

ΝΕΣΤΩΡ ΔΑΥΤΣΙΟΣ

«Διαμόρφωση επιπέδων  
μεταλλικών ελασμάτων με τη  
μέθοδο Yoshida»

Τομέας: Τεχνολογίας των Κατεργασιών

Επιβλέπων: Μανωλάκος Δημήτριος , Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα 2023



ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



Υπεύθυνη δήλωση για λογοκλοπή και για κλοπή πνευματικής ιδιοκτησίας:

Έχω διαβάσει και κατανοήσει τους κανόνες για τη λογοκλοπή και τον τρόπο σωστής αναφοράς των πηγών που περιέχονται στον οδηγό συγγραφής Διπλωματικών Εργασιών. Δηλώνω ότι, από όσα γνωρίζω, το περιεχόμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι προϊόν δικής μου εργασίας και υπάρχουν αναφορές σε όλες τις πηγές που χρησιμοποίησα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτή τη Διπλωματική εργασία είναι του συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Νέστωρ Δαύτσιος



## 1. Περίληψη

Κατά τις κατεργασίες κοίλανσης προκαλούνται θλιπτικές (συμπιεστικές) τάσεις στα μεταλλικά ελάσματα, οι οποίες μπορούν να προκαλέσουν ανεπιθύμητες κοιλάνσεις. Από την άλλη πλευρά, το υψηλό πάχος του φύλλου και η υψηλή τοπική καμπυλότητα της επιφάνειας εξουδετερώνουν την τάση τσαλακώματος σταθεροποιώντας το ακατέργαστο υλικό. Για να διερευνηθούν πειραματικά αυτοί οι παράγοντες που επηρεάζουν την έναρξη της κοίλανσης, δηλαδή του τοπικού φαινομένου λυγισμού, δημιουργήθηκε ένα τροποποιημένο τεστ προσαρμοσμένο σε αυτές τις απαιτήσεις που ονομάζεται τεστ λυγισμού Yoshida (Yoshida Buckling Test). Σε αυτήν λοιπόν την εργασία μελετάμε τη συμπεριφορά της κοίλανσης που προκαλείται στα μεταλλικά ελάσματα χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Yoshida ως μέθοδο αξιολόγησης της. Τα υλικά που χρησιμοποιήσαμε για την υλοποίηση της εργασίας αυτής ήταν ελάσματα χάλυβα, χαλκού και ορείχαλκου. Πρώτα από όλα ασχολούμαστε με το θεωρητικό μέρος των επιπέδων ελασμάτων στις κατεργασίες διαμόρφωσης και στη χρησιμότητα τους για την δημιουργία διαφόρων αντικειμένων. Περιγράφεται η θεωρητική και η πειραματική φάση των ελασμάτων που εξετάζουμε. Στη συνέχεια εξετάζουμε και αναλύουμε τη πειραματική διαδικασία, παρουσιάζοντας τα ελάσματα με βάση το υλικό και τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους, το μηχανολογικό εξοπλισμό και όλα τα μηχανήματα και τις μετρητικές διατάξεις που χρησιμοποιήσαμε για την υλοποίηση της πειραματικής διαδικασίας. Περαιτέρω πραγματοποιείται η προσομοίωση της διαμόρφωσης μέσω της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων με τη βοήθεια του προγράμματος Ansys, ώστε να γίνει η σύγκριση μέσω της πειραματικής και προσομοιωτικής διαδικασίας. Ωστόσο παρουσιάζεται η κατασκευή και η διακριτοποίηση του μοντέλου με τη βοήθεια του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων για την αποτελεσματικότερη ανάλυση των ελασμάτων. Γίνεται επιλογή των υλικών που θα χρησιμοποιήσουμε και εξετάζεται η δέσμευση των κόμβων. Τέλος, συγκρίνουμε τα πειραματικά αποτελέσματα με αυτά που ληφθήκανε από τη προσομοιωτική διαδικασία με τη βοήθεια του προγράμματος Ansys, και καταλήγουμε στα τελικά συμπεράσματα για τη μέθοδο Yoshida που προέκυψαν από τα τρία διαφορετικά υλικά που χρησιμοποιήσαμε.

## 2. Abstract

During drawing forming process, compressive stresses are caused in the metal sheets which can cause unwanted wrinkles. On the other hand, the high thickness of the sheet and the high local curvature of the surface, neutralize the wrinkling tendency by stabilizing the raw material. In order to experimentally investigate these factors that influence the onset of wrinkles, a modified test adapted to these requirements was created called Yoshida buckling test. So in this work, we study the behavior of the wrinkles caused in the metal sheets by shaping the deep drawing. The materials we used for the implementation of this work were steel, copper and brass sheets. First of all we deal with the theoretical part of sheet planes in shaping operations and their usefulness in creating various objects. The theoretical and the experimental phase of the sheets we consider are described, and the influence of many factors towards the more efficient functioning of the sheets. Then we examine and analyze the experimental process, presenting the sheets based on the material and technical characteristics, the equipment and all the machines and measuring devices we used to implement the experimental process. Further, the simulation of the configuration is carried out through the finite element method with the help of Ansys program, in order to make a comparison between the experimental and simulation process. However, the construction and discretization of the model will help of the finite element mesh for the more efficient analysis of the plates is presented. A choice is made of the materials we will use the binding of the knots is examined. Finally, we compare the experimental results with those obtained from the simulation process with the help of Ansys program and come to the final conclusions for Yoshida method obtained from the three different materials we used.

### 3. Περιεχόμενα

1. Περίληψη.....	5
2. Abstract.....	6
3. Περιεχόμενα .....	7
4. Εισαγωγή .....	9
5. Θεωρητικό μέρος.....	13
5.1 Χαρακτηριστικά για τη μέθοδο Yoshida Buckling test.....	13
5.2 Επίδραση των ιδιοτήτων στη διαμόρφωση των μεταλλικών ελασμάτων.....	19
5.3 Παράγοντες που επηρεάζουν τη συνολική μορφοποίηση κατά τον Yoshida ....	22
6. Ανάλυση λειτουργίας.....	23
7. Πειραματικό μέρος ελασμάτων .....	25
7.1 Πειραματικός εξοπλισμός .....	25
7.2 Υλικά μεταλλικών ελασμάτων .....	27
7.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά ελασμάτων.....	28
7.3.1 Πίνακας ελασμάτων χαλκού.....	30
7.3.2 Πίνακας ελασμάτων χάλυβα .....	30
7.3.3 Πίνακας ελασμάτων ορείχαλκου .....	31
7.4 Διεξαγωγή πειράματος.....	32
7.4 Μεταλλικά ελάσματα χαλκού .....	32
7.4.1 Έλασμα 1 <sup>ο</sup> .....	32
7.4.2 Έλασμα 2 <sup>ο</sup> .....	34
7.4.3 Έλασμα 3 <sup>ο</sup> .....	36
7.4.4 Μεταλλικά ελάσματα χάλυβα.....	38
7.4.4 Έλασμα 4 <sup>ο</sup> .....	38
7.4.5 Έλασμα 5 <sup>ο</sup> .....	40
7.4.6 Έλασμα 6 <sup>ο</sup> .....	42
7.4.7 Μεταλλικά ελάσματα ορείχαλκου .....	44
7.4.7 Έλασμα 7 <sup>ο</sup> .....	44
7.4.8 Έλασμα 8 <sup>ο</sup> .....	46
8. Μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων .....	48
8.1 Μοντελοποίηση μέσω της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων .....	53
8.2 Αποτύπωση πλέγματος στα ελάσματα .....	55
8.2 Προσομοίωση ελασμάτων χαλκού.....	55
8.3 Συμπεράσματα ελασμάτων χαλκού .....	58
8.4 Προσομοίωση ελασμάτων χάλυβα (ss 304).....	60
8.5 Συμπεράσματα ελασμάτων χάλυβα.....	63
8.6 Προσομοίωση ελασμάτων ορείχαλκου 0,5 mm .....	65
8.7 Προσομοίωση ελασμάτων ορείχαλκου 1 mm .....	69
8.8 Συμπεράσμα ελασμάτων ορείχαλκου .....	73
9. Συμπεράσματα .....	74
10. Κατάλογος Σχημάτων .....	75

11. Κατάλογος Πινάκων .....	78
12. Κατάλογος Αναφορών.....	79



## 4. Εισαγωγή

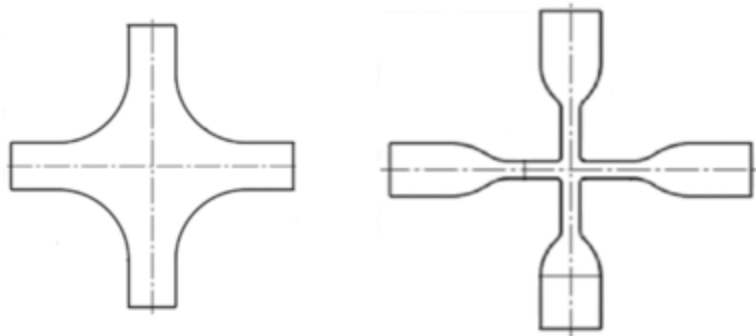
Ως κατεργασία ορίζεται η διαδικασία μορφοποίησης των διαφόρων υλικών αποσκοπώντας στην ιδιότητα τους να παραμορφώνονται πλαστικά συνδυάζοντας κατάλληλα τις συνθήκες φόρτισης, θερμοκρασίας και ταχύτητας για την παραγωγή των προϊόντων που επιθυμούμε. Οι κατεργασίες διαχωρίζονται σε τέσσερις βασικές κατηγορίες, κατεργασίες κοπής, κατεργασίες διαμόρφωσης, συγκολλήσεις και χύτευση (Εικόνα 2). Στη παρούσα εργασία η κατεργασία που μας απασχολεί αντιστοιχεί στις κατεργασίες διαμορφώσεων επίπεδων μεταλλικών ελασμάτων. Οι κατεργασίες μεταλλικών ελασμάτων χρονολογούνται από το 5000 π.Χ, όπου ξεκίνησε η κατασκευή οικιακών σκευών, κοσμημάτων, όπλων και άλλων αντικειμένων με σκοπό να εξυπηρετούν τις ανθρώπινες ανάγκες. Η διαμόρφωση των ελασμάτων μας υποδεικνύει την αλλαγή σχήματος, δηλαδή την αλλαγή της γεωμετρίας ενός υπάρχοντος στερεού σώματος. Σε αυτού του είδους τις κατεργασίες το αρχικό υλικό που χρησιμοποιείται εκτός από μορφή ελάσματος μπορεί να έχει και σχήμα ράβδου, σύρματος ή σωλήνα.

Ως λεπτά ελάσματα(sheets) χαρακτηρίζονται αυτά τα οποία έχουν πάχος μικρότερο από 6mm και χρησιμοποιούνται σε αμαξώματα οχημάτων και ατράκτους αεροσκαφών, δοχεία τροφών και αναψυκτικών, καθώς και εξοπλισμό κουζίνας και γραφείου. Seropé Kalrskjian, Steven R. Schmid Μηχανουργική Επιστήμη & Τεχνολογία Επιστημονική επιμέλεια Δημήτριος Μανωλάκος, Άγγελος Μαρκόπουλος. Τα μεταλλικά ελάσματα σε σύγκριση με αυτά που παράγονται μέσω χύτευσης και σφυρηλάτησης έχουν το μεγάλο πλεονέκτημα ότι το υλικό έχει υψηλό μέτρο ελαστικότητας, υψηλή αντοχή διαρροής και καλή αναλογία αντοχής προς το βάρος τους με αποτέλεσμα να τα τροποποιούμε σε σύνθετες γεωμετρίες χωρίς να υπάρχει γρήγορη θραύση τους. Τα πιο σημαντικά κριτήρια για την επιλογή ενός υλικού σχετίζονται με τη λειτουργία του κάθε εξαρτήματος και τις ιδιότητες του από τις οποίες χαρακτηρίζεται. Για τα μεταλλικά ελάσματα θα πρέπει να υπάρχει η ικανότητα να μορφοποιήσουν τους μέσω της διαμόρφωσή τους. Για να εκτιμήσουμε τη δυνατότητα διαμόρφωσης, θα πρέπει να είμαστε σε θέση να περιγράψουμε τη συμπεριφορά του φύλλου με ακριβή τρόπο και να εκφράσουμε τις ιδιότητες του σε μαθηματική μορφή.

Στις περισσότερες κατεργασίες που πραγματοποιούνται, τα ελάσματα βρίσκονται σε συνθήκες περιβάλλοντος. Η διαμόρφωση των μεταλλικών ελασμάτων μπορεί να αξιολογηθεί με διάφορες δοκιμές όπως δοκιμή κοίλανσης κωνικών κυπέλλων(conical cup drawing test),δοκιμή τεντώματος(stretch forming),Test λυγισμού Yoshida (Yoshida buckling test) ,διαξονικός εφελκυσμός (Biaxial tensile test).

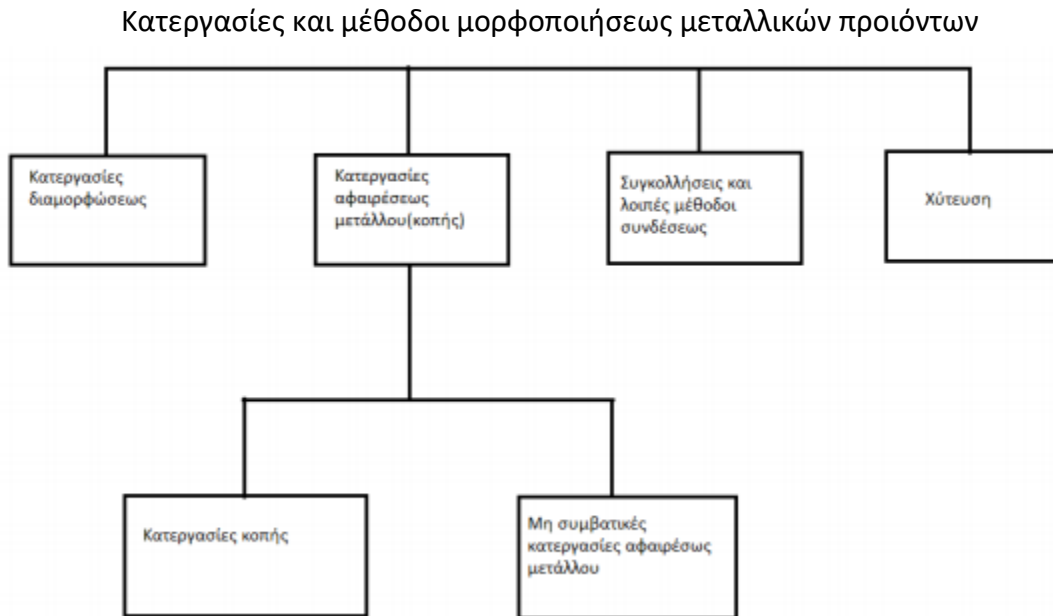
Αυτές είναι δοκιμές που χρησιμοποιούνται ευρέως για την αξιολόγηση της διαμόρφωσης των μεταλλικών ελασμάτων. Βασικά χαρακτηριστικά των μεταλλικών ελασμάτων είναι οι παραμένουσες τάσεις, οι διαστατικές ανοχές και η τραχύτητα επιφανείας τους. Η διαμόρφωση των μεταλλικών ελασμάτων γίνεται μεταξύ του ορίου διαρροής τους και του ορίου θραύση τους. Ως αποτυχία θεωρείται όχι μόνο η θραύση ή ο εντοπισμός λαιμού αλλά και γεωμετρικά ελαττώματα επιφανείας χαλαρό υλικό και πτυχώσεις που σχηματίζονται. Μία διαδικασία διαμόρφωσης μεταλλικών ελασμάτων είναι και αυτή της βαθείας κοίλανσης.Η βαθεία κοίλανση είναι η κατεργασία κατά την

οποία διαμορφώνεται ένα επίπεδο έλασμα σε κοίλο, μέσω ενός κατάλληλου εργαλείου. Η κοίλανση όπως αναφέρθηκε, πραγματοποιείται σε πρέσες. Κατά τη διαδικασία διαμόρφωσης προκαλούνται τοπικά θλιπτικές τάσεις. Αφενός, αυτές βρίσκονται συνήθως στην περιοχή της συγκράτησης και στη περιοχή που αλλάζει το σχήμα, αλλά καθώς η δύναμη του συγκρατητήρα του ακατέργαστου υλικού είναι αρκετά υψηλή οι κοιλάνσεις μπορεί να εμφανιστούν στα ελάσματα. Αντίστοιχα, οι υψηλές θλιπτικές τάσεις στη περιοχή του πλευρικού τοιχώματος των εξαρτημάτων βαθείας κοίλανσης, ειδικά σε περιοχές χωρίς επαφή με το εργαλείο, συχνά οδηγεί σε τοπικούς λυγισμούς. Συγκεκριμένα, η αύξηση των δυνάμεων συγκράτησης των δοκιμίων είναι ένα αποτελεσματικό μέτρο για την αποφυγή τσαλακώματος στο πλευρικό τοίχωμα, αλλά αυτό αυξάνει επίσης τον κίνδυνο ρωγμών. Εκτός τη από τη βαθεία κοίλανση τοπικά φαινόμενα λυγισμού-κοιλάνσεις μπορεί να παρουσιαστούν σε διαμόρφωση με τέντωμα (stretch forming process) κατά την οποία ένα κομμάτι ελάσματος τεντώνεται και κάμπτεται ταυτόχρονα πάνω από μία μήτρα προκειμένου να σχηματιστούν τα ελάσματα στη μορφή που απαιτείται.



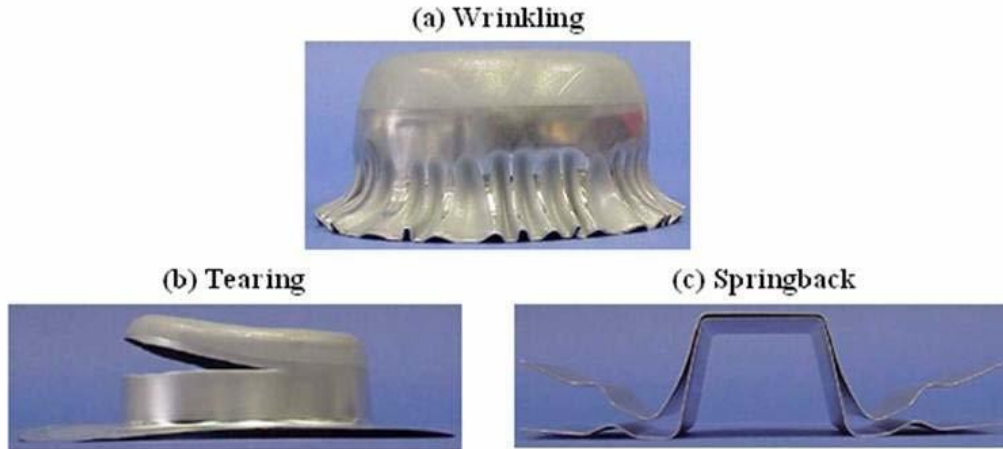
**Εικόνα 1** Διαξονικό τεστ Εφελκυσμού, **Biaxial tensile testing, Specimen shape, Wikipedia.org**

Μία άλλη εκδοχή της μεθόδου Yoshida είναι ο διαξονικός εφελκυσμός επιπέδων ελασμάτων η οποία μας δίνει ιδανικά αποτελέσματα για την κατανόηση των ιδιοτήτων του υλικού και την παραμόρφωση του ελάσματος κατά τη φάση του τεντώματος. Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό αυτή της μεθόδου είναι το σχήμα του δοκιμίου που χρησιμοποιείται το οποίο τις περισσότερες περιπτώσεις είναι σε σχήμα τετραγώνου η σταυροειδές.



**Εικόνα 2** Μηχανουργική Τεχνολογία II (Κατεργασίες Διαμόρφωσης) **Τεχνικά Επαγγελματικά Εκπαιδευτήρια 1ος Κύκλος Β΄ Τάξη**

Οι κοιλάνσεις ορίζονται ως επιφανειακές αποκλίσεις, οι οποίες είναι μη αποδεκτές εάν το μεταλλικό έλασμα χρησιμοποιείται σε εξωτερικά τμήματα πχ. του αυτοκινήτου που δεν πρέπει να έχουν γεωμετρικές ατέλειες. Επιπλέον, οι λειτουργικές ιδιότητες όπως ανεπαρκής μηχανική αντοχή ή έλλειψη ιδιοτήτων διάβρωσης, είναι αρνητικές επιπτώσεις στην οπτική των ελασμάτων. Ακόμα, οι κοιλάνσεις συνήθως αυξάνουν και τη φθορά των εργαλείων. Επομένως η πρόβλεψη των κοιλάνσεων παίζει σημαντικό ρόλο στη διαδικασία ανάπτυξης βιομηχανικών προϊόντων. Οι πειραματικές προσεγγίσεις μπορούν να χωρίζονται σε δύο ομάδες. Από τη μία πλευρά, υπάρχουν απλές υποδειγματικές γεωμετρικές βαθείας κοιλανσης ως κύπελλα. Από την άλλη πλευρά χρησιμοποιούνται ειδικές γεωμετρικές δειγμάτων, οι οποίες είναι κατάλληλες για δοκιμές μεταλλικών ελασμάτων. Οι τελευταίες περιλαμβάνουν τη δοκιμή λυγισμού Yoshida, όπου το δοκίμιο έχει σχεδιαστεί για να δημιουργεί θλιπτικές τάσεις τοποθετώντας μια δύναμη εφελκυσμού. Αυτό επιτρέπει μια ποιοτική σύγκριση της τάσης λυγισμού διαφόρων υλικών. Η γεωμετρία του δείγματος του τεστ λυγισμού Yoshida καθώς και η πειραματική ρύθμιση έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία 40 χρόνια με στόχο να αποκτηθούν περισσότερες πληροφορίες για το τοπικό λυγισμό.



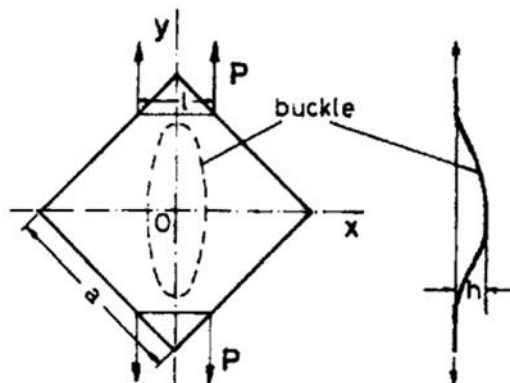
**Εικόνα 3** Προβλήματα ποιότητας εξαρτήματος στη διαδικασία διαμόρφωσης λαμαρίνας. α) Πτυχώσεις, β) Σχίσσιμο, γ) Δυνάμεις επαναφοράς (springback) **MIMO Adaptive Process Control in Stamping Using Punch Force** Yongseob Lim, Daegu Gyeongbuk Institute of Science and Technology

## 5. Θεωρητικό μέρος

### 5.1 Χαρακτηριστικά για τη μέθοδο Yoshida Buckling test

Ο μονοαξονικός εφελκυσμός ενός τετραγωνικού μεταλλικού φύλλου κατά μήκος της μίας εκ των δύο από τις διαγώνιες του ονομάζεται Yoshida Buckling Test (Test λυγισμού Yoshida). Αυτό το test πραγματοποιήθηκε από τον Yoshida, προκειμένου να γίνει εκτίμηση των τάσεων σχηματισμού κοιλάνσεων σε φύλλα μεταλλικών ελασμάτων με σκοπό την πρόβλεψη και κατανόηση του σχηματισμού τους που δημιουργούνται στα μεταλλικά ελάσματα. Στο test λυγισμού Yoshida αναπτύσσεται μια μη ομοιόμορφη παραμόρφωση λόγω μονοαξονικού τεντώματος που οδηγεί σε πλαστικό λυγισμό (buckling). Τα ελάσματα έχουν σχεδιαστεί έτσι ώστε να δημιουργούν θλιπτικές τάσεις τοποθετώντας μία δύναμη εφελκυσμού.

Οι κοιλάνσεις είναι ουσιαστικά ένα τοπικό φαινόμενο λυγισμού που προκύπτουν από τις τάσεις συμπίεσης (αστάθεια συμπίεσης). Η εφελκυστική παραμόρφωση στην διεύθυνση φόρτισης ( $y$ ) προκαλεί μία συμπιεστική τάση στην εγκάρσια διεύθυνση ( $x$ ) στην κεντρική περιοχή του δείγματος, και έτσι η τάση συμπίεσης προκαλεί το σχηματισμό των κοιλάνσεων. Finite Element Analysis of the Wrinkling Initiation and Growth in Modified Yoshida Buckling Test. J. B. Kim and D. T. Yang Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science & Technology 373-1 Gusung-dong, Yuseong-ku, Taejeon 305-701, Korea. Όταν το έργο που δημιουργείται από αυτές τις δυνάμεις εφελκυσμού είναι μικρότερο από την ενέργεια παραμόρφωσης της συμπίεσης, η επίπεδη μορφή ισορροπίας της πλάκας είναι σταθερή. Εάν το ίδιο έργο γίνει μεγαλύτερο από την ενέργεια συμπίεσης για οποιοδήποτε σχήμα πλευρικής παραμόρφωσης, η πλάκα είναι ασταθής και εμφανίζεται λυγισμός.

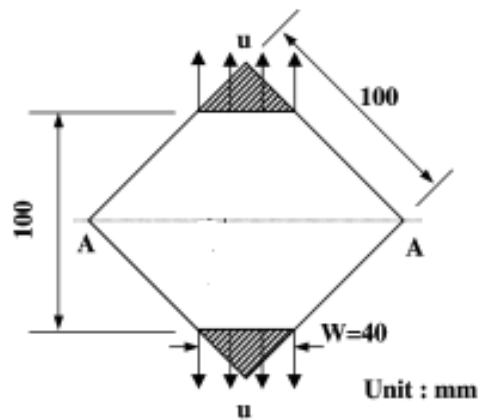


**Εικόνα 4** Η αρχή του Yoshida Buckling Test **On the Yoshida Buckling Test of High Strength and Coated Low Carbon Steels** A. G. Mamalis and L. P. Hatzikonstantis; National Technical University of Athens/Greece

Σε μια πραγματική λειτουργία το μεταλλικό φύλλο καταπονείται σε μία ανομοιογενή κατάσταση με αποτέλεσμα να «τσαλακωθεί» το έλασμα. Με την αύξηση του ύψους των

κοιλάνσεων, οι εφελκυστικές και συμπιεστικές τάσεις στα κεντρικά σημεία των ελασμάτων αυξάνονται μέχρι μία τιμή έως ότου αστοχήσουν.

Ο λόγος τάσης στη κεντρική περιοχή του δείγματος μπορεί να αλλάξει μεταβάλλοντας απλά το μήκος και το πλάτος των ελασμάτων, και την απόσταση που οι αρπάγες το γραπώνουν. Αυτό αυτομάτως συνεπάγεται και διαφορετικά αποτελέσματα και ως προς το τελικό σχήμα του φύλλου και ως προς τις τιμές των δυνάμεων, τάσεων, παραμόρφωσης που θα λάβουν τα ελάσματα μέχρι να αστοχήσουν.

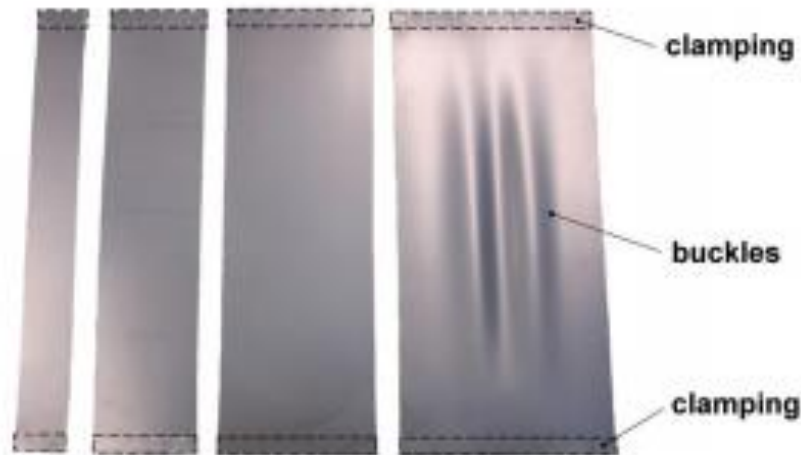


**Εικόνα 5** Σχηματική απεικόνιση της μεθόδου Yoshida. **Wrinkling initiation and growth in modified Yoshida buckling test: Finite element analysis and experimental comparison J.B. Kim!, J.W. Yoon", D.Y. Yang!,\***

Κατά τη διάρκεια της πειραματικής φάσης δημιουργούνται προβλήματα λόγω του πιασίματος (γραπώματος) από τις αρπάγες του μηχανήματος στα μεταλλικά ελάσματα, με αποτέλεσμα να επηρεάζονται τα αποτελέσματα. Ωστόσο η δοκιμή Yoshida είναι αποτελεσματική για την εκτίμηση της ζαρωμένης συμπεριφοράς των μεταλλικών ελασμάτων, και έχει επιλεγεί ως παράδειγμα για τη μελέτη των τοπικών φαινομένων λυγισμού στα πειραματικά μοντέλα. Ο στόχος αυτής της πειραματικής εργασίας δεν ήταν μόνο η μελέτη της συμπεριφοράς λυγισμού, αλλά και η λήψη πληροφοριών σχετικά με την κατανομή των τάσεων στην επιφάνεια των φύλλων και τη διάδοση των τάσεων πριν, κατά τη διάρκεια και μετά τον λυγισμό.

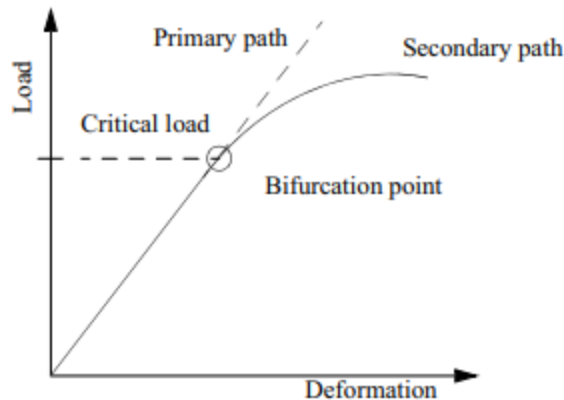
Η ακαμψία στο λυγισμό περιγράφει την αντίσταση κατά τη φάση της πρώτης ελαστικής παραμόρφωσης. Η ακαμψία εξαρτάται από το πάχος του μεταλλικού φύλλου, το μέτρο ελαστικότητας του υλικού, τη γεωμετρία του και την κατάσταση των τάσεων που αναπτύσσονται. Επιπλέον, η αντίσταση λυγισμού περιγράφει την αντίσταση έναντι πλαστικής παραμόρφωσης.

Αντίστοιχα με το λυγισμό των δοκών, ο λυγισμός λεπτών μεταλλικών φύλλων μπορεί επίσης να συμβεί υπό φορτίο συμπίεσης. Πολλές αναλυτικές προσεγγίσεις σχετικά με τον σχηματισμό των κοιλάνσεων έχουν πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας τη θεωρία της πλαστικής διχοτόμησης (plastic bifurcation theory). Οι κοιλάνσεις έχουν επίσης μελετηθεί με την ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων.



**Εικόνα 6** Εξέλιξη των πτυχώσεων λόγω εγκάρσιας συστολής σε μονοαξονική τάση, *Investigation on Simulation of Buckling of Aluminium Sheet Alloys*, Ralf Schleich, Christoph Albiez, Apostolos papaioanu, Prof. Dr .M. Liewald MBA

Η θεωρία που υπάρχει για τη συμπεριφορά των μεταλλικών ελασμάτων που υπόκεινται σε συμπιεστικές δυνάμεις χωρίζεται σε δύο μέρη: πρώτον τον υπολογισμό του κρίσιμου σημείου έναρξης των πτυχώσεων και δεύτερον τον προσδιορισμό της τελικής στάθμης του φορτίου. Το κρίσιμο επίπεδο φορτίου είναι εξ ορισμού το σημείο όπου η «τέλεια δομή» χάνει τη σταθερότητα της και ξεκινάει η ανάπτυξη των πτυχώσεων. Το σημείο αυτό ονομάζεται σημείο διχοτόμησης ή φορτίο διχοτόμησης και παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.



**Εικόνα 7** Σχηματική περιγραφή της διχοτόμησης *Plate Buckling Resistance* Mattias Clarin, Lulea University of Technology Department of Civil, Mining and Environmental Engineering Division of Structural Engineering – Steel Structures

Ο αναλυτικός υπολογισμός της διχοτόμησης με βάση την κλασική θεωρία της ελαστικότητας μπορεί να γίνει είτε μέσω της επίλυσης της διαφορικής εξίσωσης της πλάκας, είτε μέσω της ενεργειακής μεθόδου. Η διαφορική εξίσωση που περιγράφει την επιφάνεια εκτροπής για την ισορροπία του ελάσματος κάτω από μικρές παραμορφώσεις

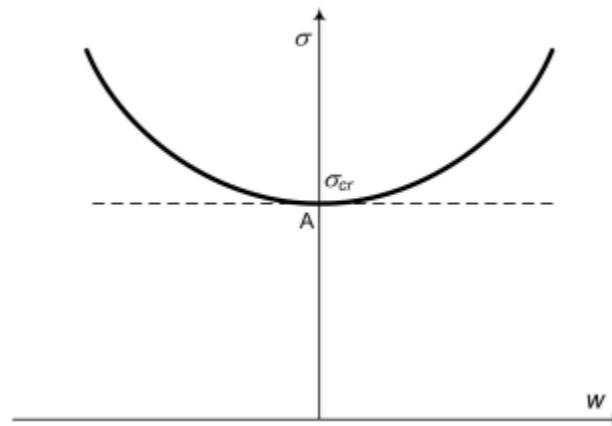
φορτωμένης στο επίπεδο της δημιουργήθηκε από τον Saint-Venant το 1870, Dubas και Gehri(1986) ,THEORY OF ELASTIC STABILITY Timoshenko& Gere, International Student editions in related fields,Plate Buckling Resistance, Mattias Clarin,Lulea University of Technology Department of Civil, Mining and Enviromental Engineering Division of Structural Engineering – Steel Structures

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \cdot \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{1}{D} \cdot \left[ N_x \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} + 2 \cdot N_{xy} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right] \quad (5.1)$$

Όπου w είναι η πλευρική μετατόπιση και η καμπτική ακαμψία της πλάκας δίνεται από:

$$D = \frac{E \cdot t^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \quad (5.2)$$

Όπου E είναι το μέτρο ελαστικότητας, t το πάχος του ελάσματος και ν ο λόγος του Poisson. Αυτή η εξίσωση της πλάκας προέκυψε με την παραδοχή ότι το υλικό συμπεριφέρεται με ιδανικά ελαστικό τρόπο, η πλάκα είναι χωρίς αρχικές ατέλειες όπως η αρχική καμπυλότητα ή υπολειπόμενες τάσεις. Επιπλέον, οι παραμορφώσεις της πλάκας θεωρείται ότι είναι μικρές. Σύμφωνα με αυτές τις παραδοχές, η πλάκα δεν παρουσιάζει πλευρικές παραμορφώσεις μέχρι να επιτευχθεί το κρίσιμο επίπεδο τάσης. Σε αυτό το σημείο, η απόκλιση μπορεί να είναι είτε αρνητική είτε θετική όσον αφορά το σύστημα συντεταγμένων της πλάκας.



**Εικόνα 8** Διχοτόμηση συστήματος στο σημείο A. Η πλάκα λυγίζει είτε στη θετική είτε στην αρνητική κατεύθυνση .**Plate Buckling Resistance Mattias Clarin, Lulea University of Technology Department of Civil, Mining and Enviromental Engineering Division of Structural Engineering – Steel Structures**

Ακόμα έχει αναπτυχθεί μία έκφραση ενέργειας παραμόρφωσης για μία πλάκα υπό κάμψη. Η προσέγγιση αυτής της μεθόδου είναι να μελετηθεί η ενέργεια της πλάκας στο σημείο της διχοτόμησης, όπου το έλασμα παύει να είναι επίπεδο και να ακολουθεί η



πλευρική παραμόρφωση μέσω των πτυχώσεων. Η λύση βασίζεται μεταξύ της εσωτερικής ενέργειας της κάμψης και του εξωτερικού έργου που γίνεται από τις δυνάμεις που δρουν μόνο στο επίπεδο του ελάσματος. Η έκφραση για την περιγραφή της ενέργειας παραμόρφωσης που αποθηκεύεται στο έλασμα είναι:

$$U = \frac{1}{2} \cdot D \cdot \iint \left[ \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)^2 - 2 \cdot (1 - \nu) \cdot \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 \right) \right] dx dy \quad (5.3)$$

Ακόμα η εξίσωση που περιγράφει το έργο που εκτελείται από τις εξωτερικά εφαρμοζόμενες δυνάμεις είναι:

$$T = -\frac{1}{2} \iint \left[ N_x \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + N_y \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + 2 \cdot N_{xy} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right] dx dy \quad (5.4)$$

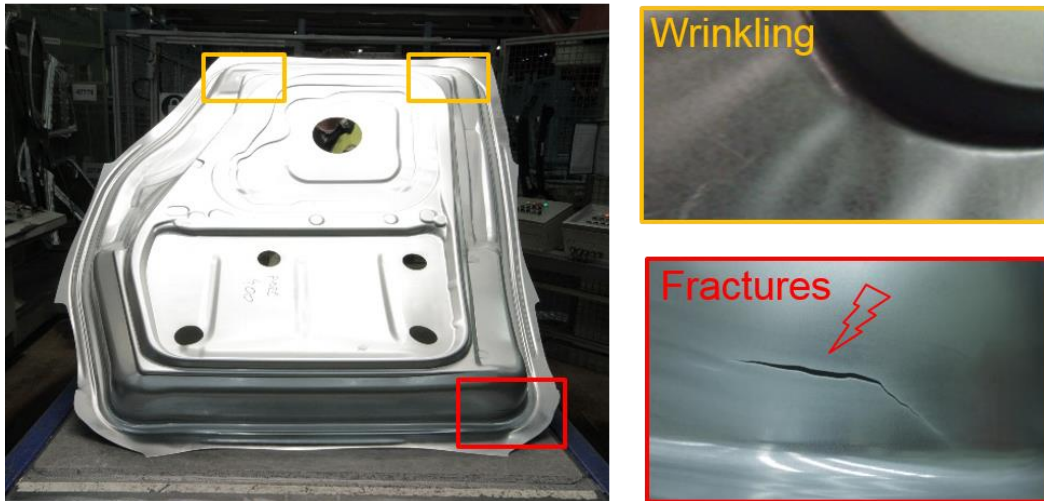
Η συσχέτιση ανάμεσα στην εσωτερική ενέργεια και το εξωτερικό έργο κατά τους Timoshenko και Gere (1963) δίνουν τις ακόλουθες πληροφορίες σχετικά με την σταθερότητα των ελασμάτων στο σημείο της διχοτόμησης.

- Εάν  $U > T$ , τότε η επίπεδη μορφή ισορροπίας των ελασμάτων είναι σταθερή
- Εάν  $U < T$ , τότε το έλασμα είναι ασταθές και εμφανίζεται λυγισμός

Για κωνικά κύπελλα η κρίσιμη θλιπτική τάση, η οποία απαιτείται για την έναρξη της ανάπτυξης των πτυχώσεων παρουσιάζεται παρακάτω:

$$\sigma_1^{cr} = \frac{1+r}{\sqrt{3(1+2r) \cdot R_2}} \cdot \frac{t}{R_2} \cdot \sqrt{E_s \cdot E_t} \quad (5.5) \quad \sigma_2^{cr} = \frac{1+r}{\sqrt{3(1+2r) \cdot R_2}} \cdot \frac{t}{R_1} \cdot \sqrt{E_s \cdot E_t} \quad (5.6)$$

Αυτή η εξίσωση δείχνει ότι η κρίσιμη θλιπτική τάση  $\sigma^{cr}$  η οποία απαιτείται για την έναρξη της πτύωσης, εξαρτάται από το πάχος του φύλλου  $t$ , την ακτίνα καμπυλότητας  $R$ , την ανισοτροπία του υλικού  $r$ , τον εφαπτομενικό συντελεστή  $E_t$  και τον συντελεστή τομής  $E_s$ . Επομένως οι δείκτες 1 και 2 υποδεικνύουν τους κύριους άξονες καμπυλότητας καθώς και την κατάσταση τάσης. Το  $\sigma_1^{cr}$  αντιπροσωπεύει την κρίσιμη τάση κατά τη διεύθυνση  $x_1$  κάθετη στη καμπυλότητα  $1/R_2$  στη  $x_2$  κατεύθυνση. *Application of Wrinkling Criterion for Prediction of Side-Wall Wrinkles in Deepdrawing of Conical Cups* H. H. Wisselink, G. T. Nagy and T. Meinders.

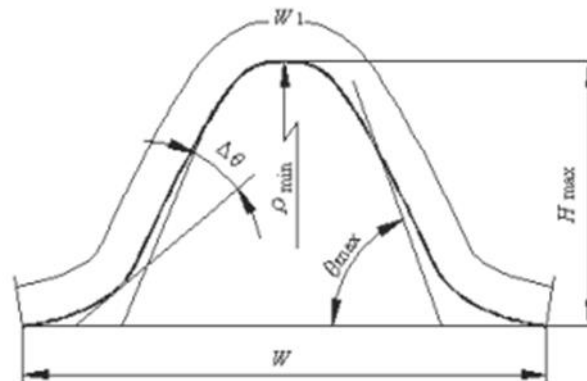


**Εικόνα 9** Η ποιότητα του εσωτερικού τμήματος της πόρτας εξαρτάται από τις συνθήκες τριβής και λίπανσης κατά τη παραγωγή, α) λυγισμός (wrinkling), β) σκίσιμο (fractures), **Volvo Car Group: Door-inner Volvo XC90, TriboForm virtual tribology**

## 5.2 Επίδραση των ιδιοτήτων στη διαμόρφωση των μεταλλικών ελασμάτων

Οι ιδιότητες των υλικών είναι ένας από τους βασικούς παράγοντες των κατεργασιών διαμόρφωσης, και αυτό αντικατοπτρίζει την διαφορετική συμπεριφορά των μεταλλικών ελασμάτων στις διαδικασίες διαμόρφωσης τους. Τα πιο σημαντικά κριτήρια για την επιλογή ενός υλικού σχετίζονται με τη λειτουργία του κάθε εξαρτήματος. Βασικές ιδιότητες όπως η αντοχή, η ακαμψία, η πυκνότητα τους, η αντοχή στη διάβρωση κ. τ. λ παίζουν καθοριστικό ρόλο ως προς την επιλογή τους. Για τα μεταλλικά ελάσματα απαραίτητη προϋπόθεση είναι η δυνατότητα μορφοποίησης τους χωρίς να επέλθει άμεση θραύση. Χρησιμοποιώντας 3 διαφορετικά υλικά καταλήγουμε στο ότι τα «μαλακά» υλικά χρειάζονται μικρότερη δύναμη διαμόρφωσης εν αντιθέσει με το χάλυβα που χρειάζεται πολύ μεγαλύτερη. Όσο περισσότερο όλκιμο είναι το υλικό τόσο λιγότερες πιθανότητες έχει να παρουσιάσει ρωγμές το μεταλλικό έλασμα και το βασικότερο να αστοχήσει στην κρίσιμη ζώνη συγκράτησης του στο σημείο που πιάνεται στις αρπάγες της μηχανής.

Παρακάτω αναφέρονται αναλυτικά οι καθοριστικοί παράγοντες διαμόρφωσης των μεταλλικών ελασμάτων: Mechanics of Sheet Metal Forming, The Technical University of Warsaw, Poland Z. Marciniak, The University of Auckland, New Zealand, J.L Duncan The University of Michigan USA.



**Εικόνα 10** Η μέθοδος αξιολόγησης της μορφολογίας των πτυχώσεων, **Research of the wrinkling elimination of stainless steel SUS304 by viscous pressure Tiejun**

### 1) Σχήμα της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης (stress/strain curve)

Η σημαντική παράμετρος είναι η σκληρότητα παραμόρφωσης (strain hardening). Όσο μεγαλύτερη είναι η σκληρότητα παραμόρφωσης του φύλλου, τόσο καλύτερη θα είναι η απόδοση του σε διαδικασίες όπου υπάρχει τέντωμα του ελάσματος. Το τέντωμα δηλαδή ο εφελκυσμός, θα είναι πιο ομοιόμορφα κατανομημένο και το φύλλο θα αντιστέκεται στο σχίσιμο και για υψηλές τιμές παραμόρφωσης. Άλλος βασικός παράγοντας είναι ο λόγος εφελκυσμού/διαρροής  $TS/(\sigma_f)_0$ , η ολική επιμήκυνση  $E_{tot}$ , και η μέγιστη ομοιόμορφη καταπόνηση,  $\epsilon_n$ , όσο υψηλότερα βρίσκονται αυτά τόσο μεγαλύτερη είναι η σκληρότητα στη παραμόρφωση.

## 2) Ανισοτροπία (Anisotropy)

Εάν το μέγεθος της παραμέτρου επίπεδης ανισοτροπίας  $\Delta R$ , είναι μεγάλο, είτε θετικό είτε αρνητικό, ο προσανατολισμός του φύλλου σε σχέση με τη μήτρα ή το τμήμα που θα σχηματιστεί θα είναι σημαντικός σε κυκλικά μέρη και θα παρατηρηθεί μία ασύμμετρη διαμόρφωση. Εάν ο κανονικός λόγος ανισοτροπίας  $R$  είναι μεγαλύτερος από τη μονάδα, υποδηλώνει ότι στη δοκιμή εφελκυσμού η παραμόρφωση πλάτους θα είναι μεγαλύτερη. Η κανονική ανισοτροπία  $R$  έχει επίσης πιο ανεπαίσθητα αποτελέσματα. Σε προϊόντα βαθείας κοίλανσης, μία υψηλή τιμή επιτρέπει βαθύτερα προϊόντα κατά τη κοίλανση. Σε ρηχά μέρη με ομαλό περίγραμμα, όπως εξωτερικά ελάσματα αυτοκινήτου, μία υψηλότερη τιμή  $R$  μπορεί να μειώσει τη πιθανότητα τσαλακώματος ή πτυχώσεων των αντικειμένων.

## 3) Fracture (Θραύση)

Ακόμη και σε όλκιμα υλικά, οι διαδικασίες εφελκυσμού μπορούν να περιοριστούν από ξαφνική θραύση. Το χαρακτηριστικό θραύσης δεν δίνεται από την ολική επιμήκυνση, αλλά υποδεικνύεται από το εμβαδόν διατομής της θραυσμένης επιφάνειας αφού το δοκίμιο έχει λαιμό και αστόχησε. Αυτό είναι δύσκολο να μετρηθεί σε λεπτά ελάσματα και κατά συνέπεια τα προβλήματα λόγω θραύσης να μην αναγνωρίζονται σωστά.



**Εικόνα 11** Διαμόρφωση ελάσματος μέσω τεντώματος (stretch forming) για εξωτερικό τμήμα αεροσκάφους Senior Aerospace, Thermal Engineering – Stretch Forming process

**4) *Homogeneity (Ομοιογένεια)***

Τα βιομηχανικά ελάσματα, δεν είναι ποτέ εντελώς ομοιογενής, ούτε απαλλαγμένα από τοπικά ελαττώματα. Τα ελαττώματα μπορεί να οφείλονται σε διακυμάνσεις στη σύνθεση, την υφή ή το πάχος ή να υπάρχουν ως σημειακά ελαττώματα. Αυτά είναι δύσκολο να χαρακτηριστούν με ακρίβεια. Η ανομοιογένεια δεν υποδεικνύεται με μία μόνο δοκιμή εφελκυσμού και ακόμη και με επαναλαμβανόμενες δοκιμές, ο πραγματικός όγκος του υλικού που δοκιμάζεται είναι μικρός και οι ανομοιομορφίες μπορεί να μην εντοπίζονται επαρκώς.

**5) *Surface effects (επιφανειακές επιδράσεις)***

Η τραχύτητα του φύλλου και η αλληλεπίδραση του με λιπαντικά και επιφάνειες εργαλείων θα επηρεάσει την απόδοση του σε μία διαδικασία διαμόρφωσης, αλλά δεν θα μετρηθεί στη δοκιμή εφελκυσμού. Υπάρχουν ειδικές δοκιμές για τη διερεύνηση των ιδιοτήτων της επιφάνειας του μεταλλικού ελάσματος.

**6) *Rate sensitivity (Ρυθμός ευαισθησίας)*** Ο ρυθμός ευαισθησίας των περισσότερων ελασμάτων είναι μικρός σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, για το χάλυβα είναι ελαφρώς θετικός και για το αλουμίνιο ελαφρώς αρνητικός. Η ευαισθησία του θετικού ρυθμού συνήθως βελτιώνει τη διαμόρφωση και έχει ένα αποτέλεσμα παρόμοιο με την σκληρότητα παραμόρφωσης. Διακρίνεται από το μέγεθος της επέκτασης στο δοκίμιο εφελκυσμού μετά το μέγιστο φορτίο και το λαιμό, λίγο πριν την αστοχία.



**Εικόνα 12** Σύστημα συγκράτησης (αρπάγες) μεταλλικών ελασμάτων

### 5.3 Παράγοντες που επηρεάζουν τη συνολική διαμόρφωση κατά τον Yoshida

---

Η διαμορφωσιμότητα αναφέρεται στην ικανότητα των μεταλλικών ελασμάτων να μορφοποιούνται χωρίς σφάλματα (ρωγμές, πτυχώσεις ή λυγισμό). Πρέπει να σημειωθεί ότι η θέση και η διεύθυνση της πτύχωσης στα μεταλλικά ελάσματα είναι τυχαίες, δηλαδή το κεντρικό σημείο του δείγματος μπορεί να μετατοπιστεί τυχαία στη θετική ή την αρνητική κατεύθυνση. Προτείνεται ότι η κοίλανση πρέπει να χαρακτηρίζεται από 3 κυρίως παράγοντες: *On the Yoshida Buckling Test of High Strength and Coated Low Carbon Steels* A. G. Mamalis and L. P. Hatzikonstantis; National Technical University of Athens/Greece.

- *Fittability* (Εφαρμοστικότητα)
- *Shape fixability* (Ακρίβεια σχήματος)
- *Fracture resistance* (Αντοχή στη θραύση)

## 6. Ανάλυση λειτουργίας

Η πειραματική διαδικασία υλοποιήθηκε στη μηχανική πρέσα INSTRON 4482, που υπάρχει στο εργαστήριο του Τομέα των Κατεργασιών. Η συγκεκριμένη μηχανή διαθέτει μηχανισμό αρπάγης ο οποίος γραπώνει με μεταλλικές σιαγώνες τα μεταλλικά ελάσματα ώστε να πραγματοποιηθούν τα πειράματα. Το σύστημα της αρπάγης του μηχανήματος διαθέτει μια ειδικά διαμορφωμένη επιφάνεια (σαγρέ) που μπορεί να γραπώνει το μεταλλικό έλασμα χωρίς να γλιστρά. Ωστόσο όμως παρατηρήθηκε μια μικρή ολίσθηση η οποία εμφανίστηκε κατά τη φάση που δεν παραμορφωνόταν άλλο το υλικό και το φορτίο είχε υψηλή τιμή. Πρώτα από όλα μηδενίζουμε τη μετρητική διάταξη ώστε να έχουμε ένα σημείο αναφοράς και να μηδενίσουμε τα σφάλματα. Ο μηδενισμός γίνεται στη απόσταση των ελασμάτων πριν γίνει η σύσφιξη. Στη συνέχεια τοποθετούμε τα ελάσματα στο μηχανήμα μας, σε κάθετη θέση με τις αρπάγες του μηχανήματος να γραπώνουν τις δύο απέναντι γωνίες των ελασμάτων σφίγγοντας τα ελάσματα όσο το δυνατόν καλύτερα ώστε να αποτρέψουμε την ολίσθηση κατά την διάρκεια του πειράματος. Μέσω του Ηλεκτρονικού υπολογιστή ορίζουμε την ταχύτητα ανύψωσης του κινητού εμβόλου μέσω των σερβοκινητήρων που διαθέτει η μετρητική διάταξη. Η ταχύτητα του εμβόλου που ορίστηκε για όλα τα ελάσματα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν 5 mm/min. Παρακάτω φαίνεται η μηχανική πρέσα κατά τη φάση του μηδενισμού (calibration).



Εικόνα 13 Μηχανική Πρέσα INSTRON 4482

Εφόσον ακολουθηθεί η παραπάνω διαδικασία και δεν έχουμε παραλείψει κάποιο βήμα ξεκινάει η διαδικασία. Το κινητό έμβολο μετατοπίζεται στον κάθετο άξονα ενώ το σταθερό τμήμα που βρίσκεται στο κάτω σημείο της διάταξης απλά παραμένει σταθερό συγκρατώντας, τα ελάσματα. Το πείραμα βρίσκεται εις πέρας όταν παρατηρώντας τη καμπύλη Φορτίου-Μετατόπισης στην οθόνη του Η/Υ, η τιμή του φορτίου πέφτει απότομα από υψηλή σε χαμηλή που συνεπάγεται και τη θραύση του μεταλλικού ελάσματος σε κάποιο τμήμα του. Όλη η παραπάνω διαδικασία που αναφέρθηκε ακολουθήθηκε για όλα τα ελάσματα που χρησιμοποιήθηκαν.



## 7. Πειραματικό μέρος ελασμάτων

### 7.1 Πειραματικός εξοπλισμός

Παρακάτω παρατίθεται τα μηχανήματα που χρησιμοποιήθηκαν και τα μεταλλικά ελάσματα για τη διεξαγωγή της πειραματικής διαδικασίας. Πρώτα από όλα τα μεταλλικά ελάσματα και των τριών υλικών (χαλκός, χάλυβας, ορείχαλκος) ήταν σε φύλλα μεγάλης επιφάνειας τα οποία και κόπηκαν στο ψαλίδι κοπής (εικόνα 11) σε τετραγωνική διατομή.



**Εικόνα 14** Ψαλίδι κοπής μεταλλικών ελασμάτων

Το κύριο μηχάνημα που έγινε η πειραματική διαδικασία του Yoshida Test είναι η μηχανική πρέσα INSTRON 4482 (εικόνα 6). Είναι μια μετρητική μηχανή που πραγματοποιεί διάφορα είδη μηχανικών καταπονήσεων όπως εφελκυσμός, θλίψη και κάμψη κ.τ.λ.

Η πρέσα αυτή είναι μια μετρητική μηχανή που ανάλογα με το είδος της διαμόρφωσης που πρόκειται να εκτελέσουμε, τοποθετούμε και τα τμήματα συγκράτησης της ανάλογα. Αποτελείται από σερβοκινητήρες, ένα σταθερό και ένα κινητό τμήμα που φέρουν αρπάγες για τη συγκράτηση των μεταλλικών ελασμάτων και Η/Υ ο οποίος είναι συνδεδεμένος με τη μηχανική πρέσα και κάνει τη καταγραφή των τιμών που προκύπτουν. (φορτία, μετατοπίσεις, τάσεις, παραμορφώσεις, κ. τ. λ)

Πίνακας 1 Τεχνικά χαρακτηριστικά της μηχανικής πρέσας INSTRON 4482

<b>Frame Design</b>	<i>Floor Standing</i>	<b>Height</b>	300
<b>Load Capacity</b>	<i>100 KN</i>	<b>Width</b>	1130
<b>Maximum speed</b>	500 mm/min	<b>Depth</b>	757
<b>Minimum speed</b>	0.001mm/min	<b>Strain measurement accuracy</b>	±0.5% of reading down to 1/50 of full range
<b>Maximum force at full speed</b>	75 KN	<b>Load measurement</b>	±0.5% of reading down to 1/50 of load cell capacity
<b>Maximum speed at full load</b>	250 mm/min	<b>Position Control Resolution</b>	0.006 μm
<b>Return speed</b>	600mm/min	<b>Crosshead speed accuracy</b>	± 0.10 mm or 0.15% of displacement
<b>Position measurement accuracy</b>	+,- 0.10mm or 0.15%	<b>Single Phase Voltage</b>	230

Instron Model 4400 Universal Testing System, Operator's Guide



Εικόνα 15 Πειραματική διάταξη μηχανική πρέσα και ηλεκτρονικός υπολογιστής καταγραφής των δεδομένων

## 7.2 Υλικά μεταλλικών ελασμάτων

---

### Ελάσματα χάλυβα

Ο χάλυβας είναι το πιο διαδεδομένο υλικό που χρησιμοποιείται στα μεταλλικά ελάσματα και έχει εφαρμογή σε διάφορα αντικείμενα της βιομηχανίας όπως αμαξώματα αυτοκινήτων, φορτηγών, πλοίων κ.τ.λ. Προσφέρει καλή αντοχή στη διάβρωση αλλά είναι περισσότερο ευάλωτος από τα υπόλοιπα μέταλλα σε περιβάλλοντα που υπάρχει νερό ή υγρασία στον αέρα. Ωστόσο διατηρεί την ικανότητα του να μορφοποιείται και να συγκολλάται. Ακόμα χαρακτηρίζεται και για την υψηλή μαγνητική διαπερατότητα του.

### Ελάσματα Χαλκού

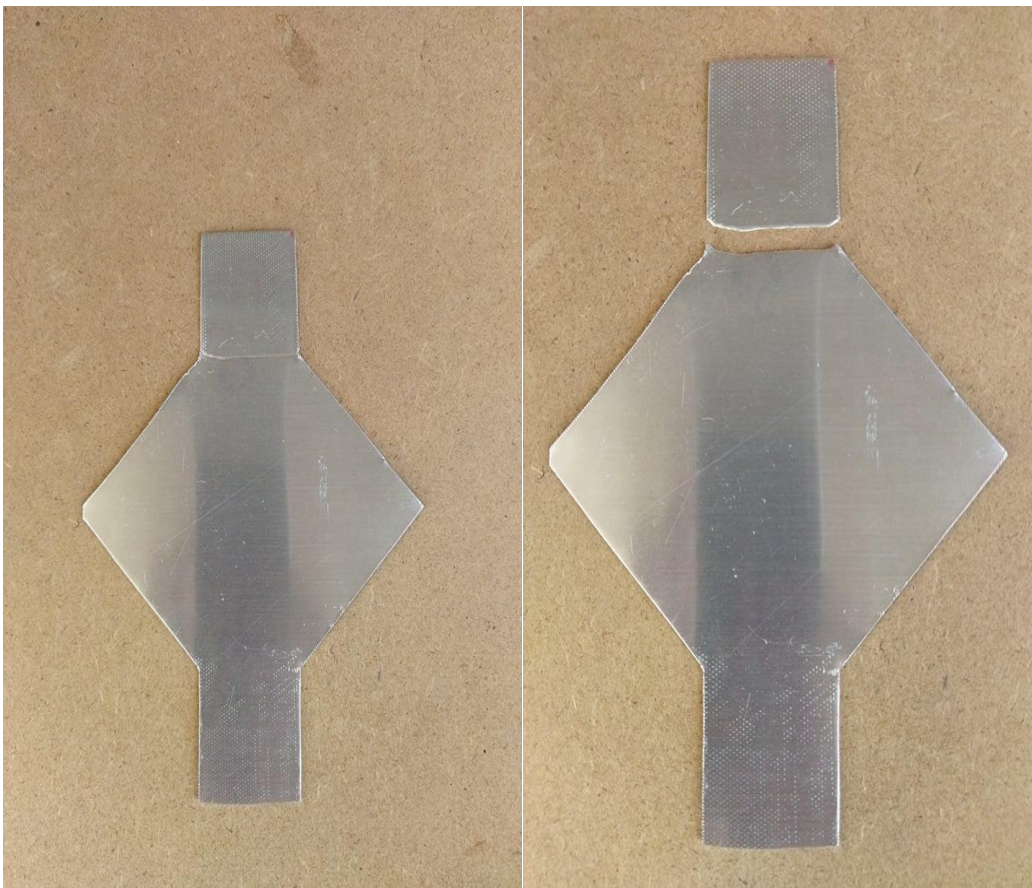
Ο χαλκός είναι ένα μέταλλο το οποίο δεν περιέχει σίδηρο, με αποτέλεσμα να κατατάσσεται στα μη σιδηρούχα μέταλλα. Κύριο χαρακτηριστικό του είναι η ολκιμότητα που παρουσιάζει δίνοντας του την ικανότητα να μπορεί να μορφοποιηθεί χωρίς να προκαλείται γρήγορη θραύση του. Οι ουσίες που μπορούν να διαβρώσουν το χαλκό δεν είναι τόσο κοινές όσο εκείνες που διαβρώνουν τα υπόλοιπα μέταλλα με αποτέλεσμα να το καθιστά ανθεκτικό σε «ευάλωτα» περιβάλλοντα. Ακόμα ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά του είναι η υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα που χρησιμοποιείται στους αγωγούς και σε ηλεκτρικά εξαρτήματα.

### Ελάσματα Ορείχαλκου

Ο ορείχαλκος είναι ένα κράμα χαλκού και ψευδαργύρου, το οποίο χρησιμοποιείται και αυτό για την κατασκευή διαφόρων αντικειμένων. Συγκριτικά με το χαλκό έχει μεγαλύτερη αντοχή, αντοχή στη διάβρωση και στη μορφοποίηση του χωρίς να παραμορφώνεται τόσο εύκολα, ενώ ταυτοχρόνως, μπορεί να διατηρεί την αγωγιμότητα του.

### 7.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά ελασμάτων

Τα πρώτα δοκίμια που διεξήχθησαν τα πειράματα ήταν ελάσματα αλουμινίου τα οποία δεν είχαν καθαρά τετραγωνική διατομή, αλλά τετραγωνικά ελάσματα που στις δύο αντίθετες γωνίες είχαν παρατεταμένο εξάρτημα για καλύτερη συγκράτηση κατά τη φάση του πειράματος (εικόνα 13). Διαπιστώθηκε αδύνατη η εφαρμογή της μεθόδου Yoshida στο τύπο αλουμινίου που είχαμε διαθέσιμο στο εργαστήριο, μιας και ήταν ψαθυρό με αποτέλεσμα να σχίζεται πριν καν τσαλακωθεί. Ωστόσο κάνοντας πειράματα και με τα υπόλοιπα υλικά με παρατεταμένο εξάρτημα σύσφιξης καταλήγαμε στο να αστοχούν και αυτά, με αποτέλεσμα να καταργήσουμε το παρατεταμένο τμήμα τους και τα μεταλλικά ελάσματα τα οποία χρησιμοποιήσαμε τελικά να έχουν καθαρά και μόνο τετραγωνική διατομή. Ο λόγος ο οποίος προκαλούσε την αστοχία σε αυτά τα δοκίμια που δεν είχαν καθαρά τετραγωνική διατομή αλλά παρατεταμένο τμήμα κατά τη μία εκ των δύο από τις διαγώνιες του, ήταν η ανάπτυξη συγκέντρωσης τάσεων λόγω υπάρξεως γεωμετρικής ασυνέχειας. Παρακάτω παρατίθεται ένα από τα δοκίμια αλουμινίου που χρησιμοποιήθηκαν με το αρχικό και τελικό σχήμα του.



Εικόνα 16 Έλασμα Αλουμινίου πριν και μετά το πείραμα

Όπως αναφέρθηκε τα ελάσματα που χρησιμοποιήθηκαν τελικά για την πειραματική διαδικασία ήταν φύλλα επίπεδης επιφάνειας τα οποία κόπηκαν στο ψαλίδι κοπής (Εικ 11) σε τετραγωνική μορφή διαστάσεων  $100 \cdot 100 \text{mm}^2$  και πάχους 0,5 mm για το χαλκό και το χάλυβα και 0,5 και 1mm για τον ορείχαλκο. Όλα τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν έχουν τα ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά εκτός από τον ορείχαλκο ο οποίος ενώ είναι τετραγωνικής διατομής έχουν και μεγαλύτερες διαστάσεις σε σχέση με τα άλλα δύο υλικά  $156 \cdot 156 \text{mm}^2$  και  $162 \cdot 162 \text{mm}^2$ . Ο λόγος ο οποίος κοπήκανε τα μεταλλικά ελάσματα του ορείχαλκου σε μεγαλύτερες διαστάσεις σε σχέση με το χάλυβα και τον χαλκό ήταν ότι επειδή ο ορείχαλκος δεν ήταν τόσο όλκιμος όσο τα άλλα υλικά, προερχόταν η θραύση των ελασμάτων πριν καν παραμορφωθούν με αποτέλεσμα για να μπορέσουμε να πάρουμε τα αποτελέσματα που θέλουμε να αυξήσουμε την επιφάνεια τους και για τα 2 πάχη. Με αύξηση της επιφάνειάς τους μπορέσαμε να πετύχουμε την παραμόρφωση χωρίς να συμβεί γρήγορη θραύση. Για το χαλκό και το χάλυβα κόπηκαν 3 ίδια ελάσματα για να έχουμε αξιοπιστία μέτρησης (επαναληψιμότητα) το οποίο μας δίνει καλύτερα αποτελέσματα στις διαδοχικές μετρήσεις. Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στην ακρίβεια των διαστάσεων των ελασμάτων, ώστε να ελαχιστοποιήσουμε όσο το δυνατό περισσότερο τα σφάλματα βάση πάντα των μηχανημάτων που διαθέτουμε. Όλα τα ελάσματα ελέγχθηκαν ώστε να είναι όσο το δυνατόν πιο επίπεδα χωρίς να υπάρχουν ανομοιομορφίες ώστε να περιορίσουμε τη συγκέντρωση τάσεων και να λάβουμε καλύτερα αποτελέσματα.



**Εικόνα 17** Δοκίμια μεταλλικών ελασμάτων (χάλυβα,χαλκού,ορείχαλκου) μετά το πέρας του πειράματος

### 7.3.1 Πίνακας ελασμάτων χαλκού

Πίνακας 2 Ελάσματα χαλκού

α/α	Μήκος-Πλάτος	Πάχος	Maximum load (N)	Maximum Tensile stress (Mpa)	Tensile strain at Maximum Tensile stress (mm/mm)	Tensile extension at Maximum Tensile stress (mm)
<b>Δοκίμιο 1</b>	100*100 mm	0,5 mm	4285	304	0.30933	10.83210
<b>Δοκίμιο 2</b>	100*100 mm	0.5 mm	4127	293	0.23103	8.08990
<b>Δοκίμιο 3</b>	100*100 mm	0.5 mm	4362	310	0.28710	10.04880

### 7.3.2 Πίνακας ελασμάτων χάλυβα

Πίνακας 3 Ελάσματα χάλυβα

	Μήκος-Πλάτος	Πάχος	Maximum load (N)	Maximum Tensile stress (Mpa)	Tensile strain at Maximum Tensile stress (mm/mm)	Tensile extension at Maximum Tensile stress (mm)
<b>Δοκίμιο 4</b>	100*100 mm	0,5 mm	8032	570	0.17560	6.14850
<b>Δοκίμιο 5</b>	100*100 mm	0.5 mm	6505	462	0.18478	6.47750
<b>Δοκίμιο 6</b>	100*100 mm	0.5 mm	6049	392	0.16407	5.75270

### 7.3.3 Πίνακας ελασμάτων ορείχαλκου

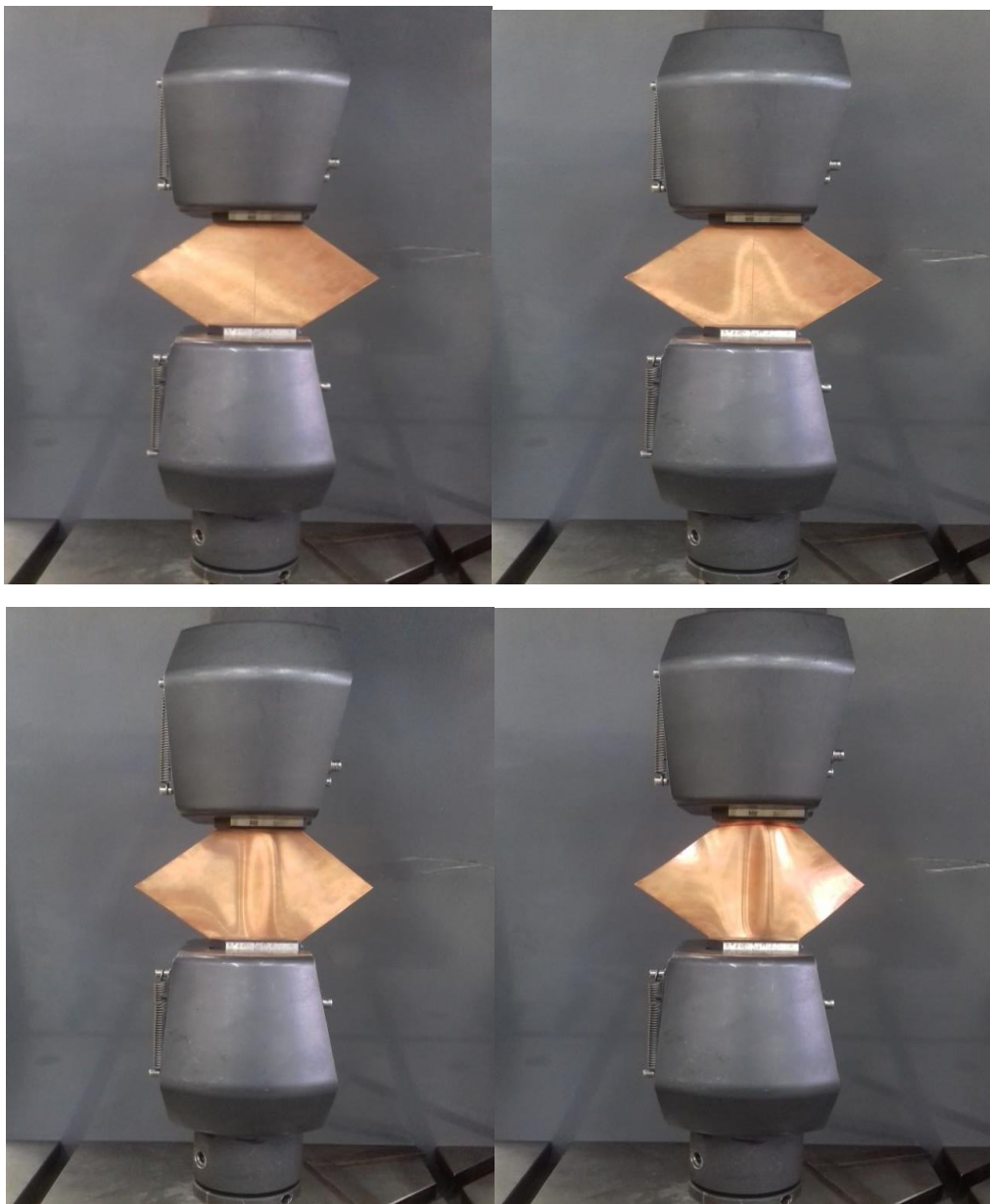
Πίνακας 4 Ελάσματα Ορείχαλκου

α/α	Μήκος-Πλάτος	Πάχος	Maximum load (N)	Maximum Tensile stress (Mpa)	Tensile strain at Maximum Tensile stress (mm/mm)	Tensile extension at Maximum Tensile stress (mm)
<b>Δοκίμιο 7</b>	156*156 mm	0,5 mm	10704	450	0.08388	2.93580
<b>Δοκίμιο 8</b>	162*162 mm	1 mm	8282	474	0.10552	3.69470

## 7.4 Διεξαγωγή πειράματος

### 7.4 Μεταλλικά ελάσματα χαλκού

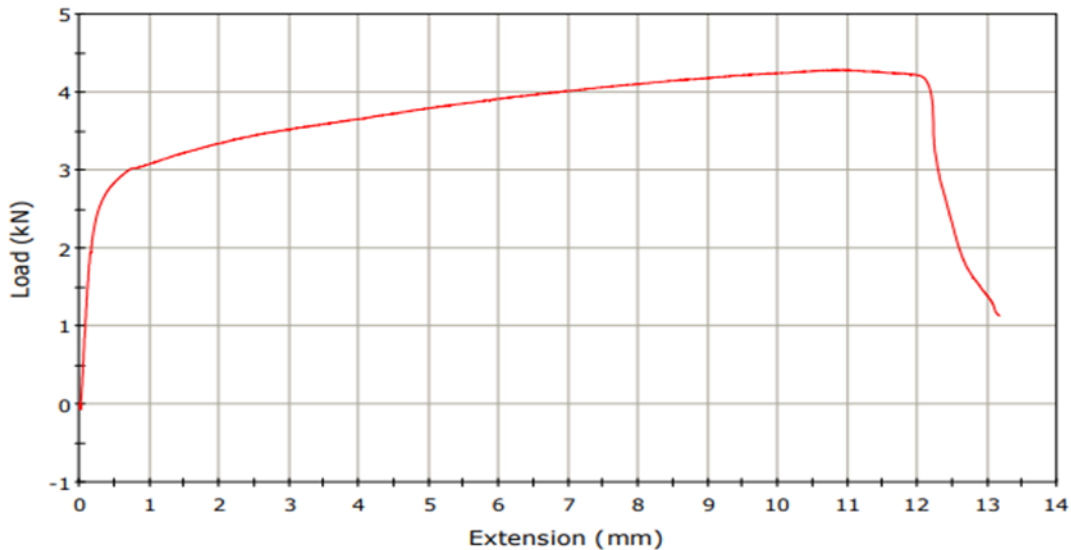
#### 7.4.1 Έλασμα 1°



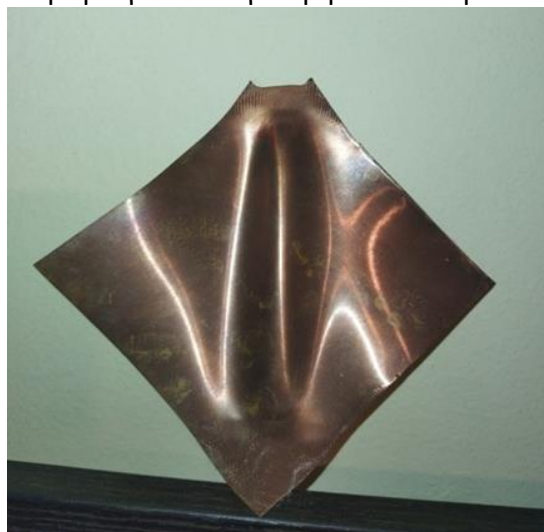
Εικόνα 18 Αρχικό, ενδιάμεσο και τελικό στάδιο διαδικασίας, Διατομή  $100 \cdot 100 \text{mm}^2$ , Πάχος  $0.5 \text{mm}$



**Γραφική παράσταση Φορτίου-Μετατόπισης Χαλκός No 1**



Από το παραπάνω γράφημα φορτίου-μετατόπισης η καμπύλη βρίσκεται στην ελαστική περιοχή έως τα 0,2 mm μετατόπιση, που αυτομάτως μεταφράζεται ότι σε όλο το εύρος της περιοχής αυτής η άρση του φορτίου μας επιτρέπει στο δοκίμιο να επανέλθει στο αρχικό μήκος που βρισκόταν. Στη συνέχεια ξεκινάει να διαρρέει το υλικό και εισέρχεται στη πλαστική περιοχή με την ανάπτυξη των πτυχώσεων. Συγκριτικά με ένα δοκίμιο κυκλικής διατομής στο οποίο μειώνεται η διατομή του, στα μεταλλικά ελάσματα μειώνεται το πλάτος κατά την εγκάρσια κατεύθυνση  $x$  με αποτέλεσμα να δημιουργούνται κοιλάνσεις. Για μετατόπιση περίπου 12,2mm και φορτίο 4200N έχουμε μεγάλη πτώση του φορτίου που συμβαίνει και η θραύση του στο σημείο συγκράτησης του. Παρακάτω φαίνεται το σημείο του σχισίματος με αποτέλεσμα να κοπεί ένα τμήμα του ελάσματος και φθάνοντας εις πέρας το πείραμα για το συγκεκριμένο έλασμα.



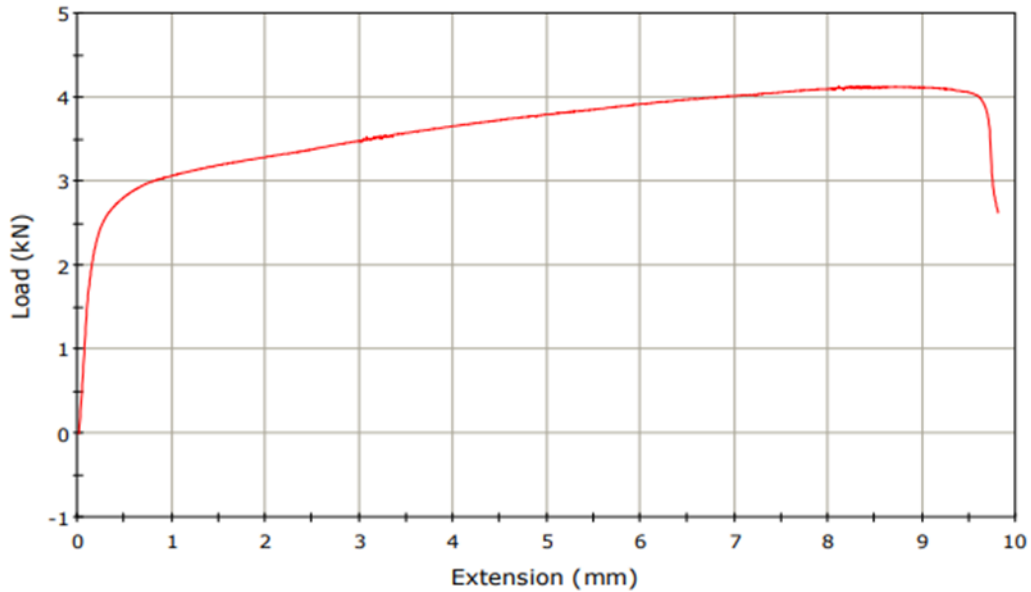
**Εικόνα 19** Έλασμα μετά το μονοαξονικό εφελκυσμό

### 7.4.2 Έλασμα 2°



Εικόνα 20 Αρχικό, ενδιάμεσο και τελικό στάδιο διαδικασίας, , Διατομή 100·100, Πάχος 0.5mm

**Γραφική παράσταση Φορτίου-Μετατόπισης Χαλκός Νο 2**

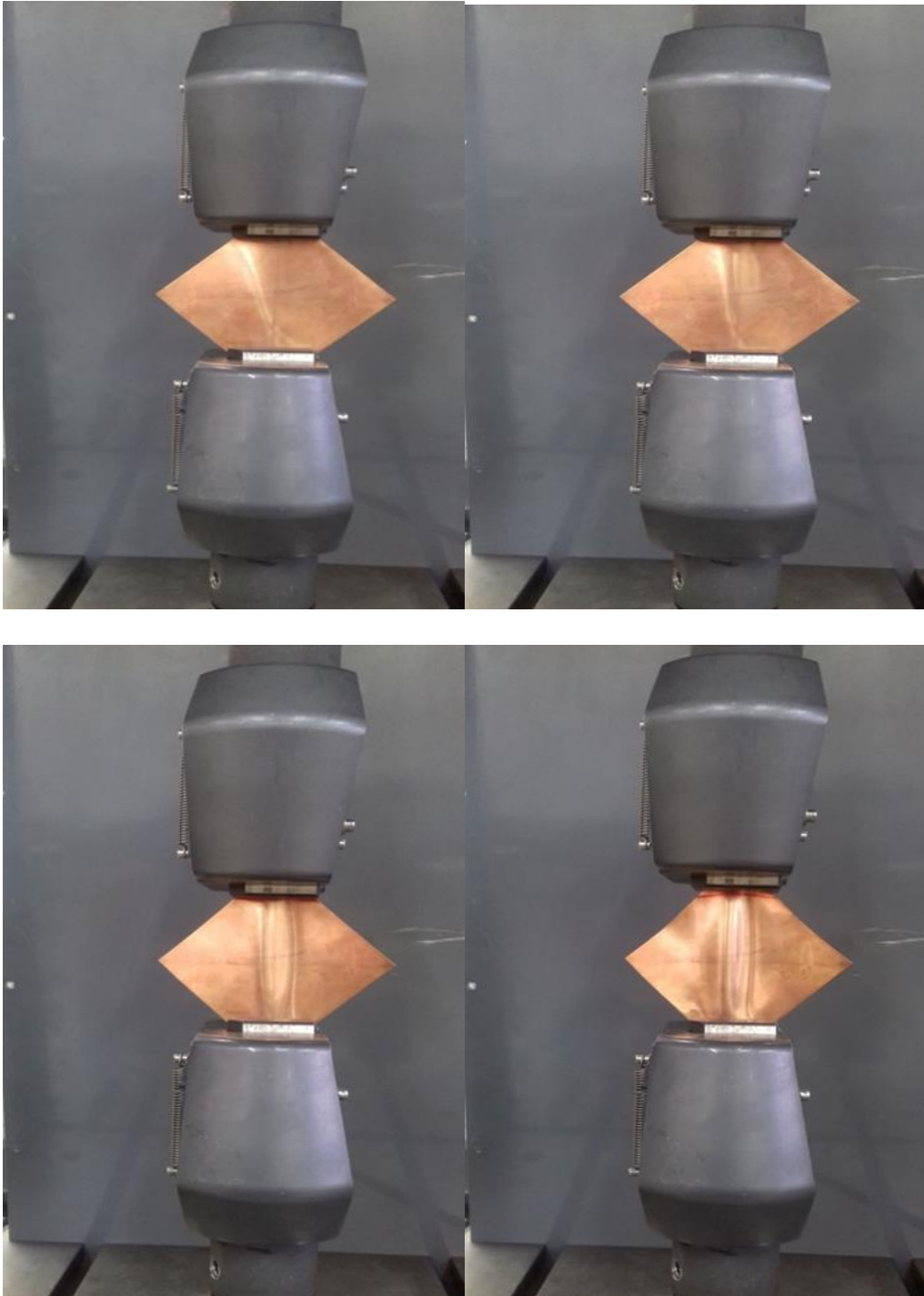


Για το δεύτερο έλασμα χαλκού από το γράφημα φορτίου-μετατόπισης παρατηρούμε ότι και η καμπύλη αυτή βρίσκεται στην ελαστική περιοχή έως τα 0,2 mm μετατόπιση, που αυτομάτως μεταφράζεται ότι σε όλο το εύρος της περιοχής αυτής η άρση του φορτίου μας επιτρέπει στο έλασμα να επανέλθει στο αρχικό μήκος που βρισκόταν. Για αυτό το έλασμα παρατηρούμε μικρότερη μετατόπιση συγκριτικά με το πρώτο που συνεπάγεται ότι η θραύση επήλθε σε μικρότερο μήκος επιμήκυνσης. Στη περίπτωση αυτή φτάνει τα 9,5mm και ακολουθεί το σχίσσιμο στο τμήμα συγκράτησης του.



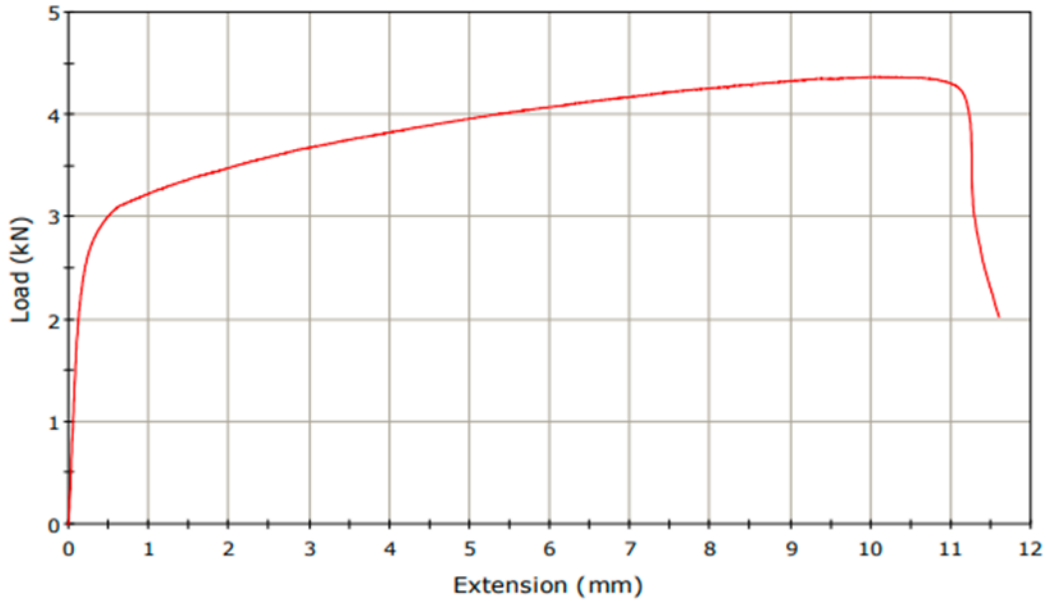
**Εικόνα 21** Έλασμα μετά το μονοαξονικό εφελκυσμό

### 7.4.3 Έλασμα 3°



Εικόνα 22 Αρχικό, ενδιάμεσο και τελικό στάδιο διαδικασίας, Διατομή 100·100, Πάχος 0.5mm

Γραφική παράσταση Φορτίου-Μετατόπισης Χαλκός Νο 3



Για το τρίτο δοκίμιο χαλκού από το γράφημα φορτίου-μετατόπισης παρατηρούμε ότι η καμπύλη βρίσκεται στην ελαστική περιοχή έως τα 0,2 mm μετατόπιση, που αυτομάτως μεταφράζεται ότι σε όλο το εύρος της περιοχής αυτής η άρση του φορτίου μας επιτρέπει στο δοκίμιο να επανέλθει στο αρχικό μήκος που βρισκόταν. Και για τα τρία ελάσματα η μετατόπιση επιμήκυνσης είχε μία μικρή απόκλιση μεταξύ τους όπως και το μέγιστο φορτίο τους.



Εικόνα 23 Έλασμα μετά το μονοαξονικό εφελκυσμό

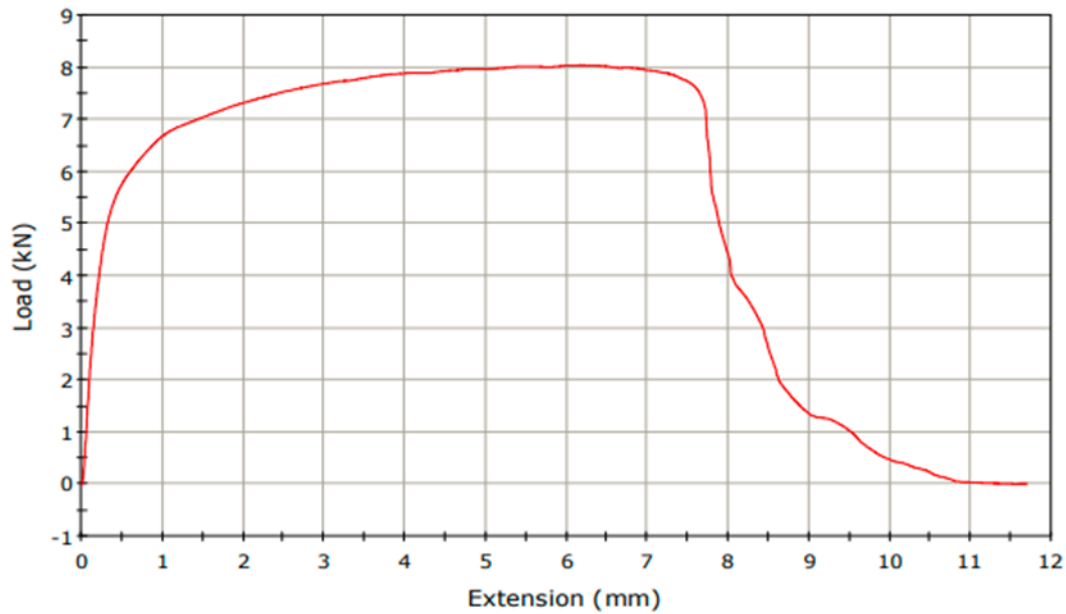
## 7.4.4 Μεταλλικά ελάσματα χάλυβα

### 7.4.4 Έλασμα 4°



**Εικόνα 24** Αρχικό, ενδιάμεσο και τελικό στάδιο διαδικασίας, Διατομή 100·100, Πάχος 0.5mm

**Γραφική παράσταση Φορτίου-Μετατόπισης Χάλυβας Νο 4**

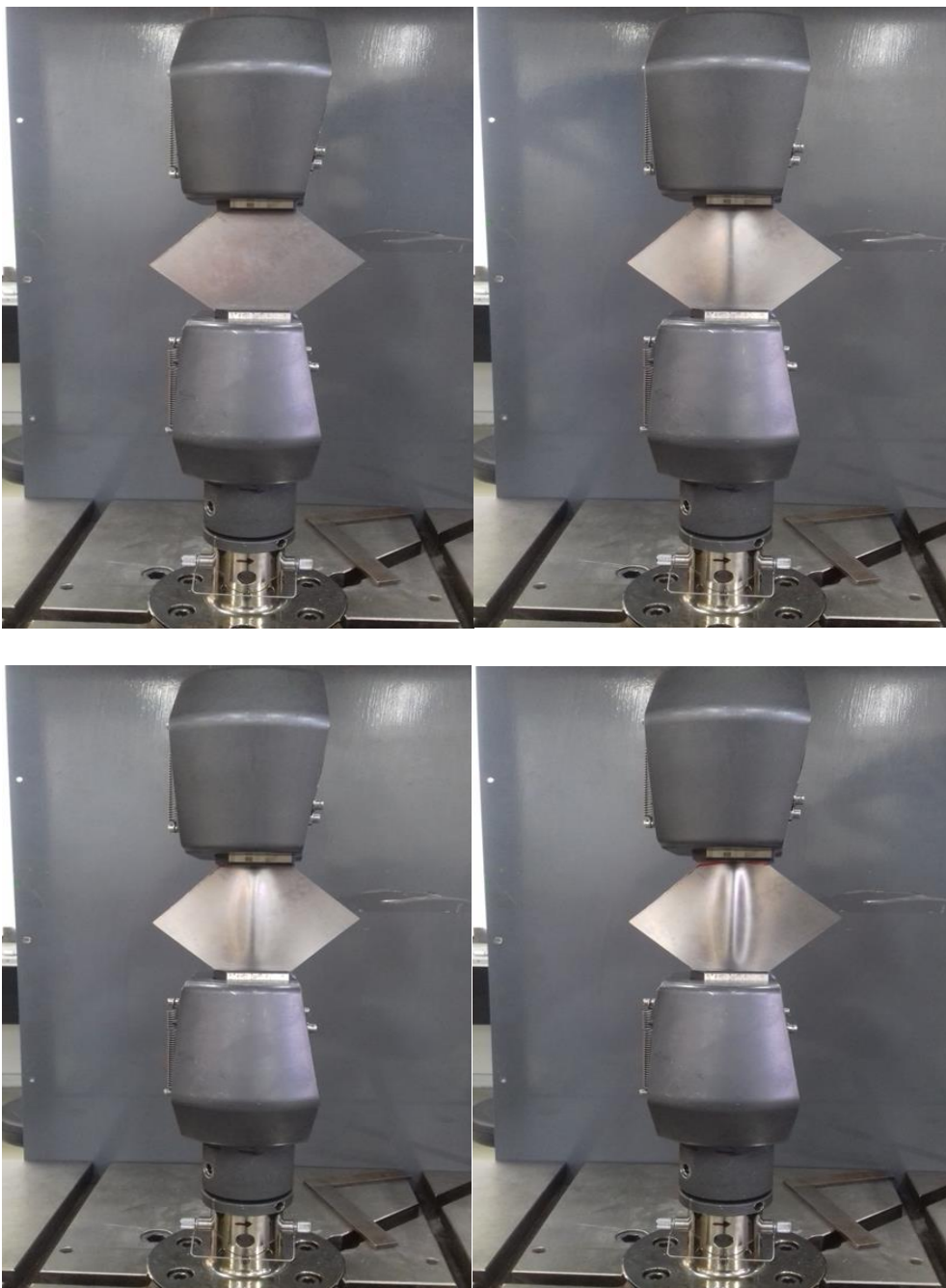


Ο χάλυβας ως πιο σκληρό μέταλλο συγκριτικά με το χαλκό χρειάζεται τη διπλάσια δύναμη για να παραμορφωθεί. Βλέποντας τη γραφική παράστασή του, παρατηρούμε ότι βρίσκεται στην ελαστική περιοχή μέχρι τα 0,3 mm και στη συνέχεια ξεκινάει η πλαστική παραμόρφωση του. Το ύψος των κοιλάνσεων είναι μικρότερο συγκριτικά με τα ελάσματα του χαλκού και για μετατόπιση 7,5 mm επέρχεται θραύση στο σημείο συγκράτησής του.



**Εικόνα 25** Έλασμα μετά το μονοαξονικό εφελκυσμό

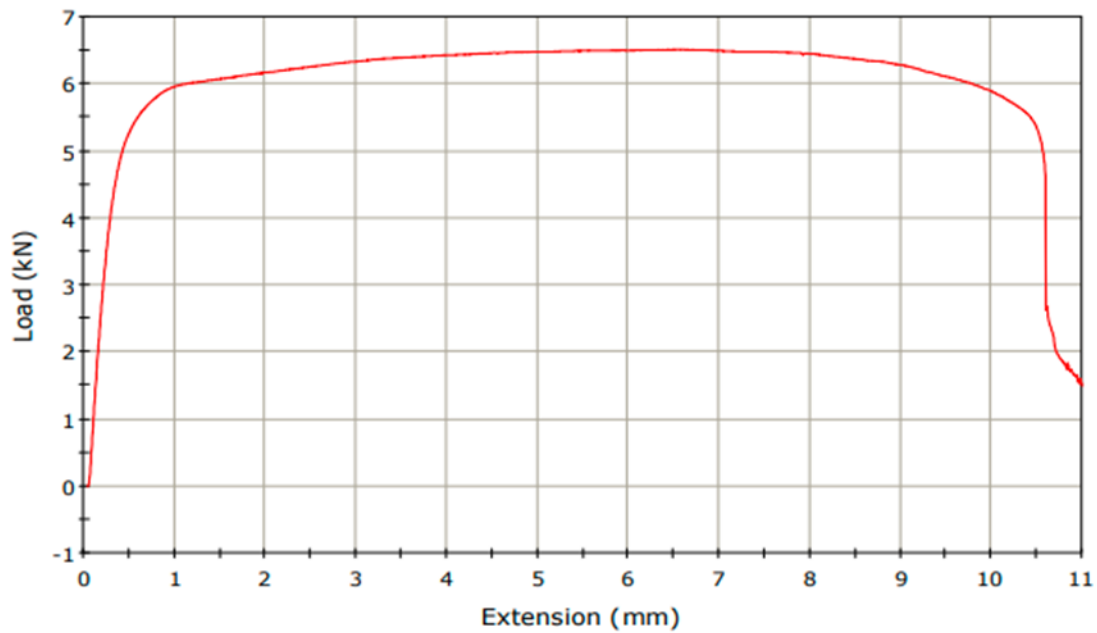
### 7.4.5 Έλασμα 5°



Εικόνα 26 Αρχικό, ενδιάμεσο και τελικό στάδιο διαδικασίας, Διατομή 100·100, Πάχος 0.5mm



**Γραφική παράσταση Φορτίου-Μετατόπισης Χάλυβας Νο 5**

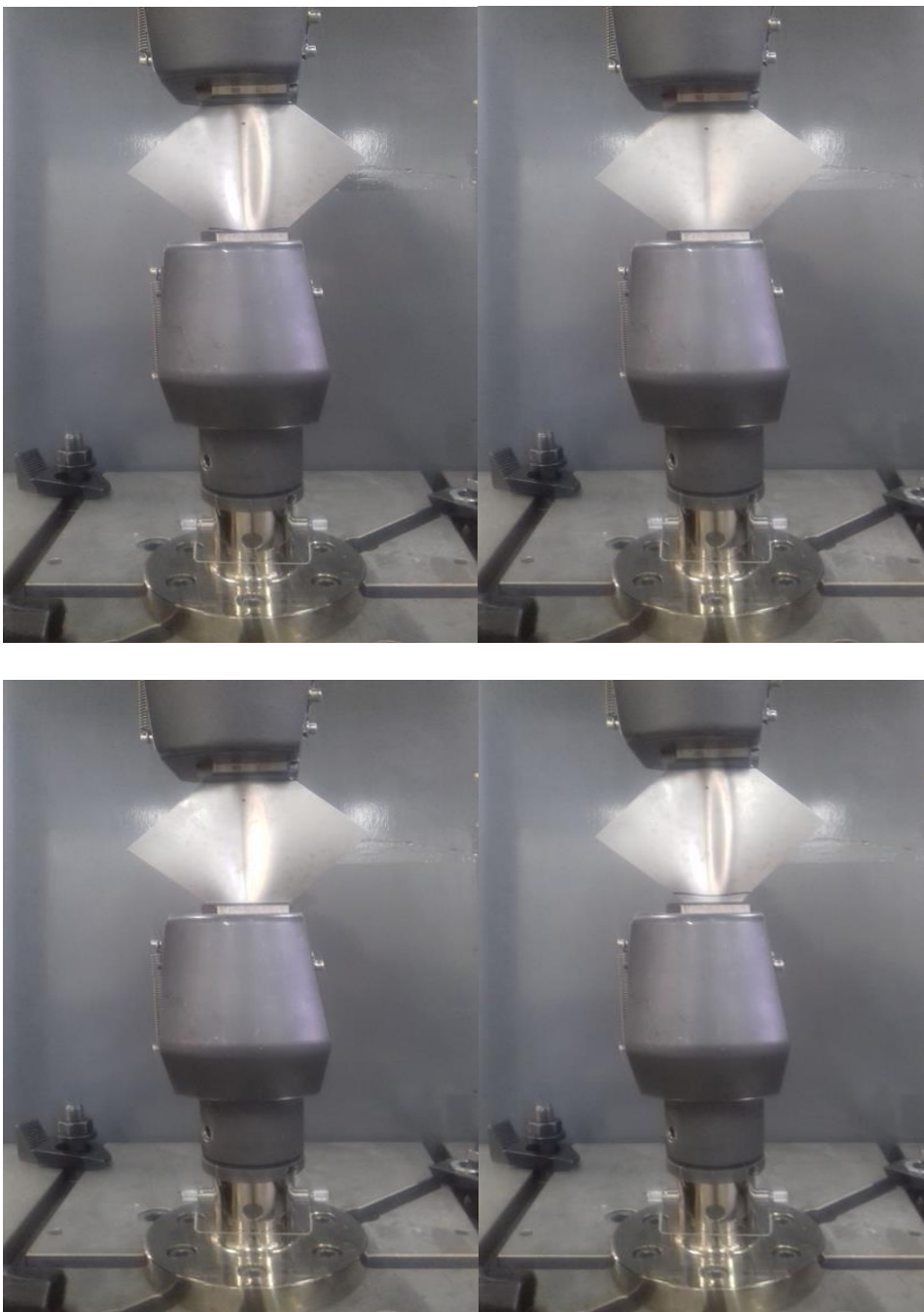


Για το δεύτερο έλασμα του χάλυβα παρατηρείται μειωμένο φορτίο σε σχέση με το πρώτο και μεγαλύτερη επιμήκυνση του ελάσματος. Παρατηρούμε ότι βρίσκεται στην ελαστική περιοχή για 0,5 mm και στη συνέχεια ξεκινάει η πλαστική παραμόρφωση του.



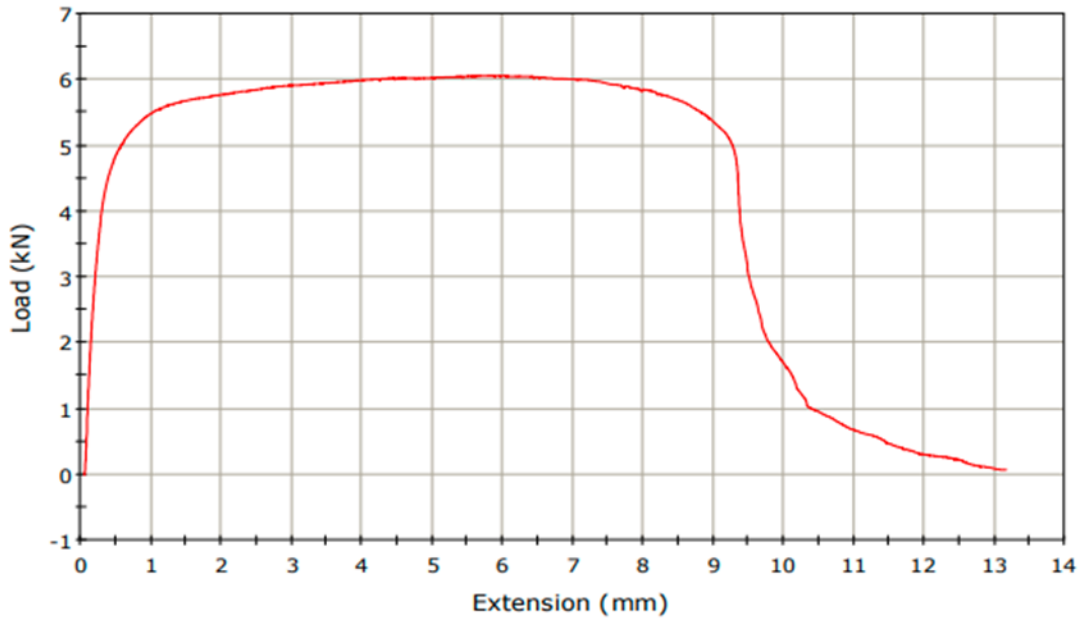
**Εικόνα 27** Έλασμα μετά το μονοαξονικό εφελκυσμό

#### 7.4.6 Έλασμα 6°



**Εικόνα 28** Αρχικό, ενδιάμεσο και τελικό στάδιο διαδικασίας, Διατομή 100·100, Πάχος 0.5mm

**Γραφική παράσταση Φορτίου-Μετατόπισης Χάλυβας Νο 6**



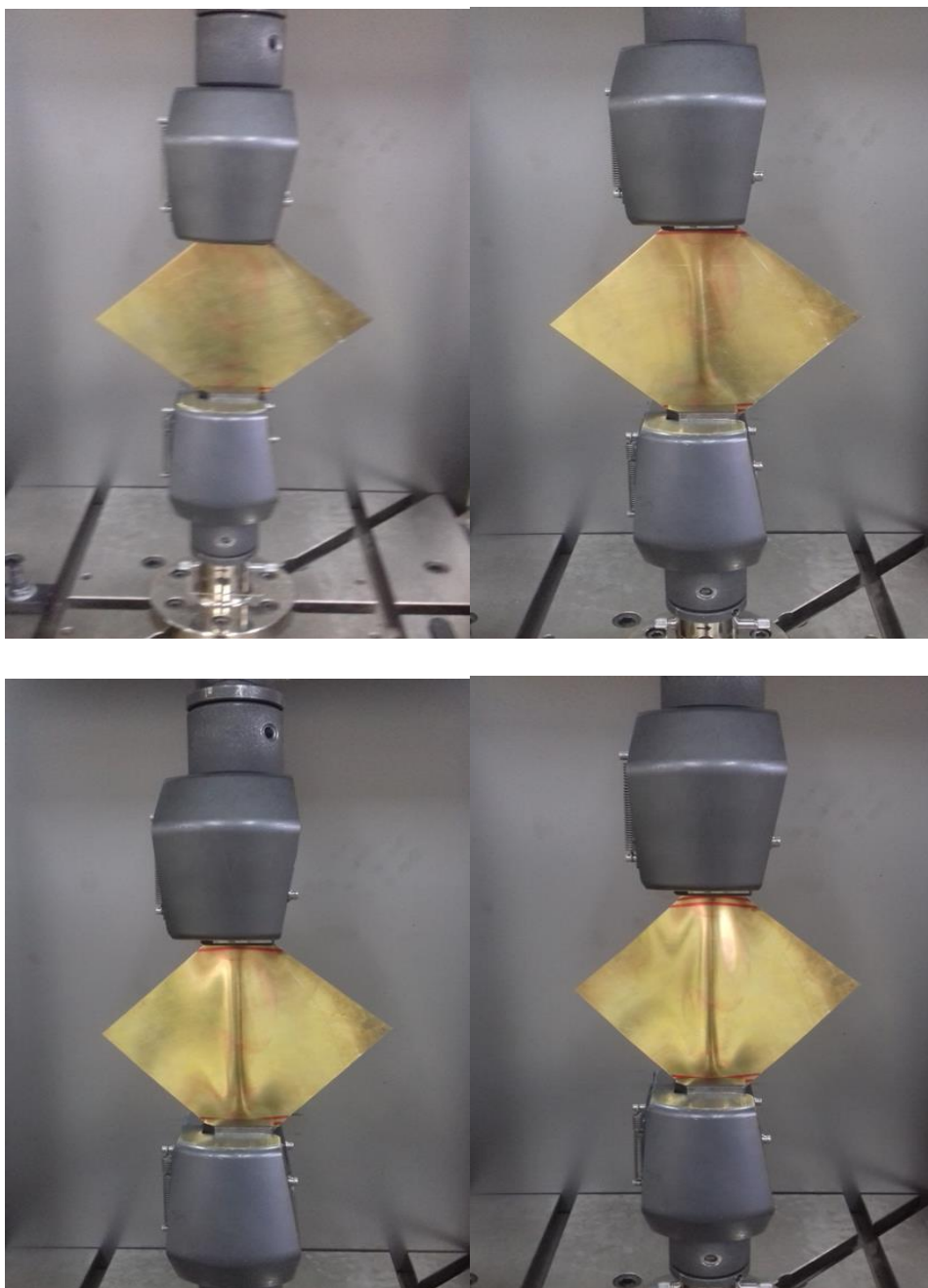
Το τρίτο δοκίμιο του χάλυβα έχει το μικρότερο φορτίο συγκριτικά με τα δύο προηγούμενα ελάσματα και παρατηρούμε ότι βρίσκεται στην ελαστική περιοχή μέχρι τα 0,3 mm μετατόπιση και στη συνέχεια ξεκινάει η πλαστική παραμόρφωση του. Το ύψος των πτυχώσεων είναι παρόμοιο με τα υπόλοιπα δύο ελάσματα.



**Εικόνα 29** Έλασμα μετά το μονοαξονικό εφελκυσμό

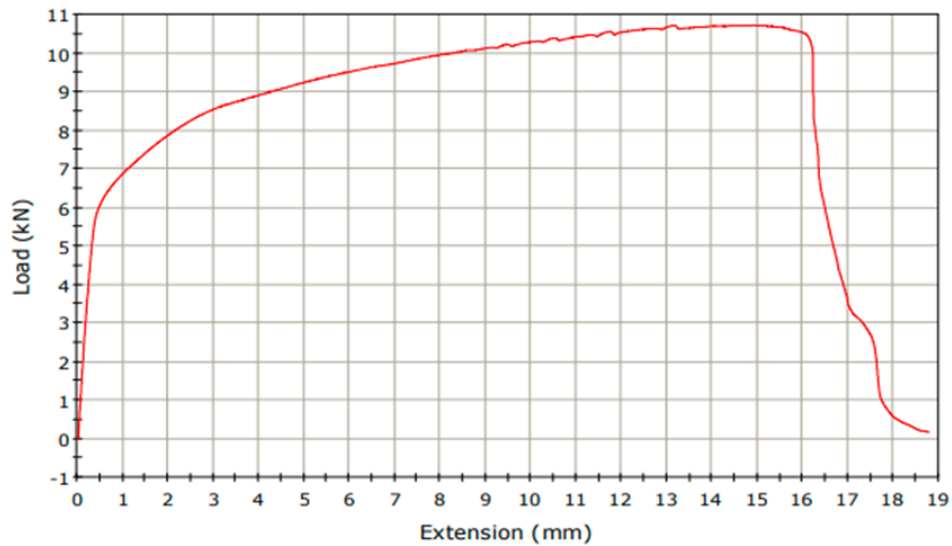
## 7.4.7 Μεταλλικά ελάσματα ορείχαλκου

### 7.4.7 Έλασμα 7°



**Εικόνα 30** Αρχικό, ενδιάμεσο και τελικό στάδιο διαδικασίας, Διατομή 162·162, Πάχος 1mm

**Γραφική παράσταση Φορτίου-Μετατόπισης Ορείχαλκου Νο 7**

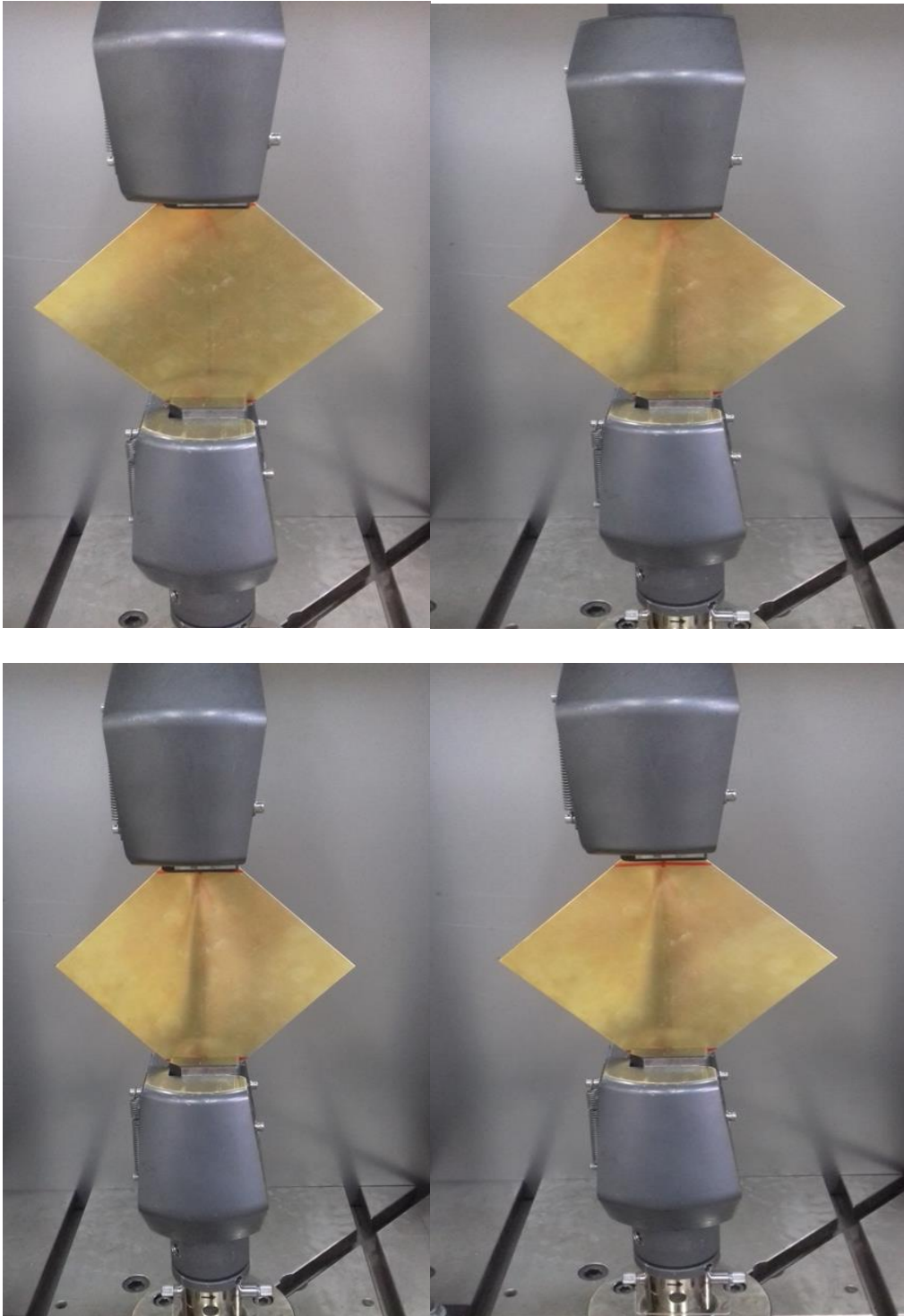


Για το πρώτο έλασμα του ορείχαλκου πάχους 1 mm, από το γράφημα φορτίου-μετατόπισης παρατηρούμε ότι η καμπύλη βρίσκεται στην ελαστική περιοχή για μετατόπιση 0,5 mm και στη συνέχεια διαρρέει έως ότου μπει στη πλαστική περιοχή. Στο έλασμα αυτό παρατηρούμε ότι το φορτίο είναι αρκετά υψηλό με μέγιστη τιμή τα 10704N και η μετατόπιση φθάνει μέχρι τα 16,2mm. Αυτό που παρατηρείται είναι ότι δημιουργείται μία πιο συμμετρική κοίλανση συγκριτικά με τα υπόλοιπα δύο υλικά, και στα άκρα του ελάσματος είναι πιο ομαλή η παραμόρφωση τους.



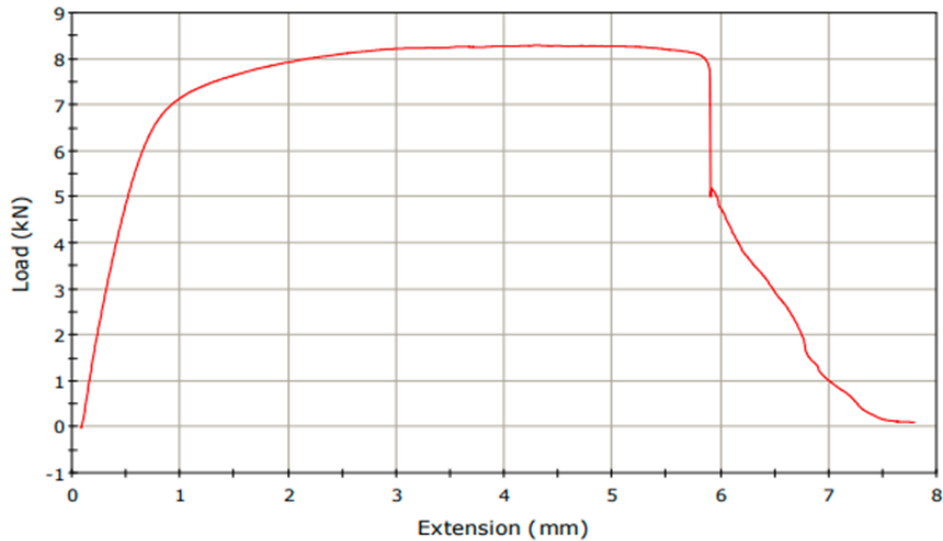
**Εικόνα 31** Έλασμα μετά το μονοαξονικό εφελκυσμό

#### 7.4.8 Έλασμα 8°



**Εικόνα 32** Αρχικό, ενδιάμεσο και τελικό στάδιο διαδικασίας, Διατομή 156·156, Πάχος 0.5mm

**Γραφική παράσταση Φορτίου-Μετατόπισης Ορείχαλκου Νο 8**



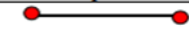



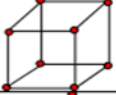

Για το δεύτερο δοκίμιο ορείχαλκου πάχους 0,5 mm, από το γράφημα φορτίου-μετατόπισης παρατηρούμε ότι η καμπύλη βρίσκεται στην ελαστική περιοχή για μεγαλύτερο διάστημα μετατόπισης κάτι το οποίο μας υποδεικνύει ότι η ενδοτράχυνση που έχει υποστεί το υλικό κατά το πέρασμα του από τη μηχανή της έλασης για τη δημιουργία μικρότερου πάχους είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση του όριου ελαστικότητας. Ακόμα παρατηρούμε ότι λόγω της ενδοτράχυνσης το υλικό έχασε την ολκιμότητα του και αυξήθηκε η σκληρότητα του με αποτέλεσμα να παρουσιάζει γρηγορότερη θραύση με μικρότερη παραμόρφωση του ελάσματος σε σχέση με το έλασμα με πάχος 1 mm.



**Εικόνα 33** Έλασμα μετά το μονοαξονικό εφελκυσμό

## 8. Μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων

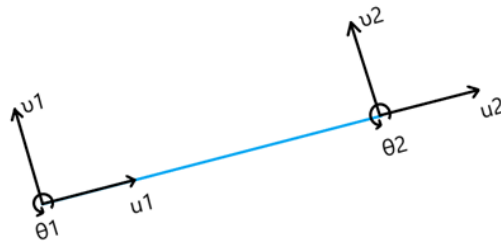
Τα τελευταία χρόνια η εξέλιξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών μας έδωσε τη δυνατότητα να σχεδιάζουμε και να προσομοιώνουμε διαφόρων ειδών αντικείμενα απλής και σύνθετης γεωμετρίας σε μικρό χρονικό διάστημα. Μέσω της δυνατότητας της προσομοίωσης μπορούμε να πραγματοποιούμε διαφόρων ειδών προσομοιώσεις όπως στατική, δυναμική, θερμική, ρευστομηχανική ανάλυση κ.ο.κ. Ο σχεδιασμός με τη βοήθεια Η/Υ αντιστοιχεί στον όρο CAD (Computer-Aided Design) ενώ η ανάλυση στον όρο CAE (Computer-Aided Engineering). Στην εκάστοτε εργασία θα μας απασχολήσει η ανάλυση μέσω της Μεθόδου των Πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method: FEM). Χρησιμοποιώντας προγράμματα που εξειδικεύονται στο αντικείμενο των πεπερασμένων στοιχείων μας δίνεται η δυνατότητα της προσομοίωσης δηλαδή η γεωμετρική απεικόνιση, ώστε να μπορούμε να συγκρίνουμε και να προσεγγίζουμε το πειραματικό με το προσομοιωτικό μέρος των αντικειμένων προς μελέτη. Η συγκεκριμένη ανάλυση βασίζεται στην αριθμητική μέθοδο (δηλ. μέθοδος υπολογισμού με χρήση Η/Υ) για τον υπολογισμό προσεγγιστικών λύσεων μερικών διαφορικών εξισώσεων. Η αναλυτική λύση είναι δυνατή μόνο σε γεωμετρικά σχήματα τα οποία έχουν απλή γεωμετρία και για τον λόγο αυτό μιας και τα περισσότερα προβλήματα που αντιμετωπίζει ο μηχανικός έχουν σύνθετη γεωμετρία υπήρξε η ανάγκη να αναπτυχθούν και προσεγγιστικές μέθοδοι των σύνθετων αυτών γεωμετριών. Μία εξ αυτών ήταν και η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων. Η βασική ιδιότητα της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων είναι η δυνατότητα προσομοίωσης της κατασκευής από τα στοιχεία που αποτελείται και συνδέονται μεταξύ τους σε ένα πεπερασμένο αριθμό κόμβων.

Finite element name	Type	Geometric Representation
One-dimensional finite element	Straight nodal lines	
	Curved nodal lines	
Two-dimensional finite element	triangular	
	quadrilateral	
Tridimensional finite element	hexahedron	
	Tetrahedron	

**Εικόνα 34** Τύποι πεπερασμένων στοιχείων 1 διάστασης, 2 διαστάσεων και 3 διαστάσεων



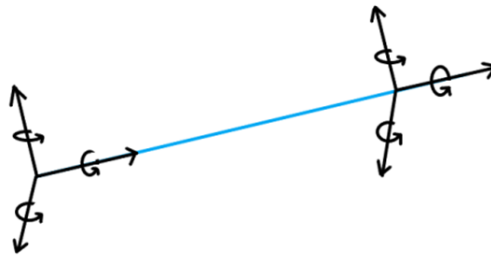
Η μέθοδος αυτή προσεγγίζει αυτό το πρόβλημα χωρίζοντας το προς μελέτη αντικείμενο σε έναν αριθμό μικρών στοιχείων που ονομάζονται πεπερασμένα στοιχεία (finite elements), και συνδέονται μεταξύ τους σε κόμβους. Η διαδικασία αυτή του διαχωρισμού του αντικειμένου ονομάζεται διακριτοποίηση (discretization) και η συλλογή κόμβων και στοιχείων ονομάζεται πλέγμα (mesh). Το πλέγμα της γεωμετρίας παίζει καθοριστικό ρόλο στη σταθερότητα και στην ακρίβεια του υπολογισμού των στοιχείων. Ο χρόνος υπολογισμού των αποτελεσμάτων εξαρτάται από την πυκνότητα πλέγματος, αυξάνει πάντα την ακρίβεια αλλά αυξάνει και το υπολογιστικό κόστος. Η ακρίβεια εξαρτάται τόσο από το σφάλμα διακριτοποίησης όσο και από το σφάλμα λύσης. Η ποιότητα του πλέγματος εξαρτάται τόσο από τον συνολικό αριθμό των στοιχείων όσο και από το σχήμα των μεμονωμένων στοιχείων. Η ταχύτητα κάθε επανάληψης αυξάνεται (γραμμικά) με τον αριθμό των στοιχείων και ο αριθμός των επαναλήψεων που απαιτούνται εξαρτάται από την τοπική τιμή λύσης και την κλίση σε σύγκριση με το σχήμα και το μέγεθος των τοπικών στοιχείων. Υπάρχουν αρκετά διαφορετικά σχήματα πεπερασμένων στοιχείων για τη διακριτοποίηση, τα πιο συνηθισμένα είναι τριγωνικής και τετραγωνικής μορφής. (Εικ 3). Η σωστή επιλογή του κάθε στοιχείου για το αντικείμενο που αναλύουμε κάθε φορά εξαρτάται από το είδος της προσομοίωσης που κάνουμε αλλά και την εμπειρία που έχει ο κάθε μηχανικός ανάλογα με το πρόβλημα που αντιμετωπίζει. Για τη συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήσαμε δυσδιάστατα τετράπλευρα στοιχεία μιας και αυτού του είδους τα στοιχεία ενδείκνυται για μεταλλικά ελάσματα. Για προβλήματα stress analysis η θεμελιώδης μεταβλητή που μας απασχολεί και θέλουμε να υπολογίσουμε είναι η μετατόπιση σε κάθε κόμβο του σώματος. Εάν έχουμε τη δυνατότητα να δούμε πως μετατοπίζεται ένα σώμα όταν εφαρμόζονται φορτία σε αυτό, θα μπορούσαμε να υπολογίσουμε τις τάσεις και τις παραμορφώσεις. Για κάθε στοιχείο του σώματος ορίζεται ένα διάνυσμα  $\{u\}$  το οποίο αποτελείται από μετατοπίσεις των κόμβων των στοιχείων, συμπεριλαμβανομένων και των περιστροφών. Αναλύοντας την περίπτωση για μία δισδιάστατη δοκό, παρατηρήθηκε ότι σε κάθε κόμβο ορίζεται το μήκος των αξόνων  $X$  και  $Y$ , και η περιστροφή του γύρω από τον άξονα  $Z$ , οπότε το διάνυσμα  $\{u\}$  θα μοιάζει με το παρακάτω:



**Εικόνα 35** 3 Βαθμούς ελευθερίας για κάθε κόμβο

$$[u] = \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ \theta_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ \theta_2 \end{bmatrix}$$

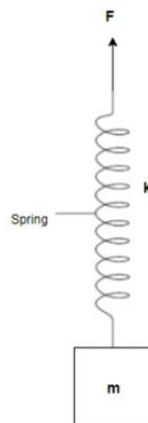
Κάθε μία από αυτές τις μετατοπίσεις ονομάζεται βαθμός ελευθερίας. Για το συγκεκριμένο στοιχείο δοκού έχουμε 3 βαθμούς ελευθερίας για κάθε ένα κόμβο, και συνολικά έχουμε 6 βαθμούς ελευθερίας. Για μία τρισδιάστατη περίπτωση ενός στοιχείου αυξάνεται σε 6 βαθμούς ελευθερίας ανά κόμβο.



**Εικόνα 36** 6 Βαθμοί ελευθερίας για κάθε κόμβο

$$[u] = \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ w_1 \\ \theta_{x1} \\ \theta_{y1} \\ \theta_{z1} \\ u_2 \\ v_2 \\ w_2 \\ \theta_{x2} \\ \theta_{y2} \\ \theta_{z2} \end{bmatrix}$$

Πως γίνεται όμως να υπολογισθούν όλες οι μετατοπίσεις για κάθε ένα ξεχωριστά κόμβο στο πλέγμα μας; Γνωρίζουμε ότι για ένα ελατήριο η σχέση ανάμεσα στη δύναμη και τη μετατόπιση καθορίζεται από το Νόμο του Hooke.



**Εικόνα 37**

$$F = -K \cdot x \quad (8.1)$$

Η ακαμψία του ελατηρίου ή σταθερά ελαστικότητας του ελατηρίου μας καθορίζει πόσο μακριά θα μετατοπισθεί το ελατήριο για μία ορισμένη δύναμη που του επιβάλλεται. Αντίστοιχα σκεπτόμενοι με τον ίδιο τρόπο παρατηρήθηκε ότι τα στοιχεία του πλέγματος μας έχουν και αυτά μία ορισμένη ακαμψία που αντιστέκονται στη παραμόρφωση τους.

$$\{f\} = [k] \cdot \{u\} \quad (8.2)$$

Στην παραπάνω εξίσωση βλέπουμε ότι το {f} αντιστοιχεί στο διάνυσμα των κομβικών δυνάμεων και ροπών, το {u} στο διάνυσμα της κομβικής μετατόπισης, ενώ το [k] είναι ο πίνακας ακαμψίας του στοιχείου. Ο πίνακας ακαμψίας του στοιχείου μας δείχνει πόσο θα μετατοπισθεί κάθε κόμβος στο στοιχείο για ένα σύνολο δυνάμεων και ροπών που εφαρμόζονται στους κόμβους, και με αυτή τη διαδικασία είναι εφικτή η επίλυση των μετατοπίσεων σε κάθε κόμβο του πλέγματος μας. Είναι ένας τετραγωνικός πίνακας, που ο αριθμός των σειρών και ο αριθμός των στηλών είναι ισοδύναμος με τον αριθμό των βαθμών ελευθερίας του στοιχείου. Έτσι λοιπόν μέσω αυτής της διαδικασίας που περιγράφηκε παραπάνω γίνεται η ανάλυση μέσω της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων.

## 8.1 Μοντελοποίηση μέσω της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση των ελασμάτων μέσω της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων είναι το Ansys Workbench. Το συγκεκριμένο λογισμικό είναι ένα πακέτο CAE (Computer Aided Design) το οποίο έχει τη δυνατότητα να σχεδιάζει, να αναλύει και να επεξεργάζεται τα δεδομένα μας. Ωστόσο ο σχεδιασμός των μεταλλικών ελασμάτων δημιουργήθηκε μέσω του λογισμικού Solidworks. Για να ορισθούν οι οριακές συνθήκες δηλαδή το σταθερό τμήμα (fixed support) και η μετατόπιση (displacement) στη διαδικασία της προσομοίωσης, το παρατεταμένο τμήμα σύσφιξης παραλείπεται. Για τη μοντελοποίηση των μεταλλικών ελασμάτων μέσω της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, ακολουθήθηκε μία σειρά με συγκεκριμένα στάδια τα οποία ήταν απαραίτητα για το τελικό αποτέλεσμα. Παρακάτω αναφέρονται συνοπτικά τα στάδια και στη συνέχεια αναλύεται το κάθε ένα ξεχωριστά. Σημειώσεις για το μάθημα: «Υπολογιστικές Μέθοδοι στις Κατασκευές» Χριστόφορος Προβατίδης

- 1<sup>ο</sup> Βήμα Κατασκευή της γεωμετρίας των ελασμάτων
- 2<sup>ο</sup> Βήμα Επιλογή των μηχανικών και φυσικών ιδιοτήτων των υλικών και επιλογή των πεπερασμένων στοιχείων
- 3<sup>ο</sup> Βήμα Δημιουργία διακριτοποίησης της γεωμετρίας των ελασμάτων σε πεπερασμένα στοιχεία και επιβολή των οριακών συνθηκών
- 4<sup>ο</sup> Βήμα Επιλογή του τρόπου επίλυσης του και επίλυση
- 5<sup>ο</sup> Βήμα Έλεγχος των αποτελεσμάτων

### 1<sup>ο</sup> Βήμα: Κατασκευή γεωμετρίας

Η κατασκευή της γεωμετρίας δημιουργήθηκε στο περιβάλλον του SOLIDWORKS. Μέσω αυτού του προγράμματος σχεδιάστηκαν τα ελάσματα στον τρισδιάστατο χώρο δίνοντας τους και τα πάχη που αντιστοιχούν στο καθένα. Το παρατεταμένο τμήμα σύσφιξης παραλείπεται στη διαδικασία της προσομοίωσης για να ορισθούν οι οριακές συνθήκες. Ο τύπος του αρχείου που αποθηκεύτηκαν είναι της μορφής .igs ώστε να τα διαχειριστούμε στο περιβάλλον του ANSYS.

### 2<sup>ο</sup> Βήμα: Επιλογή μηχανικών και φυσικών ιδιοτήτων

Βάση των ιδιοτήτων των υλικών των ελασμάτων δεν επιλέχθηκαν από τη βιβλιοθήκη του ANSYS γιατί δεν γνωρίζουμε τα τεχνικά χαρακτηριστικά των υλικών που έχουμε. Για το λόγο αυτό δημιουργήθηκαν στο Ansys τα υλικά των ελασμάτων με βάση των τιμών από την καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης μεταλλικών λωρίδων (Εικ 37) που επιμηκύνθηκαν σε μονοαξονικό εφελκυσμό δημιουργώντας υλικά με τα τεχνικά χαρακτηριστικά των ελασμάτων Yoshida.

### 3<sup>ο</sup> Βήμα: Δημιουργία διακριτοποίησης της γεωμετρίας

Το συγκεκριμένο λογισμικό μας παρέχει τη δυνατότητα αυτόματης δημιουργίας πλέγματος(mesh) για τη διακριτοποίηση σε πεπερασμένα στοιχεία, ωστόσο δεν χρησιμοποιήθηκε το πλέγμα που είναι είδη καθορισμένο μιας και ήταν αρκετά αραιό. Αυτό συμβαίνει επειδή οι ιδιαιτερότητες του κάθε προβλήματος είναι διαφορετικές με αποτέλεσμα, κάθε φορά να έχουμε διαφορετικά κριτήρια αξιολόγησης ακολουθώντας πάντα μία κοινή γραμμή. Για το λόγο αυτό, η μορφή των στοιχείων ήταν τετραγωνικής διατομής δυσδιάστατα μιας και αυτού του είδους τα στοιχεία είναι ιδανικότερα για προσομοίωση μεταλλικών ελασμάτων.

### 4<sup>ο</sup> Βήμα: Επιλογή του τρόπου επίλυσης του προβλήματος

Μιας και το πρόβλημα μας είναι η μελέτη των κοιλάνσεων ,των μεταλλικών ελασμάτων, το πρόβλημα μας αντιμετωπίζει φαινόμενα λυγισμού και πτύχωσης το οποίο συγκαταλέγεται ως ένα μη-γραμμικό πρόβλημα. Για την λύση ενός τέτοιου είδους προβλήματος υπάρχουν διαφορετικοί αλγόριθμοι επίλυσης οι οποίοι δίνουν παρόμοιο αποτελέσματα αλλά με διαφορετικό χρόνο επίλυσης.

### 5<sup>ο</sup> Βήμα: Έλεγχος των αποτελεσμάτων

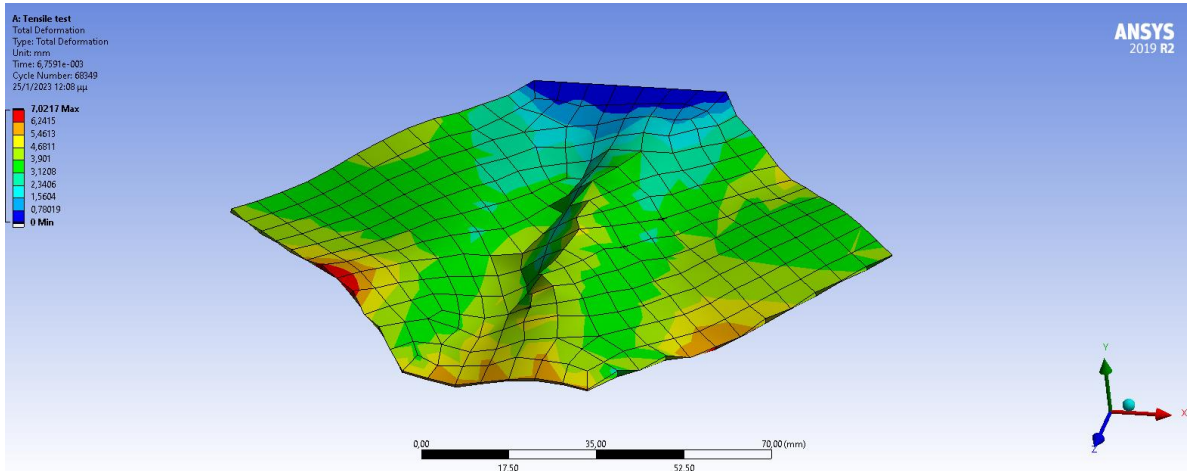
Από την αριθμητική επίλυση του μοντέλου προέκυψαν αποτελέσματα χρήσιμα για τη μελέτη των ελασμάτων, που αφορούσαν παραμέτρους όπως η πλαστική παραμόρφωση και οι τάσεις στην ζώνη παραμόρφωσης κατά το κριτήριο αστοχίας Von-Mises. Τα αποτελέσματα αυτά δύσκολα μετρώνται πειραματικά και παρουσιάζονται στις εικόνες που ακολουθούν.



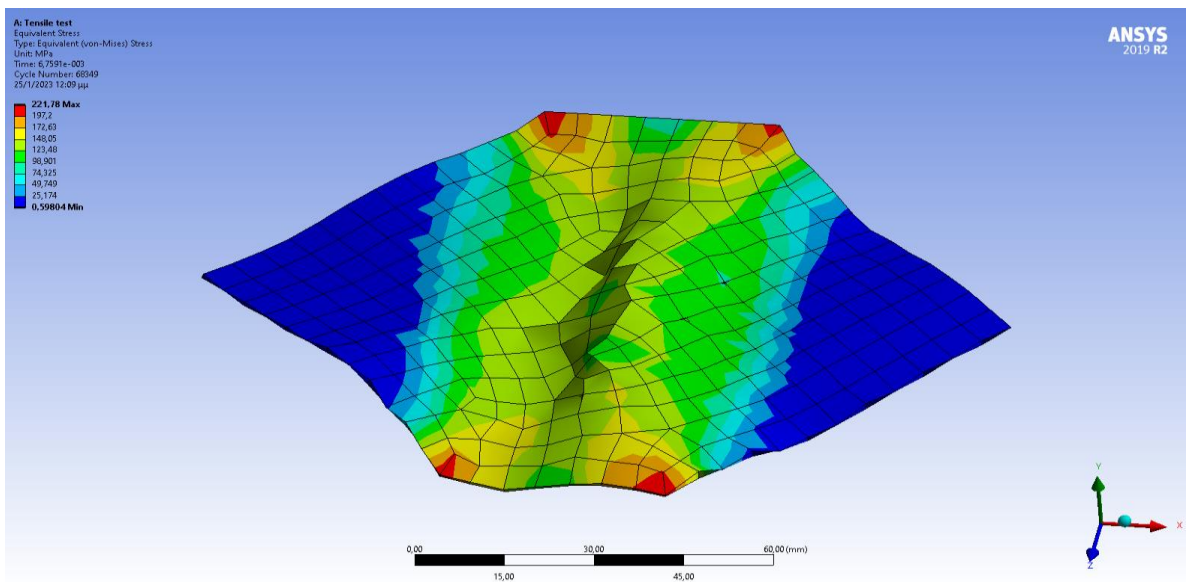
**Εικόνα 38** Λωρίδες μεταλλικών ελασμάτων για την δημιουργία νέων υλικών στο Ansys

## 8.2 Αποτύπωση πλέγματος στα ελάσματα

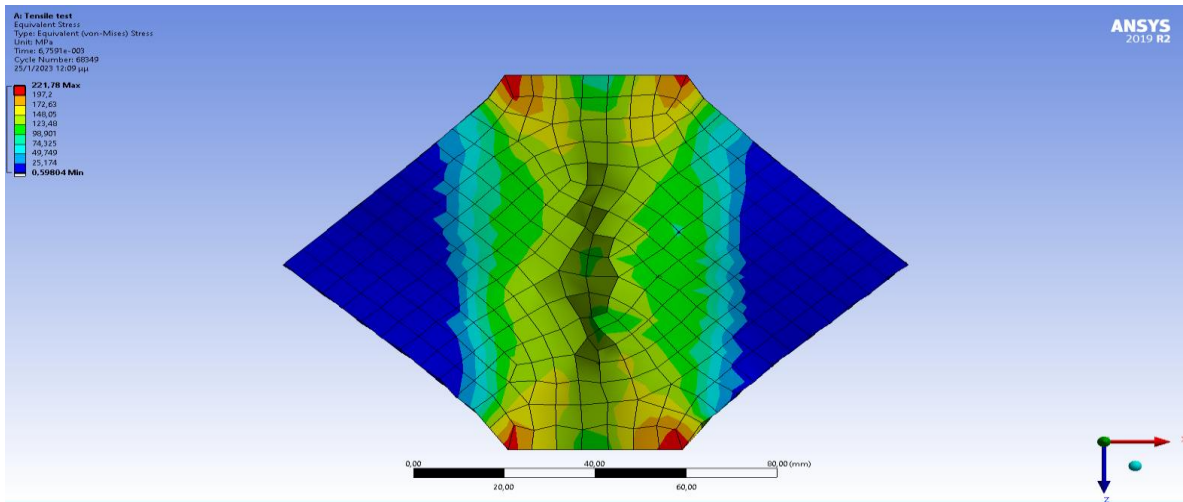
### 8.2 Προσομοίωση ελασμάτων χαλκού



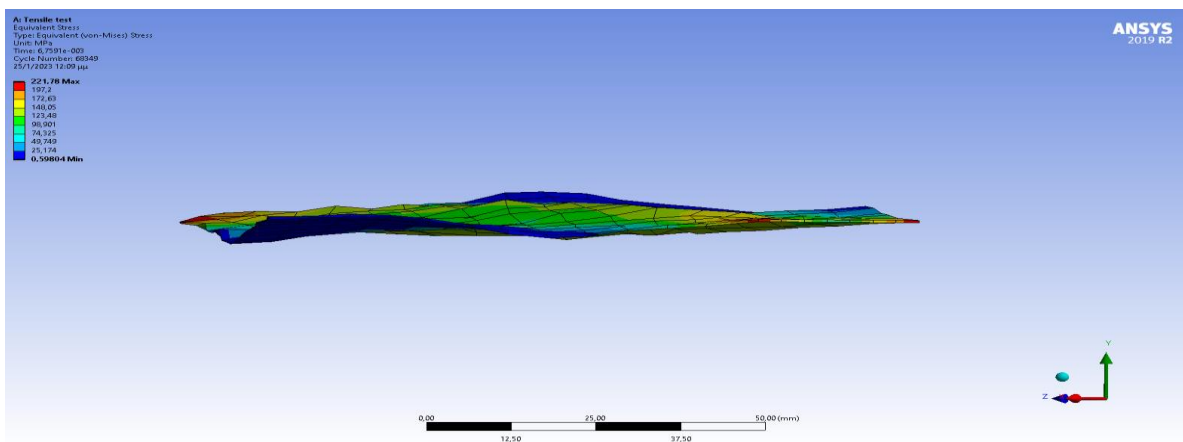
Εικόνα 39 Ολική παραμόρφωση (Total Deformation)



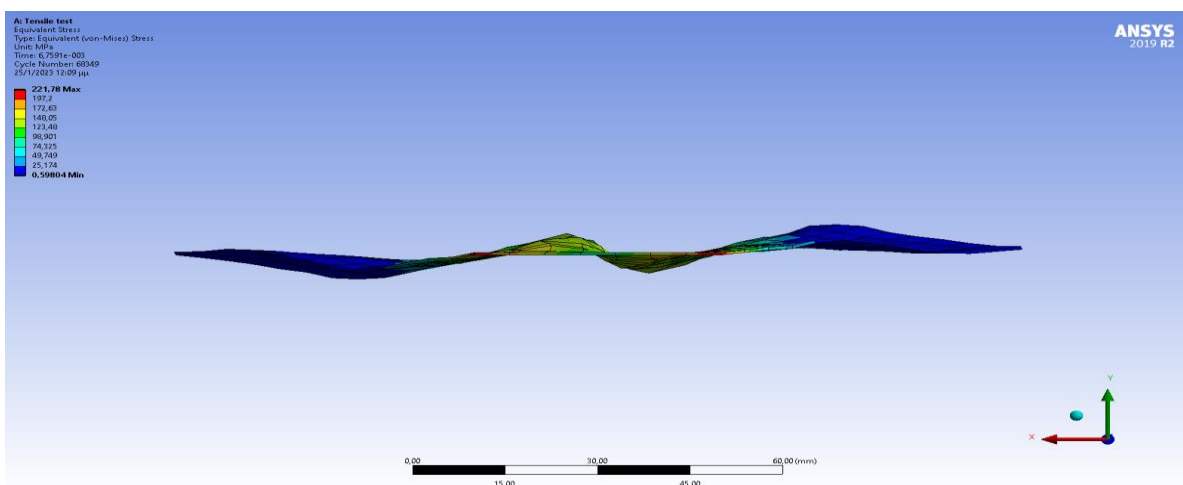
Εικόνα 40 Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises



Εικόνα 41 Ισοδύναμη τάση κατά Von-Mises



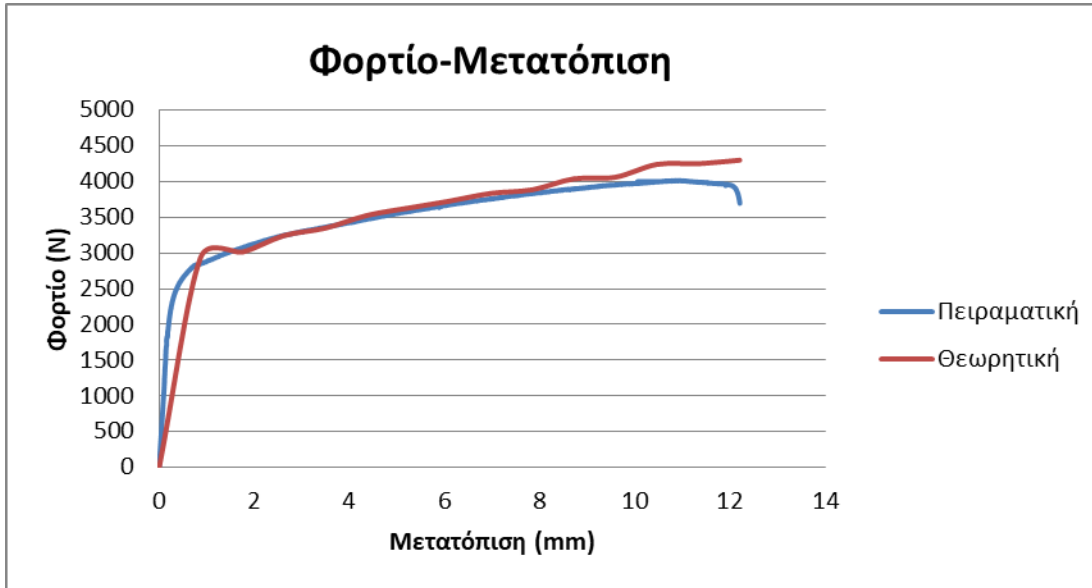
Εικόνα 42 Ισοδύναμη τάση κατά Von-Mises



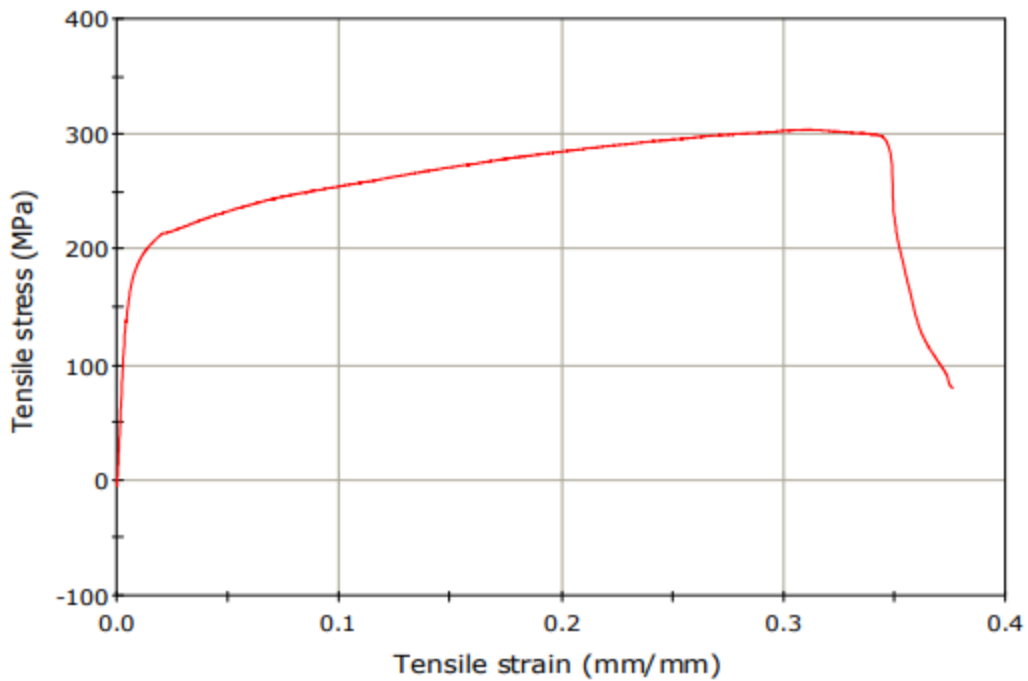
Εικόνα 43 Ισοδύναμη τάση κατά Von-Mises



Γραφική παράσταση Φορτίου-Μετατόπισης Χαλκού



Γραφική παράσταση τάσης-παραμόρφωσης Χαλκού πειραματική Νο 1

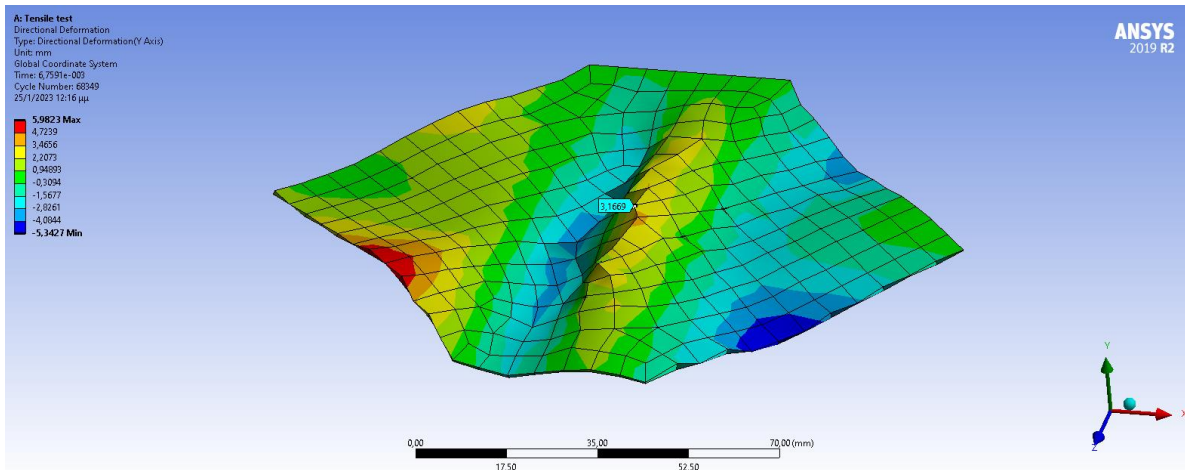


### 8.3 Συμπεράσματα ελασμάτων χαλκού

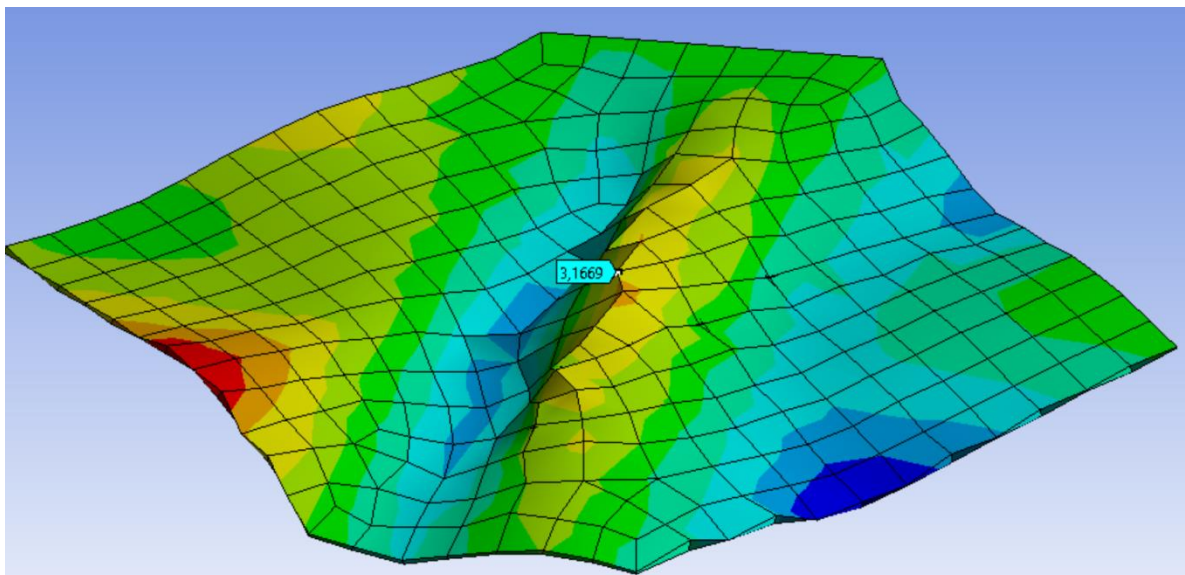
Παρατηρώντας τη κατανομή των τάσεων του ελάσματος του χαλκού, έχοντας χρησιμοποιήσει το ισοδύναμο κριτήριο αστοχίας κατά Von-Mises διακρίνουμε ότι η κύρια ζώνη που καταλήγει στην αστοχία του ελάσματος λαμβάνοντας τη μέγιστη τιμή τάσης 221,78MPa αντιστοιχεί στο σημείο γραπώματος του σταθερού και του κινητού τμήματος. Στο σημείο λοιπόν αυτό, που αντιστοιχεί στη συγκράτηση των ελασμάτων, το συγκεντρωμένο φορτίο που δρα δεν έχει ομοιόμορφη τάση. Δεν έχουμε ομοιόμορφη τάση γιατί ανάμεσα στα σημεία συγκράτησης το όριο μου είναι αφόρτιστο, δηλαδή οι ορθές τάσεις είναι μηδενικές. Στη συνέχεια παρατηρούμε ότι στη κεντρική περιοχή του ελάσματος εμφανίζεται τοπικός λυγισμός με την παρουσία κοιλάνσεων όπως προκύπτει και στο πειραματικό μέρος. Οι διατμητικές τάσεις ασκούνται πρώτα στη περιφέρεια του φύλλου του υλικού και στη συνέχεια διεισδύουν στη κεντρική περιοχή του ελάσματος. Εκτός από τη παρουσία κοιλάνσεων στη κεντρική περιοχή οι τάσεις αυτές έχουν προκαλέσει και στρεβλώσεις σε όλες τις πλευρές του ελάσματος. Και εφόσον τα ελάσματα του χαλκού είναι αρκετά όλκιμα και πιο ελαστικά από τα υπόλοιπα οι στρεβλώσεις αυτές είναι πιο ασύμμετρες. Συγκρίνοντας τα προσομοιωτικά αποτελέσματα με τα πειραματικά για το συγκεκριμένο υλικό καταλήγουμε στο ότι κατά τη πειραματική φάση το ύψος του τοπικού λυγισμού στη κεντρική περιοχή του ελάσματος αντιστοιχεί σε 4mm ενώ στη προσομοιωτική διαδικασία σε 3,16 mm. Η καμπύλη φορτίου-μετατόπισης παρουσιάζει παρόμοια κυματομορφή και το όριο διαρροής είναι πιο ευδιάκριτο στη θεωρητική καμπύλη από ότι στη πειραματική. Το μέγιστο φορτίο στη πειραματική καμπύλη είναι 4015 N και στη θεωρητική καμπύλη είναι 4300N.

Details of "Mesh"		
+	Display	
+	Defaults	
+	Sizing	
+	Quality	
+	Inflation	
+	Advanced	
-	Statistics	
<input type="checkbox"/>	Nodes	608
<input type="checkbox"/>	Elements	274

**Εικόνα 44** Συνολικός αριθμός κόμβων και στοιχείων χαλκού

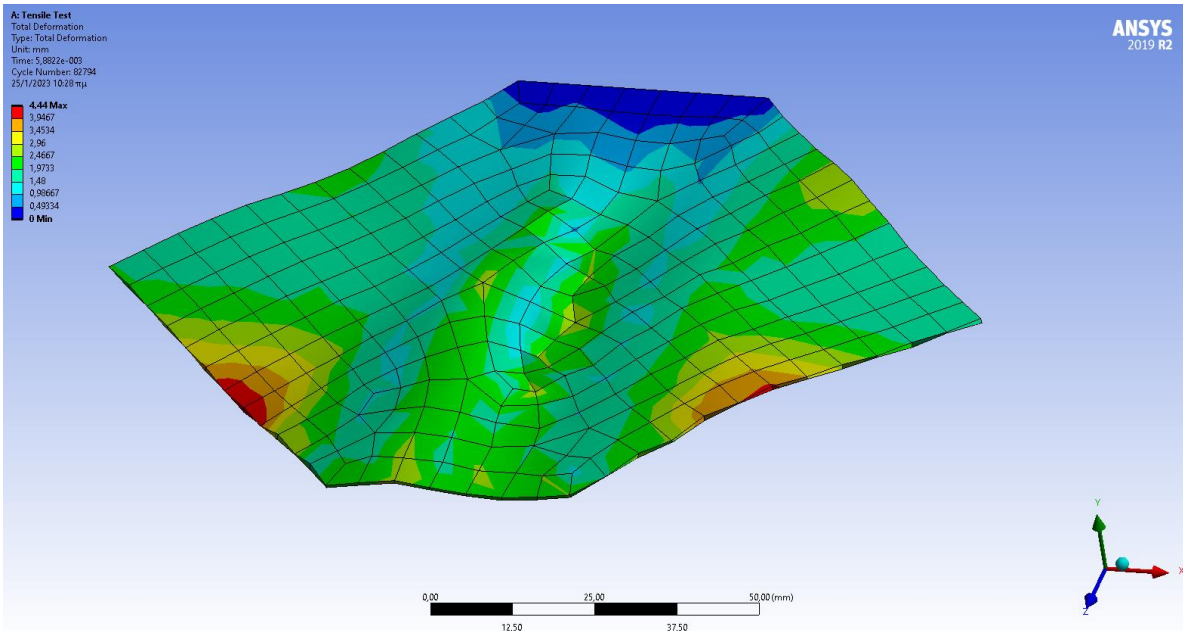


Εικόνα 45 Ύψος κοίλανσης από το επίπεδο αναφοράς 3,17 mm

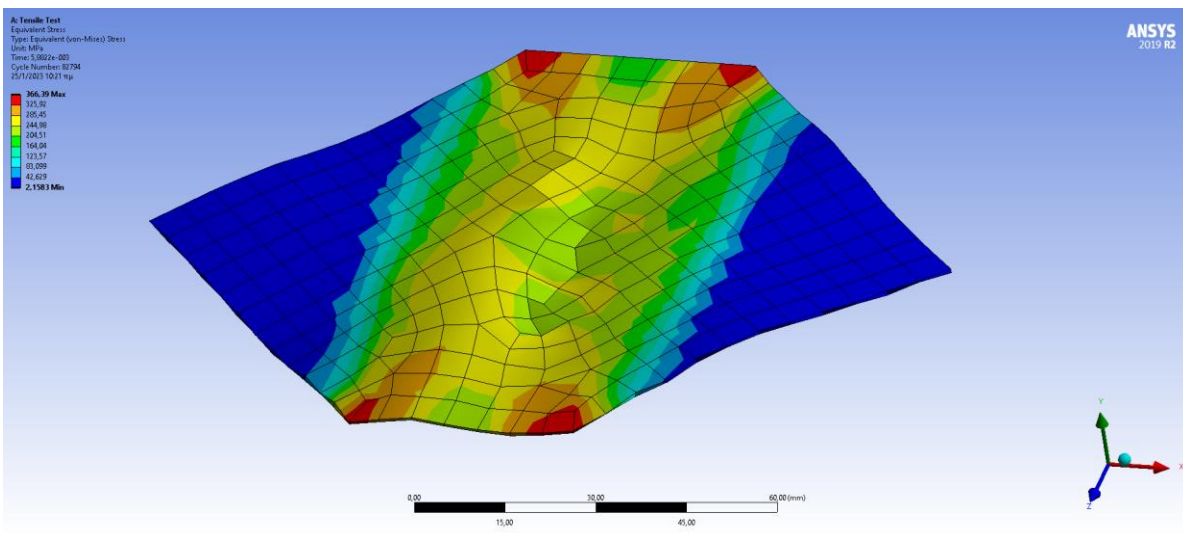


Εικόνα 46 Ύψος κοίλανσης από το επίπεδο αναφοράς 3,17 mm

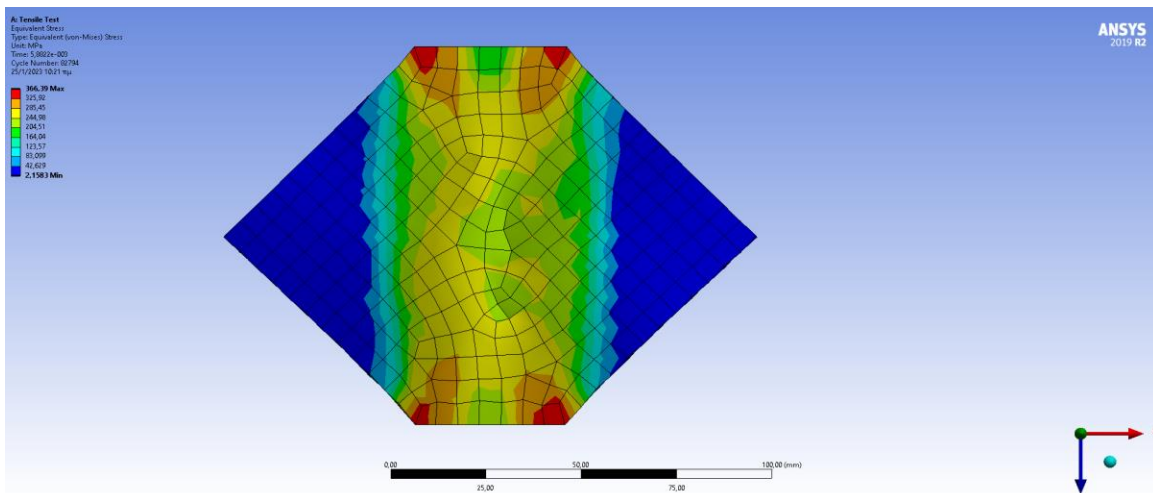
## 8.4 Προσομοίωση ελασμάτων χάλυβα (ss 304)



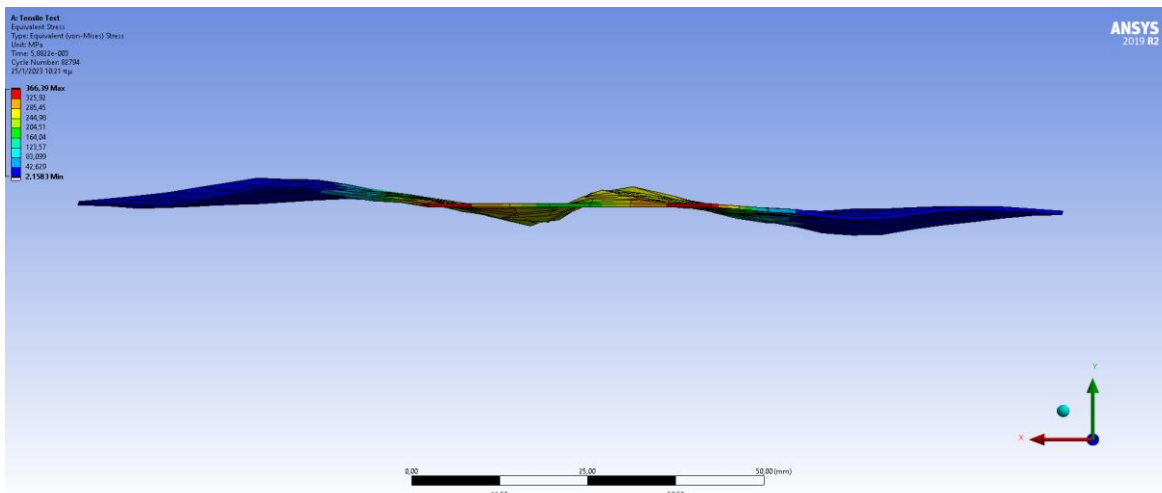
Εικόνα 47 Ολική παραμόρφωση (Total Deformation)



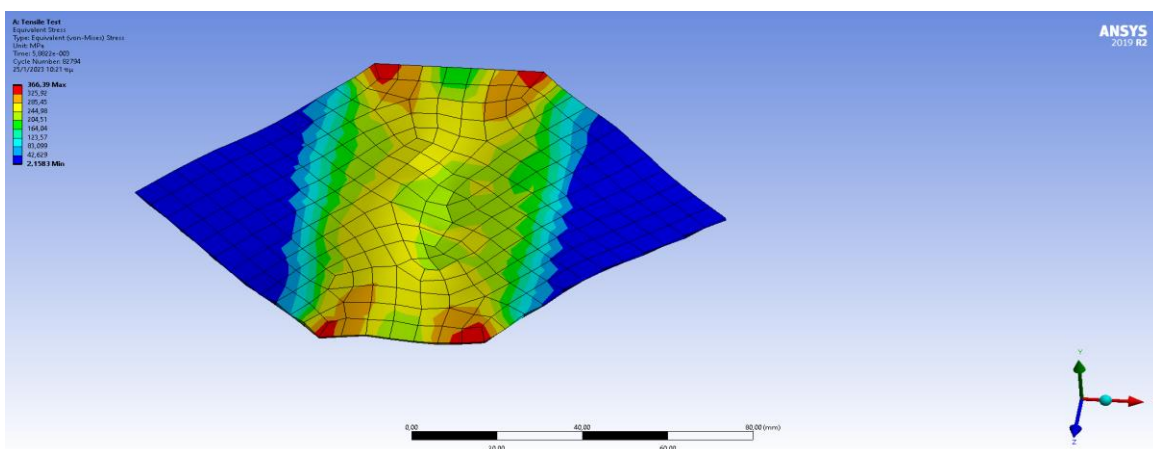
Εικόνα 48 Ισοδύναμη τάση κατά Von-Mises



Εικόνα 49 Ισοδύναμη τάση κατά Von-Mises

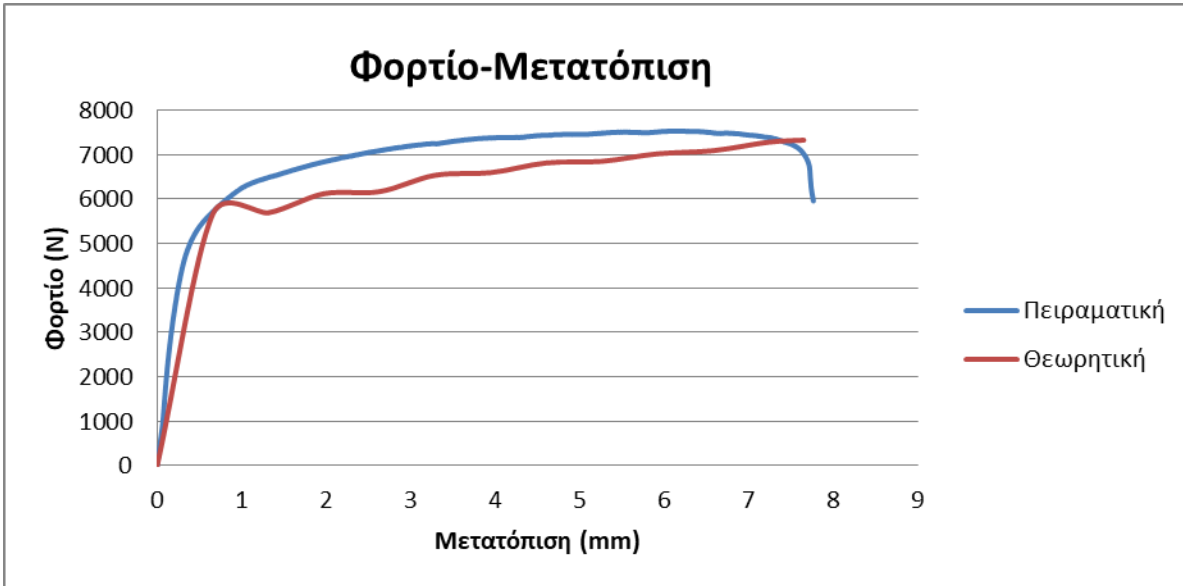


Εικόνα 50 Ισοδύναμη τάση κατά Von-Mises

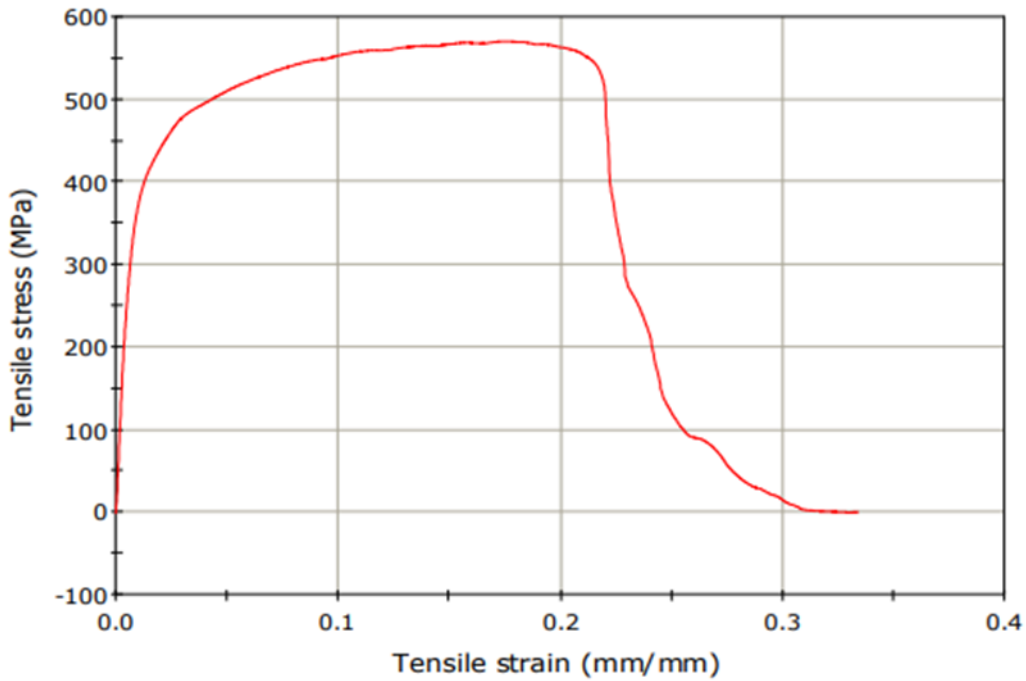


Εικόνα 51 Ισοδύναμη τάση κατά Von-Mises

Γραφική παράσταση Φορτίου-Μετατόπισης Χάλυβα



Γραφική παράσταση Τάσης-Παραμόρφωσης Χάλυβα Νο4

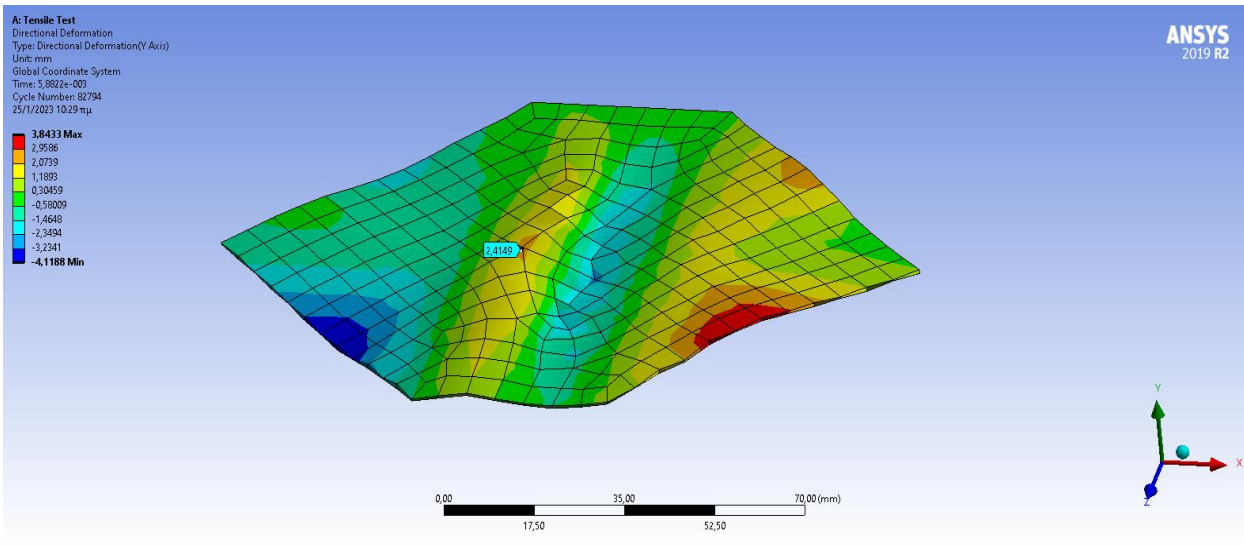


## 8.5 Συμπεράσματα ελασμάτων χάλυβα

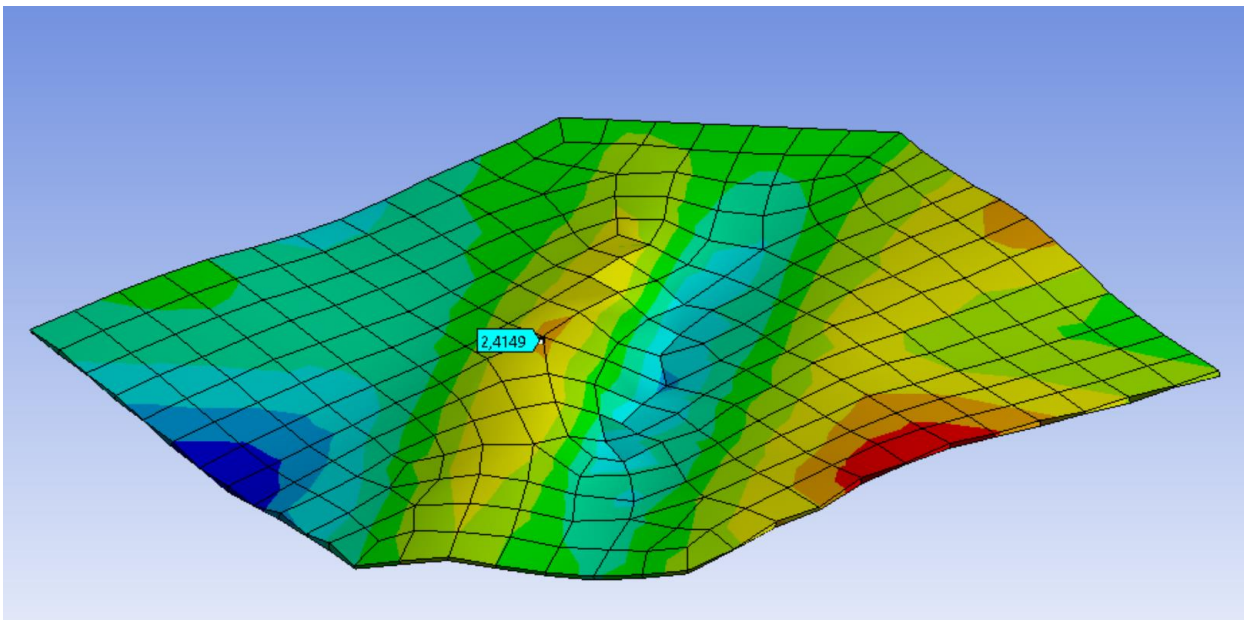
Παρατηρώντας το έλασμα του χάλυβα, χρησιμοποιώντας και εδώ το ισοδύναμο κριτήριο κατά Von-mises ως πρώτη παρατήρηση είναι ότι η μέγιστη τάση με τιμή 366,39MPa είναι μίαιμιση φορά μεγαλύτερη από ότι είναι στο έλασμα του χαλκού. Και εδώ το έλασμα αστοχεί στο σημείο συγκράτησης του και όπως έχει αναφερθεί αυτό προκαλείται γιατί δεν υπάρχει ομοιόμορφη τάση στο σημείο γραπώματος. Η κεντρική περιοχή του ελάσματος του χάλυβα παρουσιάζει και αυτή τοπικό φαινόμενο λυγισμού αλλά με μικρότερο ύψος κοίλανσης από ότι του χαλκού, κάτι το οποίο ήταν αναμενόμενο μιας και ο χάλυβας σαν υλικό χαρακτηρίζεται για την υψηλή αντοχή του και την σκληρότητα του. Συγκρίνοντας τα πειραματικά αποτελέσματα με τα προσομοιωτικά παρατηρούμε ότι στη πειραματική φάση το ύψος του τοπικού λυγισμού στη κεντρική περιοχή του ελάσματος αντιστοιχεί σε 2 mm ενώ στη προσομοιωτική διαδικασία σε 2,41 mm. Η καμπύλη φορτίου-μετατόπισης παρουσιάζει έντονα το σημείο διαρροής της προσομοιωτικής κυματομορφής. Το μέγιστο φορτίο στη πειραματική καμπύλη είναι 7528 N και στη θεωρητική καμπύλη είναι 7327N.

Details of "Mesh"		
+	Display	
+	Defaults	
+	Sizing	
+	Quality	
+	Inflation	
+	Advanced	
≡	Statistics	
<input type="checkbox"/>	Nodes	608
<input type="checkbox"/>	Elements	274

**Εικόνα 52** Συνολικός αριθμός κόμβων και στοιχείων χάλυβα



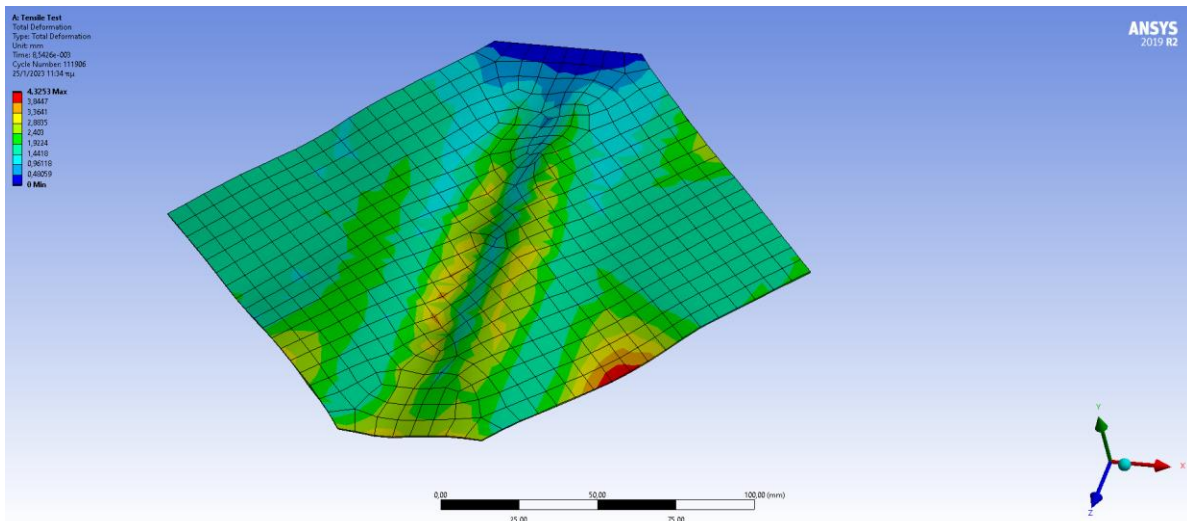
Εικόνα 53 Ύψος κοίλανσης από το επίπεδο αναφοράς 2,42 mm



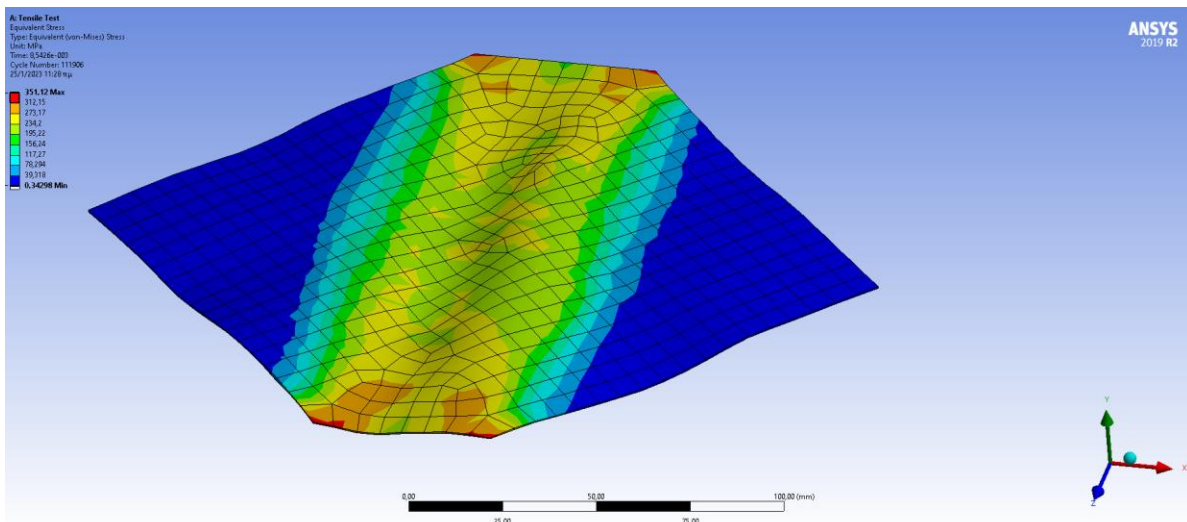
Εικόνα 54 Ύψος κοίλανσης από το επίπεδο αναφοράς 2,42 mm



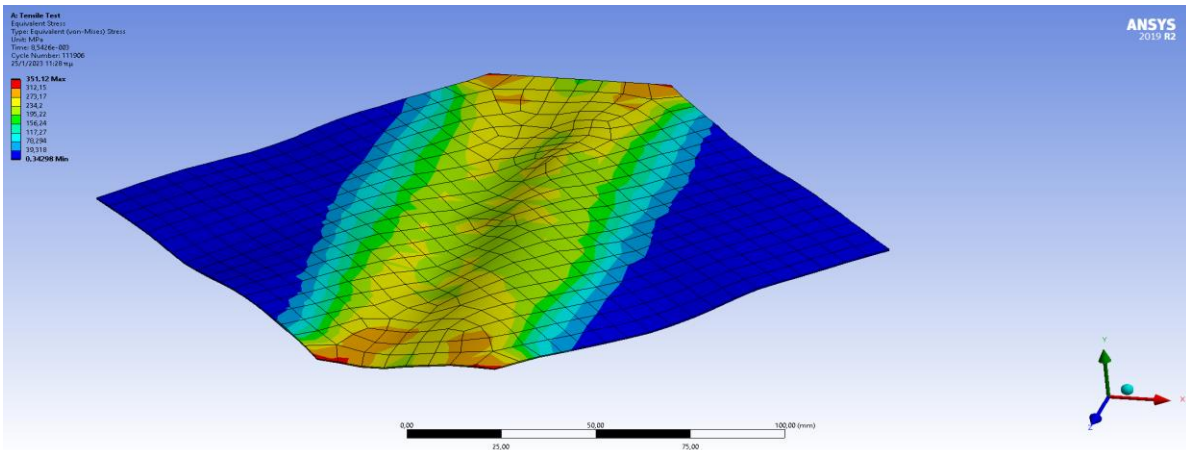
## 8.6 Προσομοίωση ελασμάτων ορείχαλκου 0,5 mm



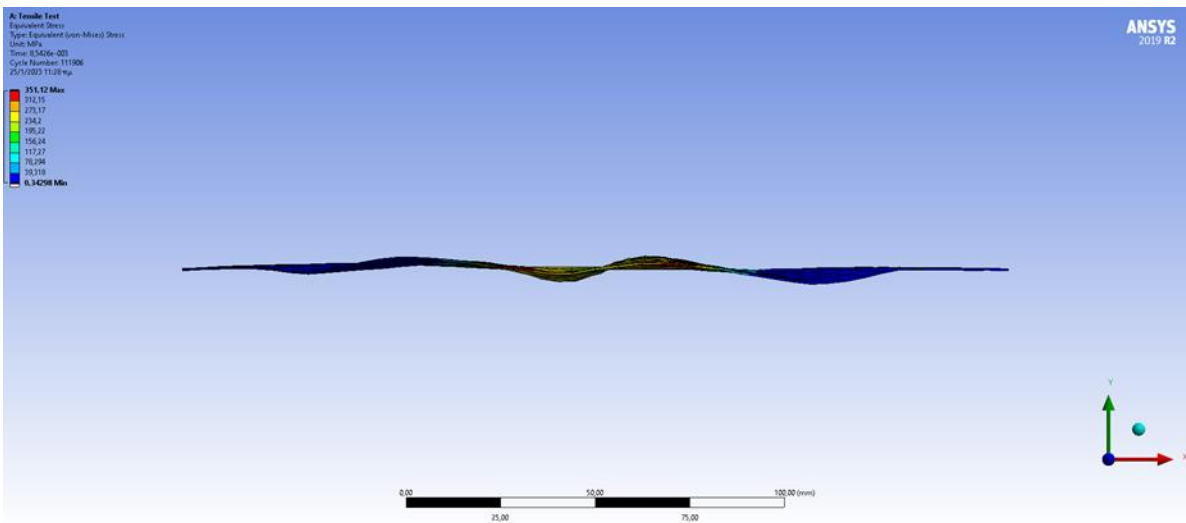
Εικόνα 55 Ολική παραμόρφωση (Total Deformation)



Εικόνα 56 Ισοδύναμη τάση κατά Von-Mises

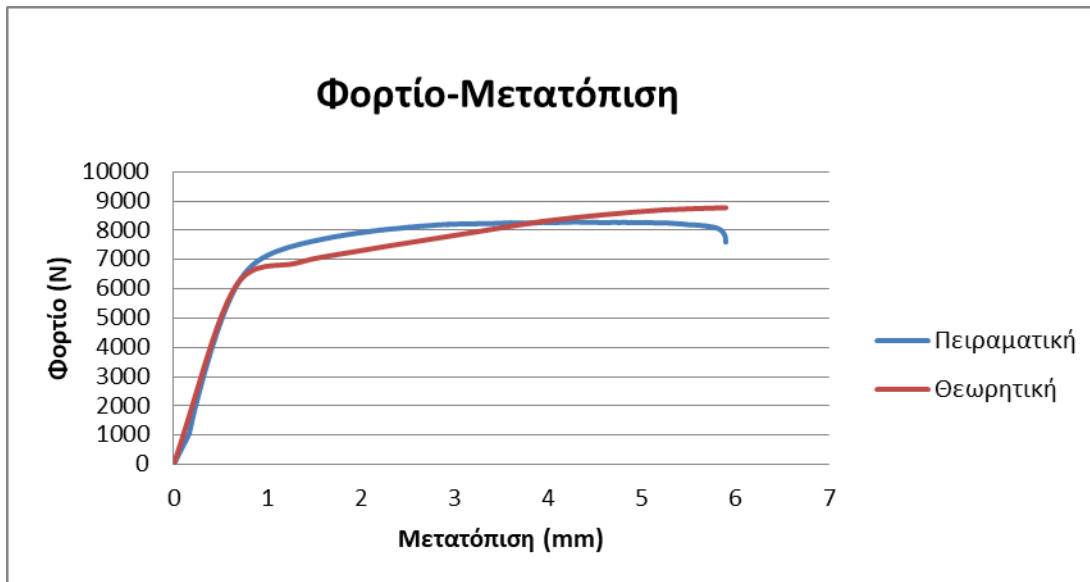


Εικόνα 57 Ισοδύναμη τάση κατά Von-Mises

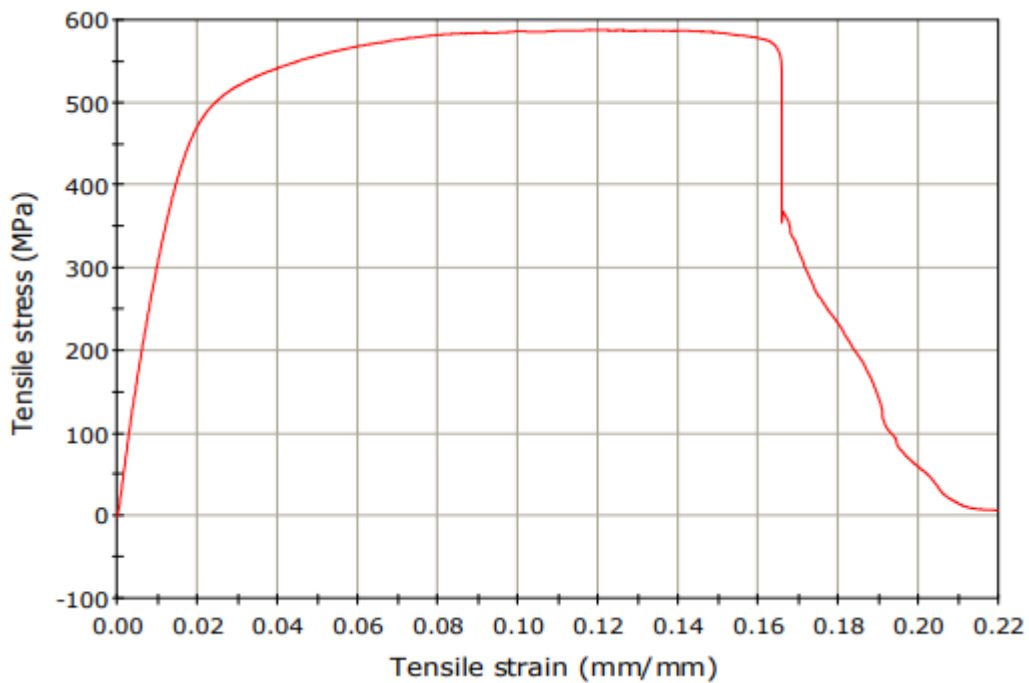


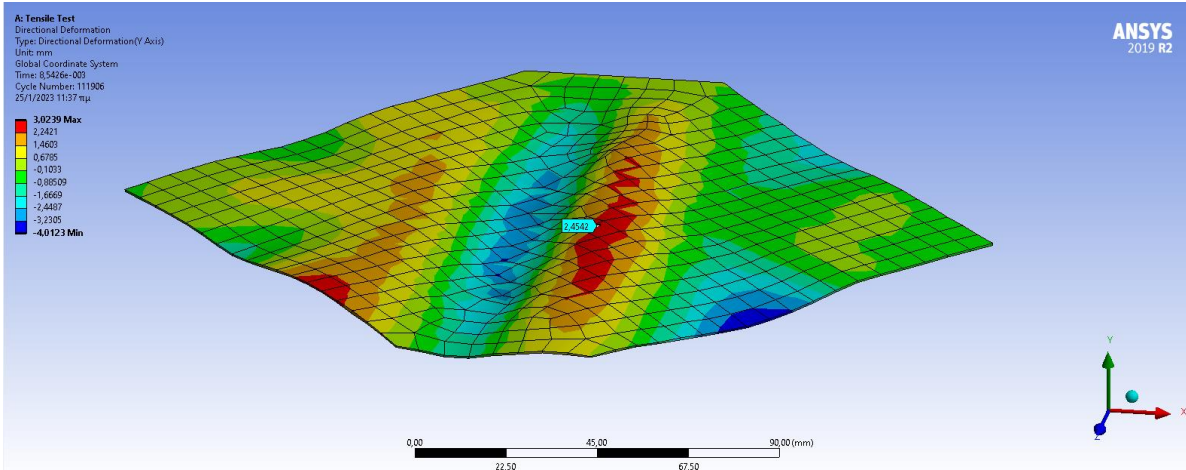
Εικόνα 58 Ισοδύναμη τάση κατά Von-Mises

**Γραφική παράσταση Φορτίου-Μετατόπισης Ορείχαλκου 0,5mm**

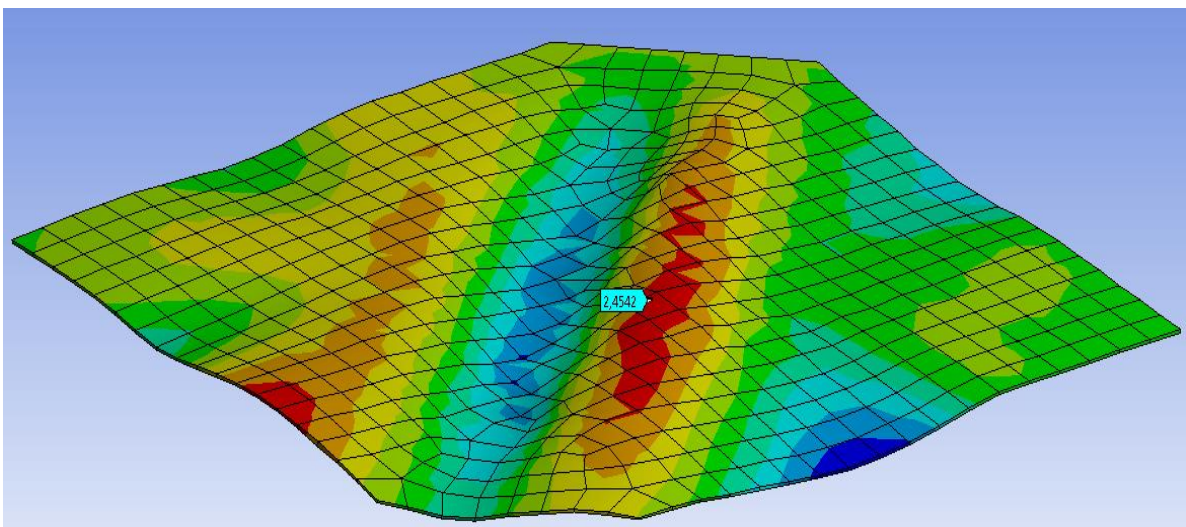


**Γραφική παράσταση Τάσης -Παραμόρφωσης Ορείχαλκου 0,5mm**



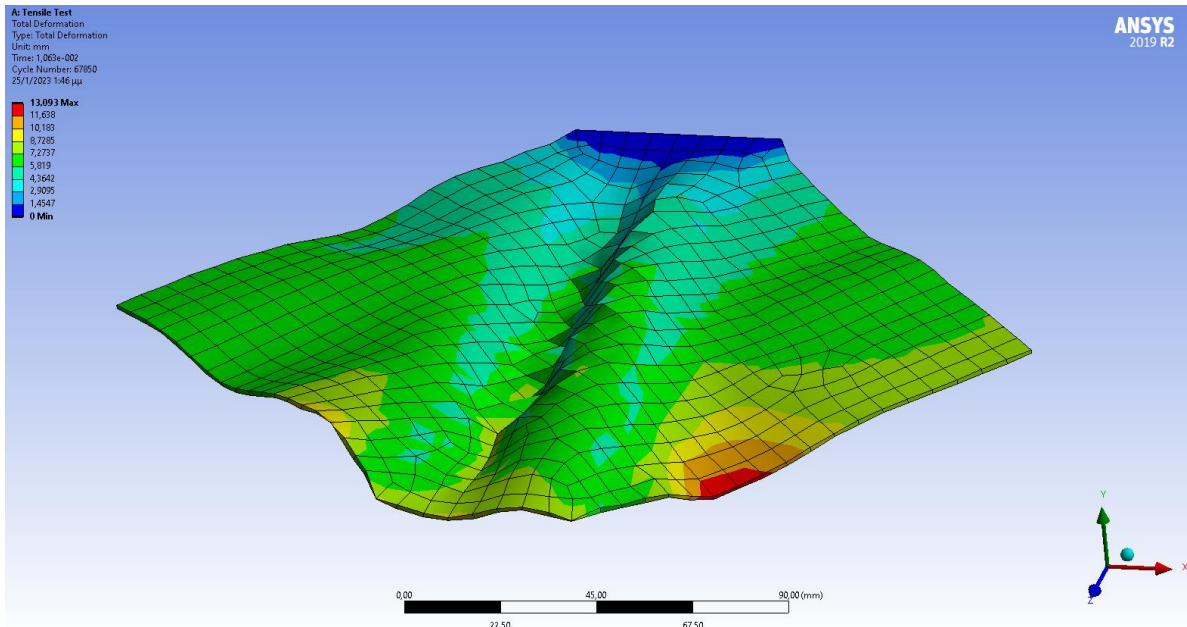


Εικόνα 59 Ύψος κοίλανσης από το επίπεδο αναφοράς 2,45 mm

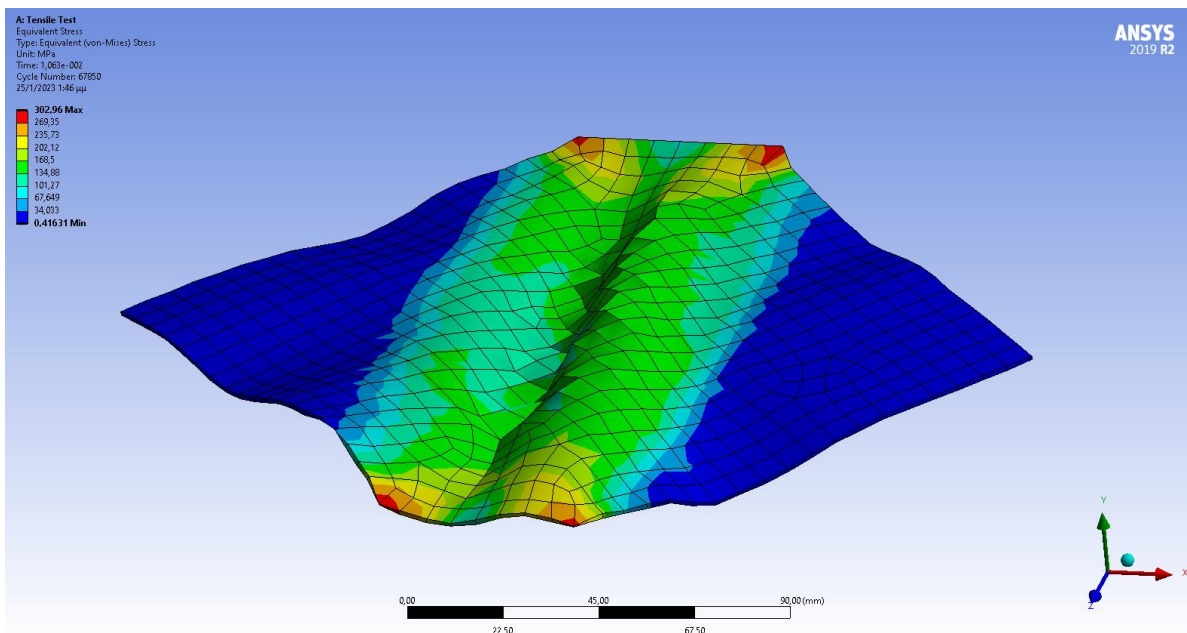


Εικόνα 60 Ύψος κοίλανσης από το επίπεδο αναφοράς 2,45 mm

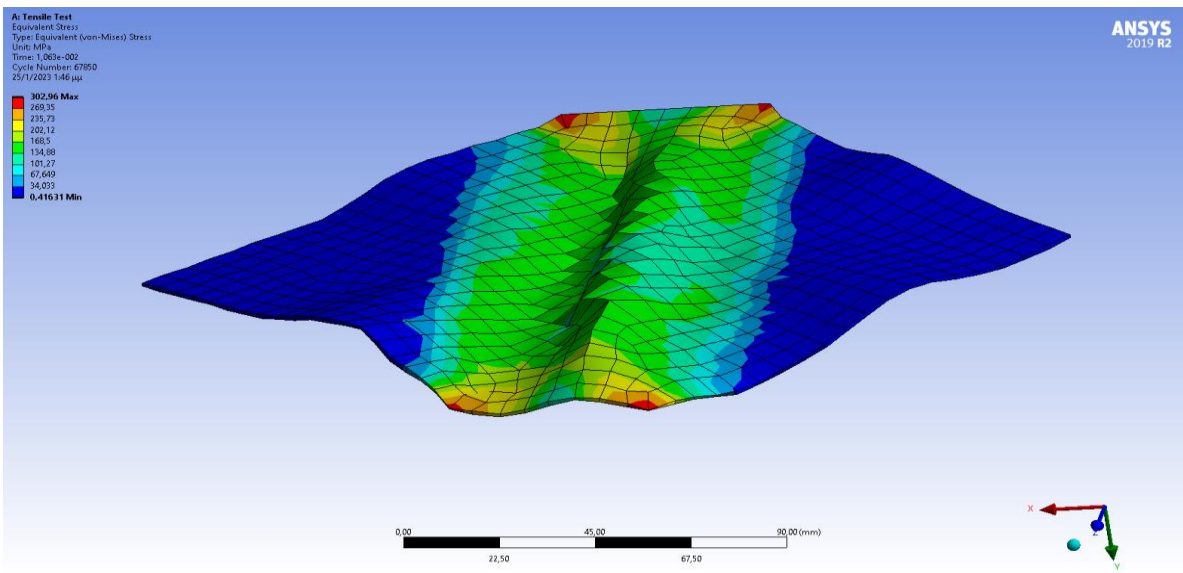
## 8.7 Προσομοίωση ελασμάτων ορείχαλκου 1 mm



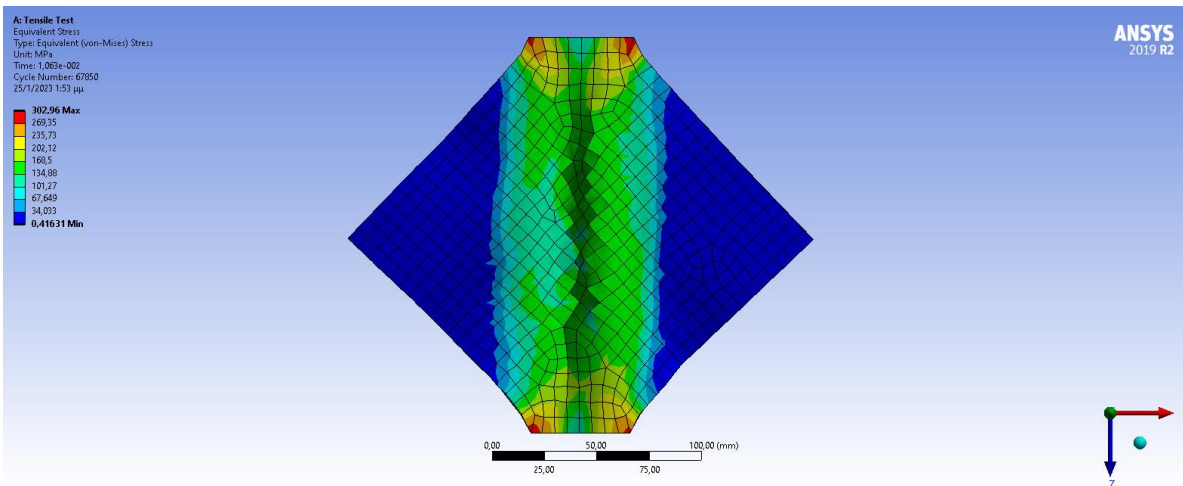
Εικόνα 61 Ολική παραμόρφωση (Total Deformation)



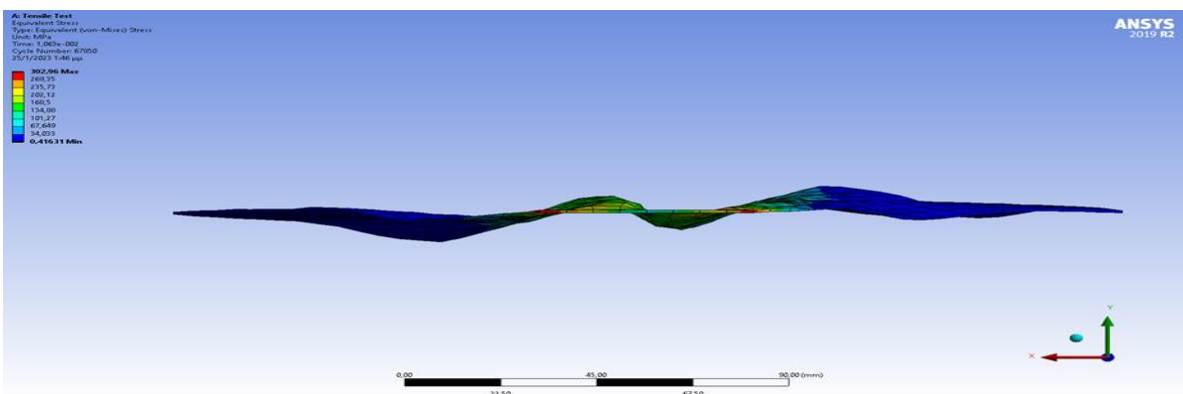
Εικόνα 62 Ισοδύναμη τάση κατά Von-Mises



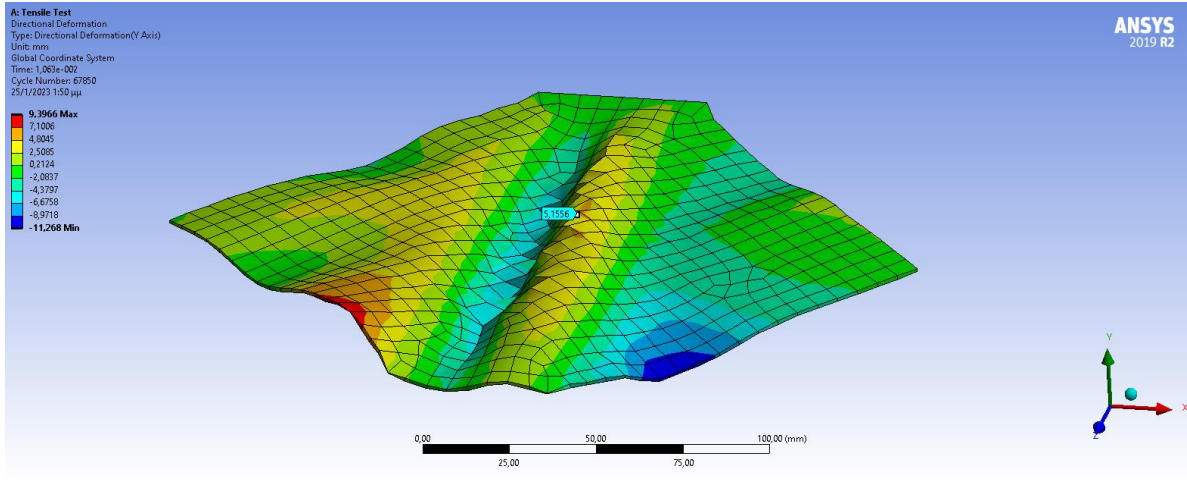
Εικόνα 63 Ισοδύναμη τάση κατά Von-Mises



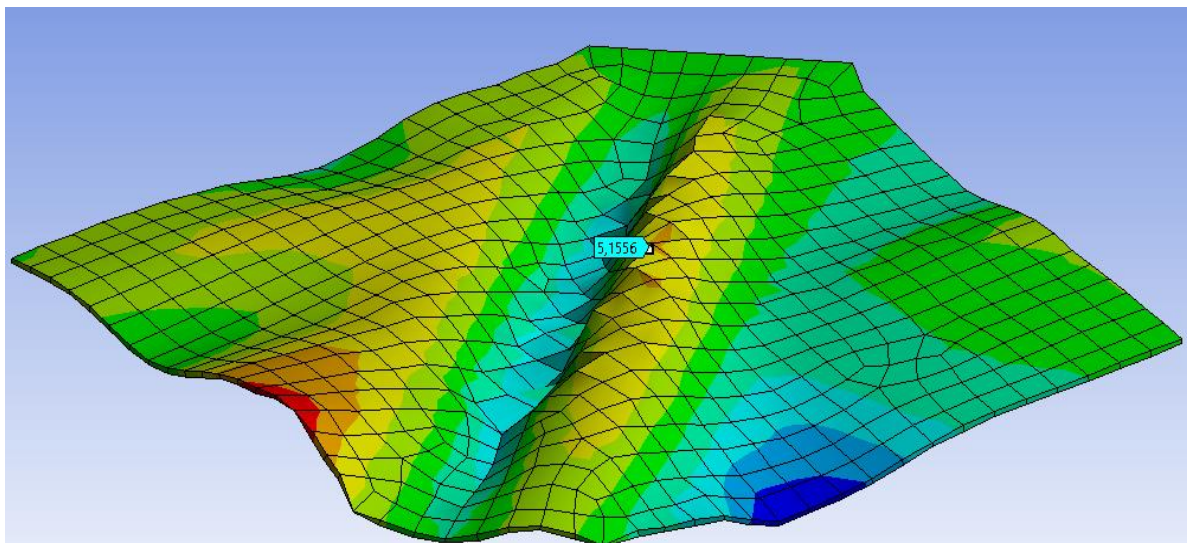
Εικόνα 64 Ισοδύναμη τάση κατά Von-Mises



Εικόνα 65 Ισοδύναμη τάση κατά Von-Mises

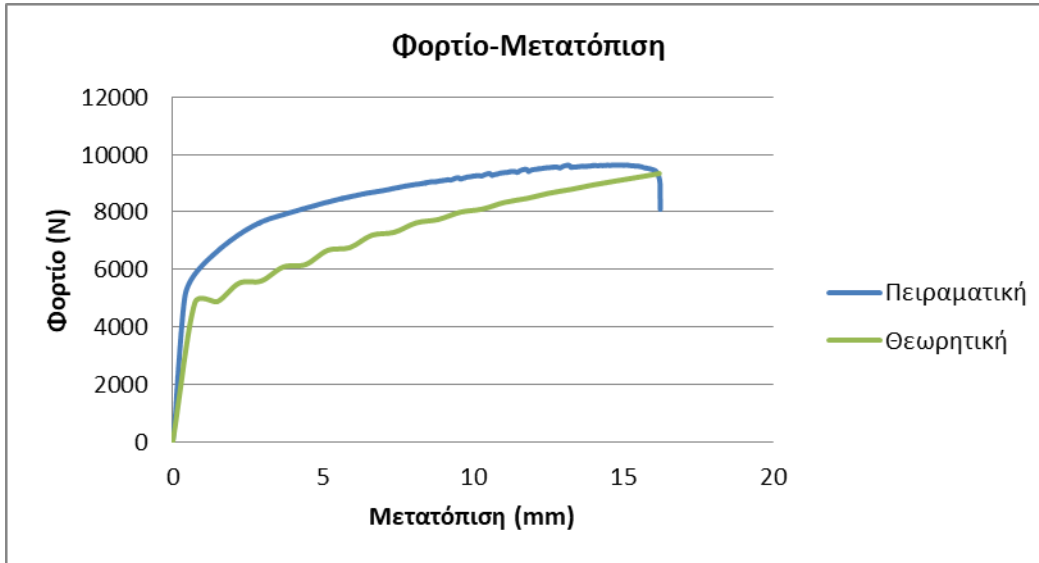


Εικόνα 66 Ύψος κοίλανσης από το επίπεδο αναφοράς 5,15 mm

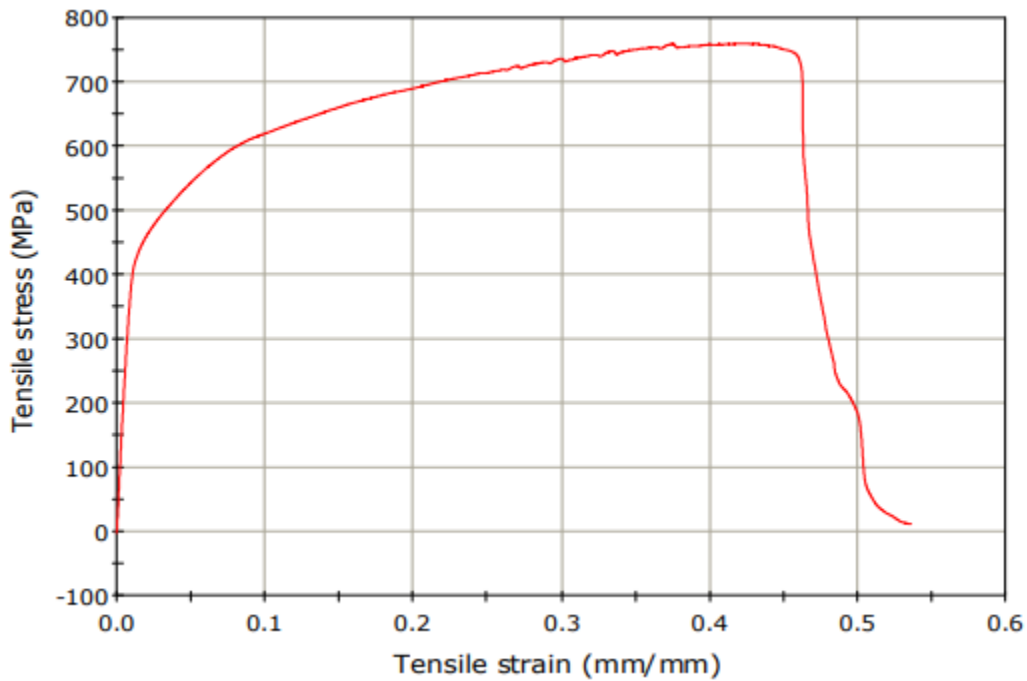


Εικόνα 67 Ύψος κοίλανσης από το επίπεδο αναφοράς 5,15 mm

**Γραφική παράσταση Φορτίου-Μετατόπισης Ορείχαλκου 1mm**



**Γραφική παράσταση Τάσης-Παραμόρφωσης Ορείχαλκου 1mm**





## 8.8 Συμπεράσμα ελασμάτων ορείχαλκου

Και για τα ελάσματα του ορείχαλκου χρησιμοποιήθηκε το ισοδύναμο κριτήριο αστοχίας κατά Von-Mises. Για τα ελάσματα αυτά όπως έχει αναφερθεί, η επιφάνεια τους είναι μεγαλύτερη, από ότι είναι τα ελάσματα του χαλκού και του χάλυβα. Και εδώ η κύρια ζώνη αστοχίας των ελασμάτων βρίσκεται στη περιοχή συγκράτησης τους. Η κεντρική περιοχή για τον ορείχαλκο πάχους 0,5mm κατά τη πειραματική διαδικασία παρουσίασε συμμετρική πτύχωση, ενώ στη προσομοιωτική διαδικασία δεν ήταν συμμετρική. Το ύψος της κοίλανσης για το έλασμα με πάχος 0,5 mm στο πειραματικό έλασμα είναι 1 mm ενώ στη προσομοιωτική διαδικασία 2,45 mm. Για το έλασμα του ορείχαλκου με πάχος 1mm το ύψος της κοίλανσης είναι 5,15 mm ενώ στο πειραματικό έλασμα είναι 5 mm. Για το έλασμα του ορείχαλκου με πάχος 1 mm η μέγιστη τάση είναι 302,96 MPa, ενώ για τον ορείχαλκο με πάχος 0,5 mm η μέγιστη τάση είναι 351 MPa. Για το πάχος 0,5mm το μέγιστο φορτίο στη πειραματική καμπύλη είναι 8287 N και στη θεωρητική καμπύλη είναι 8778N. Για το πάχος 1 mm Το μέγιστο φορτίο στη πειραματική καμπύλη είναι 9624 N και στη θεωρητική καμπύλη είναι 9079N.

Details of "Mesh"	
+ Display	
+ Defaults	
+ Sizing	
+ Quality	
+ Inflation	
+ Advanced	
- Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	1146
<input type="checkbox"/> Elements	528

Εικόνα 68 Συνολικός αριθμός κόμβων και στοιχείων ορείχαλκου 7ο

Details of "Mesh"	
+ Display	
+ Defaults	
+ Sizing	
+ Quality	
+ Inflation	
+ Advanced	
- Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	1242
<input type="checkbox"/> Elements	574

Εικόνα 69 Συνολικός αριθμός κόμβων και στοιχείων ορείχαλκου 8ο

## 9. Συμπεράσματα

Τέλος, μετά την ανάλυση και της προσομοιωτικής διαδικασίας και συγκρίνοντας τα αποτελέσματα τους με την πειραματική, καταλήγουμε ότι η μορφή των κοιλάνσεων παρουσιάστηκε παρόμοια μεταξύ των δύο αυτών μεθόδων για τα περισσότερα ελάσματα. Το υλικό που παρουσίασε λίγο διαφορετική συμπεριφορά των κοιλάνσεων από ότι στη πειραματική διαδικασία ήταν του ορείχαλκου γιατί ο ορείχαλκος σαν υλικό παρουσιάζει ανισοτροπία. Για τον ορείχαλκο με πάχος ελάσματος τα 0,5 mm στη πειραματική διαδικασία παρουσιάστηκε μία μικρή συμμετρική πτύχωση εν αντιθέσει με την προσομοίωση που δεν ήταν συμμετρική. Για τον ορείχαλκο με πάχος 1 mm στη πειραματική φάση δημιουργήθηκε μια μεγάλη πτύχωση στη κεντρική περιοχή του ελάσματος ενώ στη προσομοίωση δεν ήταν και αυτή συμμετρική.

Από τα κύρια χαρακτηριστικά των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από όλη την εργασία καταλήξαμε στα ακόλουθα συμπεράσματα με τη μέθοδο Yoshida:

1) Η δοκιμή λυγισμού Yoshida, δηλαδή ο μονοαξονικός εφελκυσμός ενός τετραγωνικού μεταλλικού ελάσματος, είναι μια κατάλληλη δοκιμή για την προσομοίωση φαινομένων εκτροπής και λυγισμού λόγω «αστάθειας συμπίεσης» σε εργασίες διαμόρφωσης μεταλλικών ελασμάτων η οποία μας δίνει ιδανικά αποτελέσματα για τη συμπεριφορά τους.

2) Καθοριστικοί παράγοντες στη διαμόρφωση των ελασμάτων είναι το υλικό που θα επιλέξουμε μιας και το κάθε υλικό έχει διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας, το πάχος του ελάσματος και η μορφή του σχήματος που θέλουμε να δημιουργηθεί. Οι μορφές των ελασμάτων δεν θα πρέπει να έχουν απότομες αλλαγές της γεωμετρίας τους ώστε να μειωθεί η συγκέντρωση τάσεων για να μην σχίζεται το έλασμα, και οι καμπυλότητες τους να είναι μικρές.

3) Οι συνθήκες γραπώματος της λαβής επηρεάζουν σημαντικά το σχηματισμό του λυγισμού. Η ολίσθηση του φύλλου στις άκρες σύσφιξης συμβάλλει στη συνολική μη ομοιόμορφη κατανομή τάσης πάνω στο δείγμα και επομένως ευνοεί το σχηματισμό των πτυχώσεων. Για το λόγο αυτό θα πρέπει να συγκρατούνται τα μεταλλικά ελάσματα ώστε οι τάσεις που αναπτύσσονται να κατανέμονται πιο ομοιόμορφα.

4) Η κεντρική περιοχή των μεταλλικών ελασμάτων παίζει το σημαντικότερο ρόλο όσον αφορά τη αστάθεια και το λυγισμό κατά το τέντωμα, όπως αποκαλύπτεται από τις κατανομές τάσης και παραμόρφωσης που λαμβάνονται χρησιμοποιώντας ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων και πειραματικές τεχνικές μέτρησης αντίστοιχα.

## 10. Κατάλογος Σχημάτων

Εικόνα 1 Διαξονικό τεστ Εφέλκυσμού, Biaxial tensile testing, Specimen shape, Wikipedia.org .....	10
Εικόνα 2 Μηχανουργική Τεχνολογία II (Κατεργασίες Διαμόρφωσης) Τεχνικά Επαγγελματικά Εκπαιδευτήρια 1ος Κύκλος Β΄ Τάξη .....	11
Εικόνα 3 Προβλήματα ποιότητας εξαρτήματος στη διαδικασία διαμόρφωσης λαμαρίνας. α) Πτυχώσεις, β) Σχίσσιμο, γ) Δυνάμεις επαναφοράς (springback) MIMO Adaptive Process Control in Stamping Using Punch Force Yongseob Lim, Daegu Gyeongbuk Institute of Science and Technology .....	12
Εικόνα 4 Η αρχή του Yoshida Buckling Test On the Yoshida Buckling Test of High Strength and Coated Low Carbon Steels A. G. Mamalis and L. P. Hatzikonstantis; National Technical University of Athens/Greece .....	13
Εικόνα 5 Σχηματική απεικόνιση της μεθόδου Yoshida. Wrinkling initiation and growth in modified Yoshida buckling test: Finite element analysis and experimental comparison J.B. Kim!, J.W. Yoon", D.Y. Yang!, * .....	14
Εικόνα 6 Εξέλιξη των πτυχώσεων λόγω εγκάρσιας συστολής σε μονοαξονική τάση, Investigation on Simulation of Buckling of Aluminium Sheet Alloys, Ralf Schleich, Christoph Albiez, Apostolos Papaioanu, Prof. Dr. M. Liewald MBA .....	15
Εικόνα 7 Σχηματική περιγραφή της διχοτόμησης Plate Buckling Resistance Mattias Clarin, Lulea University of Technology Department of Civil, Mining and Environmental Engineering Division of Structural Engineering – Steel Structures .....	15
Εικόνα 8 Διχοτόμηση συστήματος στο σημείο Α. Η πλάκα λυγίζει είτε στη θετική είτε στην αρνητική κατεύθυνση. Plate Buckling Resistance Mattias Clarin, Lulea University of Technology Department of Civil, Mining and Environmental Engineering Division of Structural Engineering – Steel Structures .....	16
Εικόνα 9 Η ποιότητα του εσωτερικού τμήματος της πόρτας εξαρτάται από τις συνθήκες τριβής και λίπανσης κατά τη παραγωγή, α) λυγισμός (wrinkling), β) σκίσιμο (fractures), Volvo Car Group: Door-inner Volvo XC90, TriboForm virtual tribology .....	18
Εικόνα 10 Η μέθοδος αξιολόγησης της μορφολογίας των πτυχώσεων, Research of the wrinkling elimination of stainless steel SUS304 by viscous pressure Tiejun .....	19
Εικόνα 11 Διαμόρφωση ελάσματος μέσω τετνώματος (stretch forming) για εξωτερικό τμήμα αεροσκάφους Senior Aerospace, Thermal Engineering – Stretch Forming process ..	20
Εικόνα 12 Σύστημα συγκράτησης (αρπάγες) μεταλλικών ελασμάτων .....	21
Εικόνα 13 Μηχανική Πρέσα INSTRON 4482 .....	23
Εικόνα 14 Ψαλίδι κοπής μεταλλικών ελασμάτων .....	25
Εικόνα 15 Πειραματική διάταξη μηχανική πρέσα και ηλεκτρονικός υπολογιστής καταγραφής των δεδομένων .....	26
Εικόνα 16 Έλασμα Αλουμινίου πριν και μετά το πείραμα .....	28
Εικόνα 17 Δοκίμια μεταλλικών ελασμάτων (χάλυβα, χαλκού, ορείχαλκου) μετά το πέρας του πειράματος .....	29

Εικόνα 18 Αρχικό, ενδιάμεσο και τελικό στάδιο διαδικασίας, Διατομή 100·100mm <sup>2</sup> , Πάχος 0.5mm .....	32
Εικόνα 19 Έλασμα μετά το μονοαξονικό εφελκυσμό .....	33
Εικόνα 20 Αρχικό, ενδιάμεσο και τελικό στάδιο διαδικασίας, Διατομή 100·100, Πάχος 0.5mm.....	34
Εικόνα 21 Έλασμα μετά το μονοαξονικό εφελκυσμό .....	35
Εικόνα 22 Αρχικό, ενδιάμεσο και τελικό στάδιο διαδικασίας, Διατομή 100·100, Πάχος 0.5mm.....	36
Εικόνα 23 Έλασμα μετά το μονοαξονικό εφελκυσμό .....	37
Εικόνα 24 Αρχικό, ενδιάμεσο και τελικό στάδιο διαδικασίας, Διατομή 100·100, Πάχος 0.5mm .....	38
Εικόνα 25 Έλασμα μετά το μονοαξονικό εφελκυσμό .....	39
Εικόνα 26 Αρχικό, ενδιάμεσο και τελικό στάδιο διαδικασίας, Διατομή 100·100, Πάχος 0.5mm.....	40
Εικόνα 27 Έλασμα μετά το μονοαξονικό εφελκυσμό .....	41
Εικόνα 28 Αρχικό, ενδιάμεσο και τελικό στάδιο διαδικασίας, Διατομή 100·100, Πάχος 0.5mm.....	42
Εικόνα 29 Έλασμα μετά το μονοαξονικό εφελκυσμό .....	43
Εικόνα 30 Αρχικό, ενδιάμεσο και τελικό στάδιο διαδικασίας, Διατομή 162·162, Πάχος 1mm.....	44
Εικόνα 31 Έλασμα μετά το μονοαξονικό εφελκυσμό .....	45
Εικόνα 32 Αρχικό, ενδιάμεσο και τελικό στάδιο διαδικασίας, Διατομή 156·156, Πάχος 0.5mm.....	46
Εικόνα 33 Έλασμα μετά το μονοαξονικό εφελκυσμό .....	47
Εικόνα 34 Τύποι πεπερασμένων στοιχείων 1 διάστασης, 2 διαστάσεων και 3 διαστάσεων .....	48
Εικόνα 35 3 Βαθμούς ελευθερίας για κάθε κόμβο.....	50
Εικόνα 36 6 Βαθμοί ελευθερίας για κάθε κόμβο .....	50
Εικόνα 37 .....	51
Εικόνα 38 Λωρίδες μεταλλικών ελασμάτων για την δημιουργία νέων υλικών στο Ansys..	54
Εικόνα 39 Ολική παραμόρφωση (Total Deformation).....	55
Εικόνα 40 Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises.....	55
Εικόνα 41 Ισοδύναμη τάση κατά Von-Mises .....	56
Εικόνα 42 Ισοδύναμη τάση κατά Von-Mises .....	56
Εικόνα 43 Ισοδύναμη τάση κατά Von-Mises .....	56
Εικόνα 44 Συνολικός αριθμός κόμβων και στοιχείων χαλκού.....	58
Εικόνα 45 Ύψος κοίλανσης από το επίπεδο αναφοράς 3,17 mm .....	59
Εικόνα 46 Ύψος κοίλανσης από το επίπεδο αναφοράς 3,17 mm .....	59
Εικόνα 47 Ολική παραμόρφωση (Total Deformation).....	60
Εικόνα 48 Ισοδύναμη τάση κατά Von-Mises .....	60
Εικόνα 49 Ισοδύναμη τάση κατά Von-Mises .....	61
Εικόνα 50 Ισοδύναμη τάση κατά Von-Mises .....	61
Εικόνα 51 Ισοδύναμη τάση κατά Von-Mises .....	61

Εικόνα 52 Συνολικός αριθμός κόμβων και στοιχείων χάλυβα .....	63
Εικόνα 53 Ύψος κοίλανσης από το επίπεδο αναφοράς 2,42 mm .....	64
Εικόνα 54 Ύψος κοίλανσης από το επίπεδο αναφοράς 2,42 mm .....	64
Εικόνα 55 Ολική παραμόρφωση (Total Deformation).....	65
Εικόνα 56 Ισοδύναμη τάση κατά Von-Mises .....	65
Εικόνα 57 Ισοδύναμη τάση κατά Von-Mises .....	66
Εικόνα 58 Ισοδύναμη τάση κατά Von-Mises .....	66
Εικόνα 59 Ύψος κοίλανσης από το επίπεδο αναφοράς 2,45 mm .....	68
Εικόνα 60 Ύψος κοίλανσης από το επίπεδο αναφοράς 2,45 mm .....	68
Εικόνα 61 Ολική παραμόρφωση (Total Deformation).....	69
Εικόνα 62 Ισοδύναμη τάση κατά Von-Mises .....	69
Εικόνα 63 Ισοδύναμη τάση κατά Von-Mises .....	70
Εικόνα 64 Ισοδύναμη τάση κατά Von-Mises .....	70
Εικόνα 65 Ισοδύναμη τάση κατά Von-Mises .....	70
Εικόνα 66 Ύψος κοίλανσης από το επίπεδο αναφοράς 5,15 mm .....	71
Εικόνα 67 Ύψος κοίλανσης από το επίπεδο αναφοράς 5,15 mm .....	71
Εικόνα 68 Συνολικός αριθμός κόμβων και στοιχείων ορείχαλκου 7ο.....	73
Εικόνα 69 Συνολικός αριθμός κόμβων και στοιχείων ορείχαλκου 8ο.....	73

## 11. Κατάλογος Πινάκων

<b>Πίνακας 1</b> Τεχνικά χαρακτηριστικά της μηχανικής πρέσσας <i>INSTRON 4482</i> .....	26
<b>Πίνακας 2</b> Ελάσματα χαλκού .....	30
<b>Πίνακας 3</b> Ελάσματα χάλυβα.....	30
<b>Πίνακας 4</b> Ελάσματα Ορείχαλκου .....	31

## 12. Κατάλογος Αναφορών

- [1] Δ. Μανωλάκος, Σημειώσεις του μαθήματος Κατεργασίες Ι
- [2] Serop Kalrskjian, Steven R. Schmid Μηχανουργική Επιστήμη & Τεχνολογία Επιστημονική επιμέλεια Δημήτριος Μανωλάκος , Άγγελος Μαρκόπουλος
- [3] Μηχανουργική Τεχνολογία ΙΙ (Κατεργασίες Διαμόρφωσης) Τεχνικά Επαγγελματικά Εκπαιδευτήρια 1<sup>ος</sup> Κύκλος Β' Τάξη
- [4] Σημειώσεις για το μάθημα: «Υπολογιστικές Μέθοδοι στις Κατασκευές» Χριστόφορος Προβατίδης
- [5] Χριστόφορος Προβατίδης Βελτιστοποίηση & Λογισμικό Κατασκευών Πεπερασμένα Στοιχεία, Ισογεωμετρικά Στοιχεία, Συνοριακά Στοιχεία
- [6] On the Yoshida Buckling Test of High Strength and Coated Low Carbon Steels A. G. Mamalis and L. P. Hatzikonstantis; National Technical University of Athens/Greece Submitted by 2. Marciniak (I)/Poland Received on February 27, 1987 - Accepted by the Editorial Committee
- [7] Numerical simulation of wrinkling behavior for the tin plate Jianjin Chena,\* , Weijie Yuana , Wenhao Wua , Cheng Yang
- [8] Buckling of Sheet Metals in Contact with Tool Surfaces J. Cao<sup>1</sup> , S. H. Cheng<sup>1</sup> , H. P. Wang<sup>2</sup> , C.T. Wang<sup>2</sup> <sup>1</sup> Department of Mechanical Engineering, Northwestern University, Evanston, IL, U.S.A. <sup>2</sup> General Motors Corporation, Warren, MI, U.S.A. Submitted by B. F. von Turkovich (1), South Burlington, V.T., U.S.A
- [9] Wrinkling initiation and growth in modified Yoshida buckling test: Finite element analysis and experimental comparison J.B. Kim<sup>1</sup>, J.W. Yoon<sup>1</sup>, D.Y. Yang<sup>1,\*</sup> <sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Kusung-dong 373-1, Yusung-gu, Taejon, 305-701, South Korea "LG Production Engineering Research Center, LG Electronics, 19-1, Cheongho-Ri, Jinwuy-Myun, Pyungtaek-Si, Kyunggi-Do, 451-713, South Korea
- [10] BUCKLING OF ALUMINIUM SHEET COMPONENTS Vishwanath Hegadekatte<sup>1</sup> , Yihai Shi<sup>2</sup> , Dubravko Nardini<sup>3</sup> <sup>1</sup> Novelis Inc., c /o Plot No. 1 & 1-A/1, MIDC Talaja, Navi Mumbai – 410208, India Aditya Birla Science and Technology Company Ltd. <sup>2</sup> Novelis Inc., Novelis Global Technology Centre, 945 Princess St., Kingston K7L 5L9, Canada <sup>3</sup> Oxford Engineering Solutions Ltd, 13 Cunliffe Close, Oxford OX2 7BJ, Great Britain
- [11] Finite Element Analysis of the Wrinkling Initiation and Growth in Modified Yoshida Buckling Test J. B. Kim and D. Y. Yang Department of Mechanical Engineering, Korea

Advanced Institute of Science & Technology 373-1 Gusung-dong, Yusung-ku, Taejon 305-701, Korea

[12] THE EFFECT OF MECHANICAL PROPERTIES ON THE WRINKLING BEHAVIOUR OF SHEET MATERIALS IN THE YOSHIDA TEST A.M. SZACINSKI and P.F. THOMSON Department of Materials Engineering, Monash University, Clayton, 3168 (Australia) (Received October 17, 1983; accepted in revised form January 4, 1984)

[13] THEORY OF ELASTIC STABILITY Timoshenko & Gere, International Student editions in related fields

[14] STAMPING AND WRINKLING OF ELASTIC PLATES Jeremy Hure, Benoit Romanm and Jose Bico PR; 109, 054302 (2012) OMMH, CNRS UMR 7636, UPMC and Université Paris Diderot, ESPCI-ParisTech, 10 rue Vauquelin, 75231 Paris Cedex 05, France

[15] APPLICATION OF WRINKLING CRITERION FOR PREDICTION OF SIDE-WALL WRINKLES IN DEEPDRAWING OF CONICAL CUPS H. H. Wisselink<sup>1,a</sup>, G. T. Nagy<sup>2,b</sup> and T. Meinders<sup>3,c</sup> <sup>1</sup>Materials innovation institute, P.O. Box 5008, 2600GA Delft, The Netherlands, <sup>2</sup>Tata Steel Research, Development & Technology P.O. Box 10000, 1970CA IJmuiden, The Netherlands, <sup>3</sup>Faculty of Engineering Technology, University of Twente P.O. Box 217, 7500 AE Enschede, The Netherlands

[16] PLASTIC BUCKLING John W. Hutchinson Division of Engineering and Applied Physics, Harvard University, Cambridge, Massachusetts

[17] ON PLATE THEORIES AND SAINT-VENANT'S PRINCIPLE R. D. Gregory Department of Mathematics, University of Manchester, Manchester, M13 9PL, England and F. Y. M. WAN\* Applied Mathematics Program, FS-20, University of Washington, Seattle, WA 98195, U.S.A

[18] MECHANICS OF SHEET METAL FORMING Z. Marciniak The Technical University of Warsaw, Poland, J.L. Duncan The University of Auckland, New Zealand, S.J. Hu The University of Michigan, USA

[19] IDENTIFICATION OF FORMING LIMITS OF SHEET METALS WITH AN IN-PLANE BIAXIAL TENSILE TEST Xiao Song

[20] RESEARCH OF THE WRINKLING ELIMINATION OF STAINLESS STEEL SUS304 BY VISCOUS PRESSURE Tiejun Gao<sup>1\*</sup> -Kun Yu<sup>2</sup> – Xiaojun Liu<sup>1</sup> – Hepeng Zhang<sup>1</sup> Faculty of Aerospace Engineering, Shenyang Aerospace University, No. 37 Daoyi South Avenue, Shenyang 110136 Liaoning, China, <sup>2</sup>AECC Shenyang Liming Aero engine co., LTD, No.6 East Street, Shenyang 110043 Liaoning, China

[21] YOSHIDA-UEMORI MATERIAL MODELS IN CYCLIC TENSION-COMPRESSION TEST AND SHEAR TESTS Chih-Yi Chang<sup>1</sup>, Ming-Hsiung Ho<sup>1</sup> and Ping-Chen Shen<sup>2</sup>



[22] OPTIMIZATION OF THE MODIFIED YOSHIDA BUCKLING TEST TO INVESTIGATE THE INFLUENCE OF CURVATURE Sven Schreyer<sup>1,a</sup> and Wolfram Volk<sup>1,b,1</sup>, Technische Universität München – Institute of Metal Forming and Casting (utg), Walther-Meißner-Straße 4, 85748 Garching, Germany

[23] A Novel Approach to Predict Wrinkling of Aluminum Alloy During Warm/Hot Sheet Hydroforming Based on an Improved Yoshida Buckling Test Gaoshen Cai 1 , Jubo Fu 1 , Dongxing Zhang 2,\* , Jinlin Yang 1 , Yongfeng Yuan 1 , Lihui Lang 3 and Sergei Alexandrov 4

[24] Plate Buckling Resistance, Patch Loading of Longitudinally Stiffened Webs and Local Buckling, Mattias Clarin DOCTORAL THESIS

[25] Wrinkling in Aluminum Sheet under Bi-Axial Loading using Finite Element Analysis, Jawad Ahmed Jadoon<sup>1</sup> and Irfan A. Manarvi<sup>2</sup> <sup>1,2</sup>Department of Mechanical Engineering, HITEC University Taxila, Pakistan

[26] POSTBIFURCATION BEHAVIOR OF WRINKLES IN SQUARE METAL SHEETS UNDER YOSHIDA TEST XIAOFANG WANG and LAWRENCE H.N. LEE University of Notre Dame

[27] Buckling of Sheet Metals in Contact with Tool Surfaces, J. Cao<sup>1</sup> , S. H. Cheng<sup>1</sup> , H. P. Wang<sup>2</sup> , C.T. Wang<sup>2</sup> <sup>1</sup> Department of Mechanical Engineering, Northwestern University, Evanston, IL, U.S.A. <sup>2</sup> General Motors Corporation, Warren, MI, U.S.A. Submitted by B. F. von Turkovich (1), South Burlington, V.T., U.S.A