



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ
ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.)
«ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ»

ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΙΜΟΤΗΤΑΣ
(FORMABILITY) ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΕΛΑΣΜΑΤΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ
ΜΕΘΟΔΟΥ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΔΗΜΗΤΡΗΣ Ζ. ΖΑΧΑΡΟΠΟΥΛΟΣ

Διπλωματούχος Πολιτικός Μηχανικός Πανεπιστημίου Πατρών

ΕΠΙΒΛΕΨΗ :

ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Δ.Ε. ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ

ΜΑΡΤΙΟΣ 2012, ΑΘΗΝΑ



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ
ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.)
«ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ»

ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΙΜΟΤΗΤΑΣ
(FORMABILITY) ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΕΛΑΣΜΑΤΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ
ΜΕΘΟΔΟΥ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΔΗΜΗΤΡΗΣ Ζ. ΖΑΧΑΡΟΠΟΥΛΟΣ

Διπλωματούχος Πολιτικός Μηχανικός Πανεπιστημίου Πατρών

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ :

Δ.Ε.ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Χ. ΠΑΝΑΓΟΠΟΥΛΟΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Β. ΚΕΦΑΛΑΣ, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΜΑΡΤΙΟΣ 2012, ΑΘΗΝΑ

Περιεχόμενα

1. Πρόλογος	5
2. Περίληψη	6
3. Abstract	7
4. Εισαγωγή	8
5. Θεωρητικό μέρος	9
5.1 Γενικά για τη διαμόρφωση	9
5.2 Θεωρητική ανάλυση της μηχανικής της δοκιμής	10
5.3 Παραγοντες που επηρεάζουν την κατεργασία	13
5.4 Προσδιορισμός της διαμορφωσιμότητας	16
5.5 Χρησιμοποιούμενα υλικά	21
6. Πειραματικό μέρος	24
6.1 Πειραματικός εξοπλισμός	24
6.2 Δοκίμια	28
6.3 Αποτύπωση πλέγματος στα δοκίμια	32
6.4 Διεξαγωγή πειράματος	37
6.5 Πειραματικά αποτελέσματα	41
7. Μοντελοποίηση διαδικασίας	43
7.1 Τα πεπερασμένα στοιχεία	43
7.2 Το λογισμικό LS-Dyna	44
7.3 Κατασκευή του μοντέλου	45
7.4 Υλικά και ιδιότητές τους στο μοντέλο	46
7.5 Δημιουργία πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων	49
7.6 Δημιουργία διεπιφανειών	54
7.7 Δέσμευση κόμβων	54

8. Αποτελέσματα μοντέλων	55
9. Συμπεράσματα	85
10. Βιβλιογραφία	88

1.Πρόλογος

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία μελετάται η διαμορφωσιμότητα λεπτών επιπέδων μεταλλικών ελασμάτων. Η διαμορφωσιμότητα κάθε υλικού είναι ένας πολύ σημαντικός δείκτης για τις δυνατότητές του στον τομέα της κατεργασίας μεταλλικών υλικών. Γίνεται μία συγκριτική μελέτη τριών διαφορετικών μετάλλων υπό το διπλό πρίσμα της πειραματικής εξέτασης με όλους τους παράγοντες απροσδιοριστίας που μπορεί αυτή να παρουσιάσει αλλά και της μοντελοποιημένης ανάλυσης με την χρήση πεπερασμένων στοιχείων.

Σκοπός της εργασίας είναι να συγκρίνει τη συμπεριφορά των μετάλλων και να αναδείξει τη μεγάλη συμβολή των πεπερασμένων στοιχείων πάνω στο θέμα της ανάλυσης συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του εργαστηρίου με αυτά των μοντέλων.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου Δημήτριο Μανωλάκο για την πολύπλευρη και αποτελεσματική στήριξή του σε γνωσιακό αλλά και ηθικό επίπεδο. Ακόμα θα ήθελα να ευχαριστήσω όλο το υπολοιπο προσωπικό του εργαστηρίου για την βοήθειά τους στην εκπόνηση της παρούσης εργασίας. Σαν ειδική μνεία θέλω να αναφέρω το φίλο διπλοματούχο μηχανολόγο μηχανικό Κωνσταντίνο Καντζάβελο , για όλα όσα έκανε. Τέλος θέλω να ευχαριστήσω για την πολύπλευρη στήριξή τους , καθόλη τη διάρκεια αυτού του μεταπτυχιακού προγράμματος , τα αδέρφια Κατερίνα και Γιώργο αν και η προσφορά τους δεν χωρά σε δυο αράδες κείμενο.

2. Περίληψη

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται μία μελέτη της διαμόρφωσης με έκταση επίπεδων ορθογωνικών δοκιμίων σε τρία διαφορετικά υλικά. Συγκεκριμένα εξετάζονται το αλουμίνιο , ο χαλκός και ο ορείχαλκος.

Αρχικά γίνεται μια θεωρητική εισαγωγή για τις κατεργασίες και εξετάζεται η διαμόρφωση σε έκταση μέσω του punch stretching. Στην συνέχεια αναφέρεται η θεωρητική ανάλυση και η μηχανική της δοκιμής καθώς και οι παράγοντες που την επηρεάζουν. Παρουσιάζονται τα κριτήρια που χρησιμοποιούνται και ο τρόπος προσδιορισμού της διαμορφωσιμότητας μέσω των διαγραμμάτων οριακής διαμόρφωσης (FLDs – Forming Limit Diagrams) η χάραξη των οποίων προκύπτει από την μέτρηση των παραμορφώσεων των δοκιμίων. Δίδονται ακόμα κάποιες γενικές πληροφορίες για τα χρησιμοποιούμενα υλικά.

Στη συνέχεια περιγράφεται και αναλύεται η πειραματική διαδικασία. Αναφέρεται ο εργαστηριακός εξοπλισμός και οι διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη φάση του πειράματος και τα δοκίμια και οι ιδιότητες των υλικών τους. Παρουσιάζεται η προετημασία των δοκιμίων, η διεξαγωγή της δοκιμής και δίδονται τα πειραματικά αποτελέσματά της μέσω των διαγραμμάτων οριακής διαμόρφωσης.

Περαιτέρω γίνεται μοντελοποίηση της κατεργασίας μέσω της χρήσης ενός προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων του LS-Dyna. Αφού γίνει μια σύντομη παρουσίαση των πεπερασμένων στοιχείων και του προγράμματος, παρουσιάζεται η κατασκευή του μοντέλου και η διακριτοποίησή του δηλαδή η δημιουργία του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων. Αναφέρονται οι ιδιότητες των υλικών στο μοντέλο , οι διεπιφάνειες και εξετάζεται η δέσμευση των κόμβων.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την ανάλυση των δοκιμίων με το LS-Dyna και δίνονται τα προκύπτοντα FLDs.

Τέλος , γίνεται σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με αυτά τα οποία προέκυψαν απο την μοντελοποίηση και παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν τόσο από τα διαφορετικά υλικά όσο και απο τις διαφορές εργαστηρίου – μοντέλου.

3. Abstract

This study makes a presentation of stretch forming in three different materials using rectangular specimens. Specifically, aluminum, copper and brass are examined.

Firstly, after a theoretical introduction, stretch forming is examined through the process of punch stretching. Moreover, theoretical analysis of test is given and also the influence factors that affect the test are mentioned. Using the Forming Limit Diagrams we define the formability of the materials. These diagrams are exported from measuring of the displacements of specimens. Also, some general information for the used material is given.

Furthermore, there is a description and examination of the experimental process. There is a reference to the experimental equipment, the specimens and their properties. A presentation of the preparation of specimens is given and after all, there is the experimental result through the Forming Limit Diagrams.

Also, by using a finite element program, the LS-Dyna, the modeling of process is achieved. After a brief presentation of the finite element program, the construction of the model and the discretization, the creation of the finite element mesh, is shown. Specify the material properties to model, interfaces and test the commitment of nodes.

Exports of the model are compared with the experimental ones and we can reach to conclusions that accrued through the different materials and also through model – experiment.

4. Εισαγωγή

Ο γενικός ορισμός της κατεργασίας ενός υλικού είναι η διαδικασία μορφοποίησης του, που εκμεταλλεύεται την ιδιότητά του να παραμορφώνεται πλαστικά και συνδιάζει κατάλληλα της συνθήκες φόρτισης, θερμοκρασίας και ταχύτητας για το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα. Η εξεταζόμενη κατεργασία εμπίπτει κατα DIN στις διαμορφώσεις του επιπέδου ελάσματος και ονομάζεται διαμόρφωση σε έκταση. Είναι μια ψυχρή, συμβατική κατεργασία που γίνεται με την βοήθεια συστήματος εμβόλου – μήτρας με ή χωρίς χρήση δακτυλίου συγκράτησης. Το εμβολο κινείται με τη βοήθεια υδραυλικής πρέσσας, η οποία ανταποκρίνεται στη σωστή και παραστατική μελέτη του διαξονικού εφελκυσμού στο επίπεδο του μεταλλικού ελασματος του δοκιμίου. Παρόλο που πρόκειται για μια μέθοδο καθιερωμένη για τη μελέτη των μεταλλικών ελασμάτων, δεν υπάρχει μια καθολικά αποδεκτή τυποποίηση για την πειραματική διαδικασία στο διεθνή επιστημονικό χώρο. Παρόλα αυτά η μηχανική του μεταλλικού ελάσματος κατά την πλαστική παραμόρφωση έχει αναλυθεί από πολλούς επιστήμονες και υπάρχει διαθέσιμη διεθνής βιβλιογραφία.

Οι κατεργασίες διαμόρφωσης μπορούν να δώσουν ικανοποιητικά αποτελέσματα στην τελική γεωμετρία του παραγόμενου υλικού στην επιφάνεια του καθώς και μικρές ανοχές. Η διαμόρφωση γίνεται στην περιοχή μεταξύ του ορίου διαρροής και του ορίου θραύσης. Τα υλικά τα οποία χαρακτηρίζονται από μικρό όριο διαρροής και από μεγάλη επιμήκυνση διαμορφώνονται πολύ καλά και παρουσιάζουν μικρές δυνάμεις επανατάξεως και άρα είναι ιδανικά για αυτή την κατεργασία.

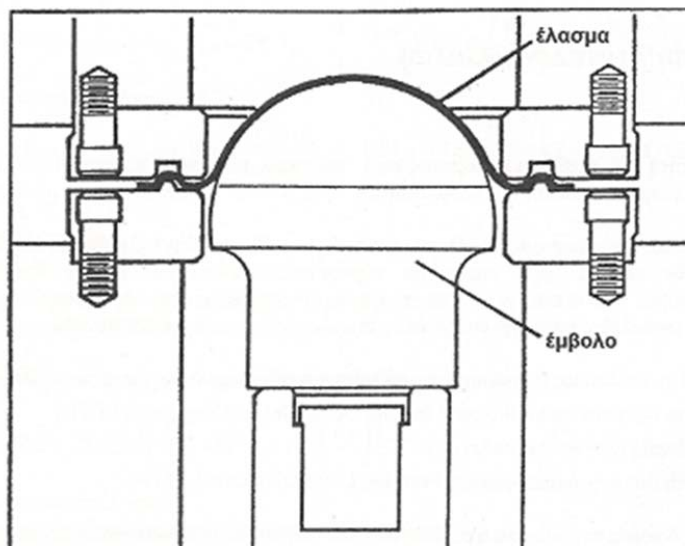
Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν ορθογωνικού σχήματος δοκίμια με τη μορφή ελασματος συγκεκριμένων γεωμετρικών διαστάσεων. Σαν αποτέλεσμα αυτής της κατεργασίας πέρνουμε τριών ειδών διαγράμματα, αυτά του φορτίου – παραμόρφωσης, της τάσης – παραμόρφωσης και τα διαγράμματα οριακής παραμόρφωσης για να εξάγουμε τα συμπεράσματά μας για το υλικό.

5. Θεωρητικό τμήμα

5.1 Γενικά για τη διαμόρφωση

Υπάρχουν πάρα πολλά είδη κατεργασιών διαμόρφωσης μεταλλικών ελασμάτων (V-bending , air-bending , rotary bending , wiping die , stretch bending , roll bending , punching , hydroforming , explosive forming , deep drawing κ.α) . Στην περίπτωση μας θα εξετάσουμε το punch stretching. Δεν υπάρχει μια παγκοσμίως προκαθορισμένη και τυποποιημένη πειραματική διαδικασία για την διαμόρφωση σε έκταση. Ωστόσο η έκταση μεταλλικών ελασμάτων μέσω ημισφαιρικού εμβόλου χρησιμοποιείται ευρέως για την εύρεση των ιδιοτήτων της τάσης και της παραμόρφωσης των μετάλλων.

Μια τυπική διάταξη αποτελείται από το έμβολο που κινείται μόνο σε ένα άξονα , το δοκίμιο που εξαναγκάζεται σε παραμόρφωση από το έμβολο , τη μήτρα που «πατάει» το δοκίμιο και τον συγκρατητή που «κρατάει» τις άκρες του δοκιμίου σταθερές ώστε να μην παρατηρείται ροή υλικού από τις ακρες στο κέντρο και απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 5.1: Τυπική διάταξη punch stretching

Η διάταξη αυτή έχει και πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Στα πρώτα συγκαταλέγονται η γνωστή γεωμετρία του δοκιμίου που είναι σε επαφή με το έμβολο, η ικανότητα του δοκιμίου να χρησιμοποιεί διαφορετικές παραμορφώσεις μέχρι την αστοχία (σχηματισμός λαιμού ή κόψιμο), η χρήση μικρής ποσότητας υλικού και η ταχύτητα. Από την άλλη μεριά όμως έχει το μειονέκτημα της ύπαρξης μη σταθερού συντελεστή τριβής στην επιφάνεια επαφής κάτι που καθιστά δύσκολη την αριθμητική επίλυση του προβλήματος, υπερεκτιμά τις αποδεκτές παραμορφώσεις, έχει γεωμετρικούς περιορισμούς αλλά και περιορισμούς στη διαδρομή του εμβόλου.

Η μηχανική της έκτασης μέσω ημισφαιρικού εμβόλου είναι παρόμοια με αυτή του bulge test αλλά έχει καλύτερα αποτελέσματα στην μελέτη της διαμορφοσιμότητας του υλικού. Τα αποτελέσματα του punch stretching επιτρέπουν τον προσδιορισμό των καμπυλών ροής του υλικού, τον εκθέτη κράτνσης n στην εξίσωση $\sigma = A \cdot \epsilon^n$ και τον εκθέτη m στην τυπική εξίσωση $\sigma = A \cdot (d\epsilon/dt)^m$ που εκφράζει το ποσοστό κράτνσης. Πολύ σημαντικό επίσης είναι το γεγονός ότι με το punch stretch μπορούμε να μελετήσουμε και την ανισοτροπία του υλικού.

5.2 Θεωρητική ανάλυση της μηχανικής της δοκιμής

Καθώς το έμβολο μετακινείται κατά τον κατακόρυφο άξονα, ασκεί δυνάμεις που εφελκύνουν το μεταλλικό έλασμα που αποτελεί το δοκίμιο, με μεσημβρινές εφελκυστικές δυνάμεις T_{θ} . Αυτές οι δυνάμεις προκαλούνται από την αντίσταση της εξωτερικής περιοχής του δοκιμίου, η οποία δεν παραμορφώνεται πλέον ελαστικά αλλά πλαστικά.

Εστω ότι ένα σημείο P αρχικά βρίσκεται σε ακτίνα r από τον άξονα συμμετρίας της διατάξης, όταν το έμβολο μετατοπιστεί κατά τον κατακόρυφο άξονα και πιέσει το δοκίμιο, είναι προφανές ότι το σημείο P θα μετατοπιστεί. Εκτός από τη μετατόπιση του κατά τον κατακόρυφο άξονα, θα αλλάξει και η οριζόντια θέση του αφού τώρα θα απέχει από τον άξονα συμμετρίας της διατάξης μία νέα απόσταση r' . Αυτό που δεν γνωρίζουμε είναι η σχέση που υπάρχει μεταξύ r και r' . Σε περίπτωση που το έμβολο ωθεί το έλασμα και το τελευταίο παραμορφώνεται γύρω από

την επιφάνεια επαφής, τότε ισχύει ότι $r' > r$. Υπάρχει όμως και μία δεύτερη περίπτωση κατά την οποία η παραμόρφωση δεν συμβαίνει γύρω από την διεπιφάνεια επαφής εμβόλου-δοκιμίου. Στην περίπτωση αυτή το δοκίμιο παραμορφώνεται από την φλάντζα. Η φλάντζα είναι το μέρος του δοκιμίου που συγκρατείται μεταξύ των επιφανειών της μητρας και του συγκρατητή. Τότε θα σημειωθεί ροή υλικού προς το εσωτερικό της διαταξής (προς τον άξονα συμμετρίας), και σε αυτή την περίπτωση θα ισχύει $r' > r$. Για κάποια ακτίνα a από τον άξονα συμμετρίας της διαταξής είναι προφανές ότι δεν θα υπάρχει ροή υλικού. Ο δακτύλιος αυτός είναι γνωστός και ως ουδέτερος κύκλος. Η περιοχή $r > a$ είναι η θλιβόμενη περιοχή, ενώ για $r < a$ έχουμε την εφελκυστική περιοχή. Η τασική κατάσταση περιγράφεται από την εξίσωση:

$$T_{\theta} = T_{a\phi}$$

Το ημισφαιρικό εμβολο έστω ακτίνας ρ_p δεν βρίσκεται σε επαφή με ολόκληρη την επιφάνεια του ελασματος. Πιο συγκεκριμένα και όπως φαίνεται στο σχήμα 5.2, το έλασμα έρχεται σε επαφή με το έμβολο μόνο σε μια κυρτή περιοχή εύρους:

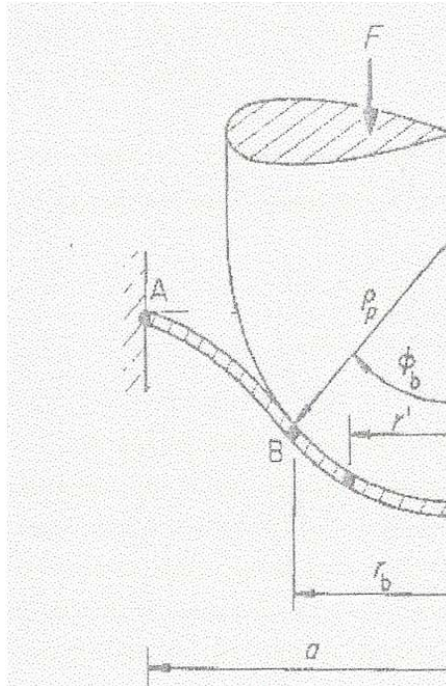
$$0 < r' < r_b$$

Σε ένα σημείο της επιφάνειας του ελασματος, έστω B , η τάση του εμβόλου θα είναι σταθερή και θα δίνεται από τον τύπο:

$$q = 2T/\rho_p$$

όπου :

$$T = \sigma_{\theta} t$$



Σχήμα 5.2

Στην περιοχή όπου το έμβολο δεν βρίσκεται σε επαφή με το έλασμα (unsupported περιοχή μεταξύ των σημείων A και B), η πίεση που ασκείται στο έλασμα είναι μηδέν και καθώς και οι δύο βασικές τάσεις είναι ίσες θα ισχύει $\rho_1 = -\rho_2$.

Εφόσον η αξονική δύναμη στην περιοχή AB πρέπει να διατηρείται σταθερή από τις παραπάνω εξισώσεις προκύπτει ότι για $r_b < r' < a$ ισχύει:

$$r' \sin \Phi = r_b \sin \Phi = Z / 2\pi T$$

Στην περίπτωση της διαμόρφωσης του ελασματος με έκταση, στην διεπιφάνεια επαφής μεταξύ εμβόλου και δοκιμίου, υπάρχει κάποιος μη σταθερός συντελεστής τριβής ο οποίος σαφώς και παίζει σημαντικό ρόλο στη μορφή της επιφάνειας του τελικού ελασματος αλλά και στο τελικό σχήμα αυτού. Σε κάποιο βαθμό το αν θα υπάρξει ροή του υλικού προς τον άξονα συμμετρίας της διατάξης καθορίζεται και από το αν θα υπάρξει ολίσθηση της επιφάνειας του εμβόλου πάνω στο έλασμα, ή αν ο συντελεστής τριβής είναι τέτοιος που δεν θα επιτρέψει την ολίσθηση ή θα την αναστείλει σε κάποιο βαθμό.

5.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την κατεργασία

Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν και αποτελούν μεταβλητές σε μια διαδικασία διαμόρφωσης είναι οι παρακάτω:

Ιδιότητες του υλικού

Ισως ο κυριότερος παράγοντας της κατεργασίας. Είναι προφανές ότι κάθε υλικό θα έχει διαφορετική συμπεριφορά ανάλογα με τις ιδιότητες του. Τα μαλακά μεταλλα χρειάζονται μικρότερη δύναμη διαμόρφωσης και λόγω μεγαλύτερης ολκιμότητας έχουν πολύ λιγότερες πιθανότητες να παρουσιάσουν ρωγμές, προβλήματα λόγω ψαθυρότητας και ατέλειες μετά την κατεργασία. Ακόμα παρουσιάζουν μικρότερες πιθανότητες να αστοχίσουν στην περιοχή συγκράτησης.

Ενας ακόμα σημαντικός παράγοντας είναι η ανισοτροπία του υλικού. Θεωρητικά κανένα υλικό δεν είναι απολύτως ιστροπικό απλά για λόγους ευκολίας στην ανάλυση, όταν αυτό δεν δημιουργεί πρόβλημα ένα υλικό θεωρείται ιστροπικό. Στη διαμόρφωση του επιπέδου ελάσματος μπορούμε να προσδιορίσουμε δυο διαφορετικές μορφές ανισοτροπίας. Η πρώτη είναι η λεγόμενη επίπεδη ανισοτροπία, που περιγραφει τη μεταβολή των μηχανικών ιδιοτήτων στο επίπεδο του ελασματος. Το μέγεθος της επίπεδης ανισοτροπίας καθορίζει και την εμφάνιση φαινομένων όπως τα “αυτια” στην κατεργασία για παραδειγμα της βαθείας κοίλανσης, ή σε κατεργασία παραμόρφωσης σε έκταση ενός πολύ λεπτού ελασματος με πολύ μικρό ρυθμό παραμόρφωσης. Η δεύτερη μορφή ανισοτροπίας είναι ως προς τον κατακόρυφο άξονα και είναι γνωστή ως καθετή ανισοτροπία. Αυτή περιγραφει τη μεταβολή των πλαστικών ιδιοτήτων του υλικού κατα το πάχος συναρτήσει αυτών στο επίπεδο του ελασματος.

Τριβή

Το φαινόμενο της τριβής στην εξεταζόμενη περίπτωση μόνο αμελητέο δεν μπορεί να χαρακτηριστεί. Εάν δεν υπήρχε τριβή η συμπεριφορά του δοκιμίου κατά τη διάρκεια της κατεργασίας όσο αύξανε η μετατόπιση του εμβόλου, το υλικό στο κέντρο του ελασματος θα συνέχιζε να γλιστράει στο προς το εξωτερικό του προσώπου του εμβόλου. Επειδή όμως υπάρχει τριβή, ο συντελεστής της οποίας μπορεί να μην είναι παντού σταθερός, τελικά το υλικό δε μπορεί να ρεύσει από το κέντρο προς την περιφέρεια όσο το έμβολο μετακινείται όλο και περισσότερο κατακόρυφα.

Αυτός είναι και ο λόγος που το έλασμα δεν έχει το ίδιο πάχος σε όλο το μήκος του. Η μεγαλύτερη λέπτυνση παρατηρείται κοντά στην επιφάνεια όπου δεν υπάρχει επαφή εμβόλου-ελασματος. Στις θέσεις αυτές υπάρχει κίνδυνος θραύσης του ελασματος. Η παραμορφωσιακή κατάσταση δεν είναι ίση με αυτήν στη διαξονική παραμόρφωση αλλά η μεσημβρινή παραμόρφωση γίνεται μεγαλύτερη από την παραμόρφωση στην περιφέρεια.

Εάν η τριβή είναι υψηλή, το έλασμα τείνει να κολλήσει στο έμβολο, η παραμόρφωση συγκεντρώνεται κοντά στο επαπτομενικό σημείο και εντός της περιοχής όπου δεν υπάρχει επαφή εμβόλου-ελασματος. Αυτό ευνοεί συνήθως τα επίπεδα έμβολα κυλινδρικής διατομής αλλά τα ημισφαιρικά που έχουν πιο μυτερό προφίλ, ενδέχεται να συμβάλλουν στην αστοχία του δοκιμίου (εμφάνιση ρωγμής ή σχισμής).

Συγκράτηση ελασματος

Στην κατεργασία της διαμόρφωσης με έκταση χρησιμοποιούνται συνήθως δύο τύποι συγκρατησης, η συγκράτηση χάρης και η συγκράτηση με πίεση. Το έλασμα πρέπει να συγκρατείται προκειμένου να επιτευχθεί η έκταση του υλικού και να μην παρασυρθεί αυτό στο εσωτερικό της μήτρας. Σκοπός της συγκρατησης είναι η αποφυγή της δημιουργίας πτυχώσεων στη φλαντζα.

Στην περίπτωση της συγκράτησης με πίεση, ο συγκρατητής είναι αυτός που θα ασκήσει την πίεση πάνω στο δοκίμιο προκειμένου αυτό να μην μετακινηθεί. Ένα σημείο που πρέπει να

προσεχθεί είναι η δύναμη συγκράτησης , αφού σε περίπτωση που είναι πολύ μεγάλη μπορεί να οδηγήσει σε κοπή του ελασματος ακριβώς στο σημείο συγκράτησης.

Ταχύτητα κίνησης του εργαλείου

Η ταχύτητα κίνησης του εργαλείου που ενδύκνεται κάθε φορά εξαρτάται απο πολλούς παράγοντες όπως τις μηχανικές και φυσικές ιδιότητες του ελάσματος , το είδος της πρέσσας και τις λίπανσης καθώς και της δύναμης συγκράτησης. Καθορίζει την ταχύτητα της κατεργασίας, και επηρεάζει το όριο διαρροής του υλικού και την δεισδιτικότητα του λιπαντικού. Στην περίπτωση του stretch forming , η ταχύτητα κίνησης του εμβολου της πρέσσας κυμαίνεται μεταξύ 0,16mm/sec και 8mm/sec , αν και οι δυνατότητες της πρέσσας είναι τέτοιες ώστε να η ταχύτητα κίνησης του εμβολου να ρυθμίζεται σε πολύ μεγαλύτερο εύρος αν οι συνθηκες το απαιτήσουν. Παρόλα αυτά η ταχύτητα του εργαλείου για τις συνήθεις περιπτώσεις έχει μικρή επίδραση στην επιτυχία ή μη της διαμόρφωσης.

Γεωμετρική μορφή εργαλείου

Όταν λεμε εργαλείο στη συγκεκριμενη περίπτωση εννοούμε το εμβολο της πρεσσας που ασκεί την πίεση. Γενικα, οι υψηλες παραμορφώσεις σχετίζονται με περιοχες υψηλής καμπυλότητας της επιφανείας του εμβόλου, αλλα σε αυτό επιδρά και η τριβή. Η μέγιστη παραμόρφωση και η μέγιστη μείωση πάχους αυξάνουν με την μείωση της διαμέτρου του εμβόλου. Η αύξηση της διαμέτρου του εμβόλου αυξάνει τις οριζόντιες και κατακόρυφες δυνάμεις που αναπτύσσονται στο έλασμα.

Λίπανση

Στο stretch forming συνιθίζεται η επάλειψη των πλευρών των δοκιμίων με κάποιο λιπαντικό πριν την έκταση κάτι που έχει σα στόχο την μείωση του φαινομένου της τριβής ανάμεσα στο δοκίμιο και το εργαλείο έτσι ώστε το έμβολο να γλιστρά και να μην κολλά υλικό πάνω του. Το λιπαντικό που θα χρησιμοποιηθεί πρέπει να μπορεί να εφαρμοστεί αλλά και να αφαιρεθεί εύκολα , να μην προσβάλλει το έλασμα ή το εργαλείο και να διατηρεί τις ιδιότητες του στην περίπτωση αύξησης της θερμοκρασίας κάτι που είναι σύνηθες σε μια κατεργασία.

Συνήθως γίνεται χρήση ορυκτελαίων ή μίγματος αυτών με φυτικά και ζωικά λίπη σε ποσοστά μέχρι 40 – 50 %. Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν ελαστικά ή πλαστικά υλικά που τοποθετούνται πάνω από το έλασμα πριν την κατεργασία. Είναι δυνατό και να μην γίνει χρήση λιπαντικού στην διαμόρφωση κάτι το οποίο είναι γνωστό και σαν dry stretching.

5.4 Προσδιορισμός της διαμορφωσιμότητας

Πειραματικά είναι δύσκολο να προσδιοριστεί η διαμορφωσιμότητα των ελασμάτων. Για τον λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί κάποιες τυποποιημένες μέθοδοι προσδιορισμού της διαμορφωσιμότητας που προσεγγίζουν τις συνθήκες διαμόρφωσης στην πράξη και περιγράφουν αξιόπιστα τα όρια ασφαλείας κατά την κατεργασία του ελάσματος στις διάφορες συνθήκες.

Αυτές είναι τα διαγράμματα οριακού ύψους θόλου (Limiting Dome Height Diagrams ή LDHs) , τα διαγράμματα οριακής διαμόρφωσης (Forming Limit Diagrams ή FLDs) και η δοκιμή Erichsen.

Και οι τρεις δοκιμές στηρίζονται στις ίδιες αρχές :

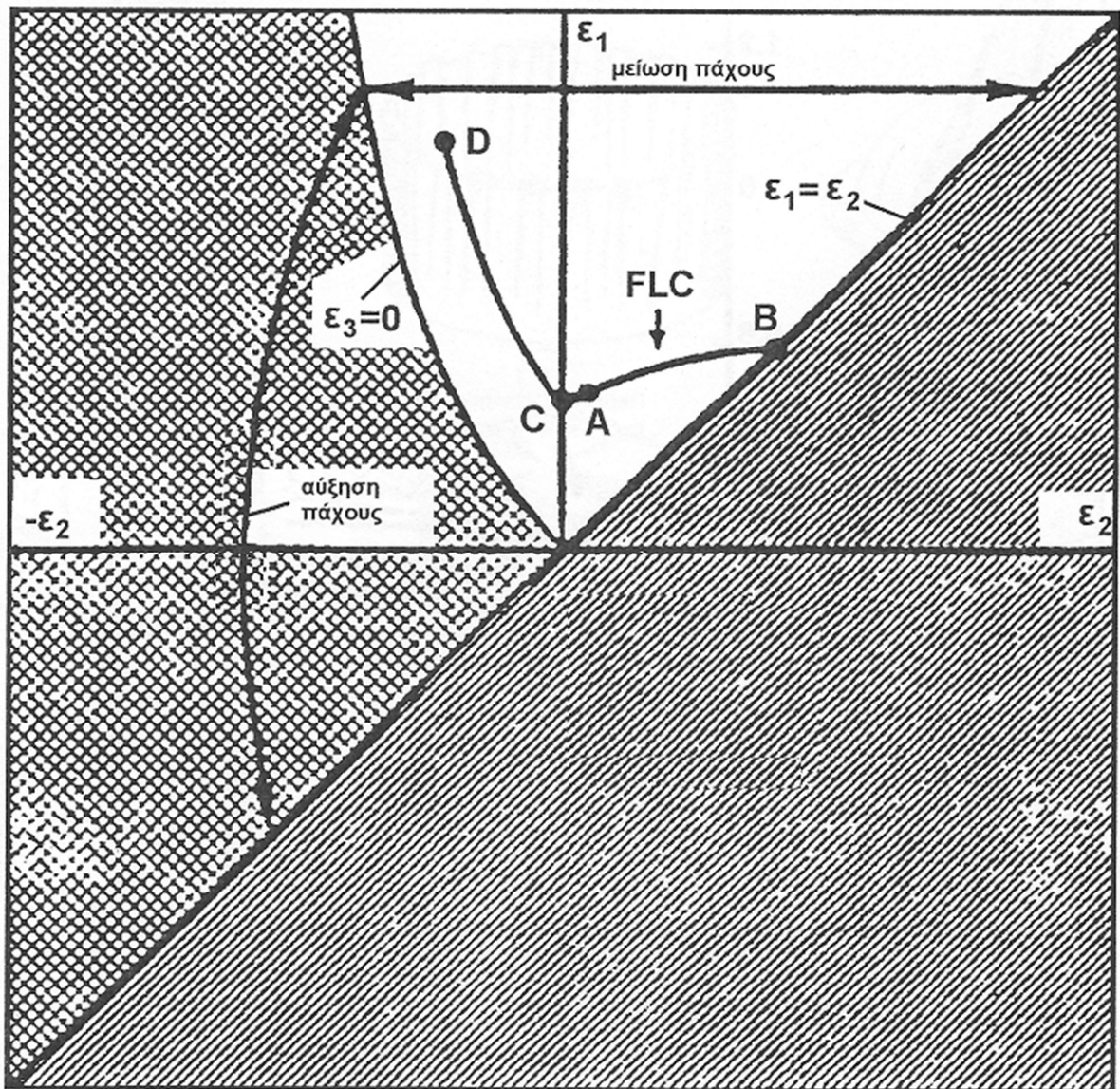
- Το δοκίμιο έχει τη μορφή λωρίδας ή πλήρους ελάσματος
- Στη μη φορτιζόμενη πλευρά του δοκιμίου έχει αποτυπωθεί κατάλληλα ένα πλέγμα επαπτόμενων μεταξύ τους κύκλων ίσης ακτίνας

- Εφαρμόζεται σύστημα φόρτισης του δοκιμίου μέσω εμβόλου συγκεκριμένης γεωμετρίας
- Η φόρτιση εφαρμόζεται μέχρι μιας ορισμένης διαδρομής ή μέχρι να εμφανιστεί αστοχία (λαιμός ή θραύση)
- Τα συμπεράσματα εξάγονται από την μορφή του παραμορφωμένου πλέγματος στις κρίσιμες περιοχές
- Οι βασικές μορφές καταπόνησης που λαμβάνονται υπόψη είναι
 - 1) Έκταση
 - 2) Ελκυσμός
 - 3) Επίπεδη παραμόρφωση



Σχήμα 5.3 : Τρόποι παραμόρφωσης των κύκλων του πλέγματος κατά τις δοκιμές διαμορφοσιμότητας

Στα πλαίσια της παρούσης εργασίας θα ασχοληθούμε με τα διαγράμματα ορικής διαμόρφωσης (FLDs). Ένα τυπικό τέτοιο διάγραμμα παρατίθεται παρακάτω στο σχήμα 5.4.



Σχήμα 5.4 : Διάγραμμα Οριακής Διαμόρφωσης (FLD) στο οποίο φαίνεται η καμπύλη οριακής διαμόρφωσης (FLC) και η περιοχή παραμορφώσεων που ενδιαφέρει τη βιομηχανία

Επι του ανωτέρου διαγράμματος μπορούμε να παρατηρήσουμε τα εξής :

- Ένα διαγραμμα FLD αποτελείται από δυο ορθογώνιους άξονες. Ο οριζόντιος άξονας απεικονίζει την ελάχιστη παραμόρφωση ϵ_2 και ο κατακόρυφος τη μέγιστη

παραμόρφωση ϵ_1 που καταγράφονται στις θέσεις αστοχίας του υλικού (λαιμός ή θραυση).

- Στο δεξιό ημιεπίπεδο προσδιορίζονται σημεία στο χωρίο που ορίζουν ο κατακόρυφος άξονας και η ευθεία $\epsilon_1 = \epsilon_2$, ενώ στο αριστερό ημιεπίπεδο προσδιορίζονται σημεία στο χωρίο που περικλείονται από τον κατακόρυφο άξονα και την ευθεία $\epsilon_2/\epsilon_1 = -1/2$.
- Ο χρησιμοποιούμενος τεχνικός εξοπλισμός περιλαμβάνει: Δακτύλιο συγκράτησης και δακτύλιο διαμόρφωσης (μήτρα), μεταξύ των οποίων συγκρατείται το δοκίμιο και ημισφαιρικό έμβολο διαμέτρου 4 in. Το έμβολο κινείται υδραυλικά με μικρή ταχύτητα, ώστε να παρέχει χαμηλή ταχύτητα παραμορφωσης της τάξης των 10^{-3} s^{-1} .
- Για την εξασφάλιση πειραματικών σημείων σε όλο το χρήσιμο χωρίο απαιτούνται:

(α) Τμήμα AB: Μετατόπιση από το A στο B επιτυγχάνεται με αύξηση της λίπανσης μεταξύ εμβόλου-δοκιμίου, το δε δοκίμιο είναι πλήρες έλασμα

(β) Τμήμα ACD : Χρησιμοποιούνται δοκίμια πλάτους 1,2,3,4,5,6 in.

- Κάθε δοκίμιο αντιπροσωπεύεται στο FLD από ένα σημείο. Στο FLD χωρίζονται περιοχές ασφαλείας και αστοχίας.

Συνήθως 8-10 δοκίμια με διαφορετικό πλάτος και λίπανση είναι αρκετά για την χάραξη ενός FLD.

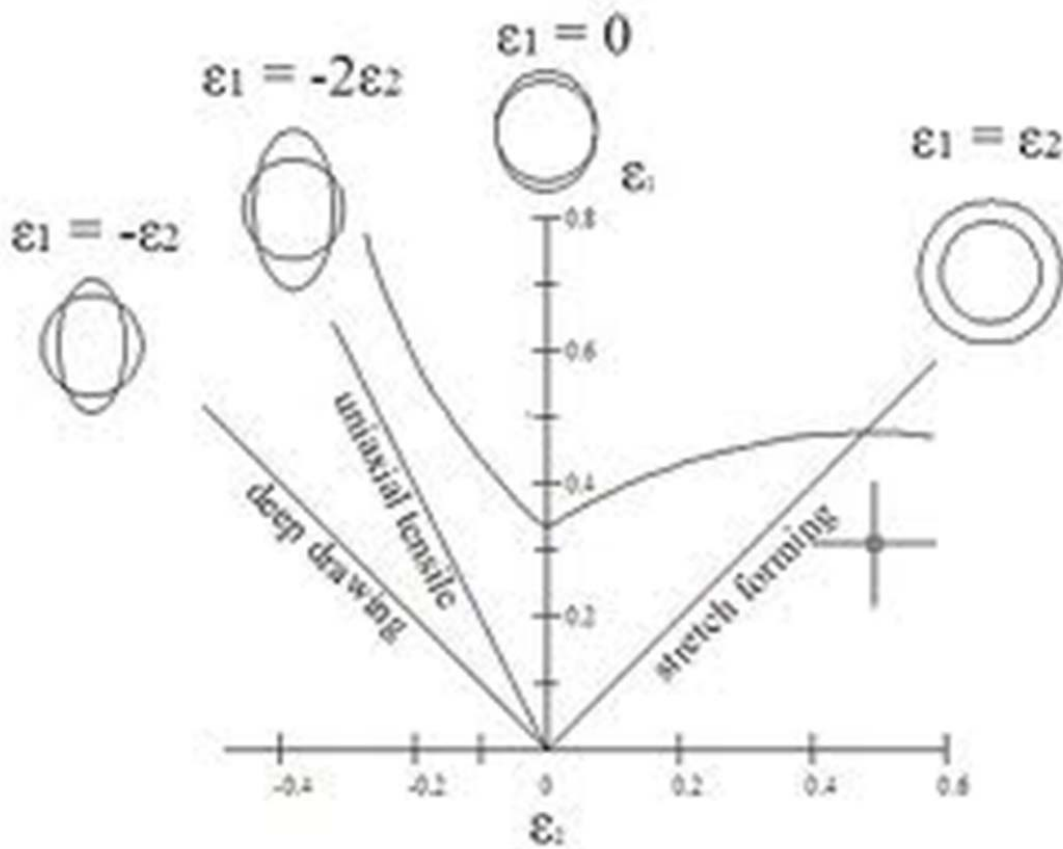
Στο διάγραμμα οριακής παραμόρφωσης, υπάρχει η δυνατότητα να φανούν οι τυπικές παραμορφώσεις ενός ελασματος. Με βάση αυτά τα διαγράμματα, η πιο πιθανή περιοχή να εμφανίσει το δοκίμιο την μεγαλύτερη παραμόρφωση είναι κοντά στην επαφή ή την εφαπτομενική γραμμή του εμβόλου που διέρχεται από το σημείο που χάνεται η επαφή μεταξύ εμβόλου-ελασματος. Έχει παρατηρηθεί ότι, εκτός και αν έχουμε πολύ καλή λίπανση, το έλασμα θα κάνει λαιμό γύρω από ένα κυκλικό δακτύλιο, και θα κοπεί μακριά από τον πόλο.

Πρώτοι οι Keeler και Goodwin εξήγαγαν διαγράμματα 'FLD' (Forming Limits Diagram) τα οποία καθορίζουν τα όρια μορφοποίησης των ελασμάτων. Για τον σκοπό αυτό εκτέλεσαν πειράματα διαξονικής επίπεδης φόρτισης σε ελάσματα, όπου μελετούσαν την συμπεριφορά τους, καθώς αύξαναν συνεχώς τον λόγο μέγιστης προς ελάχιστης παραμόρφωσης. Όταν λοιπόν

παρατηρούσαν υπό σταθερό ρυθμό του λόγου παραμόρφωσης, απότομες μεταβολές στην δύναμη καταπόνησης, είχαν μια ένδειξη για τον σχηματισμό λαιμού στο έλασμα, και συνεπώς κατέγραφαν την τιμή της παραμόρφωσης που επικρατούσε την στιγμή αυτή στο δοκίμιο. Τα διαγράμματα αυτά είχαν ενδιαφέρον γιατί χώριζαν την περιοχή σε δύο ζώνες, τη ζώνη επιτυχούς διαμόρφωσης κάτω από την καμπύλη και τη ζώνη αστοχίας πάνω από την καμπύλη και ζωτικό για τις διαμορφώσεις βαθείας κοιλάνσεως.

Τα διαγράμματα FLD αποτελούν μια από τις πρωταρχικές μεθόδους καθορισμού των ορίων μορφοποίησης στα ελάσματα. Το μειονέκτημα των διαγραμμάτων αυτών όμως, είναι ότι ισχύουν μόνο για την περίπτωση αναλογικής φόρτισης, δηλαδή υπό την επιβολή σταθερού λόγου παραμορφώσεων στο επίπεδο του ελάσματος. Οι εργασίες των Ghosh και Laukonis [1976] καθώς και των Graf και Hosford [1993] έδειξαν ότι για μη αναλογική φόρτιση, που είναι και το σύνηθες στις εφαρμογές, τα όρια μορφοποίησης που προβλέπουν τα διαγράμματα FLD μεταβάλλονται, καθιστώντας έτσι την χρήση τους μη πρακτική. Ένας απλός τρόπος για την λύση του προβλήματος αποτελεί η δημιουργία διαγραμμάτων που θα περιγράφουν τα όρια μορφοποίησης των ελασμάτων στο χώρο των κυρίων τάσεων και όχι στον χώρο των κυρίων παραμορφώσεων κάτι όμως που ξεφεύγει από τα πλαίσια της παρούσης εργασίας.

Από μία πρακτική σκοπιά μπορεί να πεί κάποιος ότι ο προσδιορισμός του διαγράμματος FLD ενός υλικού προς διαμόρφωση, συνισφέρει τα μέγιστα στην εξοικονόμηση κόστους αλλά και χρόνου στην εφαρμογή της εκάστοτε κατεργασίας του.



Σχήμα 5.5 : Διάγραμμα FLD όπου παρατηρούνται η καμπύλη FLC καθώς και οι περιοχές της διαμόρφωσης σε έκταση (stretch forming) , διαξονικής έντασης (uniaxial tensile) και βαθείας κούλιανσης (deep drawing).

5.5 Χρησιμοποιούμενα υλικά

Παρακάτω, για λόγους πληρότητας, γίνεται μία μικρή αναφορά στα χρησιμοποιούμενα υλικά, τις ιδιότητες τους αλλά και τις χρήσεις για τις οποίες γίνονται κατεργασίες διαμόρφωσης στα μέταλλα αυτά.

Αλουμίνιο

Το αργίλιο ή αλουμίνιο (Al) είναι ένα αργυρόλευκο μεταλλικό στοιχείο. Είναι το πιο άφθονο μέταλλο στο φλοιό της Γης και συνολικά το τρίτο πιο άφθονο χημικό στοιχείο συνολικά στον πλανήτη μας, μετά το οξυγόνο και το πυρίτιο. Ωστόσο είναι πολύ δραστικό χημικά ώστε να βρίσκεται στη φύση ως ελεύθερο μέταλλο. Η κύρια πηγή για τη βιομηχανική παραγωγή του μετάλλου είναι ο βωξίτης.

Εξαιτίας της σχετικά χαμηλής του πυκνότητας και της μεγάλης του ικανότητας να δημιουργεί μεγάλη ποικιλία κραμάτων με πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες, έγινε στρατηγικό μέταλλο για βιομηχανία. Οι ιδιότητες που κάνουν το αλουμίνιο τόσο σημαντικό για την βιομηχανία είναι το χαμηλό του ειδικό βάρος, η υψηλή αντοχή του σε μηχανικές καταπονήσεις και η εξαιρετική αντοχή του στη διάβρωση, η οποία οφείλεται στο φαινόμενο της παθητικοποίησης.

Κύριες χρήσεις οι οποίες περιέχουν διαμορφώσεις συναντώνται στην αεροναυπηγική , στην αυτοκινητοβιομηχανία, στις σωληνώσεις αλλά και πολύ πιο προσιτά παραδείγματα όπως τα κουτιά για αναψυκτικά και σκευη κουζίνας.

Χαλκός

Ο χαλκός (Cu) είναι κοκκινωπό μεταλλικό στοιχείο. Σύμφωνα με τους αρχαιολόγους ο χαλκός είναι το πρώτο από τα μέταλλα που χρησιμοποίησε ο άνθρωπος για την κατασκευή σκευών, εργαλείων και όπλων. Εκτιμάται ότι ο χαλκός έγινε γνωστός περίπου το 9.000 π.Χ., πιθανόν επειδή απαντάται σε καθαρή μορφή. Το αγγλικό του όνομα *copper* προκύπτει από το λατινικό *Cuprum*, λέξη η οποία με τη σειρά της προέρχεται από το νησί της Κύπρου, όπου και εξορυσσόταν κατά την ρωμαϊκή εποχή.

Η βιομηχανία ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών ειδών κάνει ευρεία χρήση χαλκού, από τον οποίο κατασκευάζει πάσης φύσεως αγωγούς (καλώδια), ηλεκτρονικά εξαρτήματα, όπως πλακέτες τυπωμένων κυκλωμάτων, πηνία, ηλεκτρομαγνήτες πάσης φύσεως για ηλεκτροκινητήρες και γεννήτριες κτλ. Χρησιμοποιείται, επίσης, στις κατασκευές κυματοαγωγών.

Στην κατασκευή κτιρίων χρησιμοποιείται για στέγες και σωληνώσεις. Είναι βασικό συστατικό στην κατασκευή κεραμάτων.

Ορείχαλκος

Ο ορείχαλκος είναι κράμα χαλκού–ψευδαργύρου που χρησιμοποιείται από την ελληνιστική εποχή μέχρι τις ημέρες μας. Η περιεκτικότητα του ορείχαλκου σε ψευδάργυρο καθορίζει και τις ιδιότητες του μετάλλου. Για περιεκτικότητα σε ψευδάργυρο έως και 35% κ.β. περίπου, η φάση που δημιουργείται είναι ο α -Cu, δηλ. ένα στερεό διάλυμα Zn εντός Cu. Για περιεκτικότητα 32–39% κ.β. Zn, η φάση α συνυπάρχει με την φάση β , ενώ για περιεκτικότητα μεγαλύτερη από 39% κ.β. Zn δημιουργείται και η φάση γ , που είναι εύθραυστη.

Το χρώμα του ορείχαλκου αλλάζει επίσης αναλόγως με την περιεκτικότητά του σε ψευδάργυρο. Όταν η περιεκτικότητα σε ψευδάργυρο είναι χαμηλή, ο ορείχαλκος έχει ένα καφεκόκκινο χρώμα που πλησιάζει το κεραμιδί χρώμα του χαλκού. Για περιεκτικότητα σε Zn περίπου 30% κ.β., ο ορείχαλκος έχει το χρώμα του χρυσού, αλλά, για ακόμα πιο υψηλή περιεκτικότητα σε Zn, το χρώμα του γίνεται και πάλι καφεκόκκινο.

Οι ορείχαλκοι με $Zn < 35\%$ κ.β. (*ορείχαλκοι α*) παρουσιάζουν καλή μηχανική αντοχή και καλή αντοχή στην διάβρωση. Οι ορείχαλκοι με $32\% \text{ κ.β.} < Zn < 39\% \text{ κ.β.}$ (*ορείχαλκοι $\alpha+\beta$*) έχουν ακόμα καλύτερη μηχανική αντοχή, μεγαλύτερη ελαστικότητα και μεγαλύτερη ολκιμότητα, αλλά κάπως μειωμένη αντοχή στην διάβρωση σε σύγκριση με τους ορείχαλκους α . Οι ορείχαλκοι με $Zn > 39\% \text{ κ.β.}$ (*ορείχαλκοι β*) παρουσιάζουν μεγάλη μηχανική αντοχή, αλλά είναι ευκατέργαστοι μόνον εν θερμώ· σε χαμηλές θερμοκρασίες έχουν μικρή ολκιμότητα.

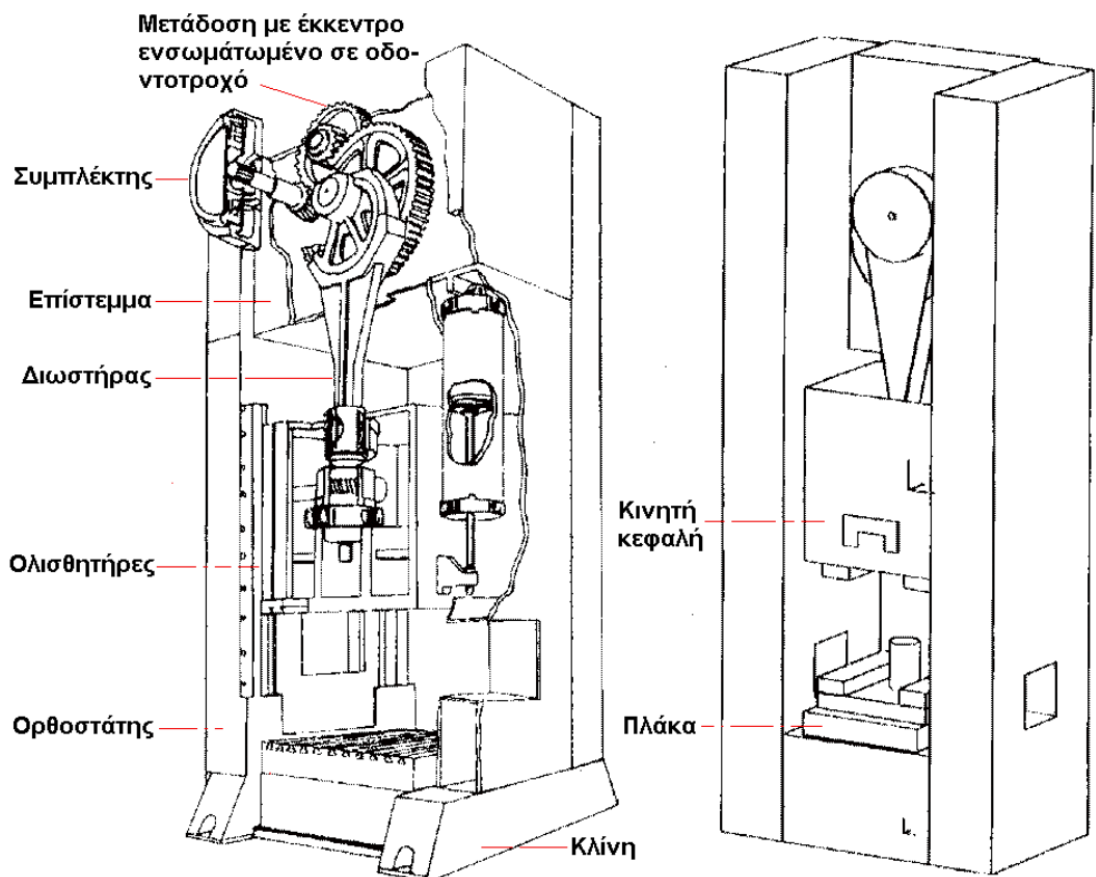
Ο ορείχαλκος χρησιμοποιείται σε πάρα πολλές εφαρμογές: στην παραγωγή βαλβίδων και τριβείων (ρουλεμάν), στην παραγωγή σωλήνων χωρίς ραφή και άλλων εξαρτημάτων ύδρευσης, στην κατασκευή όπλων και εξαρτημάτων μηχανών, στην κατασκευή πνευστών μουσικών οργάνων, κ.ά.

6. Πειραματικό μέρος

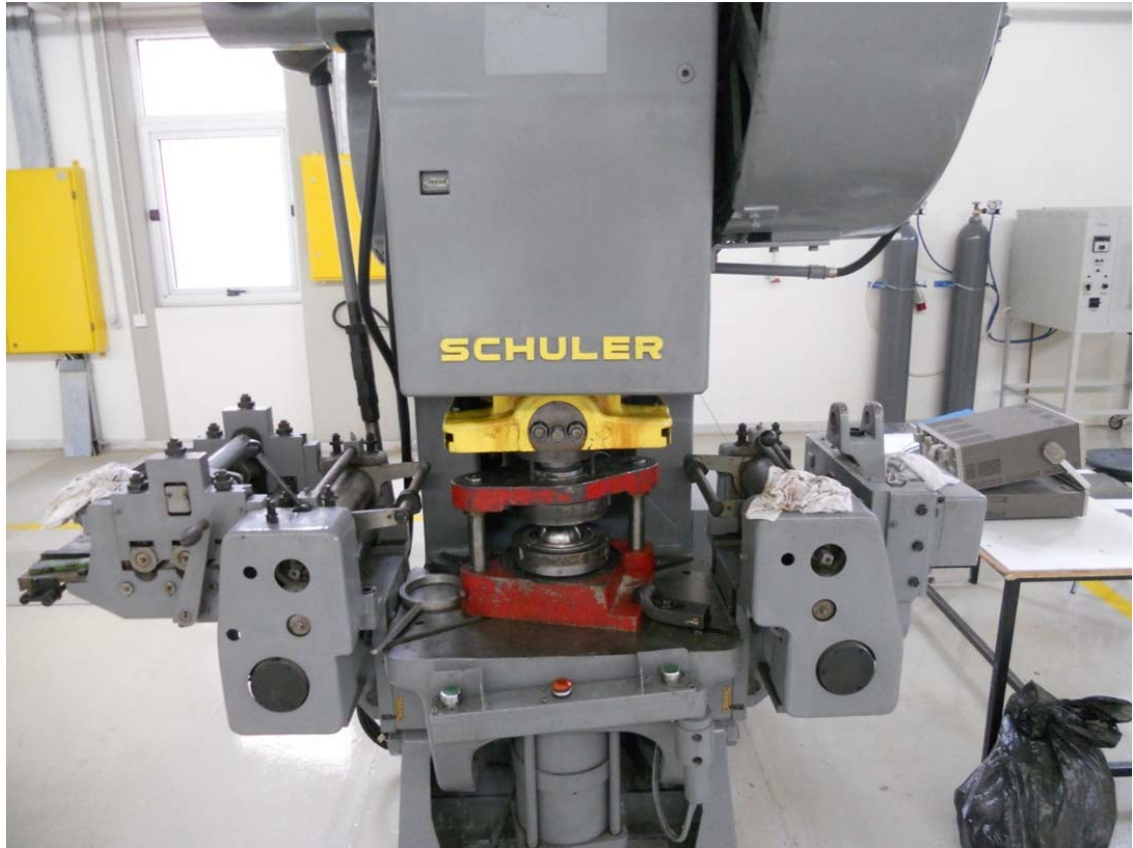
6.1 Πειραματικός εξοπλισμός

Στο σημείο αυτό θα αναφερθούν τα χρησιμοποιούμενα εργαλεία και υλικά που χρειάστηκαν για την διεξαγωγή της πειραματικής διαδικασίας.

Το κύριο εργαλείο της πειραματικής διαδικασίας είναι μία κάθετη μηχανική πρέσα «Schuler» ονομαστικού φορτίου 63 tn. Πρόκειται για πρέσα ανοικτού κατακόρυφου πλαισίου (τύπου C). Η διαθέσιμη ενέργεια εξασφαλίζεται από τον Η/Κ της μέσω σφονδύλου που περιστρέφεται συνεχώς και συμπλέκεται κατάλληλα με το σύστημα μετάδοσης κίνησης στην κινητή κεφαλή, προσδίδοντας σ' αυτή την αναγκαία κινητική ενέργεια για την εκτέλεση της κατεργασίας. Η κίνηση στην κινητή κεφαλή καθίσταται δυνατή με χρήση μηχανισμού διωστήρα-στροφάλου.



Σχήμα 6.1 : Τα κύρια μέρη και η διάταξή τους στη μηχανική πρέσα



Σχήμα 6.2 : Φωτογραφική αποψη πρέσας Schuler του εργαστηρίου

Επάνω στην πρέσα διαμορφώνεται κατάλληλα η διάταξη της κατεργασίας. Αυτή αποτελείται από το έμβολο το οποίο και προσαρμόζεται στην κάτω πλάκα της πρέσας , τη μήτρα η οποία και αυτή προσαρμόζεται καταλληλα στο κάτω μέρος , τα δαχτυλίδια συγκράτησης των δοκιμίων , την άνω πλάκα διαμόρφωσης η οποία και βιδώνεται στην πάνω πλάκα της πρέσας και το εξωτερικό δαχτυλίδι το οποίο και συγκατεί την όλη διάταξη. Η διάμετρος του εμβόλου είναι 100 mm , η διάμετρος που διαμορφώνεται το δοκίμιο (χείλος συγκράτησης) είναι 120 mm και η εσωτερική διάμετρος της άνω πλάκας είναι 104 mm. Η κάθετη διαδρομή του εμβόλου είναι 35 mm.



Σχήμα 6.3 : Φωτογραφική άποψη της διάταξης της καταργασίας , τοποθετημένης στην πρέσα



Σχήμα 6.4 : Φωτογραφική άποψη της μήτρας. Διακρίνονται το χείλος και τα δακτυλίδια συγκράτησης

Για την αποτύπωση του πλέγματος στα δοκίμια χρησιμοποιήθηκαν τα εξής χημικά : γαλάκτωμα «work» , εμφανιστής «eukobrom» και στερεωτής «superfix plus». Η διαδικασία θα περιγραφεί αναλυτικά στο κεφάλαιο 6.3.



Σχήμα 6.5 : Τα χρησιμοποιούμενα χημικά για την αποτύπωση του πλέγματος

Το κόψιμο των τεμαχίων σε ορθογώνιες λωρίδες, γίνεται με ειδικό κοπτικό εργαλείο σταθερής έδρασης, που αποτελείται από έναν κινητό βραχίονα κινούμενο από πίεση αέρα που φέρει και την κοφτερή όψη.

Η εξέταση των παραμορφωμένων δοκιμίων για την μέτρηση των παραμορφώσεων έγινε με τη χρήση οπτικού μικροσκοπίου το οποίο έχει διμορφωμένη διάταξη για την μέτρηση αποστάσεων έως 40 mm.



Σχήμα 6.6 : Φωτογραφική άποψη μικροσκοπίου εργαστηρίου κατά την μέτρηση των παραμορφώσεων

6.2 Δοκίμια

Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν κόπηκαν με το ανφερθέν στην παράγραφο 6.1 κοπτικό εργαλείο στο εργαστήριο του Ε.Μ.Π. Συνολικά κόπηκαν 30 δοκίμια , 10 απο κάθε υλικό. Ετσι έχουμε 10 δοκίμια κράματος αλουμινίου , 10 χαλκού και 10 ορείχαλκου. Ολα τα

δοκίμια έχουν σταθερό μήκος ίσο με 180 mm και μεταβλητό πλάτος που παίρνει τις τιμές 25,50,75,120 και 150 mm. Σε κάθε υλικό έχουμε δύο πεντάδες δοκιμών μεταβλητού πλάτους με δύο διαφορετικά πάχη 1 και 2 mm.

Η ακρίβεια των διαστάσεων ήταν πολύ καλή και δεν παρατηρήθηκαν ελατώματα στις γωνίες περ αν ένα δυο δοκιμών. Ακόμα τα δοκίμια δεν έφεραν καμία επιφανειακή ανωμαλία και είχαν αρκετά καθαρή επιφάνεια.

Από τα ίδια ελάσματα κόπηκαν λωρίδες 15 mm για την διεξαγωγή πειράματος μονοαξονικού εφελκυσμού απο το οποίο εξάγονται διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης τα οποία και καθορίζουν τις διάφορες τιμές μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν αργότερα στη διαδικασία της μοντελοποίησης.

Τέλος μετρήθηκε η πυκνότητα των υλικών στο εργαστήριο και έγινε χρήση των τιμών αυτών κατα τη μοντελοποίηση.

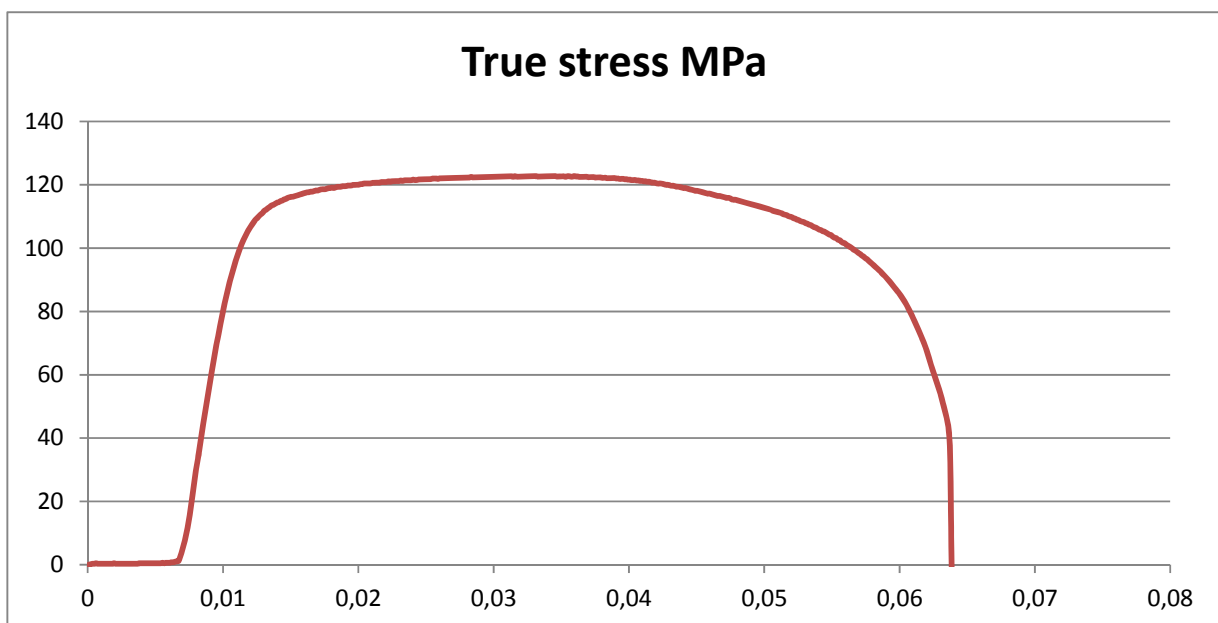


Σχήμα 6.7 : Φωτογραφική άποψη δοκιμής μονοαξονικού εφελκυσμού στο εργαστήριο για την εξαγωγή των καμπυλών σ - ϵ

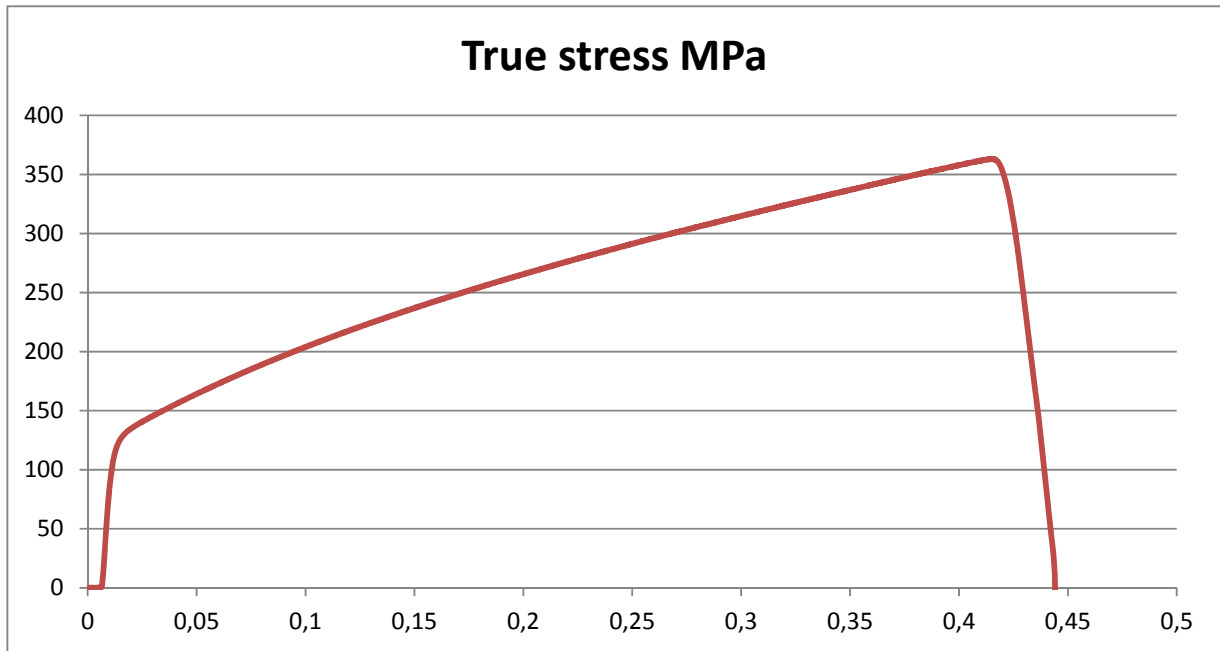


Σχήμα 6.8 : Φωτογραφική άποψη δοκιμίου χαλκού πριν και μετά κατα τη διεξαγωγή του μονοαξονικού εφελκυσμού

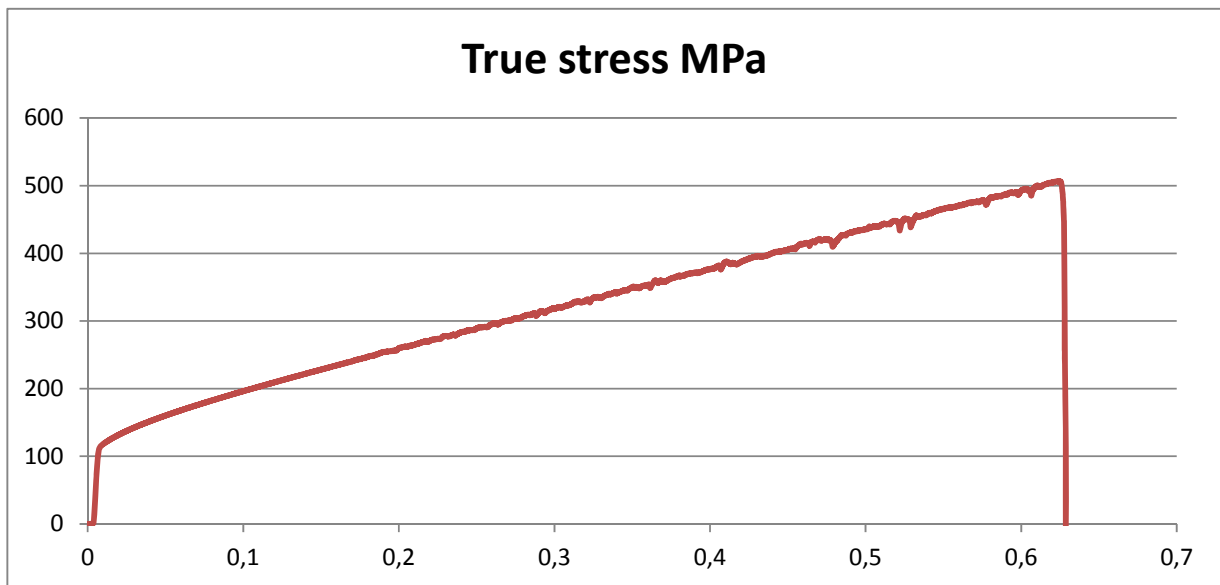
Παρακάτω παρατίθενται οι καμπύλες σ - ϵ που προέκυψαν από το πείραμα.



Σχήμα 6.9 : Καμπύλη σ - ϵ για το κράμα αλουμινίου



Σχήμα 6.10 : Καμπύλη σ-ε για το χαλκό



Σχήμα 6.11 : Καμπύλη σ-ε για τον ορείχαλκο

6.3 Αποτύπωση πλέγματος στα δοκίμια

Σε όλα τα δοκίμια για τη μέτρηση των παραμορφώσεων για την δημιουργία των διαγραμμάτων FLD έπρεπε να αποτυπωθεί ένα πλέγμα από εφαπτόμενους κύκλους ίσης ακτίνας.

Επιλέχθηκε για την αποτύπωση αυτή να χρησιμοποιηθεί η φωτοχημική μέθοδος. Η αρχή της μεθόδου είναι σχετικά απλή και ακολουθεί τη λογική της φωτογραφικής εκτύπωσης. Με τη χρήση ειδικού γαλακτώματος φτιάχνουμε ένα φωτοευαίσθητο φιλμ πάνω στην επιφάνεια που θέλουμε. Στη συνέχεια τοποθετούμε την επιφάνεια μας κάτω από ένα ισχυρό φως αφού έχουμε παρεμβάλει ανάμεσα ένα αρνητικό με το προς αποτύπωση σχέδιο. Στη συνέχεια με την χρήση ειδικών χημικών αποτυπώνουμε και σταθεροποιούμε το σχέδιο. Η μέθοδος λαμβάνει χώρα σε σκοτεινό θάλαμο.

Αναλυτικά τώρα η διαδικασία είχε τα παρακάτω βήματα που επαναλαμβάνονταν για κάθε δοκίμιο.

Καθαρισμός δοκιμίου

Το δοκίμιο πλένεται με χρήση κοινού υγρού πιάτων για την απομάκρυνση κάθε λιπαρής ουσίας από την επιφάνεια του με μαλακό σφουγγαράκι σε νερό βρύσης. Στη συνέχεια στεγνώνεται με πιστολάκι και καθαρίζεται εκ νέου με χρήση καθαρού οινοπνεύματος. Ο καθαρισμός γίνεται με γάντια για την αποφυγή της λιπαρότητας των χεριών.

Προθέρμανση δοκιμίου

Το δοκίμιο τοποθετείται στο φούρνο για λίγη ώρα μέχρι να φτάσει τους 40°C περίπου. Αυτό γίνεται για να είναι σε κοινή θερμοκρασία με το γαλάκτωμα και να μην υπάρχει θερμικό σοκ του γαλακτώματος με το που θα έρθει σε επαφή με την επιφάνεια του δοκιμίου. Στο φούρνο το δοκίμιο πατά σε ειδικά τοποθετημένες πατούρες για να έχει τη λιγότερη δυνατή επαφή με τα τοιχώματα αφού προηγουμένος έχει σχολαστικά καθαριστεί.

Φωτοευαίσθητο γαλάκτωμα

Από αυτή τη στιγμή και ύστερα πρέπει να δουλέψουμε σε σκοτεινό θάλαμο ο οποίος να έχει και βρύση. Παρόλα αυτά μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε λάμπες μονοχρωματικού κοκκινού φωτός καθώς δεν αλλοιώνουν το αποτέλεσμα. Στο προθερμασμένο δοκίμιο και από

την πιά λεία πλευρά του γίνεται επάλειψη με τη χρήση πινέλου ενός πολύ λεπτού στρώματος απο ένα ειδικό φωτοευαίσθητο γαλάκτωμα με την εμπορική ονομασία «work». Το γαλάκτωμα σε θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι στερεό. Πρέπει λοιπόν να θερμανθεί για να γίνει εργάσιμο.

Αφού λοιπόν διαστρωθεί καλά και ισοπάχως το γαλάκτωμα με τη χρήση πινέλου, το δοκίμιο αφήνεται να στεγνώσει. Ωστόσο η διαδικασία επιταχύνεται με τη χρήση ψυχρού αέρα απο πιστολάκι. Το στεγνώμα διαρκεί κάποια λεπτά και αφού έχει τελειώσει προσεκτικά το τοποθετούμε κάτω απο την λάμπα.

Εκθεση στο φώς

Τοποθετούμε λοιπόν το δοκίμιο πάνω σε ένα καλά καθαρισμένο τζάμι που βρίσκεται κάτω από την λάμπα. Γίνεται χρήση πολύ ισχυρής λάμπας η οποία είναι τοποθετημένη σε μικρή απόσταση απο τον πάγκο. Πάνω στο δοκίμιο τοποθετούμε το αρνητικό (φίλμ) το οποίο έχει το πλέγμα που θα αποτυπωθεί και σκεπάζουμε με ένα δεύτερο επίσης καλά καθαρισμένο τζάμι. Ανάβουμε την λάμπα για 10 λεπτά. Μετά το πέρας του χρόνου προσεκτικά αφαιρούμε τζάμι και αρνητικό.

Εμφανιστής

Στη συνέχεια και μόνο με τη ύπαρξη της κόκκινης λάμπας εμβαπτίζουμε το δοκίμιο στο διάλυμα του εμφανιστή. Εμπορική ονομασία «Eukobrom». Χρησιμοποιείται σε υδατικό διάλυμα 1+7 και σε θερμοκρασία 20°C. Το δοκίμιο μένει στο διάλυμα για 10 sec περίπου, ανάλογα με το πάχος του γαλακτώματος και το χρόνο έκθεσης στο φώς ο χρόνος μπορεί να αλλάξει.

Τερματισμός εμφάνισης

Για να τερματίσουμε τη διαδικασία της εμφάνισης τοποθετούμε το δοκίμιο κάτω απο τη βρύση για λίγα δευτερόλεπτα προσέχοντας ιδιέτερα καθώς το αποτυπωμένο πλέγμα δεν έχει ακόμα στερεοποιηθεί.

Στερεοποιητής

Μετά τον τερματισμό της εμφάνισης εμβαπτίζουμε το δοκίμιο στο διάλυμα του στερεοποιητή. Εμπορική ονομασία «Superfix Plus». Χρησιμοποιείται σε υδατικό διάλυμα 1+4

και σε θερμοκρασία 20°C. Το δοκίμιο αφού αρχικά ανακινηθεί μέσα στο διάλυμα αφήνεται για 3 με 4 λεπτά. Μετά το πρώτο λεπτό το φώς μπορεί να ανάψει.

Πλύσιμο

Το δοκίμιο αφού βγει από το διάλυμα του στερεοποιητή πρέπει να αφαιρεθεί κάτω από τρεχούμενο νερό για 10 λεπτά περίπου για να πλυθεί καλά.

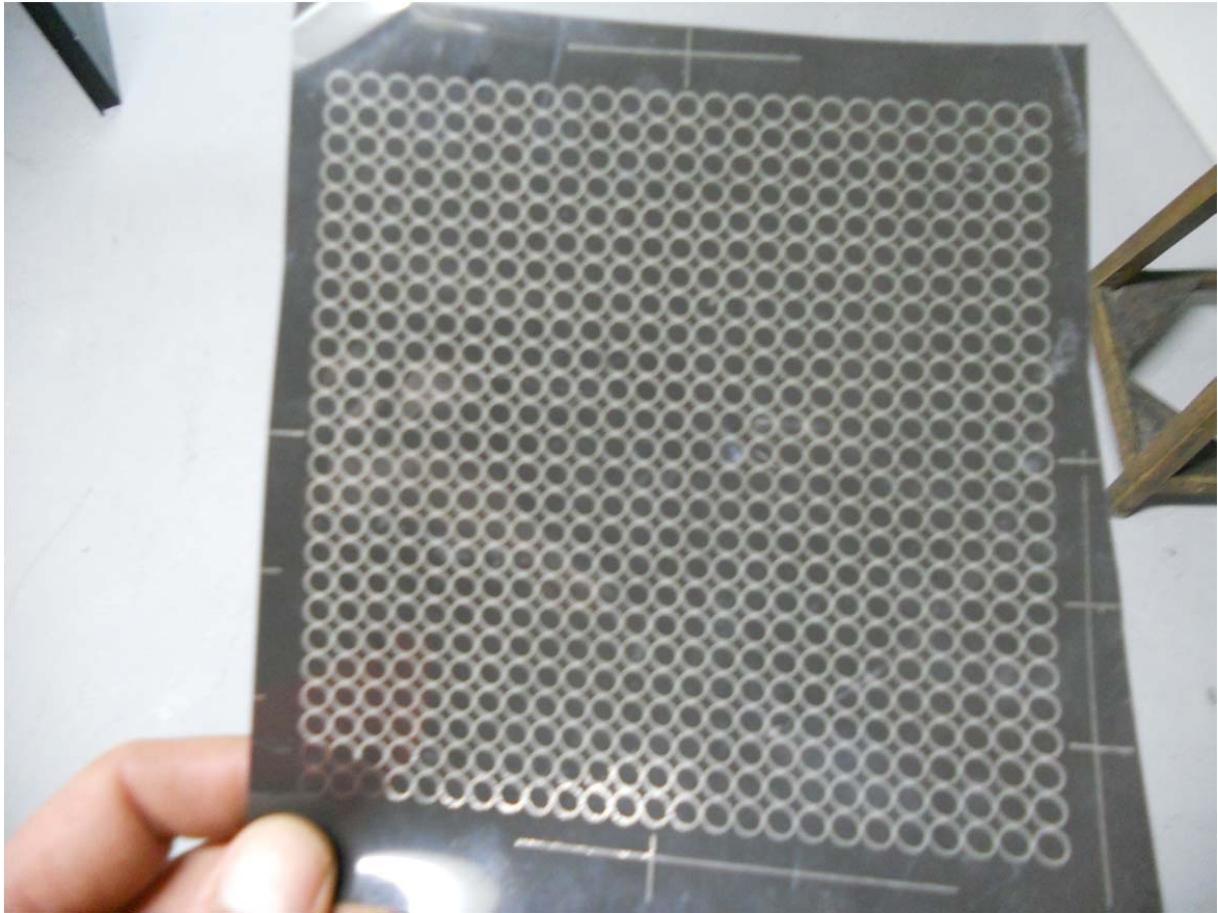
Στέγνωμα

Τέλος το δοκίμιο αφήνεται να στεγνώσει πλήρως ή εναλλακτικά στεγνώνεται με πιστολάκι και κρύο αέρα.

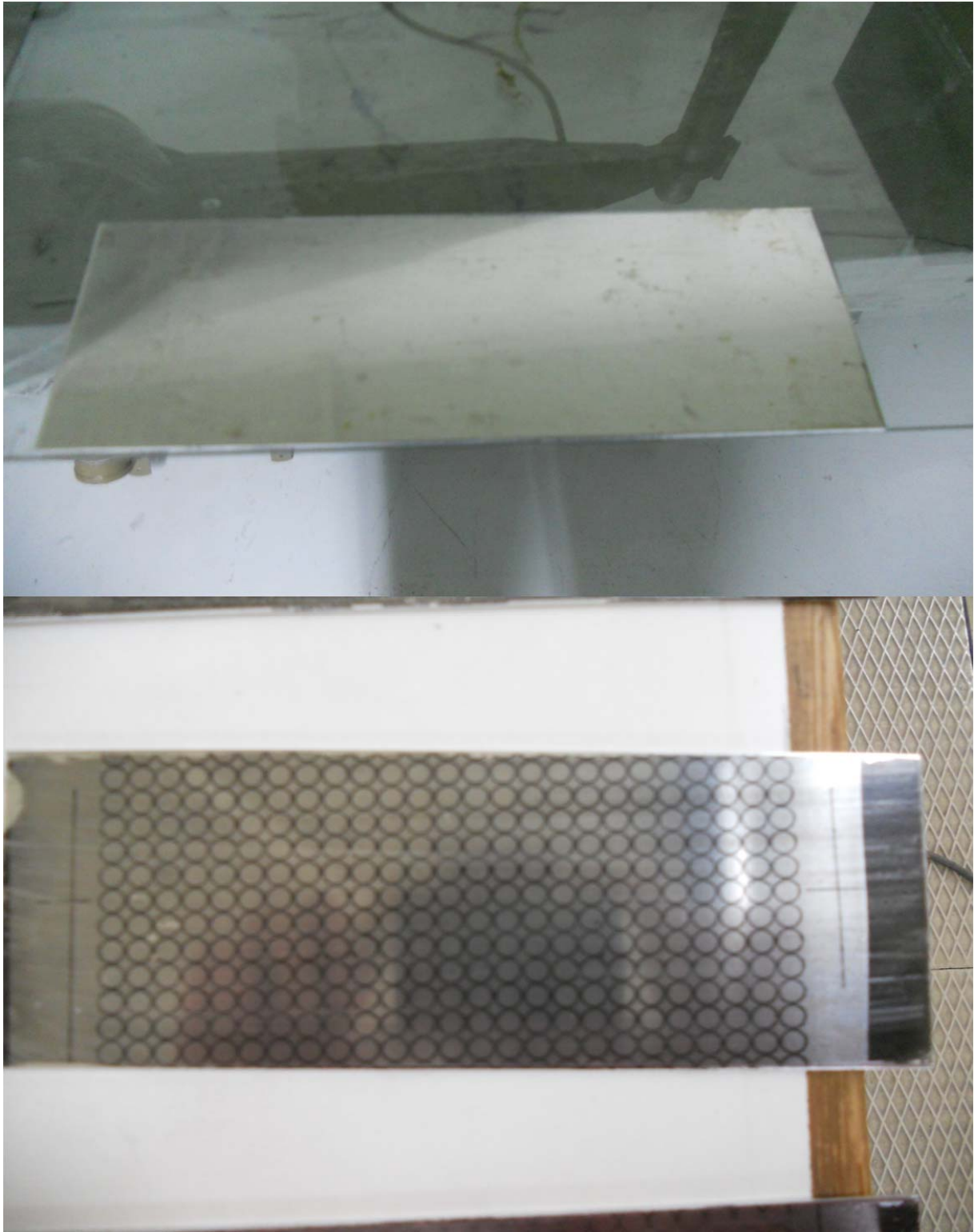
Πλέον το δοκίμιο έχει αποτυπωμένο το πλέγμα απο τη μια του πλευρά και είναι έτοιμο για την πρέσσα.



Σχήμα 6.12 : Φωτογραφική άποψη λάμπας έκθεσης. Αριστερά διακρίνονται οι λάμπες κόκκινου μονοχρωματικού φωτός.



Σχήμα 6.13 : Φωτογραφική άποψη του χρησιμοποιηθέντος φιλμ



Σχήμα 6.14 : Δοκίμιο κράματος αλουμινίου 180x50x1 mm πριν και μετά την αποτύπωση του πλέγματος

6.4 Διαξαγωγή πειράματος

Σε πρώτη φάση έγιναν αρκετά τον αριθμό δοκιμαστικά πειράματα σε δοκίμια για τον καθορισμό της συγκράτησης αλλά και για τον έλεγχο της διαδρομής του εμβόλου. Οι δοκιμές έγιναν και στα τρία υλικά για να φανεί η συμπεριφορά τους κατά την διαμόρφωση, σε περισσότερα από ένα προκαθορισμένα πλάτη καθώς και στα δυο πάχη. Αφού καθορίστηκαν αυτοί οι παράγοντες, η συγκράτηση έγινε με δακτυλίους για να μειωθεί το ύψος του χείλους και να μην υπάρχει αστοχία λόγω συγκράτησης και η διαδρομή του εμβόλου ορίστηκε στα 35 mm, μετά από μια σύντομη οπτική εξέταση για την αποφυγή τυχόντων ανωμαλιών λόγω της χρονικής διαφοράς των φάσεων του πειράματος, διαμορφώθηκαν τα δοκίμια που είχαν αποτυπωμένο το πλέγμα. Το δοκίμιο τοποθετείται με την πλευρά του αποτυπωμένου πλέγματος έτσι ώστε αυτή να μην έρχεται σε επαφή με το έμβολο για την αποφυγή καταστροφής του πλέγματος.

Οι συνθήκες είναι τυπικές, έχουμε δηλαδή 23 °C και σχετική υγρασία 50-60%. Στα δοκίμια δεν έγινε χρήση λίπανσης, ακολουθήθηκε η διαδικασία του dry stretching.

Τα παραμορφωμένα δοκίμια άρα και πλέγματα εξετάστηκαν με τη χρήση οπτικού μικροσκοπίου για την μέτρηση των παραμορφώσεων. Στα κρίσιμα σημεία μετρήθηκαν η μέγιστη και η ελάχιστη παραμόρφωση για την δημιουργία των διαγραμμάτων FLD όπως αναφέρεται και στην παράγραφο 5.4.



Σχήμα 6.15 : Δοκιμαστικές διαμορφώσεις για τον καθορισμό της συγκράτησης



Σχήμα 6.16 : Δοκίμιο που αστόχησε λόγω συγκράτησης



Σχήμα 6.17 : Δοκίμια χαλκού πάχους 2 mm μετά τη διαμόρφωση



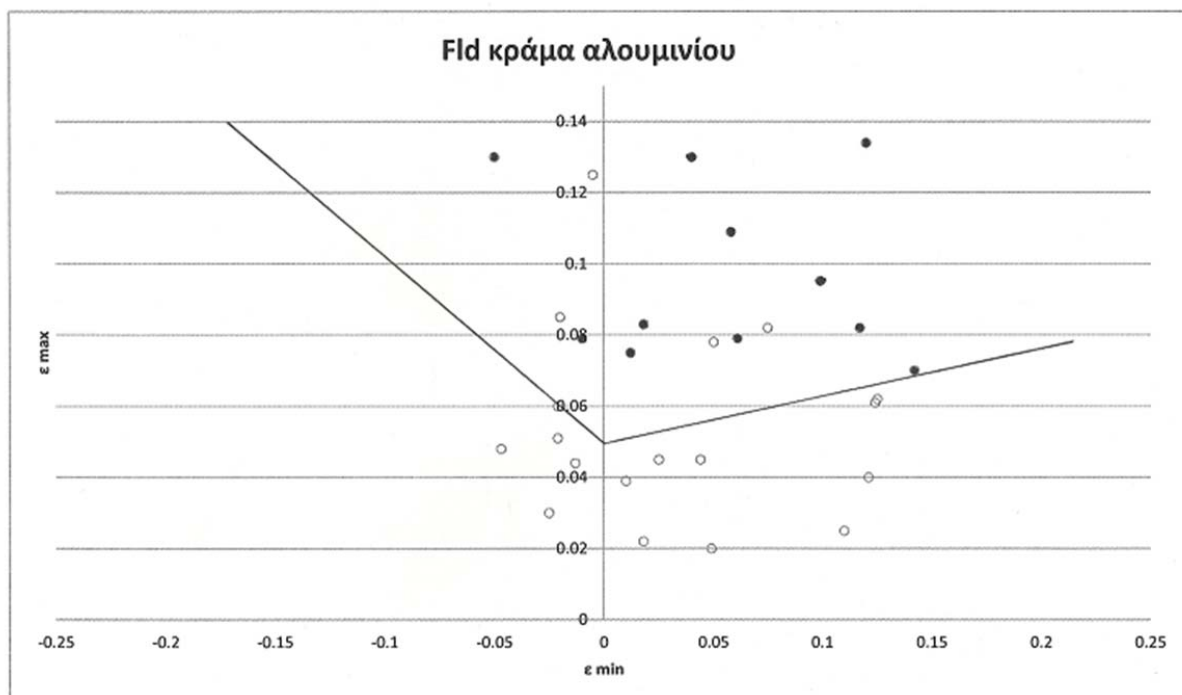
Σχήμα 6.17 : Δοκίμιο ορείχαλκου πάχους 1 mm μετά τη διαμόρφωση



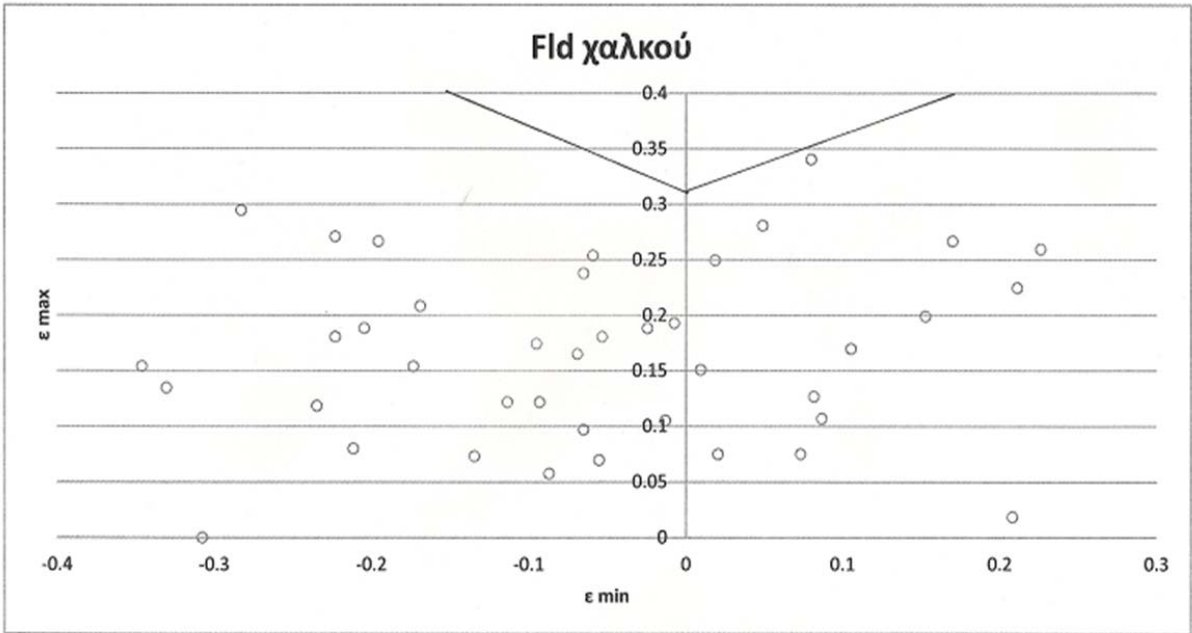
Σχήμα 6.18 : Δοκίμιο κράματος αλουμινίου μετά τη διαμόρφωση. Το δοκίμιο έχει αστοχήσει στο δεξιό μέρος και στο αριστερό έχει παρουσιαστεί λαιμός.

6.5 Πειραματικά αποτελέσματα

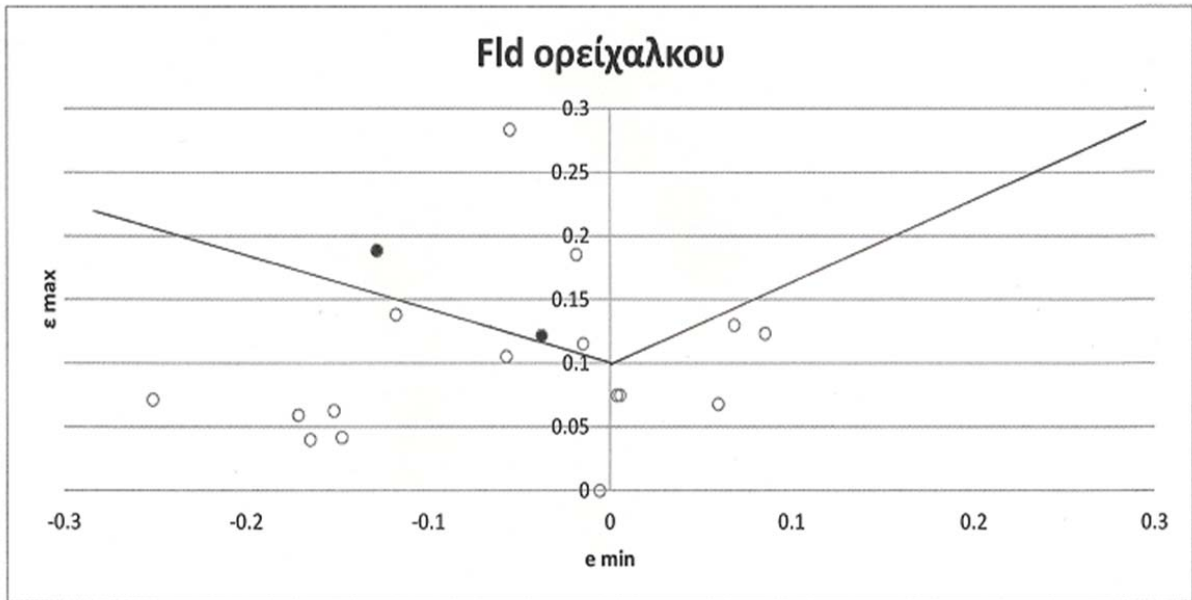
Από τις μετρήσεις στα παραμορφωμένα δοκίμια εξάγονται τα διαγράμματα FLD και η πειραματικά προσδιοριζόμενη καμπύλη FLC που παουσιάζονται παρακάτω για το κάθε υλικό. Στον άξονα των x απεικονίζεται η ελάχιστη παραμόρφωση ϵ_2 και στον άξονα των y η μέγιστη ϵ_1 . Με μαύρα σημεία απεικονίζονται τα δοκίμια που αστόχησαν.



Σχήμα 6.19 Fld για το κράμα αλουμινίου



Σχήμα 6.20 FId για το χαλκό



Σχήμα 6.21 FId για τον ορείχαλκο

7. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ

7.1 Τα πεπερασμένα στοιχεία

Η αναλυτική λύση των εξισώσεων με τις οποίες περιγράφονται τα διάφορα τεχνικά προβλήματα είναι δυνατή μόνο σε ειδικές περιπτώσεις, όπου οι καταπονήσεις και τα γεωμετρικά σχήματα είναι πάρα πολύ απλά. Έτσι, η ανάγκη να λυθούν τα πιο σύνθετα προβλήματα οδήγησε στην ανάγκη ανάπτυξης διάφορων προσεγγιστικών μεθόδων.

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων είναι μια αριθμητική μέθοδος για τον υπολογισμό προσεγγιστικών λύσεων μερικών διαφορικών εξισώσεων. Η μέθοδος είναι μεν προσεγγιστική, αλλά μπορεί να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα και έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα τα προβλήματα. Το μειονέκτημά της είναι οι αυξημένες απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ, ιδίως όταν εφαρμόζεται σε σύνθετα μοντέλα. Αυτό όμως το μειονέκτημα ξεπεράστηκε τα τελευταία χρόνια χάρη στη ραγδαία ανάπτυξη των υπολογιστών

Η μέθοδος αυτή είναι μία εξέλιξη των μητρωϊκών μεθόδων αριθμητικής επίλυσης διαφορικών εξισώσεων που έγινε από διάφορους σπουδαίους επιστήμονες όπως ο Ιωάννης Αργύρης, ο Clough, ο Ritz και άλλοι.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μία μέθοδος με την οποία ένα συνεχές σύστημα με άπειρους βαθμούς ελευθερίας προσεγγίζεται από ένα σύστημα στοιχείων με καθορισμένο αριθμό αγνώστων. Τα στοιχεία αυτά συνδέονται μεταξύ τους σε διακεκριμένα σημεία. Έτσι, τα πλέον πολύπλοκα προβλήματα φυσικής και μηχανικής μπορούν να προσεγγιστούν με συστήματα πεπερασμένου αριθμού εξισώσεων. Η μέθοδος προσεγγίζει την λύση με μία παραμετροποιημένη δοκιμαστική συνάρτηση. Αντικαθιστώντας στο πρόβλημα, επιλύονται οι προκύπτουσες εξισώσεις ελαχιστοποιώντας το ολοκλήρωμα του παραμένοντος σφάλματος ως προς τις παραμέτρους, έτσι ώστε να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή προσέγγιση.

7.2 Το λογισμικό LS-Dyna

Για τη πραγματοποίηση της μοντελοποίησης της διαμόρφωσης σε έκταση, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό LS-Dyna της εταιρίας Livermore Software Technology Corporation. Ο κώδικας LS-DYNA είναι ένας κώδικας πεπερασμένων στοιχείων για επίλυση μη γραμμικών συστημάτων σε αναλύσεις τρισδιάστατων μοντέλων και ενδείκνυται να χρησιμοποιείται στις περιπτώσεις μελετης δυναμικών φαινομένων.

Το λογισμικό LS-DYNA αποτελείται απο τρία τμήματα : το program manager , τους processors και τους solvers.

Το program manager είναι το αρχικό σημείο λειτουργίας του προγράμματος. Περιλαμβάνει σε γραφικό περιβάλλον παραθύρων όλα τα εργαλεία του προγράμματος καθώς και τα εγχειρίδια λειτουργίας αλλά και τα εργαλεία επεξεργασίας ενός αρχείου. Οι solvers του λογισμικού αποτελούν το σημαντικότερο τμήμα καθώς είναι αυτοί που πραγματοποιουν την ανάλυση. Υπάρχει δυνατότητα επιλογής στο πρόγραμμα διαφορετικού solver ανάλογα με την περίπτωση. Οι processors είναι τριων ειδών : ETA Pre-Processor , ETA Post-Processor και ETA Graph-Processor.

Στον Pre-Processor πραγματοποιείται η σχεδίαση και η μοντελοποίηση των τμημάτων της κατασκευης που πρόκειται να μελετηθεί. Πέρα από τη σχεδίαση, ορίζονται τα υλικά των διαφόρων τμημάτων, οι ιδιότητες τους, οι οριακές συνθηκες καθώς και οι επικρατούσες στις διεπιφάνειες συνθήκες. Στην ουσία πρόκειται για ένα περιβάλλον CAD το οποίο διαθέτει τα συνηθισμένα εργαλεία σχεδίασης αλλά και επιπλέον εργαλεία για τις ανάγκες της μοντελοποίησης.

Στον Post-Processor πραγματοποιείται η αναπαράσταση της διεργασίας που μελετάται, σε μορφη animation και λαμβάνονται ταυτόχρονα τα επιθυμητά αποτελέσματα τα οποία και επιλέγονται από μία λίστα που διαθέτει το λογισμικό.

Στον Graph-Processor παίρνονται τα αποτελέσματα σε μορφη γραφημάτων, ανάλογα με τις επιλογές και τις ανάγκες κάθε φορά του χειριστή του λογισμικού. Επιπλέον, είναι δυνατη η επεξεργασία των γραφημάτων για την εξαγωγή περισσότερων αποτελεσμάτων και συμπερασμάτων.

Κατά τη μοντελοποίηση και ανάλυση με χρήση του λογισμικού ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δοθεί στις χρησιμοποιούμενες μονάδες καθώς αυτές θα πρέπει να δίνονται στις μονάδες που έχει οριστεί το πρόγραμμα να λειτουργεί.

Μέγεθος	Μήκος	Μάζα	Χρόνος	Δύναμη	Τάση
Μονάδα	mm	gr	msec	N	MPa

Πίνακας 7.1 : Μονάδες που χρησιμοποιεί το λογισμικό LS-Dyna

7.3 Κατασκευή του μοντέλου

Έγινε προσπάθεια στο να κατασκευαστεί ένα όσο το δυνατό πιο απλό μοντέλο που θα μπορούσε να προσομοιάσει την κατεργασία της διαμόρφωσης σε έκταση ορθογωνικών δοκιμίων. Έτσι σχεδιάζονται μόνο τα απαραίτητα κομμάτια της κατεργασίας στην οποία γίνεται η μοντελοποίηση. Τα κομμάτια αυτά είναι το έλασμα , η μήτρα , το έμβολο και ο συγκρατητής.

Αρχικά μέσω της εντολής Part > Create Part, δημιουργούμε το κάθε τμήμα του μοντέλου. Παρατηρούμε ότι μέσω αυτής της εντολής καθορίζεται και το χρώμα που θα έχει αυτό το κάθε τμήμα. Χρησιμοποιώντας στη συνέχεια τις εντολές σχεδίασης, σχεδιάζουμε το κάθε κομμάτι του μοντέλου. Ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δίνεται κατά τη σχεδίαση ενός τμήματος στο σύστημα συντεταγμένων που είναι ενεργοποιημένο από το λογισμικό. Προκειμένου να είναι σωστή η σχεδίαση θα πρέπει το χρώμα των γραμμών του τεμαχίου που σχεδιάζουμε να είναι ίδιο με το χρώμα των δεικτών του συστήματος συντεταγμένων.

Part dokimio	Κίτρινο
Part embolo	Κόκκινο
Part mhtra	Πράσινο
Part sygkrathths	Μπλέ

Πίνακας 7.2 : Τα μέρη του μοντέλου και το χρώμα σχεδίασης τους

Οι διαστάσεις των δοκιμίων είναι (μήκος , πλάτος , πάχος) :

180x150x1	180x150x2
180x120x1	180x120x2
180x75x1	180x75x2
180x50x1	180x50x2
180x25x1	180x25x2

Το έμβολο σχεδιάζεται σαν ένα ημισφαίριο ακτίνας 50 mm. Η κορυφή του τοποθετήθηκε κατά την σχεδίαση στο σημείο (0,0,0) στο καθολικό σύστημα συντεταγμένων. Το ύψος σχεδιάστηκε στα 50 mm. Η κορυφή του εμβόλου εφάπτεται με το δοκίμιο.

Η μήτρα σχεδιάζεται σαν ένα κυλινδρικό τμήμα ακτίνας 60 mm το οποίο εφάπτεται στο κάτω μέρος του δοκιμίου. Η ακτίνα καμπυλότητας των χειλιών σχεδιάστηκε στα 5 mm.

Ο συγκρατητής είναι παρόμοιος με τη μήτρα με τη διαφορά ότι εφάπτεται στο πάνω μέρος του δοκιμίου. Οι διαστάσεις του ίδιες με αυτές της μήτρας.

7.4 Υλικά και ιδιότητές τους στο μοντέλο

Στο σημείο αυτό αναφέρονται τα υλικά και οι ιδιότητες κάθε τμήματος του μοντέλου. Τα στοιχεία που αποτελούν τη διάταξη της κατεργασίας χωρίζονται σε δυο βασικές ομάδες. Στη μία από αυτές ανήκουν ο συγκρατητής, η μήτρα και το έμβολο, τα οποία όλα θεωρούνται κατασκευασμένα από το ίδιο υλικό. Αντίθετα το δοκίμιο δεν θεωρείται από το ίδιο υλικό αλλά από άλλο στο οποίο προσδίδονται οι ιδιότητες του κάθε υλικού των δοκιμίων (κράμα αλουμινίου, χαλκός και ορείχαλκος).

Μέσω της εντολής Create A Material δημιουργούμε τα υλικά. Επιλέχθηκε το Material Type 39 για τα δοκίμια και το Material Type 20 για τη μήτρα, το συγκρατητή και το έμβολο. Στη συνέχεια μέσω του Prop > Create Property ορίζουμε τις ιδιότητες των υλικών.

Τα στοιχεία και οι ιδιότητες των υλικών δίδονται στους παρακάτω πίνακες :

Τμήμα μοντέλου: έλασμα	Κράμα αλουμινίου	Χαλκός	Ορείχαλκος
Αριθμός υλικού του LS-Dyna	Material Type 39	Material Type 39	Material Type 39
Mass Density	0,0027	0,0089	0,0085
Young Modulus	90000	110000	123000
Poisson Ratio	0,35	0,35	0,38
Yield Stress	110	130	117

Πίνακας 7.3 : Στοιχεία υλικών δοκιμίων στο μοντέλο, μονάδες g/mm^3 και MPa

Element Property Type	Shell
Element Formulation	Belytschko – Tsay
Shear Factor	1
NO. Of Int. Points	2
SETUP	1
Thickness At Node 1	1
Thickness At Node 2	1
Thickness At Node 3	1
Thickness At Node 4	1

Πίνακας 7.4 : Ιδιότητες υλικών δοκιμίων στο μοντέλο, μονάδες (thickness) mm

Στα δοκίμια πάχους 2 mm το thickness αλλάζει σε 2.

Τμήμα μοντέλου:	έμβολο	μήτρα	συγκρατητής
Αριθμός υλικού του LS-Dyna	Material Type 20	Material Type 20	Material Type 20
Mass Density	0,00783	0.00783	0.00783
Young Modulus	207000	207000	207000
Mass Constrain (CMO)	1	1	1
Local Coord.NO. (CON1)	4	7	7
SPC. NO. (CON2)	7	7	7

Πίνακας 7.5 : Στοιχεία υλικών εμβόλου , μήτρας και συγκρατητή στο μοντέλο , μονάδες gr/mm^3 και MPa

Element Property Type	Shell
Element Formulation	Belytschko – Tsay
Shear Factor	1
NO. Of Int. Points	2
SETUP	1
Thickness At Node 1	1
Thickness At Node 2	1
Thickness At Node 3	1
Thickness At Node 4	1

Πίνακας 7.6 : Ιδιότητες υλικών εμβόλου , μήτρας και συγκρατητή στο μοντέλο , μονάδες (thickness) mm

Είναι προφανές ότι η μήτρα , ο συγκρατητής και το έμβολο είναι πρακτικά απαραμόρφωτα συγκριτικά με τα δοκίμια. Αυτό στο σχεδιασμό μοντέλων επιτυγχάνεται με το να δίδεται στο απαραμόρφωτο υλικό πολύ μεγάλο μέτρο ελαστικότητας E. Παρακάτω γίνεται κάποιων από τις παραπάνω παραμέτρους.

Mass Constrain (CMO) : Η τιμή αυτής της παραμετρου καθορίζει το χώρο εφαρμογής των περιορισμών για τα εργαλεία. Στα δεδομένα των τριών τμημάτων έχει δοθεί η τιμή 1 ώστε οι περιορισμοί να εφαρμόζονται στο σύστημα των πολικών συντεταγμενων.

Local Coord.NO. (CON1) : Είναι η πρώτη παράμετρος των περιορισμών και καθορίζει σε ποιες κατευθύνσεις θα επιτρεπεται η μετατόπιση των τμημάτων των εργαλείων. Για το εμβολο η τιμή της είναι ίση με 4, περιορίζεται δηλαδή η κίνηση κατά τους άξονες x και y και επιτρεπεται μόνο η μετατόπιση κατά τον άξονα z. Για τη μήτρα και το συγκρατητή η τιμή της είναι ίση με 7, δηλαδή δεν επιτρεπεται η μετατόπιση σε κανένα απο τους τρεις άξονες.

SPC. NO. (CON2) : Είναι η δεύτερη παράμετρος των περιορισμών και καθορίζει σε ποιες κατευθύνσεις θα επιτρεπεται η περιστροφή των τμημάτων των εργαλείων. Η τιμή της είναι ίση με 7 και για τα τρία εργαλεία ώστε να μην επιτρεπεται η περιστροφή τους γύρω από τους άξονες x, y και z.

7.5 Δημιουργία πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων

Η δημιουργία του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων η λεγόμενη και διακριτοποίηση είναι το σημαντικότερο τμήμα μιας μοντελοποίησης. Το είδος των στοιχείων καθώς και η πυκνότητά τους επηρεάζει το αποτέλεσμα αλλά και το χρόνο που χρειάζεται το μοντέλο για να «τρέξει». Ανάλογα με το μελετούμενο πρόβλημα μπορεί να χρειασθεί να χρησιμοποιηθούν διαφορετικά είδη στοιχείων , δισδιάστατα ή τρισδιάστατα στοιχεία , τριγωνικά στοιχεία καθώς και άλλα ειδη στοιχείων. Στην περίπτωση που εξετάζουμε έγινε χρήση δισδιάστατων πεπερασμένων στοιχείων όπως αναφέρθηκε παραπάνω στην παράγραφο 7.4. Όσο

μεγαλύτερη είναι η πυκνότητα των πεπερασμένων στοιχείων τόσο καλύτερα προσεγγίζεται το αποτέλεσμα και ταυτόχρονα ελαστοποιείται το όποιο σφάλμα. Από την άλλη μεριά όμως τόσο πιο «βαρύ» γίνεται το μοντέλο και άρα χρειάζεται περισσότερο χρόνο για να «τρέξει» δηλαδή να εξαχθεί το αποτέλεσμα. Έτσι η σωστή επιλογή της πυκνότητας του πλέγματος πρέπει να αποτελεί ένα σωστό συγκερασμό.

Ενεργοποιώντας την εντολή Elem > Plate/Solid Mesh > 4 Line Mesh, ζητείται από το πρόγραμμα να οριστούν τέσσερις γραμμές για τη δημιουργία του πλέγματος. Η επιλογή των γραμμών αυτών θα πρέπει να γίνει με κυκλική φορά. Αφού επιλεγούν οι τέσσερις γραμμές του τετραγώνου ελασματος, ζητείται ο αριθμός των υποδιαιρέσεων κατά μήκος κάθε γραμμής. Επειδή, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω η υψηλή ανάλυση εξασφαλίζει πιο ακριβή αποτελέσματα, δίνεται τέτοια τιμή ώστε τα στοιχεία του ελάσματος να είναι τα μισά της διάστασης π.χ. 90 κατά το μήκος του ελασματος (180/2). Στη συνέχεια γίνεται αποδοχή του πλέγματος που προκύπτει και η διαδικασία έχει ολοκληρωθεί. Εφαρμόζοντας την ίδια ακριβώς διαδικασία, κατασκευάζονται και τα πλέγματα των άλλων τριών τμημάτων. Επειδή πρόκειται για τα εργαλεία της κατεργασίας, των οποίων δε μελετάται η συμπεριφορά, αρκεί να κατασκευαστεί πλέγμα χαμηλής ανάλυσης. Μετά τη δημιουργία των πλεγμάτων και των τεσσάρων τμημάτων, πραγματοποιείται η διαμόρφωση και ο έλεγχος των πλεγμάτων. Αρχικά ενεργοποιείται η εντολή Part > Parts On ώστε να εμφανιστούν όλα τα τμήματα στην επιφάνεια εργασίας. Στη συνέχεια ενεργοποιείται η εντολή Elem > Plate > Solid Mesh > Surface Mesh και επιλέγεται η δευτερεύουσα εντολή Select All Surfaces In Database. Επιλέγεται το μέγεθος του στοιχείου να είναι ίσο με 15 και γίνεται αποδοχή όλων των τιμών που προτείνει το πρόγραμμα. Στο τέλος γίνεται δεκτό το πλέγμα που προκύπτει. Ακολούθως, ελέγχεται η φορά των πεπερασμένων στοιχείων και το πλήθος των τυχαίων κόμβων που εμφανίζονται για κάθε τμήμα του μοντέλου ξεχωριστά όπως περιγράφεται παρακάτω.

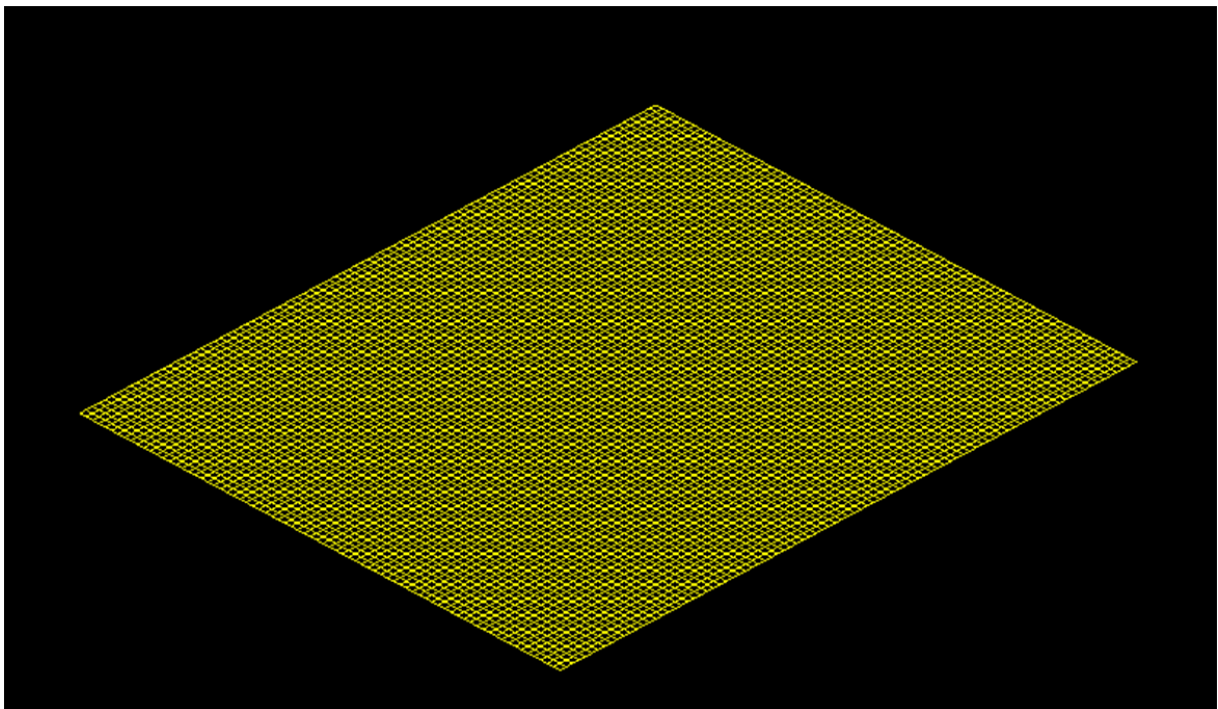
Έλεγχος του Πλέγματος του Επίπεδου Ελασματος

Μέσω της εντολής Part > Parts On/Off επιλέγεται το επίπεδο έλασμα ώστε να είναι το μοναδικό τμήμα που εμφανίζεται στην επιφάνεια εργασίας. Ενεργοποιώντας την εντολή Node > Check For Coincident Nodes, γίνεται έλεγχος για την παρουσία τυχαίων κόμβων και εάν εμφανιστούν τέτοιοι κόμβοι τότε ενεργοποιείται η εντολή Delete Unreferenced Nodes > All Unreferenced Nodes μέσω της οποίας σβήνονται. Στη συνέχεια με την ενεργοποίηση της

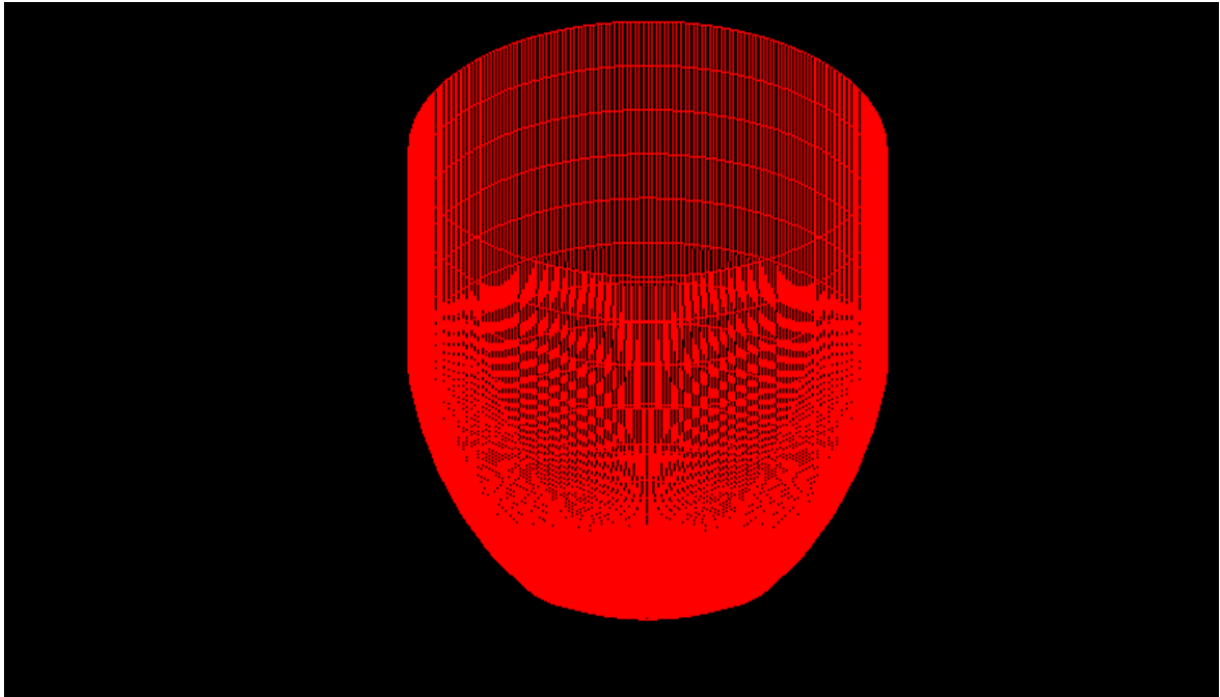
εντολής Check > Auto Plate Normal ελέγχεται η φορά των πεπερασμένων στοιχείων. Στο επίπεδο έλασμα η φορά των στοιχείων είναι προς τις θετικές τιμές του άξονα z. Εάν η φορά που δίνεται δεν είναι η επιθυμητή, μπορεί να μεταβληθεί μέσω συγκεκριμένης επιλογής που διαθέτει παραπάνω εντολή.

Έλεγχος του Πλέγματος των Εργαλείων

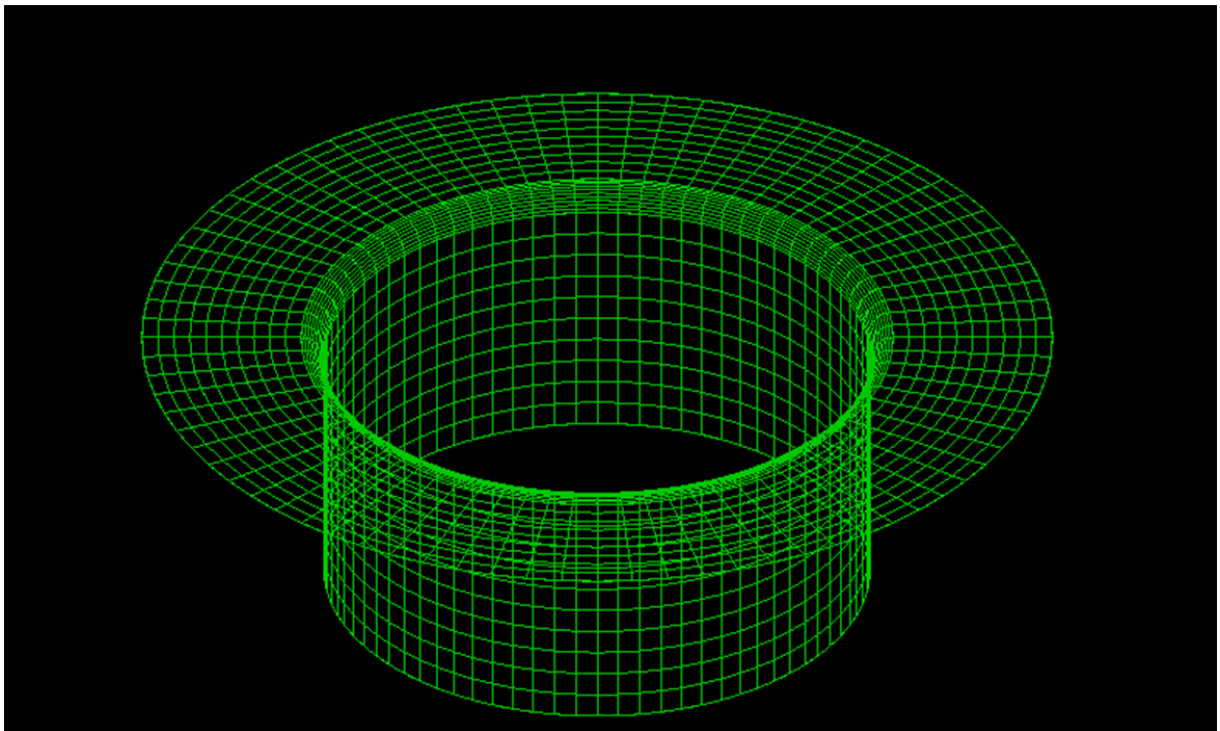
Επαναλαμβάνοντας τη διαδικασία που περιγραφηκε παραπάνω, πραγματοποιείται ο έλεγχος των πλεγμάτων των υπόλοιπων τριών τμημάτων, δηλαδή του εμβόλου, της μήτρας και του συγκρατητή. Το μοναδικό σημείο στο οποίο διαφοροποιείται η διαδικασία είναι στη φορά που επιλέγεται για τα πεπερασμένα στοιχεία. Έτσι η φορά για τα στοιχεία του εμβόλου επιλέγεται να είναι προς τα έξω, ενώ για τη μήτρα και το συγκρατητή προς τα μέσα.



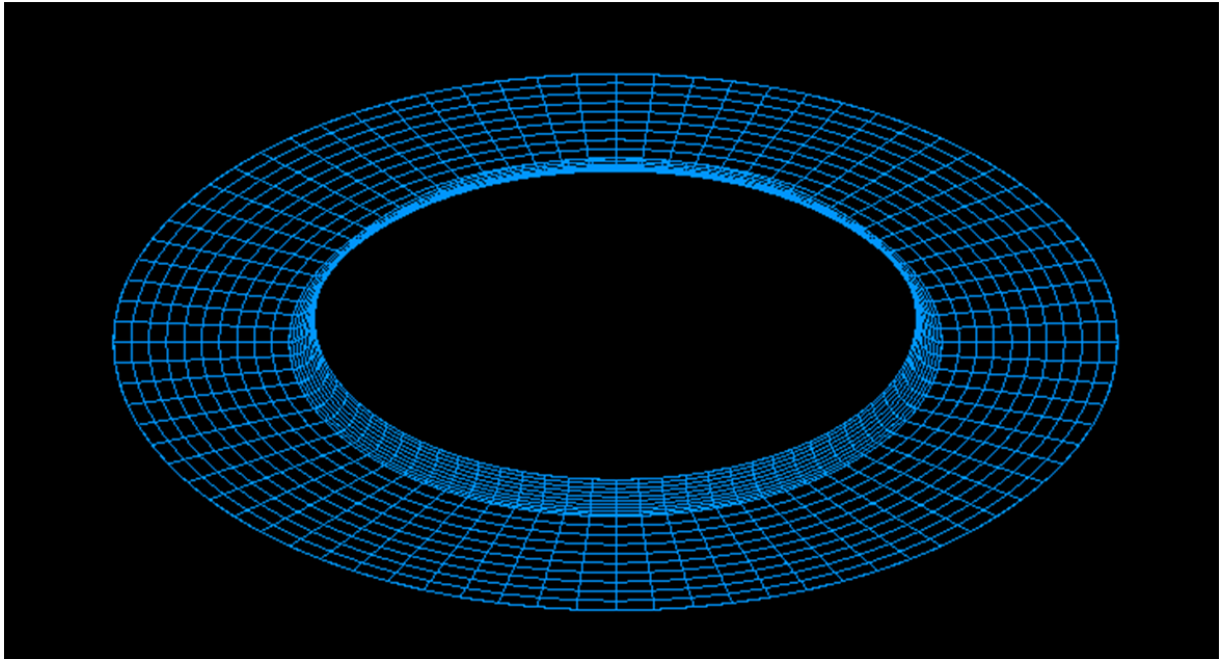
Σχήμα 7.7 : Το στοιχείο dokimio διακριτοποιημένο



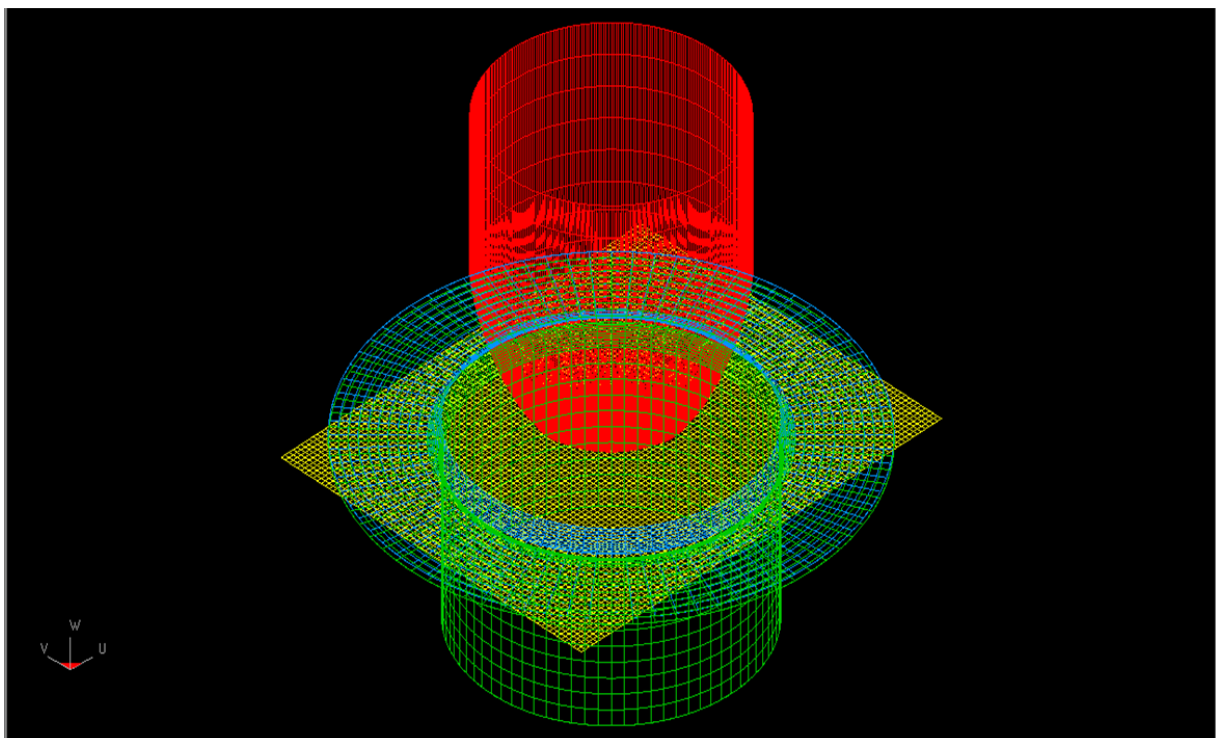
Σχήμα 7.8 : Το στοιχείο embolo διακριτοποιημένο



Σχήμα 7.9 : Το στοιχείο mhtra διακριτοποιημένο



Σχήμα 7.10 : Το στοιχείο sygkrathths διακριτοποιημένο



Σχήμα 7.11 : Ολόκληρη η διάταξη διακριτοποιημένη

7.6 Δημιουργία διεπιφανειών

Στο σημείο αυτό θα γίνει ο προσδιορισμός των συνθηκών επαφής στις διεπιφάνειες που δημιουργούνται στο μοντέλο. Μέσω των εντολών I.F. > Create Interface > Sliding και I.F. > Create Contact Segment > Master ορίζονται οι διεπιφάνειες.

Διεπιφάνεια	έμβολο - έλασμα	μήτρα - έλασμα	συγκρατητής-έλασμα
Contact Interface Type	Nodes to surface	Nodes to surface	Nodes to surface
Stat Coef Of Friction	0.1	0.1	0.1
Dyn Coef Of Friction	0.1	0.1	0.1
Master Segment	έμβολο	μήτρα	συγκρατητής
Slave Segment	έλασμα	έλασμα	έλασμα

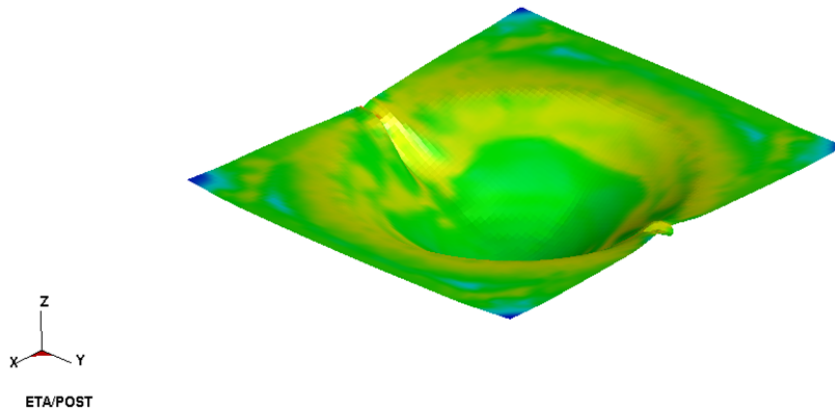
Πίνακας 7.12 : Συντελεστές διεπιφανειών

7.7 Δέσμευση κόμβων

Για να εξασφαλιστεί η συγκράτηση του δοκιμίου στο μοντέλο μπορεί να γίνει δέσμευση κόμβων. Στην ουσία είναι σαν να θεωρούμε κάποια σημεία του μοντέλου πακτωμένα κατά την διαδικασία της ανάλυσης. Για να μην υπάρξει ολίσθηση του δοκιμίου πρέπει τα σημεία του δοκιμίου τα οποία βρίσκονται έξω από την περιφέρεια της μήτρας να θεωρηθούν πακτωμένα. Η διαδικασία γίνεται μέσω της εντολής Set > Create > Node Set και επιλέγονται οι κόμβοι που θέλουμε. Η διαδικασία αυτή παρόλα αυτά δεν ακολουθήθηκε καθώς τα υλικά υπό εξέταση είναι μαλακά και το έμβολο δεν συναντά ιδιέταιρη αντίσταση. Σε δοκιμαστικό μοντέλο που έτρεξε με δέσμευση κόμβων δεν παρουσιάστην διαφορές στην δύναμη του εμβόλου και στις αναπτυσσόμενες τάσεις στο υλικό κατά τη διάρκεια της κατεργασίας. Διαφορά υπηρξε μόνο στη μετατόπιση του δοκιμίου αλλά σε γενικές γραμμές το συνολικό αποτέλεσμα δεν επηρεάζεται σημαντικά.

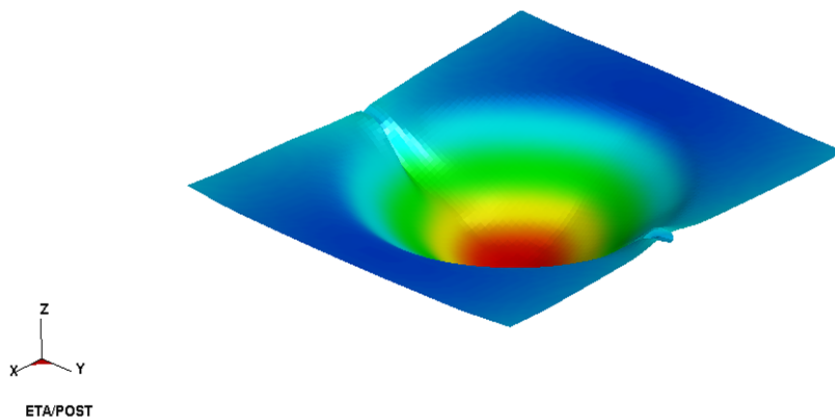
8. Ανάλυση μοντέλων

LS-DYNA USER INPUT
STEP 7 TIME: 1.000013
COMPONENT: Maximum Von Mises



194.764313
180.852570
166.940842
153.029099
139.117371
125.205627
111.293892
97.382156
83.470421
69.558685
55.646946
41.735210
27.823473
13.911736
0.000000
0

LS-DYNA USER INPUT
STEP 7 TIME: 1.000013
COMPONENT: Total-displacement

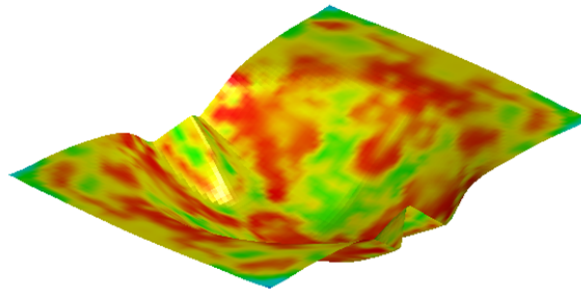


32.903355
30.553114
28.202875
25.852636
23.502396
21.152157
18.801916
16.451677
14.101438
11.751198
9.400958
7.050719
4.700479
2.350240
0.000000
0

Σχήμα 8.1 : Τάσεις – παραμορφώσεις στο τέλος της διαμόρφωσης για το κράμα αλουμινίου 180x150x2 mm

LS-DYNA USER INPUT
STEP 7 TIME: 1.000160
COMPONENT: Maximum Von Mises

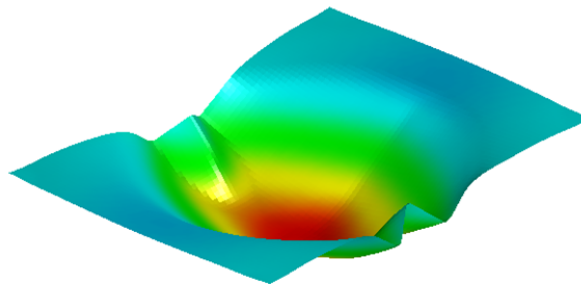
144.269943
133.964951
123.659950
113.354958
103.049957
92.744965
82.439972
72.134972
61.829975
51.524979
41.219986
30.914988
20.609993
10.304996
0.000000
0



Z
X Y
ETA/POST

LS-DYNA USER INPUT
STEP 7 TIME: 1.000160
COMPONENT: Total-displacement

32.989117
30.632751
28.276386
25.920021
23.563656
21.207291
18.850924
16.494558
14.138193
11.781828
9.425462
7.069097
4.712731
2.356365
0.000000
0

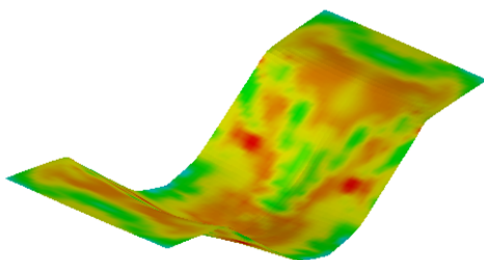


Z
X Y
ETA/POST

Σχήμα 8.2 : Τάσεις – παραμορφώσεις στο τέλος της διαμόρφωσης για το κράμα αλουμινίου 180x120x2 mm

LS-DYNA USER INPUT
STEP 7 TIME: 1.000218
COMPONENT: Maximum Von Mises

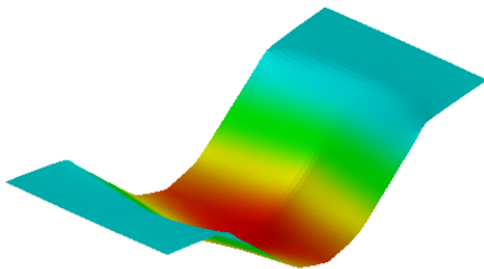
156.602951
145.417023
134.231094
123.045174
111.859245
100.673325
89.487396
78.301476
67.115547
55.929623
44.743698
33.557774
22.371849
11.185925
0.000000
0



ETA/POST

LS-DYNA USER INPUT
STEP 7 TIME: 1.000218
COMPONENT: Total-displacement

33.826096
31.409946
28.993797
26.577648
24.161497
21.745348
19.329199
16.913048
14.496899
12.080749
9.664599
7.248449
4.832300
2.416150
0.000000
0



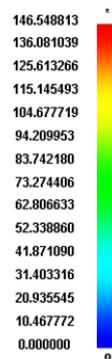
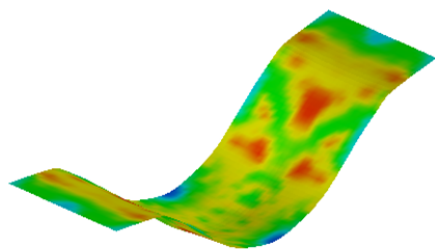
ETA/POST

Σχήμα 8.3 : Τάσεις – παραμορφώσεις στο τέλος της διαμόρφωσης για το κράμα αλουμινίου 180x75x2 mm

LS-DYNA USER INPUT
STEP 7 TIME: 1.000118
COMPONENT: Maximum Von Mises



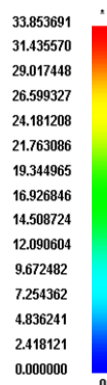
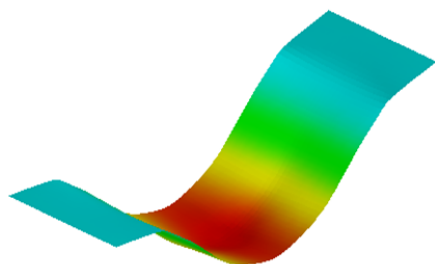
ETA/POST



LS-DYNA USER INPUT
STEP 7 TIME: 1.000118
COMPONENT: Total-displacement



ETA/POST

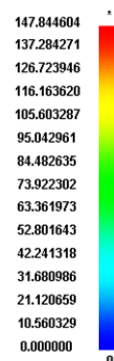
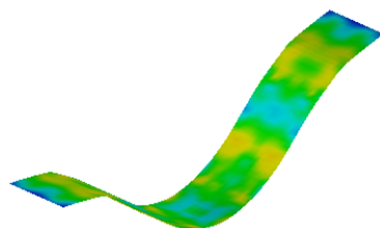


Σχήμα 8.4 : Τάσεις – παραμορφώσεις στο τέλος της διαμόρφωσης για το κράμα αλουμινίου 180x50x2 mm

LS-DYNA USER INPUT
STEP 7 TIME: 1.000130
COMPONENT: Maximum Von Mises



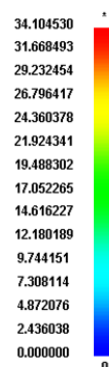
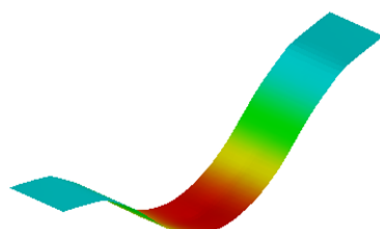
ETA/POST



LS-DYNA USER INPUT
STEP 7 TIME: 1.000130
COMPONENT: Total-displacement

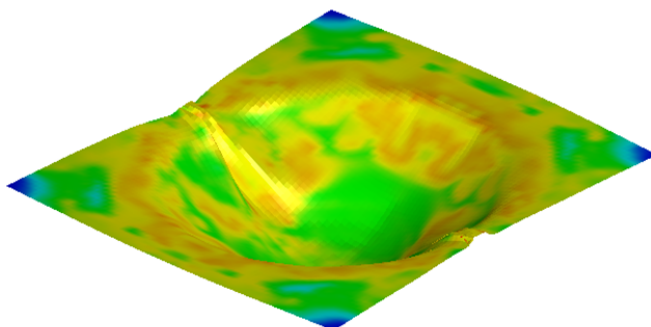
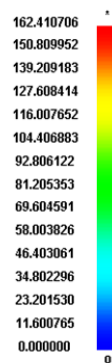


ETA/POST



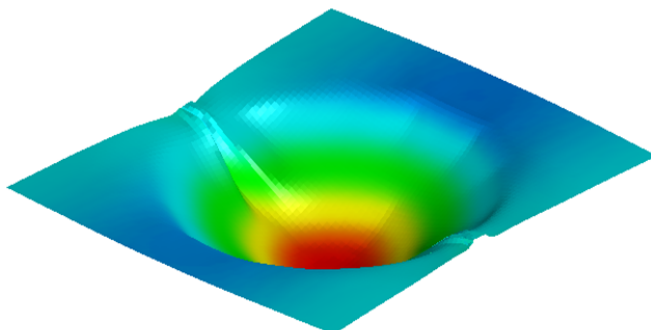
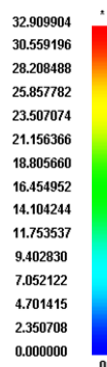
Σχήμα 8.5 : Τάσεις – παραμορφώσεις στο τέλος της διαμόρφωσης για το κράμα αλουμινίου 180x25x2 mm

LS-DYNA USER INPUT
STEP 7 TIME: 1.000055
COMPONENT: Maximum Von Mises



ETA/POST

LS-DYNA USER INPUT
STEP 7 TIME: 1.000055
COMPONENT: Total-displacement

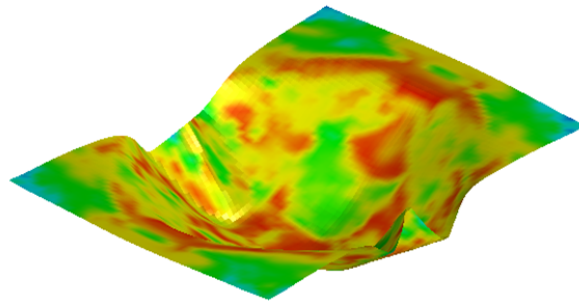


ETA/POST

Σχήμα 8.6 : Τάσεις – παραμορφώσεις στο τέλος της διαμόρφωσης για το κράμα αλουμινίου 180x150x1 mm

LS-DYNA USER INPUT
STEP 7 TIME: 1.000210
COMPONENT: Maximum Von Mises

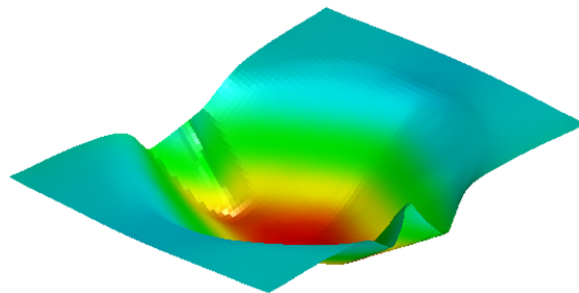
146.038651
135.607330
125.175995
114.744659
104.313324
93.881996
83.450661
73.019325
62.587997
52.156662
41.725330
31.293999
20.862665
10.431333
0.000000
0



Z
X Y
ETA/POST

LS-DYNA USER INPUT
STEP 7 TIME: 1.000210
COMPONENT: Total-displacement

33.176937
30.807158
28.437376
26.067595
23.697813
21.328032
18.958250
16.588469
14.218688
11.848907
9.479125
7.109344
4.739563
2.369781
0.000000
0

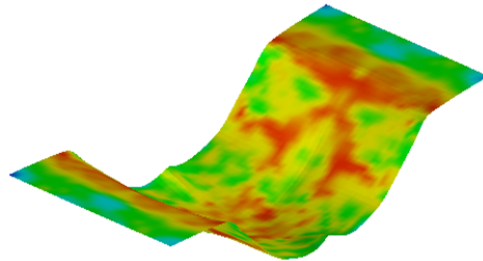


Z
X Y
ETA/POST

Σχήμα 8.7 : Τάσεις – παραμορφώσεις στο τέλος της διαμόρφωσης για το κράμα αλουμινίου 180x120x1 mm

LS-DYNA USER INPUT
STEP 7 TIME: 1.000135
COMPONENT: Maximum Von Mises

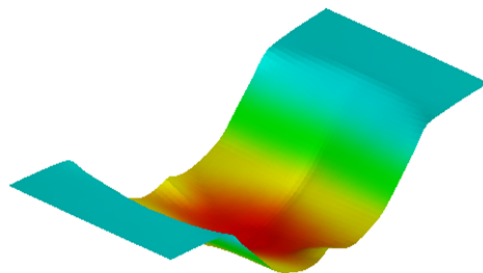
146.075943
135.641953
125.207954
114.773956
104.339958
93.905968
83.471970
73.037971
62.603977
52.169979
41.735985
31.301989
20.867992
10.433996
0.000000
0



ETA/POST

LS-DYNA USER INPUT
STEP 7 TIME: 1.000135
COMPONENT: Total-displacement

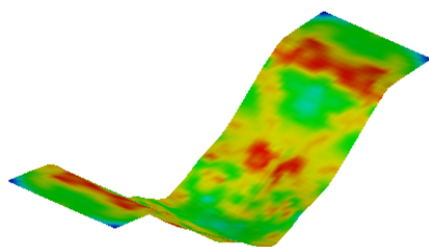
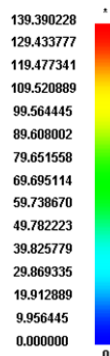
34.080383
31.646069
29.211756
26.777443
24.343130
21.908817
19.474504
17.040192
14.605878
12.171565
9.737252
7.302939
4.868626
2.434313
0.000000
0



ETA/POST

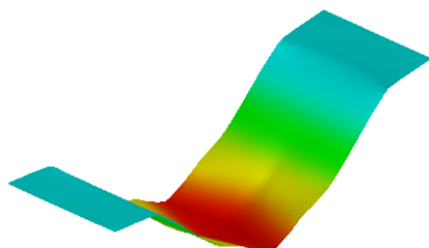
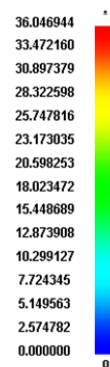
Σχήμα 8.8 : Τάσεις – παραμορφώσεις στο τέλος της διαμόρφωσης για το κράμα αλουμινίου 180x75x1 mm

LS-DYNA USER INPUT
STEP 7 TIME: 1.000145
COMPONENT: Maximum Von Mises



ETA/POST

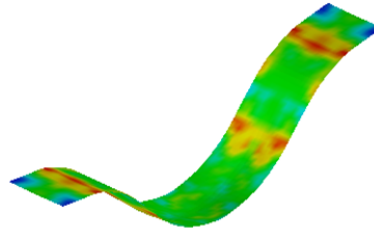
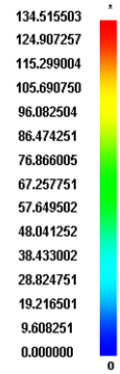
LS-DYNA USER INPUT
STEP 7 TIME: 1.000145
COMPONENT: Total-displacement



ETA/POST

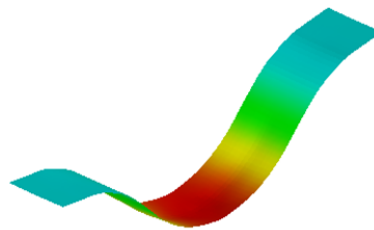
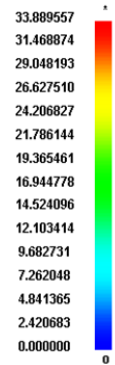
Σχήμα 8.9 : Τάσεις – παραμορφώσεις στο τέλος της διαμόρφωσης για το κράμα αλουμινίου 180x50x1 mm

LS-DYNA USER INPUT
STEP 7 TIME: 1.000224
COMPONENT: Maximum Von Mises



ETA/POST

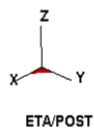
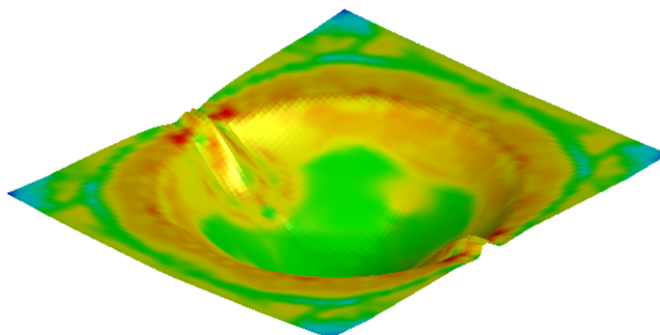
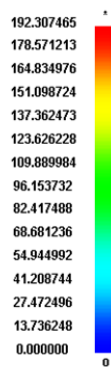
LS-DYNA USER INPUT
STEP 7 TIME: 1.000224
COMPONENT: Total-displacement



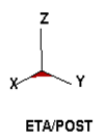
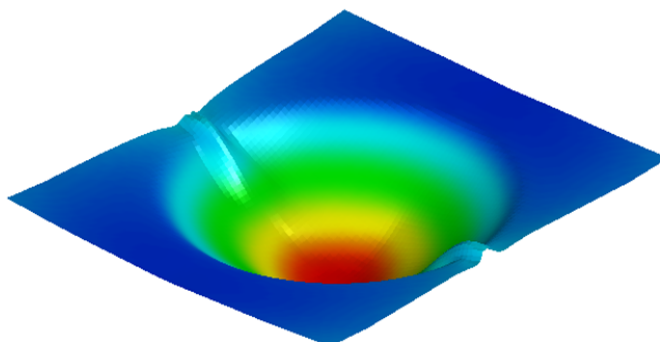
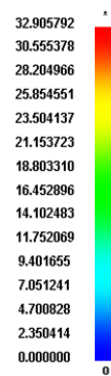
ETA/POST

Σχήμα 8.10 : Τάσεις – παραμορφώσεις στο τέλος της διαμόρφωσης για το κράμα αλουμινίου 180x25x1 mm

LS-DYNA USER INPUT
STEP 7 TIME: 1.000086
COMPONENT: Maximum Von Mises

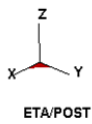
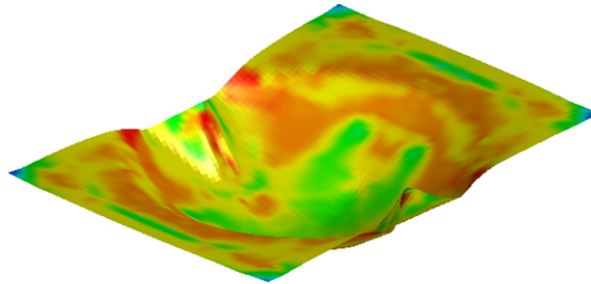
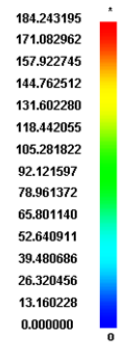


LS-DYNA USER INPUT
STEP 7 TIME: 1.000086
COMPONENT: Total-displacement

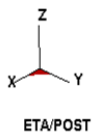
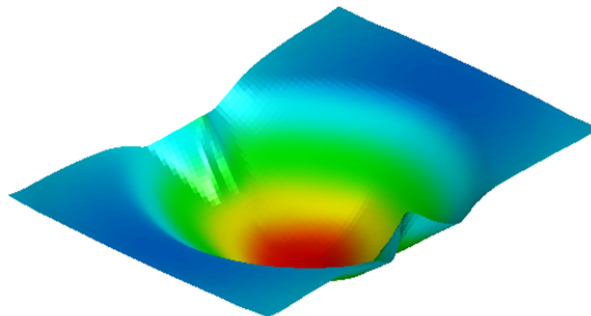
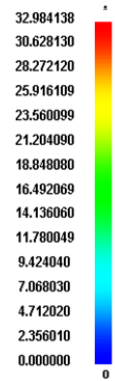


Σχήμα 8.11 : Τάσεις – παραμορφώσεις στο τέλος της διαμόρφωσης για το χαλκό 180x150x2 mm

LS-DYNA USER INPUT
STEP 7 TIME: 1.000148
COMPONENT: Maximum Von Mises



LS-DYNA USER INPUT
STEP 7 TIME: 1.000148
COMPONENT: Total-displacement

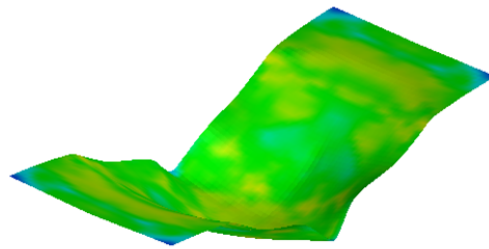


Σχήμα 8.12 : Τάσεις – παραμορφώσεις στο τέλος της διαμόρφωσης για το χαλκό 180x120x2 mm

LS-DYNA USER INPUT
STEP 7 TIME: 1.000277
COMPONENT: Maximum Von Mises



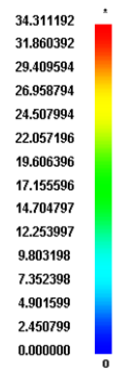
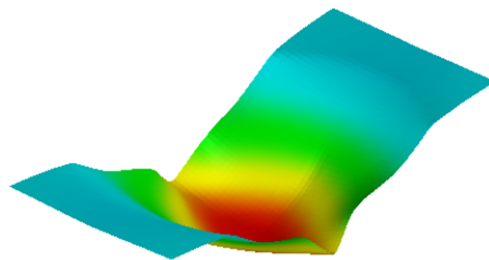
ETA/POST



LS-DYNA USER INPUT
STEP 7 TIME: 1.000277
COMPONENT: Total-displacement

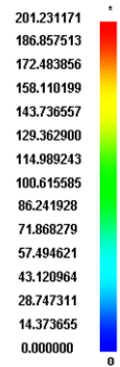
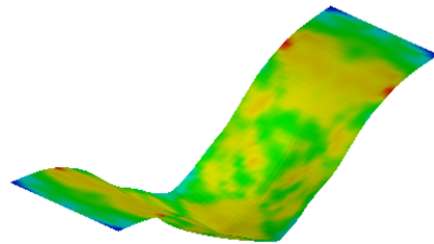
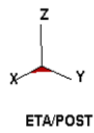


ETA/POST

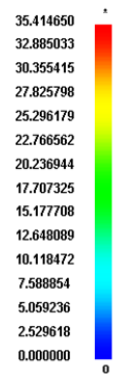
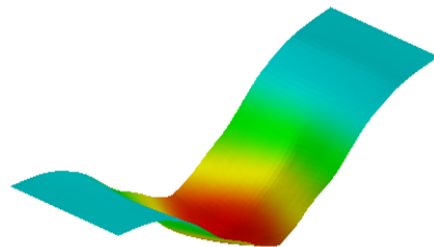
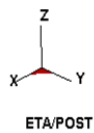


Σχήμα 8.13 : Τάσεις – παραμορφώσεις στο τέλος της διαμόρφωσης για το χαλκό 180x75x2 mm

LS-DYNA USER INPUT
STEP 7 TIME: 1.000029
COMPONENT: Maximum Von Mises

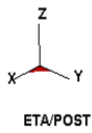
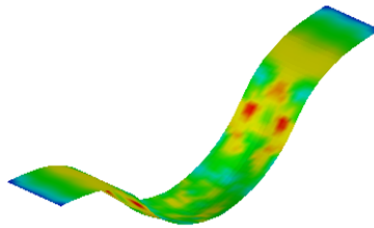
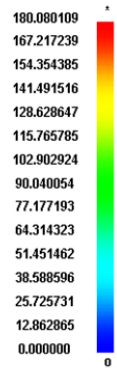


LS-DYNA USER INPUT
STEP 7 TIME: 1.000029
COMPONENT: Total-displacement

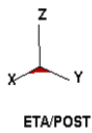
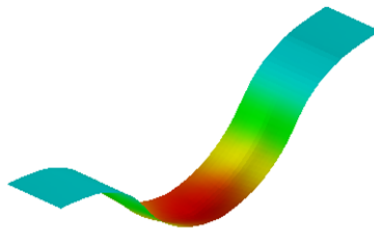
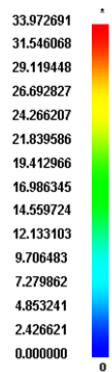


Σχήμα 8.14 : Τάσεις – παραμορφώσεις στο τέλος της διαμόρφωσης για το χαλκό 180x50x2 mm

LS-DYNA USER INPUT
STEP 7 TIME: 1.000247
COMPONENT: Maximum Von Mises

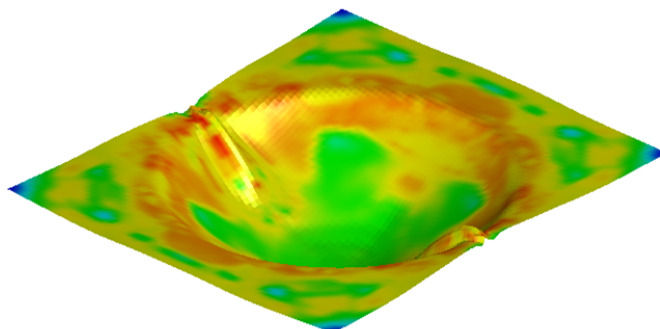
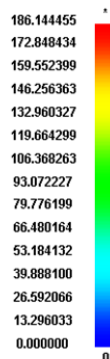


LS-DYNA USER INPUT
STEP 7 TIME: 1.000247
COMPONENT: Total-displacement



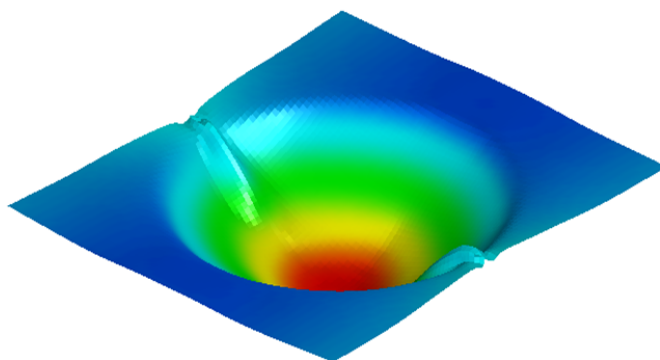
Σχήμα 8.15 : Τάσεις – παραμορφώσεις στο τέλος της διαμόρφωσης για το χαλκό 180x25x2 mm

LS-DYNA USER INPUT
STEP 7 TIME: 1.000162
COMPONENT: Maximum Von Mises



ETA/POST

LS-DYNA USER INPUT
STEP 7 TIME: 1.000162
COMPONENT: Total-displacement

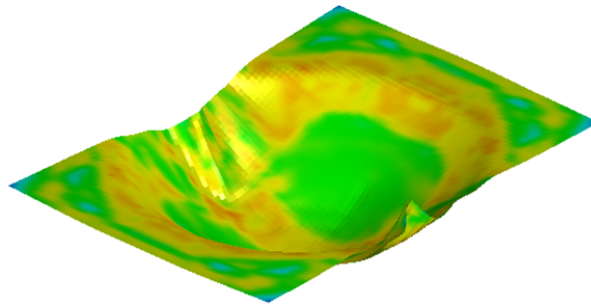


ETA/POST

Σχήμα 8.16 : Τάσεις – παραμορφώσεις στο τέλος της διαμόρφωσης για το χαλκό 180x150x1 mm

LS-DYNA USER INPUT
STEP 7 TIME: 1.000051
COMPONENT: Maximum Von Mises

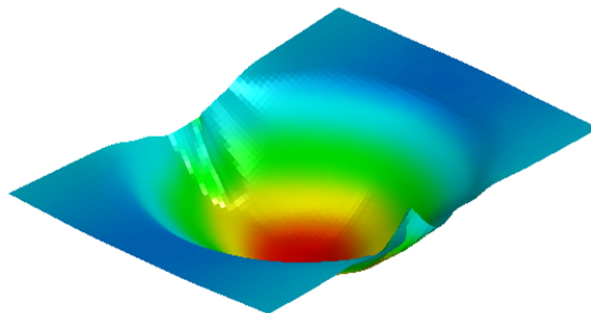
162.956726
151.316956
139.677200
128.037430
116.397659
104.757896
93.118126
81.478363
69.838600
58.198830
46.559063
34.919300
23.279531
11.639766
0.000000
0



Z
X Y
ETA/POST

LS-DYNA USER INPUT
STEP 7 TIME: 1.000051
COMPONENT: Total-displacement

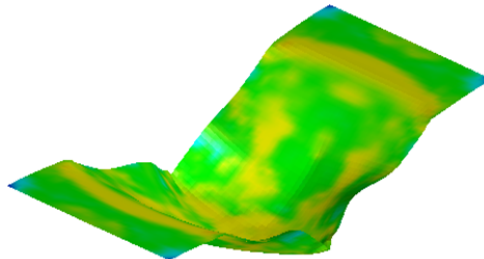
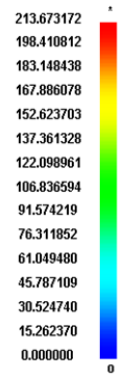
32.997101
30.640165
28.283230
25.926292
23.569357
21.212421
18.855486
16.498550
14.141615
11.784678
9.427743
7.070807
4.713871
2.356936
0.000000
0



Z
X Y
ETA/POST

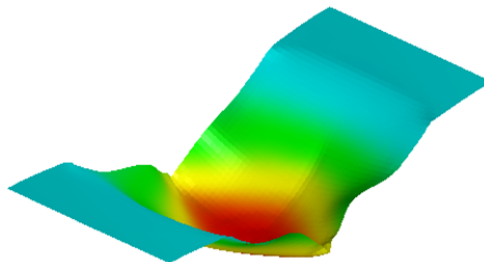
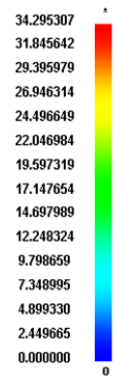
Σχήμα 8.17 : Τάσεις – παραμορφώσεις στο τέλος της διαμόρφωσης για το χαλκό 180x120x1 mm

LS-DYNA USER INPUT
STEP 7 TIME: 1.000284
COMPONENT: Maximum Von Mises



ETA/POST

LS-DYNA USER INPUT
STEP 7 TIME: 1.000284
COMPONENT: Total-displacement



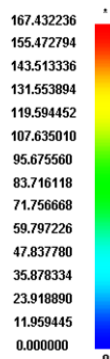
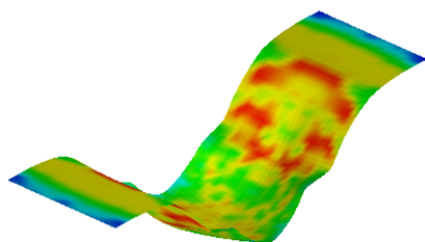
ETA/POST

Σχήμα 8.18 : Τάσεις – παραμορφώσεις στο τέλος της διαμόρφωσης για το χαλκό 180x75x1 mm

LS-DYNA USER INPUT
STEP 7 TIME: 1.000255
COMPONENT: Maximum Von Mises



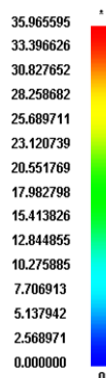
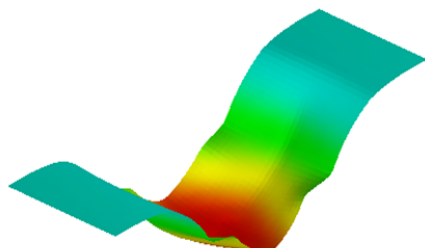
ETA/POST



LS-DYNA USER INPUT
STEP 7 TIME: 1.000255
COMPONENT: Total displacement



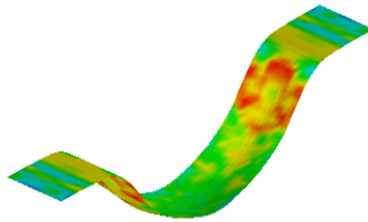
ETA/POST



Σχήμα 8.19 : Τάσεις – παραμορφώσεις στο τέλος της διαμόρφωσης για το χαλκό 180x50x1 mm

LS-DYNA USER INPUT
STEP 7 TIME: 1.000275
COMPONENT: Maximum Von Mises

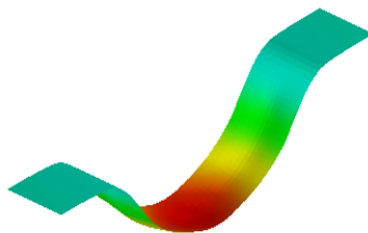
160.827377
149.339706
137.852036
126.364365
114.876694
103.389030
91.901360
80.413689
68.926018
57.438347
45.950680
34.463009
22.975340
11.487670
0.000000



Z
X Y
ETA/POST

LS-DYNA USER INPUT
STEP 7 TIME: 1.000275
COMPONENT: Total-displacement

33.746822
31.336336
28.925848
26.515362
24.104874
21.694386
19.283899
16.873411
14.462924
12.052437
9.641950
7.231462
4.820975
2.410487
0.000000

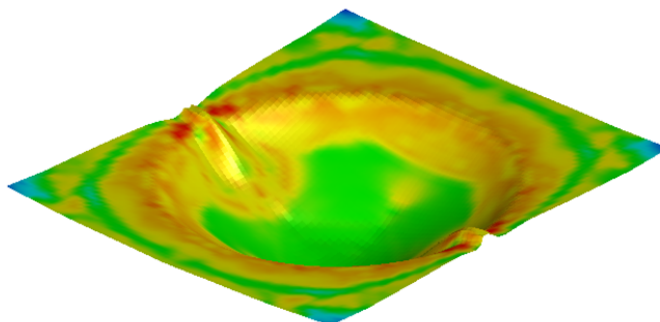


Z
X Y
ETA/POST

Σχήμα 8.20 : Τάσεις – παραμορφώσεις στο τέλος της διαμόρφωσης για το χαλκό 180x25x1 mm

LS-DYNA USER INPUT
STEP 7 TIME: 1.000113
COMPONENT: Maximum Von Mises

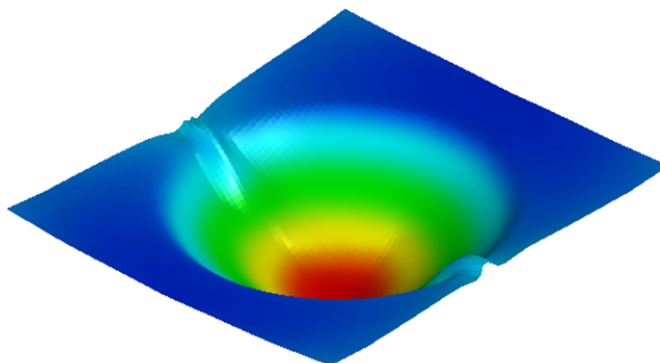
172.824966
160.480331
148.135696
135.791046
123.446411
111.101768
98.757126
86.412483
74.067848
61.723206
49.378563
37.033924
24.689281
12.344641
0.000000
0



Z
X Y
ETA/POST

LS-DYNA USER INPUT
STEP 7 TIME: 1.000113
COMPONENT: Total-displacement

32.907089
30.556583
28.206078
25.855572
23.505064
21.154558
18.804052
16.453545
14.103039
11.752532
9.402026
7.051519
4.701013
2.350507
0.000000
0

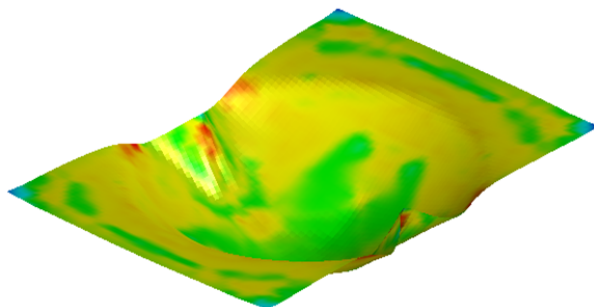


Z
X Y
ETA/POST

Σχήμα 8.21 : Τάσεις – παραμορφώσεις στο τέλος της διαμόρφωσης για τον ορείχαλκο 180x150x2 mm

LS-DYNA USER INPUT
STEP 7 TIME: 1.000162
COMPONENT: Maximum Von Mises

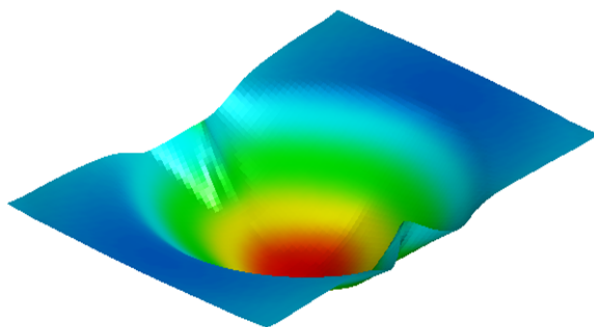
181.829056
168.841263
155.853485
142.865692
129.877899
116.890106
103.902321
90.914528
77.926743
64.938950
51.951160
38.963371
25.975580
12.987790
0.000000



ETA/POST

LS-DYNA USER INPUT
STEP 7 TIME: 1.000162
COMPONENT: Total-displacement

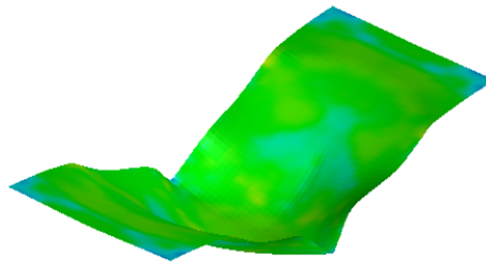
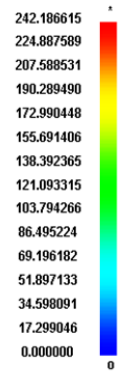
32.985577
30.629463
28.273350
25.917238
23.561125
21.205013
18.848900
16.492788
14.136675
11.780562
9.424450
7.068337
4.712225
2.356112
0.000000



ETA/POST

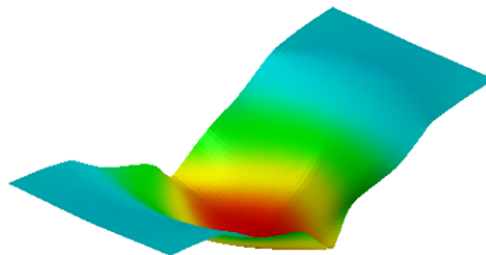
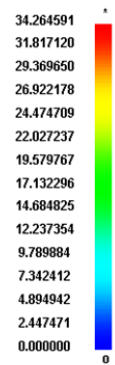
Σχήμα 8.22 : Τάσεις – παραμορφώσεις στο τέλος της διαμόρφωσης για τον ορείχαλκο 180x120x2 mm

LS-DYNA USER INPUT
STEP 7 TIME: 1.000226
COMPONENT: Maximum Von Mises



ETA/POST

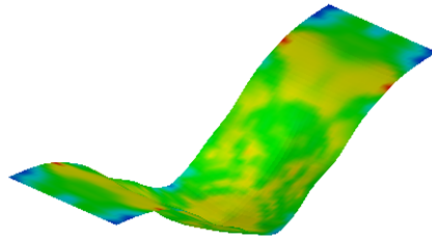
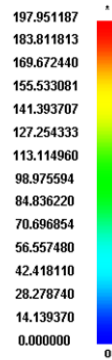
LS-DYNA USER INPUT
STEP 7 TIME: 1.000226
COMPONENT: Total-displacement



ETA/POST

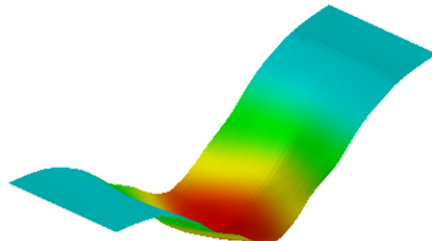
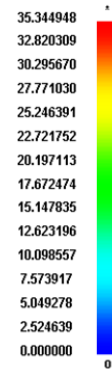
Σχήμα 8.23 : Τάσεις – παραμορφώσεις στο τέλος της διαμόρφωσης για τον ορείχαλκο 180x75x2 mm

LS-DYNA USER INPUT
STEP 7 TIME: 1.000025
COMPONENT: Maximum Von Mises



ETA/POST

LS-DYNA USER INPUT
STEP 7 TIME: 1.000025
COMPONENT: Total-displacement

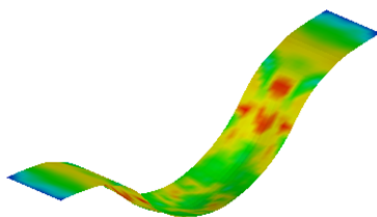


ETA/POST

Σχήμα 8.24 : Τάσεις – παραμορφώσεις στο τέλος της διαμόρφωσης για τον ορείχαλκο 180x50x2 mm

LS-DYNA USER INPUT
STEP 7 TIME: 1.000060
COMPONENT: Maximum Von Mises

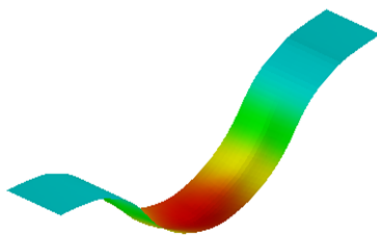
148.047302
137.472504
126.897690
116.322884
105.748077
95.173271
84.598457
74.023651
63.448845
52.874039
42.299229
31.724422
21.149614
10.574807
0.000000
0



ETA/POST

LS-DYNA USER INPUT
STEP 7 TIME: 1.000060
COMPONENT: Total-displacement

33.942223
31.517778
29.093334
26.668890
24.244444
21.820000
19.395555
16.971111
14.546667
12.122222
9.697778
7.273334
4.848889
2.424444
0.000000
0

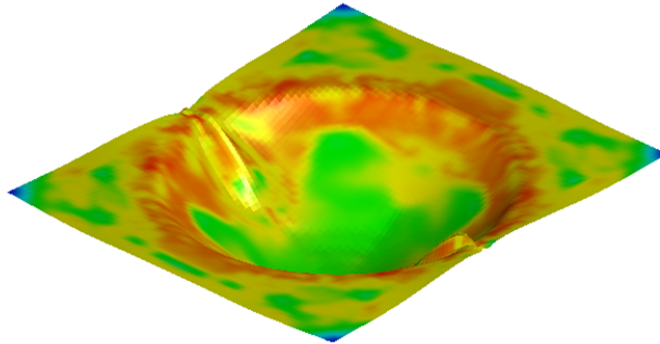


ETA/POST

Σχήμα 8.25 : Τάσεις – παραμορφώσεις στο τέλος της διαμόρφωσης για τον ορείχαλκο 180x25x2 mm

LS-DYNA USER INPUT
STEP 7 TIME: 1.000039
COMPONENT: Maximum Von Mises

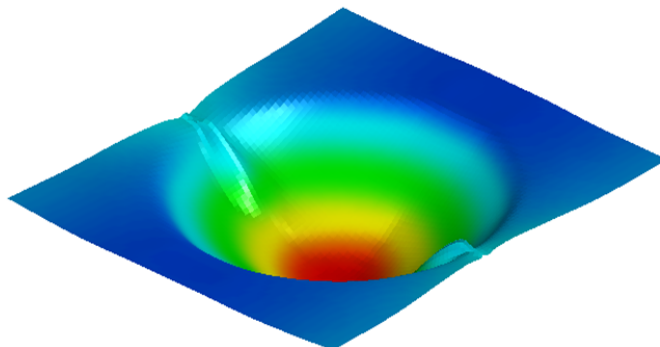
164.393921
152.651505
140.909073
129.166656
117.424232
105.681808
93.939384
82.196960
70.454536
58.712116
46.969692
35.227268
23.484846
11.742423
0.000000
0



ETA/POST

LS-DYNA USER INPUT
STEP 7 TIME: 1.000039
COMPONENT: Total-displacement

32.908459
30.557854
28.207251
25.856646
23.506042
21.155437
18.804832
16.454229
14.103625
11.753021
9.402416
7.051813
4.701208
2.350604
0.000000
0

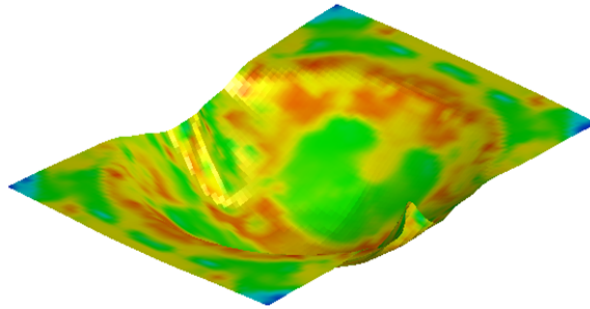


ETA/POST

Σχήμα 8.26 : Τάσεις – παραμορφώσεις στο τέλος της διαμόρφωσης για τον ορείχαλκο 180x150x1 mm

LS-DYNA USER INPUT
STEP 7 TIME: 1.000033
COMPONENT: Maximum Von Mises

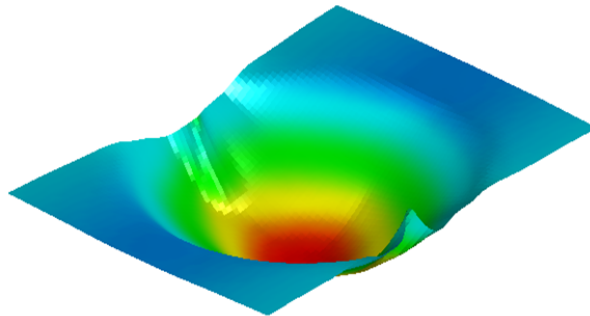
163.512924
151.833435
140.153946
128.474442
116.794952
105.115456
93.435959
81.756462
70.076973
58.397476
46.717979
35.038486
23.358990
11.679495
0.000000
0



ETA/POST

LS-DYNA USER INPUT
STEP 7 TIME: 1.000033
COMPONENT: Total-displacement

32.992260
30.635670
28.279079
25.922489
23.565899
21.209311
18.852720
16.496130
14.139540
11.782949
9.426360
7.069770
4.713180
2.356590
0.000000
0

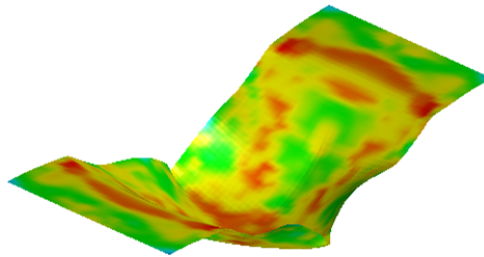


ETA/POST

Σχήμα 8.27 : Τάσεις – παραμορφώσεις στο τέλος της διαμόρφωσης για τον ορείχαλκο 180x120x1 mm

LS-DYNA USER INPUT
STEP 7 TIME: 1.000223
COMPONENT: Maximum Von Mises

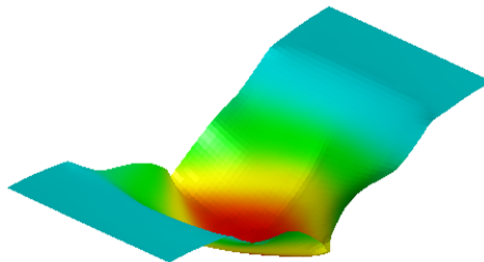
161.442810
149.911179
138.379547
126.847923
115.316292
103.784660
92.253036
80.721405
69.189774
57.658146
46.126518
34.594887
23.063259
11.531630
0.000000
0



ETA/POST

LS-DYNA USER INPUT
STEP 7 TIME: 1.000223
COMPONENT: Total-displacement

34.387794
31.931524
29.475254
27.018982
24.562712
22.106440
19.650169
17.193897
14.737627
12.281356
9.825085
7.368814
4.912542
2.456271
0.000000
0



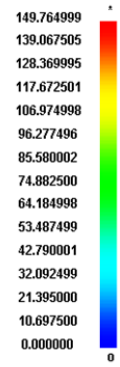
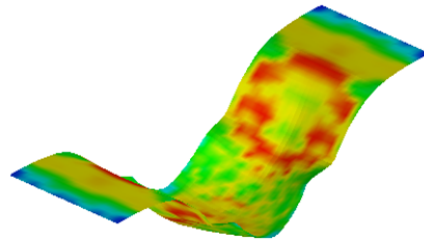
ETA/POST

Σχήμα 8.28 : Τάσεις – παραμορφώσεις στο τέλος της διαμόρφωσης για τον ορείχαλκο 180x75x1 mm

LS-DYNA USER INPUT
STEP 7 TIME: 1.000295
COMPONENT: Maximum Von Mises



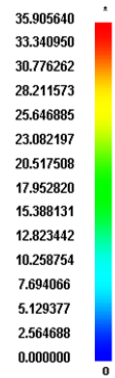
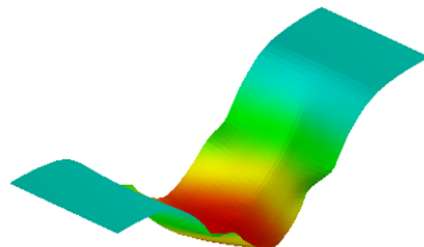
ETA/POST



LS-DYNA USER INPUT
STEP 7 TIME: 1.000295
COMPONENT: Total-displacement

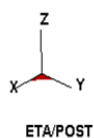
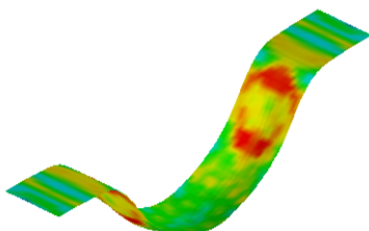
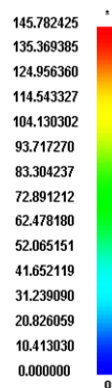


ETA/POST

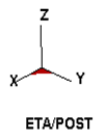
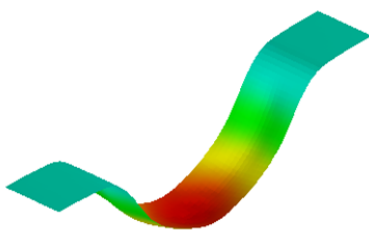
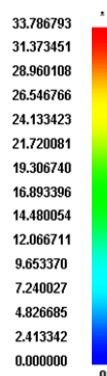


Σχήμα 8.29 : Τάσεις – παραμορφώσεις στο τέλος της διαμόρφωσης για τον ορείχαλκο 180x50x1 mm

LS-DYNA USER INPUT
STEP 7 TIME: 1.000078
COMPONENT: Maximum Von Mises



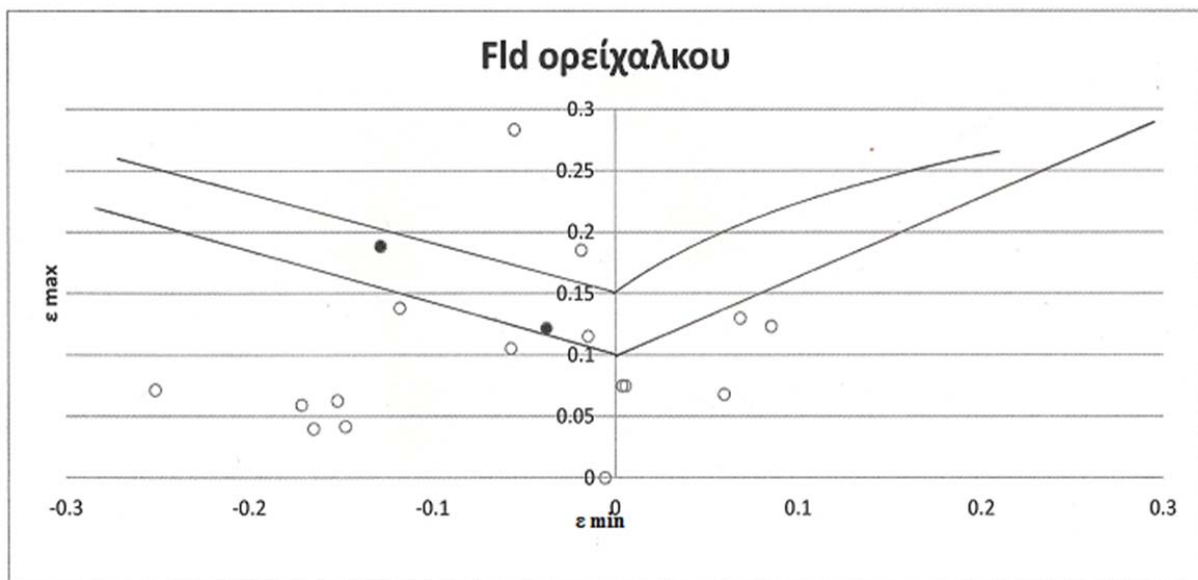
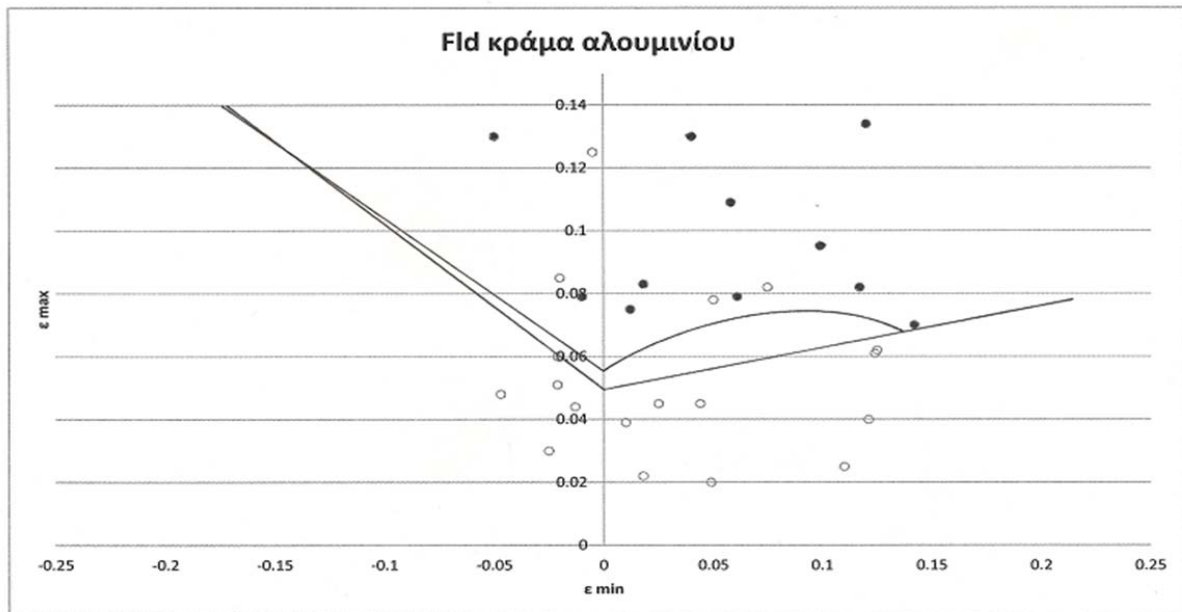
LS-DYNA USER INPUT
STEP 7 TIME: 1.000078
COMPONENT: Total-displacement



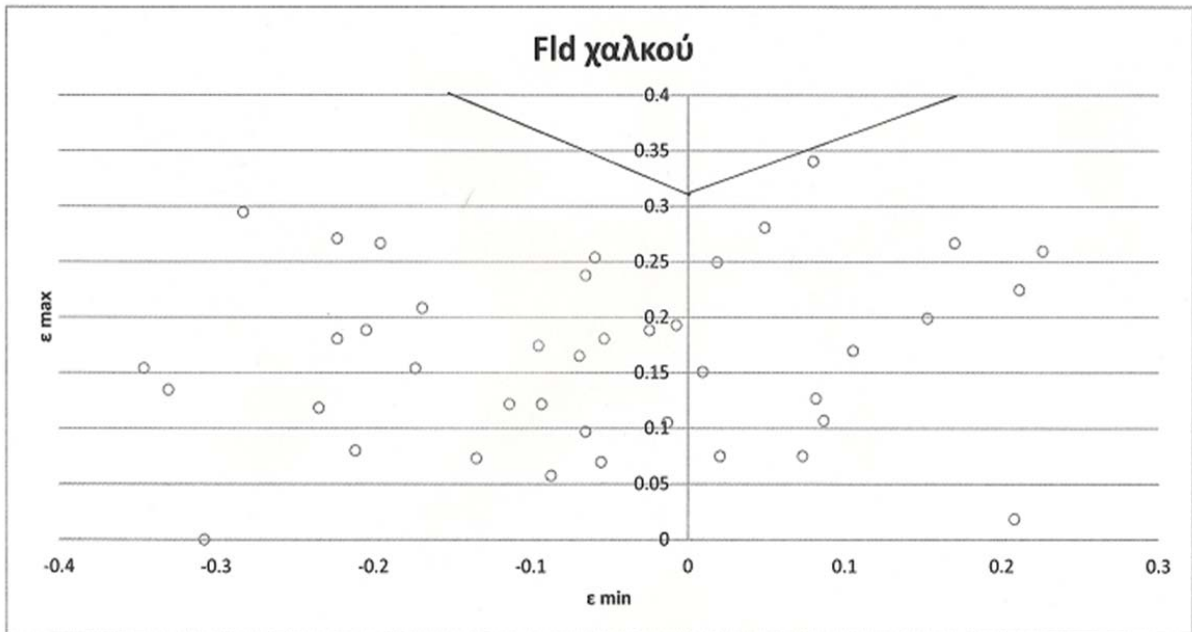
Σχήμα 8.30 : Τάσεις – παραμορφώσεις στο τέλος της διαμόρφωσης για τον ορείχαλκο 180x25x1 mm

9. Συμπεράσματα

Παρατίθενται παρακάτω τα συγκριτικά διαγράμματα οριακής διαμόρφωσης για το κράμα αλουμινίου και τον ορείχαλκο και το πειραματικό διάγραμμα του χαλκού.



Σχήμα 9.1 : Συγκριτικά διαγράμματα οριακής διαμόρφωσης για το κράμα αλουμινίου και τον ορείχαλκο



Σχήμα 9.2 : Πειραματικό διάγραμμα οριακής διαμόρφωσης για το χαλκό

Εύκολα μπορεί να εξαχθεί το πρωτεύον συμπέρασμα για τη σειρά διαμορφοσιμότητας των υλικών. Ο χαλκός είναι πιο διαμορφώσιμος (βασή παραμορφώσεων που μπορεί να παραλάβει πριν την αστοχία) από τον ορείχαλκο και αυτός με τη σειρά του πιο διαμορφώσιμος από το κράμα αλουμινίου. Ιδιαίτερη σημασία πρέπει να δώσουμε όμως στο αλουμίνιο. Σαν υλικό ενδιαφέρει πολύ περισσότερο η διαμορφοσιμότητά του, κυρίως λόγω των περισσότερων και πιο «σημαντικών» χρήσεων του. Για το λόγω αυτό άλλωστε έχει συγκετρώσει και την περισσότερη ερευνητική προσοχή διεθνώς. Το κράμα που χρησιμοποιήθηκε για την διαξαγωγή του πειράματος αποδείχθηκε αρκετά «σκληρό». Παρόλα αυτά ο στόχος ήταν η συγκριτική μελέτη των υλικών και έτσι δεν δώθηκε ιδιαίτερο βάρος στην επιλογή του κράματος. Το αλουμίνιο όμως είχε και το καλύτερο αποτέλεσμα όσον αφορά τα διαγράμματα οριακής διαμόρφωσης καθώς υπήρξαν δοκίμια που αστόχησαν. Απο την άλλη μεριά για το χαλκό προκύπτει μεν η ασφαλής περιοχή αλλά δεν ξέρουμε τα όρια στα οποία εμφανίζεται η αστοχία καθώς δεν υπήρξε αστοχία δοκιμίου. Ίσως χρειάζεται μεγαλύτερη διαδρομή

εμβόλου για να έχομε σαφέστερο αποτέλεσμα. Παρόλα αυτά η διαδρομή πρέπει να είναι ίδια για όλα τα υλικά για να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα που θα παρθούν. Σημαντικό είναι επίσης να αναφερθεί ότι τα δύο σημεία που δείχνουν αστοχία στον ορείχαλκο προέρχονται από το ίδιο δοκίμιο και άρα λόγω λίγων σημείων στο διάγραμμα η αστοχία μπορεί να αποτελεί τυχηματικό γεγονός. Γενικά υπάρχει συμφωνία μεταξύ πειραματικών και θεωρητικών αποτελεσμάτων. Από την ανάλυση των μοντέλων προκύπτει ακόμα ότι το κράμα αλουμινίου είχε την μεγαλύτερη ομοιογένεια στις μέγιστες παρατηρούμενες αναπτυσσόμενες τάσεις, ακολούθησε ο ορείχαλκος και ύστερα ο χαλκός.

Εχει εδώ αξία να αναφερθεί ο ρόλος της μοντελοποίησης στην εξοικονόμηση χρόνου αλλά και χρήματος καθώς είναι προφανές ότι η πειραματική διαδικασία είναι και πιο χρονοβόρα και πιο αντικοινωνική. Και στις δύο περιπτώσεις υπάρχουν παράγοντες απροσδιοριστίας όμως. Στο μέν πείραμα εύκολα γίνεται αυτό αντιληπτό, στη μοντελοποίηση όμως υπάρχουν αρκετές παράμετροι οι οποίες είτε δεν μπορούν να προσδιοριστούν, είτε πρέπει να χρησιμοποιηθούν εμπειρικές τιμές. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι ο συντελεστής τριβής στις διεπιφάνειες κατά τον ορισμό τους.

10. Βιβλιογραφία

- Pohlandt, K., Springer-Verlag Berlin Heidelberg «Materials Testing for the Metal Forming Industry», (1989), Germany
- Kurt Lange , «Handbook Of Metal Forming», (1985), Mc Graw- Hill Book Company
- Marciniak, Z&Duncan, J ., Edward Arnold, Kent,«The Mechanics of Sheet Metal Forming», (1992), England
- Δ. Μανωλάκος, «Κατεργασίες των υλικών», (2008), Αθήνα
- Α. Μάμαλης, «Τεχνολογία των κατεργασιών – Μη συμβατικές κατεργασίες», Εκδόσεις Ανωση, (2000), Αθήνα
- Dimitrios Papapostolou, «NTUA REPORT on Stretching testing of AA2024-T3 Metal Sheet Specimen», (2002), Αθήνα
- Α.Μάμαλης, Δ. Μανωλάκος, Α. Μπαλντούκας, «Finite Element modeling of the stretch forming of coated steels», Journal of Materials Processing Technology (1997).
- Pearce R. , Adam Hilger , «Sheet Metal Forming», (1991)
- Koistinen D. P., Wang, N.-M. , «Mechanics of Sheet Metal Forming – Material Behavior and Deformation analysis», Plenum Press (1978)
- Keeler S.P. and Backofen W.A., «Plastic Instability and Fracture in Sheets Stretched Over Rigid Punches», (1963)
- Marciniak Z. and Kuczynski K., «Limits Strains in The Processes of Stretch- Forming Sheet Metal» , (1967)
- Hutchinson J.W. and Neale K.W., «Sheet Necking-III. Strain-Rate Effects, in Mechanics of Sheet Metal Forming», (1978) eds. D.P. Koistinen and N.M. Wang Plenum, New York
- Sowerby R. and Duncan, D.L. , «Failure in Sheet Metal in Biaxial Tension», (1971)
- Graf, A. and Hosford, W.F. , «Calculations of forming limit diagrams», (1990)