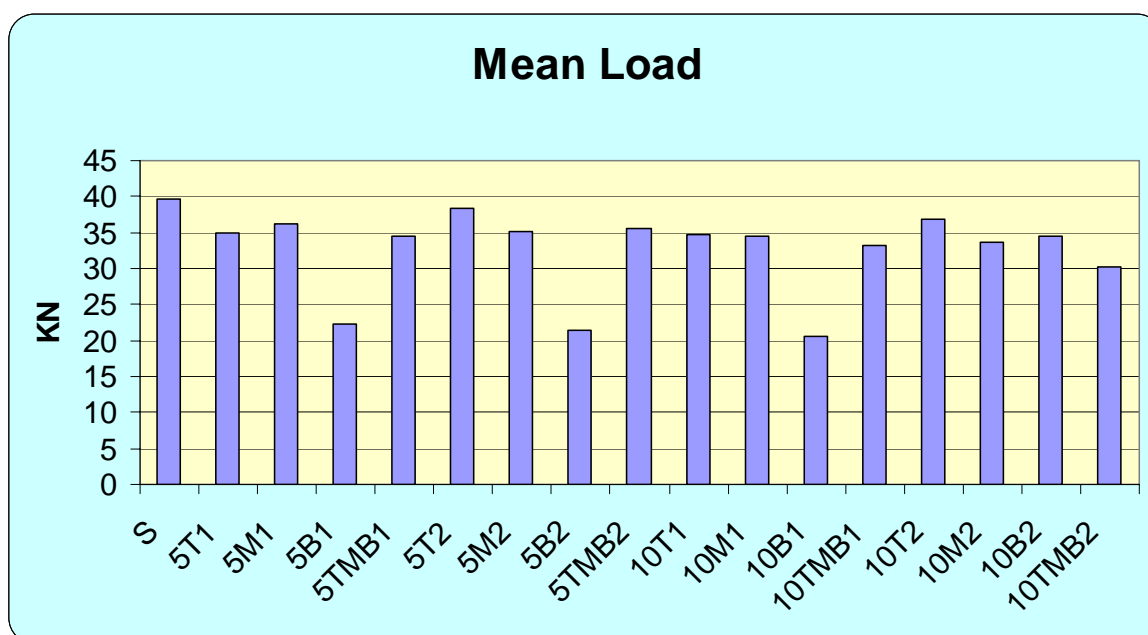
Η συνολική ενέργεια που δαπανήθηκε για την αξονική κατάρρευση του δοκιμίου είναι $E = 1960 \text{ KNmm}$.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ:

Ένας συγκεντρωτικός πίνακας των αποτελεσμάτων που πήραμε από τις προσομοιώσεις 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} |
|--------|-----------------|----------------|---------------|----------------------|
| S | 39,69 | 79,6 | 2580 | 2,01 |
| 5T1 | 34,92 | 79,1 | 2270 | 2,27 |
| 5M1 | 36,15 | 79,2 | 2350 | 2,19 |
| 5B1 | 22,31 | 79,5 | 1450 | 3,56 |
| 5TMB1 | 34,46 | 79,0 | 2240 | 2,29 |
| 5T2 | 38,46 | 77,3 | 2500 | 2,01 |
| 5M2 | 35,05 | 77,5 | 2280 | 2,21 |
| 5B2 | 21,38 | 78,2 | 1390 | 3,66 |
| 5TMB2 | 35,53 | 77,1 | 2310 | 2,17 |
| 10T1 | 34,77 | 74,4 | 2260 | 2,14 |
| 10M1 | 34,5 | 74,6 | 2243 | 2,16 |
| 10B1 | 20,62 | 77,0 | 1340 | 3,73 |
| 10TMB1 | 33,2 | 74,7 | 2158 | 2,25 |
| 10T2 | 36,92 | 69,8 | 2400 | 1,89 |
| 10M2 | 33,54 | 70,7 | 2180 | 2,11 |
| 10B2 | 34,46 | 70,2 | 2240 | 2,04 |
| 10TMB2 | 30,15 | 70,5 | 1960 | 2,34 |

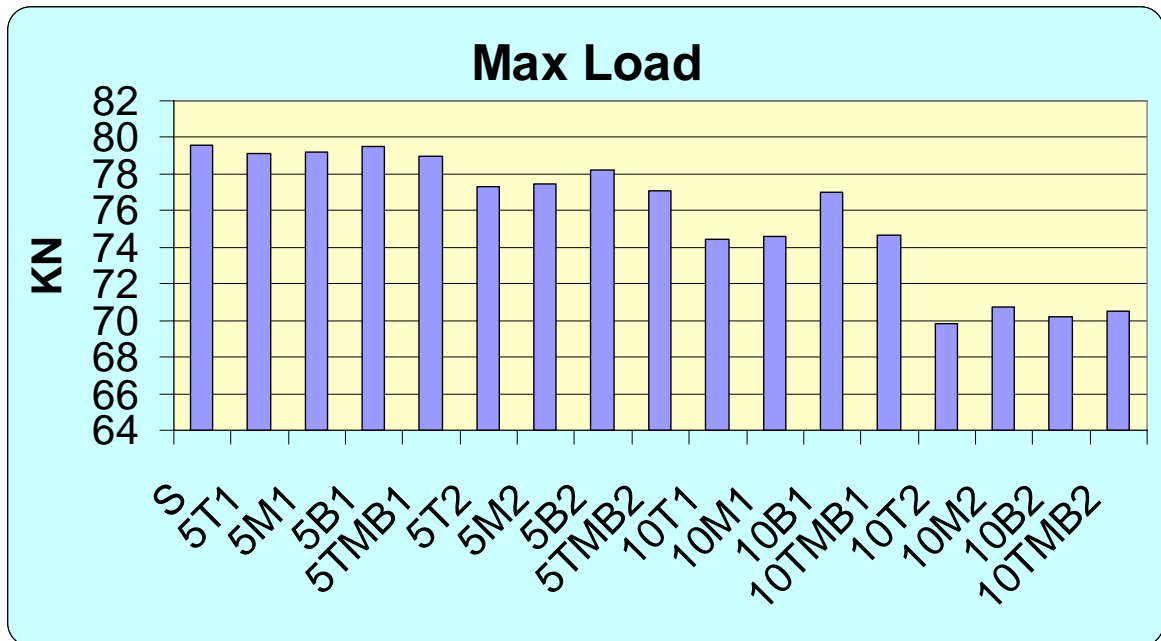
- Το συγκριτικό γράφημα μέσου φορτίου (P_{mean}) για όλα τα δοκίμια είναι το ακόλουθο:



Το δοκίμιο που εμφανίζει το μέγιστο μέσο φορτίο, άρα και μεγαλύτερη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας πλαστικής παραμόρφωσης κατά την αξονική του

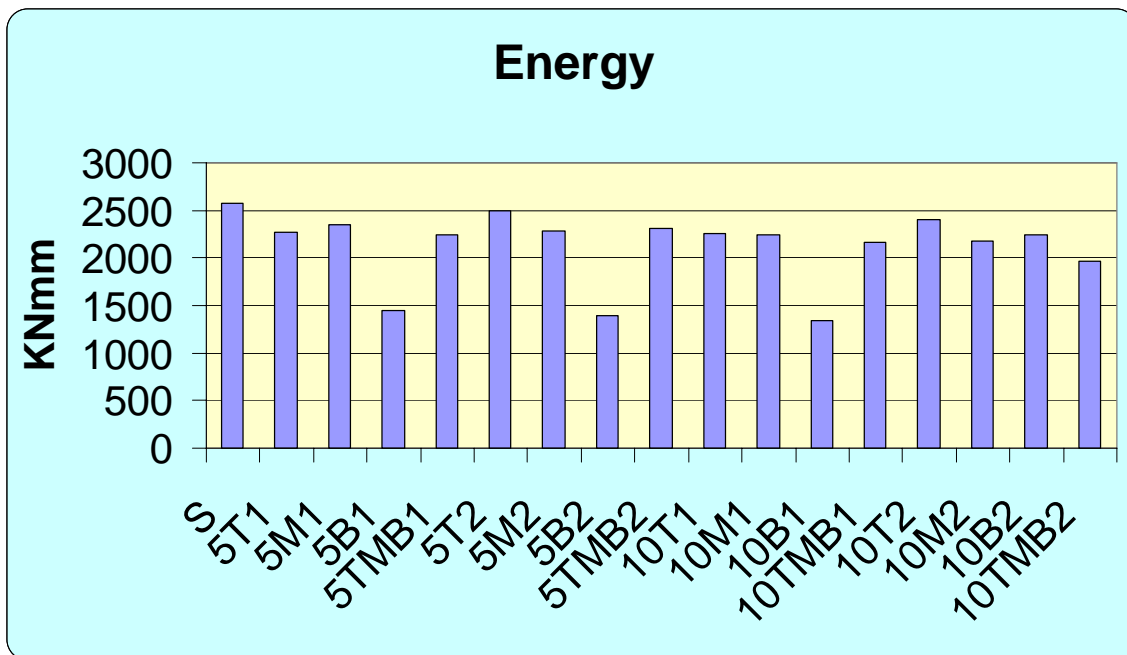
κατάρρευση, είναι το **S** (δοκίμιο κυκλικής διατομής άνευ οπής), ενώ το δοκίμιο που εμφανίζει το ελάχιστο μέσο φορτίο, άρα και μικρότερη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας πλαστικής παραμόρφωσης κατά την κατάρρευσή του, είναι το **10B1** (δοκίμιο κυκλικής διατομής με μια οπή $\Phi 10$ μη διαμπερούς στο $1/2$ του ύψους του δοκιμίου).

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



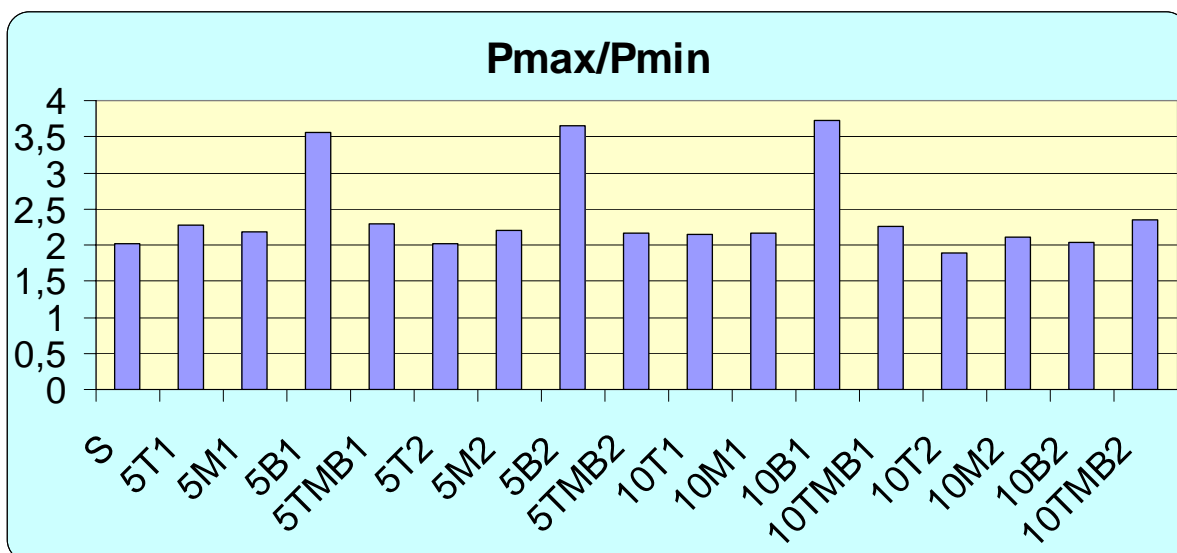
Το δοκίμιο που εμφανίζει το μεγαλύτερο μέγιστο φορτίο, άρα το δοκίμιο που έχει την μεγαλύτερη αντοχή μέχρι να ξεκινήσει η κατάρρευσή του, είναι το **S** (κυκλικής διατομής χωρίς οπές) και δεύτερο το δοκίμιο **5B1** με μία μη διαμπερή οπή 5mm στο μέσο του δοκιμίου ενώ το δοκίμιο που εμφανίζει το μικρότερο μέγιστο φορτίο, άρα το δοκίμιο που αντέχει λιγότερο μέχρι να αρχίσει να καταρρέει, είναι το **10T2** (δοκίμιο κυκλικής διατομής με μία οπή $\Phi 10$ διαμπερές στα 10mm από το άνω χείλος του δοκιμίου).

- 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 **S** (δοκίμιο κυκλικής διατομής άνευ οπής) και δεύτερο το **5T2** (δοκίμιο κυκλικής διατομής με μια οπή $\Phi 5$ διαμετρή στα 7.5mm από το άνω χείλος του δοκιμίου), ενώ το δοκίμιο που εμφανίζει την ελάχιστη ενέργεια πλαστικής παραμόρφωσης, είναι το **10B1** (δοκίμιο κυκλικής διατομής με μία οπή $\Phi 10$ μη διαμετρή στο μέσο του).

➤ 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 δοκίμιο **10B1** με μία μη διαμετρή οπή 10mm στο μέσο του δοκιμίου ενώ εξίσου μεγάλο λόγο παρουσιάζει το δοκίμιο **5B2** με μία διαμετρή οπή 5mm στο μέσο του δοκιμίου. Την **ελάχιστη τιμή** παρουσιάζει το δοκίμιο **10T2** με μία διαμετρή οπή, 10mm από το άνω χείλος του δοκιμίου.

ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ:

Σε γενικές γραμμές, όπως παρουσιάστηκε στα προηγούμενα κεφάλαια 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.
- 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 οπές που σχεδιάζονται στο LS-DYNA, είναι πλήρως κυκλικές 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 οπές που δημιουργήθηκαν στα πειραματικά δοκίμια μπορεί να εμφανίζουν αποκλίσεις γεωμετρίας και θέσης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι άξονες των διαμπερών οπών να μην συμπίπτουν με τις διαμέτρους των αντίστοιχων διατομών και έτσι οι τάσεις που θα δημιουργηθούν γύρω από τις οπές 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.
- Επιπλέον, στο LS-DYNA η επιλογή των shell elements με ομοιόμορφο πάχος 2mm 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 (1mm) διατομή σε επαφή με την κινούμενη πλάκα μία μικρή καμπυλότητα όπως επίσης και στην κάτω διατομή. Αυτή η καμπυλότητα επηρεάζει τον τρόπο κατάρρευσης του δοκιμίου αφού εκλαμβάνεται από τον κώδικα η επιφάνεια της άνω διατομής ως μη επίπεδη. Για αυτό παρατηρείται η κατάρρευση του δοκιμίου να μην ξεκινάει από την περιοχή στο μέσο της οπής του δοκιμίου αλλά από το άνω μέτωπο ,με περιστροφή περί το καμπύλο χείλος

του άνω μετώπου προς τα έξω της υψηλότερης ζώνης στοιχείων και δημιουργία αξονοσυμμετρικού λοβού. 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 και χρονικά την ανάλυση. Όμως θα έκαναν τον σχεδιασμό του δοκιμίου και συγκεκριμένα της περιοχής των οπών πολύ πιο δύσκολο.

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 **Axial Crushing Videos**, 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 **Ptixiaki** περιλαμβάνει όλα τα κεφάλαια της εργασίας σε μορφή αρχείων κειμένου Word 2003. Στον κατάλογο **Presentation** 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

➤ ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ:

1] **THE EFFECTIVE CRUSHING DISTANCE IN AXIALLY COMPRESSED THIN-WALLED METAL COLUMNS**, Włodzimierz 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*

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

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 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.

➤ **ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ:**

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....σελ.1

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

.....σελ.2

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο : ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΤΑΣΕΩΝ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΟΠΕΣ

.....σελ.7

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο : ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ – ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

.....σελ.12

ΕΝΟΤΗΤΑ 5-0: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΑΝΕΥ ΟΠΩΝ (***TYPE_S***)σελ. 18

ΕΝΟΤΗΤΑ 5-1: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΙΑΣ ΜΗ ΔΙΑΜΠΕΡΟΥΣ
ΟΠΗΣ Φ5 (***TYPE_5T1***).....σελ. 33

ΕΝΟΤΗΤΑ 5-2: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΙΑΣ ΜΗ ΔΙΑΜΠΕΡΟΥΣ
ΟΠΗΣ Φ5 (***TYPE_5M1***).....σελ. 48

ΕΝΟΤΗΤΑ 5-3: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΙΑΣ ΜΗ ΔΙΑΜΠΕΡΟΥΣ
ΟΠΗΣ Φ5 (***TYPE_5B1***).....σελ. 61

ΕΝΟΤΗΤΑ 5-4: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΤΡΙΩΝ ΜΗ ΔΙΑΜΠΕΡΩΝ
ΟΠΩΝ Φ5 (***TYPE_5TMB1***).....σελ. 75

ΕΝΟΤΗΤΑ 5-5: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΙΑΣ ΜΗ ΔΙΑΜΠΕΡΟΥΣ
ΟΠΗΣ Φ10 (***TYPE_10T1***).....σελ. 89

ΕΝΟΤΗΤΑ 5-6: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΙΑΣ ΜΗ ΔΙΑΜΠΕΡΟΥΣ
ΟΠΗΣ Φ10 (***TYPE_10M1***).....σελ. 102

ΕΝΟΤΗΤΑ 5-7: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΙΑΣ ΜΗ ΔΙΑΜΠΕΡΟΥΣ
ΟΠΗΣ Φ10 (***TYPE_10B1***).....σελ. 116

| | |
|-------------------------------------|--|
| <u>ΕΝΟΤΗΤΑ 5-8:</u> | ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΤΡΙΩΝ ΜΗ ΔΙΑΜΠΕΡΩΝ ΟΠΩΝ Φ10(<i>TYPE_10TMB1</i>).....σελ. 129 |
| <u>ΕΝΟΤΗΤΑ 5-9:</u> | ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΙΑΣ ΔΙΑΜΠΕΡΟΥΣ ΟΠΗΣ Φ5 (<i>TYPE_5T2</i>).....σελ. 143 |
| <u>ΕΝΟΤΗΤΑ 5-10:</u> | ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΙΑΣ ΔΙΑΜΠΕΡΟΥΣ ΟΠΗΣ Φ5 (<i>TYPE_5M2</i>)σελ. 156 |
| <u>ΕΝΟΤΗΤΑ 5-11:</u> | ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΙΑΣ ΔΙΑΜΠΕΡΟΥΣ ΟΠΗΣ Φ5 (<i>TYPE_5B2</i>)σελ. 171 |
| <u>ΕΝΟΤΗΤΑ 5-12:</u> | ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΤΡΙΩΝ ΔΙΑΜΠΕΡΩΝ ΟΠΩΝ Φ5 (<i>TYPE_5TMB2</i>)σελ. 185 |
| <u>ΕΝΟΤΗΤΑ 5-13:</u> | ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΙΑΣ ΔΙΑΜΠΕΡΟΥΣ ΟΠΗΣ Φ10 (<i>TYPE_10T2</i>).....σελ. 199 |
| <u>ΕΝΟΤΗΤΑ 5-14:</u> | ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΙΑΣ ΔΙΑΜΠΕΡΟΥΣ ΟΠΗΣ Φ10 (<i>TYPE_10M2</i>).....σελ. 213 |
| <u>ΕΝΟΤΗΤΑ 5-15:</u> | ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΙΑΣ ΔΙΑΜΠΕΡΟΥΣ ΟΠΗΣ Φ10 (<i>TYPE_10B2</i>).....σελ. 226 |
| <u>ΕΝΟΤΗΤΑ 5-16:</u> | ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΤΡΙΩΝ ΔΙΑΜΠΕΡΩΝ ΟΠΩΝ Φ10 (<i>TYPE_10TMB2</i>).....σελ. 240 |
| <u>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ:</u> |σελ. 253 |
| <u>ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ:</u> |σελ. 256 |
| <u>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ:</u> |σελ. 258 |