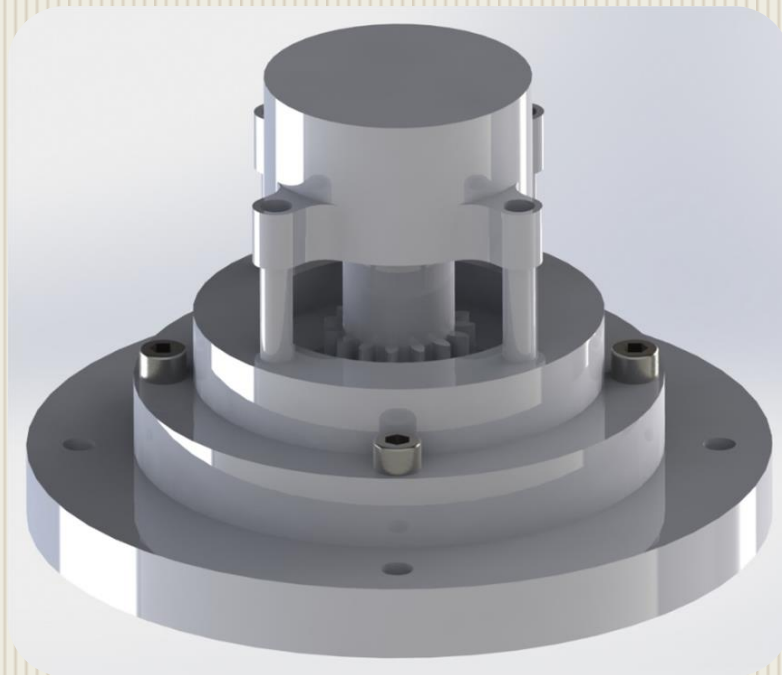




**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΘΕΡΜΗΣ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ
ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ ΕΥΘΕΙΑΣ
ΟΔΟΝΤΩΣΗΣ**



**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ
ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ**

ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2013

.....

Παρασκευή Δρόσου

Μηχανολόγος Μηχανικός Ε.Μ.Π.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια των σπουδών μου στη σχολή των Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π., στον Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών. Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερω τον επιβλέποντα για την εργασία καθηγητή κ. Δημήτριο Μανωλάκο για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου αναθέτοντάς μου τη μελέτη και τη διεκπεραίωση της διπλωματικής αυτής εργασίας αλλά και για την πολύτιμες και ουσιαστικές συμβουλές του, αλλά και τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Εμμανουήλ Γκιθώνα για την εποικοδομητική συνεργασία κατά την εκπόνησή της.

Αθήνα, Ιούλιος 2013

Παρασκευή Δρόσου
Μηχανολόγος Μηχανικός Ε.Μ.Π.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η προσομοίωση της μεθόδου της θερμής σφυρηλάτησης ακριβείας και η μελέτη αντοχής μήτρας σφυρηλάτησης κατασκευής οδοντωτών τροχών ευθείας οδόντωσης χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, με τη βοήθεια του πακέτου DEFORM 3D. Το συγκεκριμένο πακέτο προτιμήθηκε λόγω του πλεονεκτήματος του να αναδημιουργεί πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων, πράγμα απαραίτητο σε κατεργασίες μεγάλης παραμόρφωσης. Επίσης, ένα άλλο βασικό πλεονέκτημα του είναι να εξάγει δυνάμεις που παρουσιάζονται σε μια προσομοίωση, από το δοκίμιο στα υπόλοιπα τμήματα της μήτρας για να πραγματοποιηθεί μελέτη αντοχής. Πολλά στοιχεία των προσομοιώσεων, λήφθησαν από επιστημονικά άρθρα παρόμοιων προσπαθειών.

Στο 1^ο κεφάλαιο γίνεται μια αναφορά στη μέθοδο της σφυρηλάτησης και περιγράφονται τα είδη σφυρηλάτησης που χρησιμοποιούνται σήμερα. Επίσης, απαριθμούνται οι μηχανές σφυρηλάτησης, καθώς και τα εργαλεία (καλούπια) που χρησιμοποιούνται. Τέλος, περιγράφονται οι παράμετροι και τα χαρακτηριστικά που παίζουν σημαντικό ρόλο στη συγκεκριμένη μέθοδο, όπως τα υλικά, η θερμοκρασία και η λίπανση.

Στο 2^ο κεφάλαιο περιγράφονται οι οδοντωτοί τροχοί και γίνεται αναφορά στα είδη που υπάρχουν. Ακόμη, αναφέρονται τα βασικά μεγέθη των οδοντώσεων, όπως, το βήμα, το module, το πάχος και η σχέση μετάδοσης.

Στο 3^ο κεφάλαιο, αναφέρονται οι μέθοδοι σφυρηλάτησης των διαφόρων ειδών οδοντωτών τροχών και γίνεται λόγος για την ακρίβεια και ποιότητά τους. Τέλος, γίνεται αναφορά στη σφυρηλάτηση ακριβείας, μια μέθοδος που αποσκοπεί στο να κατασκευαστεί το τελικό τεμάχιο χωρίς επιπλέον στάδια εκτός αυτού της σφυρηλάτησης.

Στο 4^ο κεφάλαιο, περιγράφεται η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (FEM), γίνεται αναφορά στη γένεση πλέγματος, και στα είδη ανάλυσης που μπορούν να πραγματοποιηθούν με αυτή τη μέθοδο.

Στο 5^ο κεφάλαιο γίνεται περιγραφή των συνθηκών των προσομοιώσεων σφυρηλάτησης και δίνονται τα χαρακτηριστικά του προς κατασκευή τροχού. Ακόμη, παρουσιάζονται στα στοιχεία της μήτρας σφυρηλάτησης, τα υλικά και οι συνθήκες των κατεργασιών. Τέλος, παρουσιάζεται αναλυτικά ένα παράδειγμα προσομοίωσης θερμής σφυρηλάτησης με το DEFORM 3D και παρατίθενται τα αποτελέσματα.

Στο 6^ο κεφάλαιο παρατίθεται αναλυτικά ένα παράδειγμα μελέτης αντοχής μιας μήτρας σφυρηλάτησης με το DEFORM 3D και παρατίθενται τα αποτελέσματα.

Στο 7^ο κεφάλαιο συγκεντρώνονται τα αποτελέσματα από όλες τις προσομοιώσεις και τις μελέτες αντοχής που πραγματοποιήθηκαν, γίνεται επεξεργασία και εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα από τη σύγκρισή τους.

Τέλος, στα παραρτήματα της εργασίας, περιγράφονται τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν, τα χαρακτηριστικά του H/Y στον οποίο και έγιναν οι προσομοιώσεις και τέλος παρατίθεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνησή της.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	3
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	4
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	5
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	8
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗ	13
1.1 ΟΡΙΣΜΟΣ – ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ.....	13
1.2 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ	13
1.2.1 ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗ ΑΝΟΙΧΤΗΣ ΜΗΤΡΑΣ (OPEN-DIE FORGING).....	13
1.2.2 ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗ ΚΛΕΙΣΤΗΣ ΜΗΤΡΑΣ (CLOSED-DIE FORGING).....	16
1.2.3 ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗ ΚΛΕΙΣΤΗΣ ΜΗΤΡΑΣ ΜΕ ΠΡΟΕΞΟΧΗ (IMPRESSION-DIE FORGING)	16
1.2.4 ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΙΚΗ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗ.....	18
1.3 ΜΗΧΑΝΕΣ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ.....	18
1.3.1 ΣΦΥΡΕΣ	19
1.3.2 ΠΡΕΣΕΣ.....	21
1.3.3 ΑΛΛΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ.....	23
1.4 ΕΡΓΑΛΕΙΑ (ΚΑΛΟΥΠΙΑ) ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ	24
1.5 ΣΗΜΑΣΙΑ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΣΤΟΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΚΑΛΟΥΠΙΩΝ	25
1.5.1 ΓΡΑΜΜΗ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΥ.....	25
1.5.2 ΚΩΝΙΚΟΤΗΤΑ.....	26
1.5.3 ΝΕΥΡΑ.....	26
1.5.4 ΕΜΒΥΘΙΣΕΙΣ – ΚΟΡΜΟΙ - ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΕΣ	26
1.5.5 ΠΡΟΕΚΤΑΜΑ	27
1.5.6 ΥΛΙΚΑ ΚΑΛΟΥΠΙΩΝ	27
1.6 ΑΛΛΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ	27
1.6.1 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ	27
1.6.2 ΛΙΠΑΝΣΗ	27
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΟΔΟΝΤΩΤΟΙ ΤΡΟΧΟΙ	28
2.1 ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ	28
2.2 ΕΙΔΗ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ	29
2.2.1 ΜΕΤΩΠΙΚΟΙ ΟΔΟΝΤΩΤΟΙ ΤΡΟΧΟΙ	29
2.2.2 ΚΩΝΙΚΟΙ ΟΔΟΝΤΩΤΟΙ ΤΡΟΧΟΙ.....	31
2.2.3 ΕΛΙΚΟΙΕΙΔΕΙΣ ΟΔΟΝΤΩΤΟΙ ΤΡΟΧΟΙ ΑΣΥΜΒΑΤΩΝ ΑΞΟΝΩΝ	32
2.2.4 ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΤΕΡΜΟΝΑ ΚΟΧΛΙΑ – ΟΔΟΝΤΩΤΟΥ ΤΡΟΧΟΥ	33
2.3 ΜΕΓΕΘΗ ΟΔΟΝΤΩΣΕΩΝ	34
2.3.1 ΒΗΜΑ ΟΔΟΝΤΩΝ – ΜΕΤΡΟ ΟΔΟΝΤΩΣΕΩΝ	34
2.3.2 ΠΑΧΟΣ ΟΔΟΝΤΩΝ	35
2.3.3 ΣΧΕΣΗ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ – ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΑΞΟΝΩΝ.....	37
2.3.4 ΓΩΝΙΑ ΕΠΑΦΗΣ	38
2.3.5 ΒΑΘΜΟΣ ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΩΣ Ή ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΕΠΑΦΗΣ	38
2.4 ΦΟΡΤΙΣΗ ΤΩΝ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ	45
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ	48
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	48

3.2	ΚΩΝΙΚΟΙ ΟΔΟΝΤΩΤΟΙ ΤΡΟΧΟΙ (BEVEL GEARS).....	48
3.3	ΤΡΟΧΟΙ ΧΩΡΙΣ ΟΔΟΝΤΩΣΗ (GEAR BLANKS).....	49
3.4	ΟΔΟΝΤΩΤΟΙ ΤΡΟΧΟΙ ΜΕ ΕΘΥΕΙΑ ΚΑΙ ΕΛΙΚΟΕΙΔΗ ΟΔΟΝΤΩΣΗ (SPUR AND HELICAL GEARS).....	51
3.5	ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ.....	52
3.6	ΑΚΡΙΒΕΙΑ ΤΩΝ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ.....	55
3.7	ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ.....	57
3.8	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	60

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....61

4.1	ΓΕΝΙΚΑ.....	61
4.2	ΟΡΙΣΜΟΣ CAD.....	61
4.3	ΟΡΙΣΜΟΣ CAE.....	62
4.4	ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	63
4.4.1	ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ – ΤΥΠΟΙ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	63
4.4.2	ΑΥΤΟΜΑΤΗ ΓΕΝΕΣΗ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ.....	66
4.4.3	ΕΙΔΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	77

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΘΕΡΜΗΣ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ ΟΔΟΝΤΩΤΟΥ ΤΡΟΧΟΥ79

5.1	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ.....	79
5.2	ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ.....	80
5.2.1	ΓΕΝΙΚΑ.....	80
5.2.2	ΠΑΚΕΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ DEFORM 3D (10.2).....	80
5.2.3	ΣΧΕΔΙΑΣΤΙΚΟ ΠΑΚΕΤΟ SOLIDWORKS.....	82
5.3	ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΟΔΟΝΤΩΤΟΥ ΤΡΟΧΟΥ ΚΑΙ ΜΗΤΡΑΣ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ.....	84
5.3.1	ΓΕΝΙΚΑ.....	84
5.3.2	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΟΔΟΝΤΩΤΟΥ ΤΡΟΧΟΥ.....	84
5.3.3	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΡΧΙΚΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ.....	87
5.3.4	ΜΗΤΡΑ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ ΟΔΟΝΤΩΤΟΥ ΤΡΟΧΟΥ.....	88
5.4	ΥΛΙΚΑ & ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	92
5.4.1	ΥΛΙΚΟ ΔΟΚΙΜΙΟΥ.....	92
5.4.2	ΥΛΙΚΟ ΜΗΤΡΑΣ & ΤΡΟΠΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ.....	93
5.4.3	ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	94
5.5	ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΘΕΡΜΗΣ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΜΕ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΠΑΚΕΤΟ DEFORM 3D.....	95
5.5.1	ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΣΥΜΜΕΤΡΙΑΣ ΚΑΙ ΕΞΑΓΩΓΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΑΠΟ ΤΟ SOLIDWORKS 95.....	95
5.5.2	ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΝΕΑΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΣΤΟ DEFORM 3D.....	97
5.5.3	ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΣΤΟ DEFORM 3D ΚΑΙ ΟΡΙΣΜΟΣ ΕΙΔΟΥΣ ΤΜΗΜΑΤΩΝ.....	98
5.5.4	ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	100
5.5.5	ΟΡΙΣΜΟΣ ΥΛΙΚΟΥ.....	101
5.5.6	ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.....	103
5.5.7	ΟΡΙΣΜΟΣ ΕΠΑΦΗΣ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	105
5.5.8	ΕΠΑΝΑΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ (REMESHING).....	106
5.5.9	ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	108
5.5.10	ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ.....	110
5.5.11	ΛΗΨΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	111

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΜΕΛΕΤΗ ΑΝΤΟΧΗΣ ΜΗΤΡΑΣ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ..... 122

6.1	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ.....	122
6.2	ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΜΕΛΕΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ.....	122
6.2.1	ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΝΕΑΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΤΟ DEFORM 3D.....	122
6.2.2	ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΤΗΣ ΒΑΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ.....	123
6.2.3	ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	125
6.2.4	ΟΡΙΣΜΟΣ ΥΛΙΚΟΥ.....	132
6.2.5	ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.....	134

6.2.6	ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΠΟΥ ΔΕΧΟΝΤΑΙ ΤΑ ΤΟΙΧΩΜΑΤΑ ΤΗΣ ΜΗΤΡΑΣ ΑΠΟ ΤΟ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΜΕΝΟ ΔΟΚΙΜΙΟ.....	135
6.2.7	ΟΡΙΣΜΟΣ ΕΠΑΦΗΣ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	137
6.2.8	ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	137
6.2.9	ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΤΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ	139
6.2.10	ΛΗΨΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	140
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....		144
7.1	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ.....	144
7.1.1	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΠΙΛΥΣΗΣ	144
7.1.2	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	144
7.1.3	ΦΟΡΤΙΟ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ	145
7.2	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΕΛΕΤΩΝ ΑΝΤΟΧΗΣ	149
7.2.1	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΠΙΛΥΣΗΣ	149
7.2.2	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	150
7.3	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	151
7.3.1	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΕΠΙ ΤΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ	151
7.3.2	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΕΠΙ ΤΩΝ ΜΕΛΕΤΩΝ ΑΝΤΟΧΗΣ	153
7.4	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ	154
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΩΝ		155
ΠΑ.1	ΧΑΛΥΒΑΣ AISI H-13 (ΥΛΙΚΟ ΜΗΤΡΑΣ)	155
ΠΑ.2	ΚΡΑΜΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ 6061-T6 (ΥΛΙΚΟ ΔΟΚΙΜΙΟΥ)	157
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ & ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ Η/Υ		160
ΠΒ.1	ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ	160
ΠΒ.2	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ Η/Υ	160
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		161
ΠΓ.1	ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	161
ΠΓ.2	ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	162
ΠΓ.3	ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΕΣ.....	168

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1**

Σχήμα 1.1: Κατεργασίες σφυρηλάτησης. (α) Κατεργασία τύπωσης νομισμάτων, (β) Διαμόρφωση κεφαλής ήλων και κοχλιών, (γ) Διάτρηση, (δ) Διαμόρφωση μορφοδοκού, (ε) Κατεργασία διαπλάτυνσης ή διάνοιξης πλήμνης, (στ) Διαμόρφωση άκρου	14
Σχήμα 1.2: Σφυρηλάτηση ανοικτής μήτρας	15
Σχήμα 1.3: Σφυρηλάτηση κλειστής μήτρας. (α) Διαδικασία πλήρωσης του καλουπιού, (β) Σφυρηλάτηση ακριβείας: (i) Απλής μορφής, (ii) Τυπικής μορφής, (iii) Near-net-shape.	17
Σχήμα 1.4: Σφυρηλάτηση κλειστής μήτρας με προεξοχή	17
Σχήμα 1.5: Αρχή λειτουργίας της περιστροφικής σφυρηλάτησης	18
Σχήμα 1.6: Σφύρες για σφυρηλάτηση ανοικτής μήτρας	19
Σχήμα 1.7: Σφύρες για σφυρηλάτηση κλειστής μήτρας. (α) και (β): Σφύρες πίπτουσας μάζας.	20
Σχήμα 1.8: Σφύρα για σφυρηλάτηση κλειστής μήτρας. Ατμόσφουρα	21
Σχήμα 1.9: (α): Βασικά μέρη μιας μηχανικής πρέσας σφυρηλάτησης.....	22
Σχήμα 1.10: Βασικά μέρη μιας υδραυλικής πρέσας σφυρηλάτησης	23
Σχήμα 1.11: Μηχανές σφυρηλάτησης με κυλινδρικά ράουλα.....	24
Σχήμα 1.12: Χαρακτηριστική ορολογία στην κατασκευή καλουπιού σφυρηλάτησης. (α) Εγκάρσια διατομή τεμαχίου/καλουπιού (β) Τρισδιάστατη μορφή σφυρήλατου τεμαχίου	25
Σχήμα 1.13: Διαμόρφωση εμβυθίσεων, νεύρων και κορμού	26

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Σχήμα 2.1: Σχετική θέση αξόνων συνεργαζομένων τροχών	29
Σχήμα 2.2: 3-D μοντέλο ζεύγους εξωτερικών μετωπικών οδοντωτών τροχών ευθείας οδοντώσεως... ..	30
Σχήμα 2.3: 3-D μοντέλο ζεύγους εξωτερικών μετωπικών οδοντωτών τροχών	31
Σχήμα 2.4: 3-D μοντέλο ζεύγους κωνικών οδοντωτών τροχών ευθείας οδοντώσεως	32
Σχήμα 2.5: Βαθμίδα ελικοειδών τροχών ασυμβάτων τροχών	33
Σχήμα 2.6: 3-D μοντέλο συστήματος ατέρμονος κοχλία – οδοντωτού τροχού.....	34
Σχήμα 2.7: Πάχος οδόντος	36
Σχήμα 2.8: Συνεργαζόμενες κατατομές	40
Σχήμα 2.9: Χαρακτηριστικά μεγέθη συνεργαζομένων τροχών	43
Σχήμα 2.10: Βαθμός επικάλυψης ϵ συναρτήσει της σχέσης μεταδόσεως i_{12} βαθμίδας	45
Σχήμα 2.11: Δυνάμεις επί των οδόντων	46

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Σχήμα 3.1: Κλασική τεχνολογία σφυρηλάτησης οδοντωτού τροχού	48
Σχήμα 3.2: Μήτρα σφυρηλάτησης γωνιακού οδοντωτού τροχού	49
Σχήμα 3.3: Γρανάζια με κενή την περιοχή οδόντωσης- νέα τεχνολογία.....	50
Σχήμα 3.4: Γρανάζια με κενή την περιοχή οδόντωσης- παραδοσιακή τεχνολογία	50
Σχήμα 3.5: Τυπική γραμμή σφυρηλάτησης για τροχούς χωρίς οδόντωση	51
Σχήμα 3.6: Τελείως κλειστή μήτρα σφυρηλάτησης τροχών με ευθεία και ελικοειδή οδόντωση	52
Σχήμα 3.7: Οδοντωτός τροχός Σχήμα 3.8: Οδοντωτός τροχός	52
Σχήμα 3.9: Εξοικονόμηση υλικού/ βάρους χρησιμοποιώντας τη σφυρηλάτηση σχεδόν καθαρού σχήματος (ASM International 2005).	53
Σχήμα 3.10: Παράδειγμα σφυρήλατου οδοντωτού τροχού ακριβείας σχεδόν καθαρού σχήματος (ASM International 2005).	55
Σχήμα 3.11: Παράγοντες που επηρεάζουν την ακρίβεια σφυρηλάτησης	55
Σχήμα 3.12: Σχετική επίδραση των διαφόρων παραμέτρων στην ακρίβεια σφυρηλάτησης	56
Σχήμα 3.13: Σχηματική παράσταση της μεθόδου «σιδερώματος»	57
Σχήμα 3.14: Αντοχή σε κόπωση οδοντωτών τροχών	59
Σχήμα 3.15: Αντοχή σε κόπωση οδοντωτών τροχών	59

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Σχήμα 4.1: Τύποι πεπερασμένων στοιχείων για (a) μονοδιάστατα, (b) δισδιάστατα και (c) τρισδιάστατα προβλήματα.....	65
Σχήμα 4.2: Μέθοδος σύνδεσης κόμβων.....	67
Σχήμα 4.3: Μέθοδος γένεσης κόμβων κατά Cavendish.....	67
Σχήμα 4.4: Διάγραμμα Voronoi και η αντιστοιχούσα τριγωνοποίηση Delaunay.....	69
Σχήμα 4.5: Αλγόριθμος τριγωνοποίησης του Watson.....	69
Σχήμα 4.6: Παράδειγμα μεθόδου τοπολογικής αποσύζευξης.....	70
Σχήμα 4.7: Τελεστές που χρησιμοποιούνται για να διαμορφώσουν τρίγωνα.....	70
Σχήμα 4.8: Μέθοδοι εκλέπτυνσης τριγώνων.....	71
Σχήμα 4.9: Τελεστές αποσύζευξης γεωμετρίας στις 3 διαστάσεις.....	72
Σχήμα 4.10: Υποδιαίρεση με διαχωριστική γραμμή (split line).....	72
Σχήμα 4.11: Παράδειγμα γένεσης πλέγματος με χρήση μιας επαναληπτικής μεθόδου.....	73
Σχήμα 4.12: Χρήση ορθογωνικού grid για τη μέθοδο “grid-based”.....	74
Σχήμα 4.13: Μέθοδος σύνδεσης κόμβων.....	75
Σχήμα 4.14: Γένεση πλέγματος με χρήση παράστασης quadree.....	75
Σχήμα 4.15: Υποδιαίρεση του τριγώνου και τετραέδρου.....	76

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Σχήμα 5.1: Παράδειγμα «έξυπνου» πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων στο DEFORM-3D.....	81
Σχήμα 5.2: Παράδειγμα ψυχρής διέλασης ελικοειδών οδοντωτών τροχών στο DEFORM-3D.....	81
Σχήμα 5.3: Παράδειγμα σφυρηλάτησης και μελέτης αντοχής της μήτρας στο DEFORM-3D.....	82
Σχήμα 5.4: Συναρμογή κατασκευασμένη στο SOLIDWORKS.....	83
Σχήμα 5.5: Πολύπλοκη συναρμογή κατασκευασμένη στο SOLIDWORKS.....	83
Σχήμα 5.6: Σχέδιο Μοτοσυκλέτας στο SOLIDWORKS.....	83
Σχήμα 5.7: Τρισδιάστατη απεικόνιση του οδοντωτού τροχού (SOLIDWORKS).....	85
Σχήμα 5.8: Διάφορες όψεις του οδοντωτού τροχού (SOLIDWORKS).....	85
Σχήμα 5.9: Συμμετρικό τμήμα οδοντωτού τροχού που θα προσομοιωθεί (SOLIDWORKS).....	86
Σχήμα 5.10: Τρισδιάστατη απεικόνιση του αρχικού δοκιμίου (SOLIDWORKS).....	87
Σχήμα 5.11: Τρισδιάστατη τομή μήτρας (N = 15 όδοντες, m = 3 mm) (SOLIDWORKS).....	89
Σχήμα 5.12: Κάτοψη και πρόοψη σε τομή μήτρας (N = 15 όδοντες, m = 3 mm) (SOLIDWORKS).....	90
Σχήμα 5.13: Τρισδιάστατη ρεαλιστική απεικόνιση μήτρας (N = 15 όδοντες, m = 3 mm) (SOLIDWORKS).....	91
Σχήμα 5.14: Ικανότητα σφυρηλασίας και διάφορες θερμοκρασίες διαφόρων κραμάτων αλουμινίου	92
Σχήμα 5.15: Δημιουργία συμμετρικής γεωμετρίας (SOLIDWORKS).....	95
Σχήμα 5.16: Παράθυρο επιλογών μορφής αρχείων STL (SOLIDWORKS).....	96
Σχήμα 5.17: Μορφές αρχείων γεωμετρίας που μπορούν να εισαχθούν (DEFORM 3D).....	97
Σχήμα 5.18: Παράθυρο επιλογών νέου προβλήματος (DEFORM 3D).....	98
Σχήμα 5.19: Παράθυρο ορισμού ονομάτων και τύπου τμημάτων της μήτρας (DEFORM 3D).....	99
Σχήμα 5.20: Γεωμετρία που έχει εισαχθεί από SOLIDWORKS και έχει επεξεργαστεί στο DEFORM 3D.....	99
Σχήμα 5.21: Παράθυρο επιλογών ορισμού πεπερασμένων στοιχείων (DEFORM 3D).....	100
Σχήμα 5.22: Πλέγμα τετραεδρικών πεπερασμένων στοιχείων (DEFORM 3D).....	101
Σχήμα 5.23: Επιλογή του Αλουμινίου 6061-T6 ως υλικό από τη βιβλιοθήκη υλικών (DEFORM 3D) ..	102
Σχήμα 5.24: Επιλογές του παραμορφώσιμου σώματος (DEFORM 3D).....	103
Σχήμα 5.25: Επιλογές ενός απαραμόρφωτου σώματος (έμβολο) (DEFORM 3D).....	104
Σχήμα 5.26: Επιλογή ταχύτητας του απαραμόρφωτου σώματος (έμβολο) (DEFORM 3D).....	104
Σχήμα 5.27: Ορισμός των επαφών μεταξύ των στοιχείων (DEFORM 3D).....	105
Σχήμα 5.28: Ορισμός του συντελεστή τριβής μεταξύ των στοιχείων (DEFORM 3D).....	105
Σχήμα 5.29: Ορισμός του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας μεταξύ των στοιχείων (DEFORM 3D).....	106
Σχήμα 5.30: Ορισμός του τύπου Remeshing (DEFORM 3D).....	106
Σχήμα 5.31: Ορισμός της ενεργοποίησης του Remeshing (DEFORM 3D).....	107

Σχήμα 5.32: Παράθυρο επιλογών της διεργασίας (DEFORM 3D).....	108
Σχήμα 5.33: Παράθυρο επιλογών βημάτων της διεργασίας (DEFORM 3D).....	109
Σχήμα 5.34: Παράθυρο επιλογών τερματισμού της διεργασίας (DEFORM 3D).....	109
Σχήμα 5.35: Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για μετατόπιση 0 mm (DEFORM 3D).....	111
Σχήμα 5.36: Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για μετατόπιση 0,525 mm (DEFORM 3D).....	112
Σχήμα 5.37: Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για μετατόπιση 1,02 mm (DEFORM 3D).....	112
Σχήμα 5.38: Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για μετατόπιση 1,54 mm (DEFORM 3D).....	113
Σχήμα 5.39: Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για μετατόπιση 2,05 mm (DEFORM 3D).....	113
Σχήμα 5.40: Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για μετατόπιση 2,50 mm (DEFORM 3D).....	114
Σχήμα 5.41: Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για μετατόπιση 3,04 mm (DEFORM 3D).....	114
Σχήμα 5.42: Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για μετατόπιση 3,55 mm (DEFORM 3D).....	115
Σχήμα 5.43: Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για μετατόπιση 3,74 mm (DEFORM 3D).....	115
Σχήμα 5.44: Θερμοκρασία για μετατόπιση 0 mm (DEFORM 3D).....	116
Σχήμα 5.45: Θερμοκρασία για μετατόπιση 0,525 mm (DEFORM 3D).....	117
Σχήμα 5.46: Θερμοκρασία για μετατόπιση 1,02 mm (DEFORM 3D).....	117
Σχήμα 5.47: Θερμοκρασία για μετατόπιση 1,54 mm (DEFORM 3D).....	118
Σχήμα 5.48: Θερμοκρασία για μετατόπιση 2,05 mm (DEFORM 3D).....	118
Σχήμα 5.49: Θερμοκρασία για μετατόπιση 2,50 mm (DEFORM 3D).....	119
Σχήμα 5.50: Θερμοκρασία για μετατόπιση 3,04 mm (DEFORM 3D).....	119
Σχήμα 5.51: Θερμοκρασία για μετατόπιση 3,55 mm (DEFORM 3D).....	120
Σχήμα 5.52: Θερμοκρασία για μετατόπιση 3,74 mm (DEFORM 3D).....	120
Σχήμα 5.53: Δύναμη εμβόλου κατά τον άξονα Z.....	121

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Σχήμα 6.1: Παράθυρο επιλογών νέου προβλήματος (DEFORM 3D).....	123
Σχήμα 6.2: Παράθυρο επιλογής βημάτων προσομοίωσης (DEFORM 3D).....	124
Σχήμα 6.3: Γεωμετρία τελευταίου σταδίου σφυρηλάτησης με το δοκίμιο (DEFORM 3D).....	124
Σχήμα 6.4: Γεωμετρία τελευταίου σταδίου σφυρηλάτησης χωρίς το δοκίμιο (DEFORM 3D).....	125
Σχήμα 6.5: Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων της μήτρας (DEFORM 3D).....	126
Σχήμα 6.6: Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων της βάσης μήτρας (DEFORM 3D).....	127
Σχήμα 6.7: Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων του εμβόλου (DEFORM 3D).....	127
Σχήμα 6.8: Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων του άνω τμήματος του εμβόλου (DEFORM 3D).....	128
Σχήμα 6.9: Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων του κελύφους (DEFORM 3D).....	128
Σχήμα 6.10: Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων της βάσης κελύφους (DEFORM 3D).....	129
Σχήμα 6.11: Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων του κοχλία (DEFORM 3D).....	129
Σχήμα 6.12: Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων του οδηγού (DEFORM 3D).....	130
Σχήμα 6.13: Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων ολόκληρης μήτρας (DEFORM 3D).....	130
Σχήμα 6.14: Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων ολόκληρης μήτρας (DEFORM 3D).....	131
Σχήμα 6.15: Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων ολόκληρης μήτρας (DEFORM 3D).....	132
Σχήμα 6.16: Επιλογή του εργαλειοχάλυβα AISI H-13 ως υλικό από τη βιβλιοθήκη υλικών (DEFORM 3D).....	133
Σχήμα 6.17: Επιλογές ενός παραμορφώσιμου σώματος (μήτρα) (DEFORM 3D).....	134
Σχήμα 6.18: Επιλογές ενός απαραμόρφωτου σώματος (άνω τμήμα της πρέσας) (DEFORM 3D).....	135
Σχήμα 6.19: Εισαγωγή δυνάμεων στα τοιχώματα της μήτρας (DEFORM 3D).....	136
Σχήμα 6.20: Εισαγωγή δυνάμεων στα τοιχώματα του εμβόλου (DEFORM 3D).....	136
Σχήμα 6.21: Εισαγωγή δυνάμεων στα τοιχώματα της βάσης εμβόλου (DEFORM 3D).....	137
Σχήμα 6.22: Παράθυρο επιλογών της διεργασίας (DEFORM 3D).....	138
Σχήμα 6.23: Παράθυρο επιλογών βημάτων της διεργασίας (DEFORM 3D).....	139
Σχήμα 6.24: Ισοδύναμες τάσεις κατά Von Mises που δέχεται το έμβολο (DEFORM 3D).....	140
Σχήμα 6.25: Ισοδύναμες τάσεις κατά Von Mises που δέχεται το άνω τμήμα του εμβόλου (DEFORM 3D).....	141
Σχήμα 6.26: Ισοδύναμες τάσεις κατά Von Mises που δέχεται η μήτρα (DEFORM 3D).....	141

Σχήμα 6.27: Ισοδύναμες τάσεις κατά Von Mises που δέχεται το κέλυφος (DEFORM 3D).....	142
Σχήμα 6.28: Ισοδύναμες τάσεις κατά Von Mises που δέχεται η βάση της μήτρας (DEFORM 3D).....	142
Σχήμα 6.29: Ισοδύναμες τάσεις κατά Von Mises που δέχεται η βάση του κελύφους (DEFORM 3D)..	143

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Σχήμα 7.1: Διάγραμμα της δύναμης του εμβόλου συναρτήσει της μετατόπισης ($T_{\delta} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$)	145
Σχήμα 7.2: Διάγραμμα της δύναμης του εμβόλου συναρτήσει της μετατόπισης ($T_{\delta} = 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$)	146
Σχήμα 7.3: Διάγραμμα της δύναμης του εμβόλου συναρτήσει της μετατόπισης ($T_{\delta} = 200 \text{ }^{\circ}\text{C}$)	146
Σχήμα 7.4: Διάγραμμα της δύναμης του εμβόλου συναρτήσει της μετατόπισης ($T_{\delta} = 300 \text{ }^{\circ}\text{C}$)	147
Σχήμα 7.5: Διάγραμμα της δύναμης του εμβόλου συναρτήσει της μετατόπισης ($T_{\delta} = 400 \text{ }^{\circ}\text{C}$)	147
Σχήμα 7.6: Διάγραμμα της δύναμης του εμβόλου συναρτήσει της μετατόπισης ($T_{\delta} = 430 \text{ }^{\circ}\text{C}$)	148
Σχήμα 7.7: Διάγραμμα της δύναμης του εμβόλου συναρτήσει της μετατόπισης ($T_{\delta} = 480 \text{ }^{\circ}\text{C}$)	148
Σχήμα 7.8: Διάγραμμα της δύναμης του εμβόλου συναρτήσει της μετατόπισης ($T_{\delta} = 500 \text{ }^{\circ}\text{C}$)	149
Σχήμα 7.9: Διάγραμμα μεταβολής της μέγιστης τάσης του δοκιμίου συναρτήσει της αρχικής θερμοκρασίας δοκιμίου.....	151
Σχήμα 7.10: Διάγραμμα μεταβολής φορτίου σφυρηλάτησης συναρτήσει της αρχικής θερμοκρασίας δοκιμίου	152
Σχήμα 7.11: Διάγραμμα μεταβολής της μέγιστης τάσης των τμημάτων της μήτρας συναρτήσει της αρχικής θερμοκρασίας δοκιμίου	154

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1****ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2**

Πίνακας 2.1: Τυποποιημένες τιμές του module m σε mm για οδόντες δι' εξειλιγμένης..... 35

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Πίνακας 3.1: Αλλαγές στην ακρίβεια των τροχών με τη χρήση «σιδερώματος» 57

Πίνακας 3.2: Αντοχή σε κρούση οδοντωτών τροχών 58

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5**

Πίνακας 5.1: Σχέσεις μεγεθών μετωπικού οδοντωτού τροχού 84

Πίνακας 5.2: Εμβαδό επιφάνειας και όγκος ολόκληρου οδοντωτού τροχού και συμμετρίας 86

Πίνακας 5.3: Εμβαδό επιφάνειας και όγκος ολόκληρου δοκιμίου και συμμετρίας 87

Πίνακας 5.4: Συνδυασμοί των υπό κατασκευή οδοντωτών τροχών 88

Πίνακας 5.5: Αρίθμηση των επιμέρους εξαρτημάτων της μήτρας σφυρηλάτησης 89

Πίνακας 5.6: Μηχανικές και φυσικές ιδιότητες του δοκιμίου και του καλουπιού 93

Πίνακας 5.7: Παρουσίαση θερμοκρασιών και ειδών σφυρηλάτησης..... 94

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Πίνακας 6.1: Ιδιότητες πλέγματος τμημάτων της μήτρας (DEFORM 3D) 126

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Πίνακας 7.1: Βασικά στοιχεία κατά την επίλυση των προσομοιώσεων 144

Πίνακας 7.2: Μέγιστες τάσεις, θερμοκρασίες και φορτία σφυρηλάτησης όλων των προσομοιώσεων 145

Πίνακας 7.3: Βασικά στοιχεία κατά την επίλυση των μελετών αντοχής..... 150

Πίνακας 7.4: Μέγιστες τάσεις των επιμέρους τμημάτων της μήτρας..... 150

Πίνακας 7.5: Μέγιστη τάση ολόκληρης της μήτρας και ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας 153

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗ

1.1 ΟΡΙΣΜΟΣ – ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

Η σφυρηλάτηση είναι μια από τις σημαντικότερες κατεργασίες του συμπαγούς υλικού. Η πλαστική παραμόρφωση του τεμαχίου επιτυγχάνεται με την άσκηση θλιπτικών φορτίων από το εργαλείο σφυρηλάτησης. Εφαρμόζεται σε μεγάλη ποικιλία μεγέθους και σχήματος τεμαχίων και από ποικιλία υλικών. Τυπικά σφυρηλάτα προϊόντα είναι: εκκεντροφόροι άξονες, διωστήρες, χειροτροχοί, οδοντωτοί τροχοί, ήλοι, εργαλεία χειρός, πτερύγια ελίκων κλπ. Επίσης μπορούν να πραγματοποιηθούν διάφορες διαμορφώσεις, διάτρηση και εξειδικευμένες κατεργασίες. (Σχήμα 1.1)

Δυνατότητα σφυρηλάτησης (Forgability) ενός μετάλλου είναι η δυνατότητά του να παραμορφώνεται πλαστικά σε ορισμένη θερμοκρασία και ταχύτητα παραμόρφωσης. Για τον συνολικό χαρακτηρισμό της κατεργασιμότητας συνεκτιμώνται οι εξής ιδιότητες του προς κατεργασία υλικού: ολκιμότητα, αντοχή, απαιτούμενη θερμοκρασία κατεργασίας, συμπεριφορά έναντι τριβής και ποιότητα του τελικού προϊόντος. Την υψηλότερη κατεργασιμότητα παρουσιάζουν τα κράματα Al, Mg, Cu ακολουθούν οι ελαφρά κραματωμένοι ανθρακοχάλυβες, οι ανοξειδωτοί χάλυβες και κράματα Ti ενώ μικρή κατεργασιμότητα έχουν τα κράματα Ni, W και Be.

1.2 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ

Η σφυρηλάτηση λαμβάνει χώρα εν ψυχρώ και σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Μια χονδρική ταξινόμηση βάση της θερμοκρασίας κατεργασίας (όπου T_m το σ.τ. του κατεργαζόμενου υλικού) είναι η παρακάτω:

Ψυχρή σφυρηλάτηση: $T < 0,3T_m$

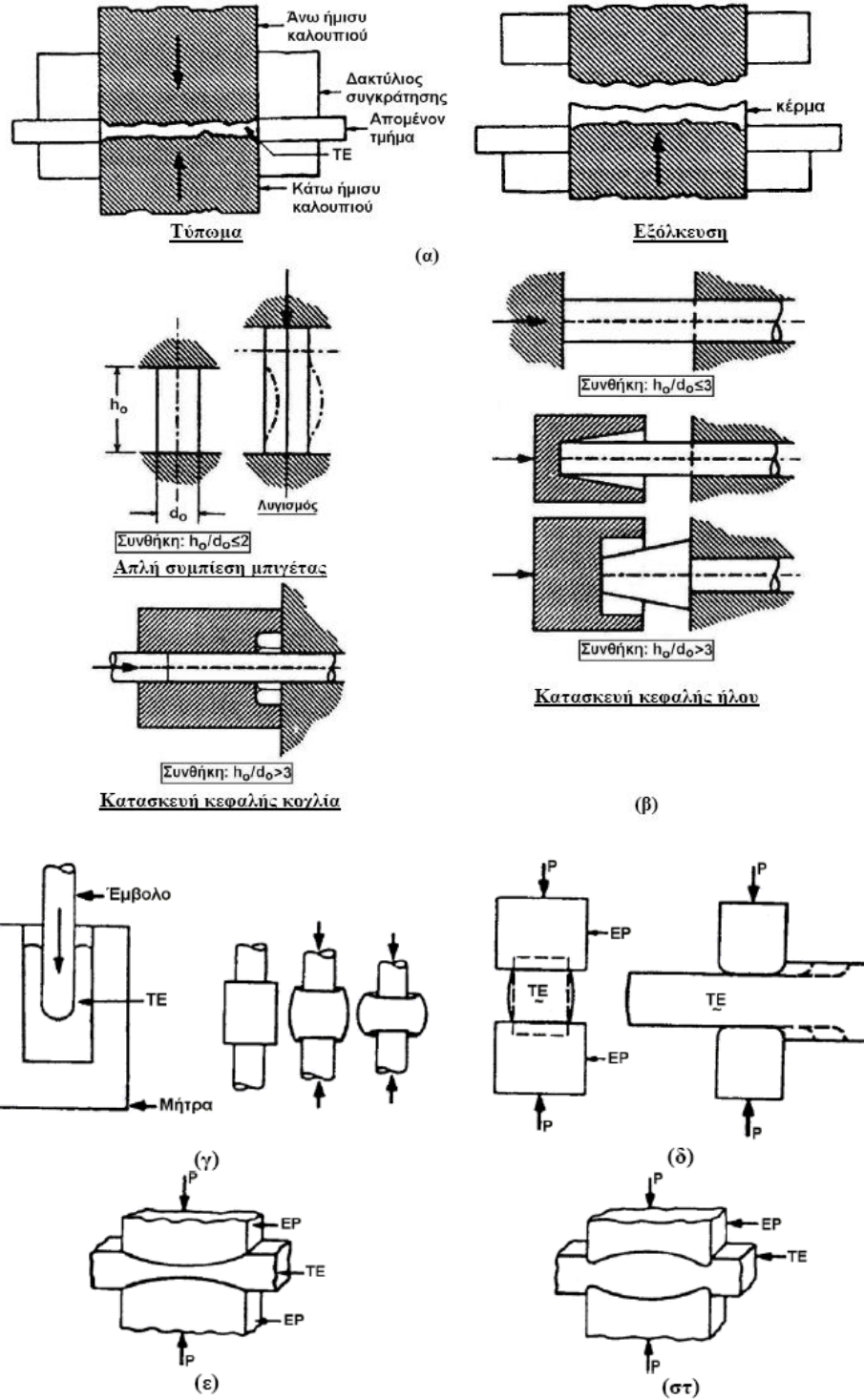
Θερμή σφυρηλάτηση: $T > 0,5T_m$

Ημίθερμη σφυρηλάτηση: $0,3T_m < T < 0,5T_m$

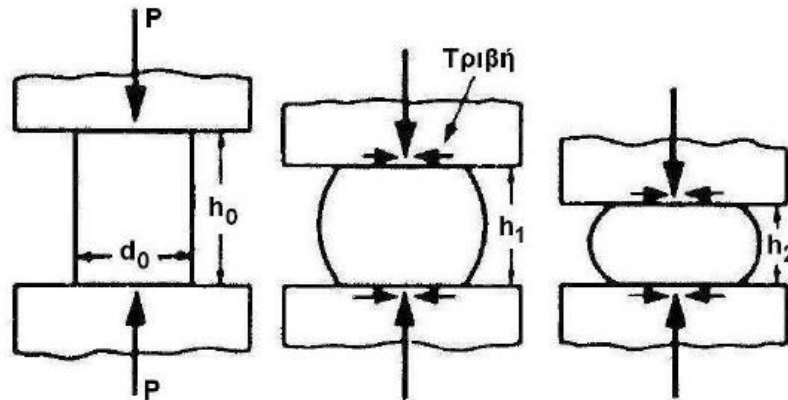
Μια διαφορετική ταξινόμηση των κατεργασιών σφυρηλάτησης με βάση τον τύπο (τη διάταξη) της κατεργασίας είναι η ακόλουθη:

1.2.1 ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗ ΑΝΟΙΧΤΗΣ ΜΗΤΡΑΣ (OPEN-DIE FORGING)

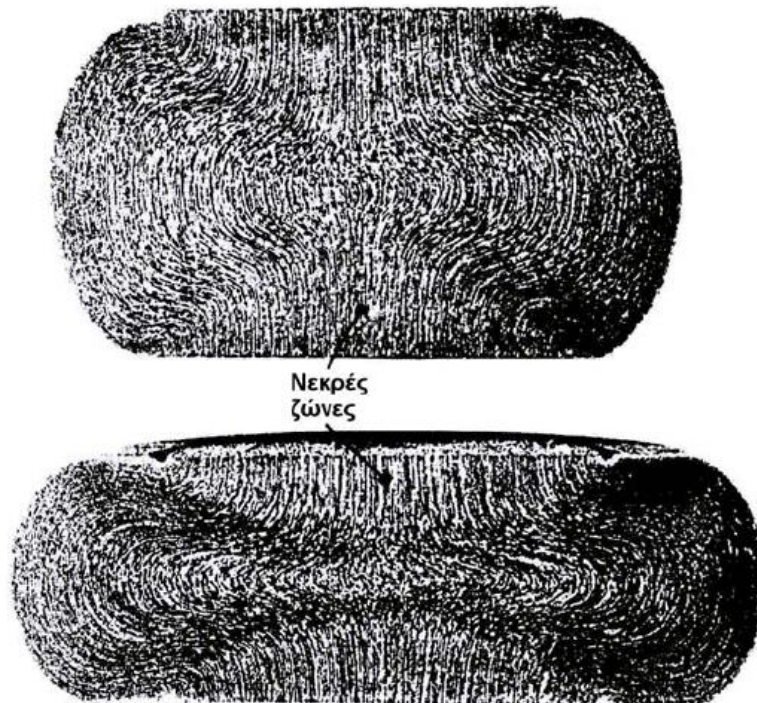
Στη σφυρηλάτηση ανοιχτής μήτρας οι δυνάμεις συμπίεσης παράγονται από εργαλεία χειρός ή μηχανικές σφύρες και ασκούνται τοπικά στο τεμάχιο (Σχήμα 1.2).



Σχήμα 1.1: Κατεργασίες σφυρηλάτησης. (α) Κατεργασία τύπωσης νομισμάτων, (β) Διαμόρφωση κεφαλής ήλων και κοχλίων, (γ) Διάτρηση, (δ) Διαμόρφωση μορφοδοκού, (ε) Κατεργασία διαπλάτυνσης ή διάνοιξης πλήμνης, (στ) Διαμόρφωση άκρου



Σχηματική παράσταση σφυρηλάτησης ανοικτής μήτρας



Ροή του υλικού κατά τη σφυρηλάτηση ανοικτής μήτρας

Σχήμα 1.2: Σφυρηλάτηση ανοικτής μήτρας

Επίσης απουσιάζει ή περιορίζεται σε πολύ μικρή έκταση η πλευρική συγκράτηση της ροής του μετάλλου. Το επιθυμητό σχήμα αποδίδεται στο τεμάχιο με απλή μετακίνηση ή στροφή του μεταξύ διαδοχικών κτυπημάτων. Τα πλεονεκτήματα αυτού του τύπου σφυρηλάτησης είναι ότι έχει απλά και φθηνά εργαλεία, είναι χρήσιμη για μικρή παραγωγή τεμαχίων αλλά για μεγάλη ποικιλία μεγεθών και αποδίδει χαρακτηριστικά καλής αντοχής στο τεμάχιο. Τα μειονεκτήματα του είναι ότι περιορίζεται σε απλές γεωμετρίες, η δυσκολία επίτευξης διαστασιακής ακρίβειας, είναι απαραίτητη η δευτερογενής κατεργασία για την απόκτηση της τελικής μορφής του τεμαχίου, γίνεται σχετικά μικρή εκμετάλλευση του υλικού, έχει αργό ρυθμό παραγωγής και απαιτεί εμπειρία και τεχνική δεξιότητα σε μεγάλο βαθμό.

1.2.2 ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗ ΚΛΕΙΣΤΗΣ ΜΗΤΡΑΣ (CLOSED-DIE FORGING)

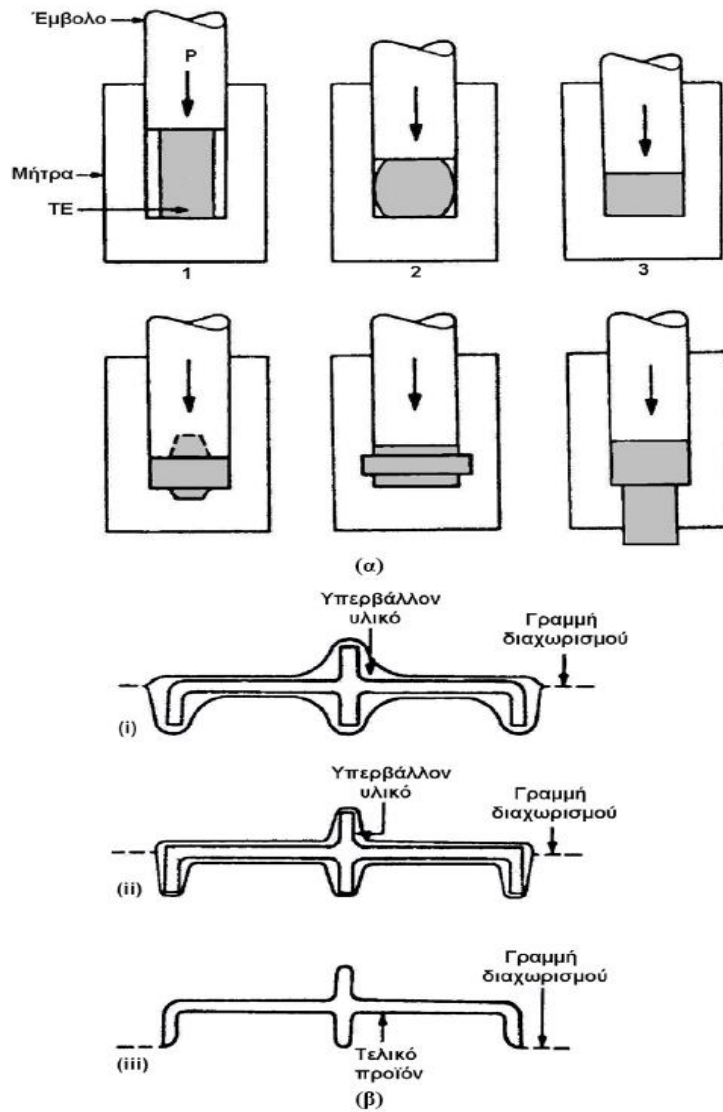
Σε αυτόν τον τύπο σφυρηλάτησης τα θλιπτικά φορτία που παράγονται από σφύρες ή πρέσες ασκούνται σε όλη την επιφάνεια του θερμαινόμενου μετάλλου. (Σχήμα 1.3(α)). Το κατεργαζόμενο υλικό παραμορφώνεται πλαστικά μέσα σε ειδικά διαμορφωμένο καλούπι (μήτρα, die) και καταλαμβάνει όλη τη διαθέσιμη κοιλότητα που έχει γεωμετρία και διαστάσεις ανάλογες με αυτές του τελικού τεμαχίου. Ανάλογα με την ακρίβεια των διαστάσεων που αποδίδει στο τελικό προϊόν, χαρακτηρίζεται και η αντίστοιχη κατεργασία κλειστής μήτρας, (Σχήμα 1.3(β)). Τα πλεονεκτήματα αυτού του τύπου σφυρηλάτησης είναι ότι κάνει καλή εκμετάλλευση του υλικού, δίνει καλύτερες ιδιότητες τεμαχίου από εκείνες της σφυρηλάτησης ανοιχτής μήτρας, καλύτερη προσέγγιση των διαστάσεων του τεμαχίου, έχει ταχύ ρυθμό παραγωγής και καλή παραγωγικότητα. Τα μειονεκτήματα του είναι ότι έχει υψηλό κόστος εργαλείων για μικρές ποσότητες παραγωγής και δεν αποκλείει δευτερογενείς κατεργασίες του τεμαχίου.

1.2.3 ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗ ΚΛΕΙΣΤΗΣ ΜΗΤΡΑΣ ΜΕ ΠΡΟΕΞΟΧΗ (IMPRESSION-DIE FORGING)

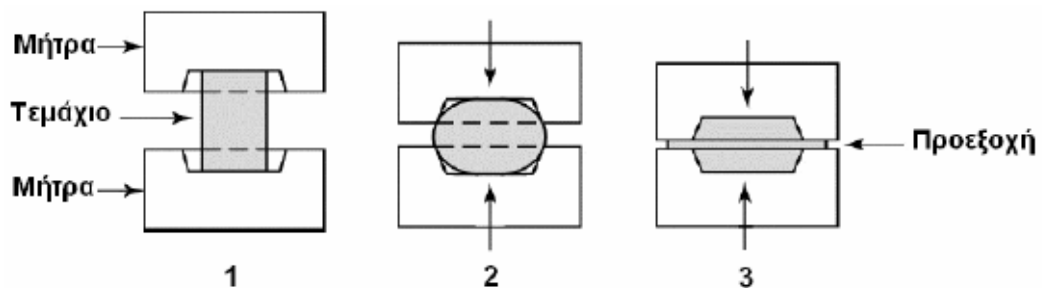
Πρόκειται για παραλλαγή της σφυρηλάτησης κλειστής μήτρας, (Σχήμα 1.4). Το υλικό του τεμαχίου είναι σε ποσότητα μεγαλύτερη από τον διατιθέμενο όγκο της κοιλότητας του καλουπιού, οπότε μέρος του υλικού εξέρχεται σε σχετικά αρχικό στάδιο ως προεξοχή ή προέκταμα (flash) μεταξύ των δύο μερών του καλουπιού έξω από την κοιλότητα αυτού, όπου και παραμορφώνεται.

Στη ψυχρή σφυρηλάτηση, λόγω του μεγάλου λόγου μήκος/πάχος στην περιοχή της προεξοχής, αναπτύσσονται εκεί υψηλές κάθετες τάσεις (πιέσεις) και κατά συνέπεια μεγάλη αντίσταση τριβής στην ροή του υλικού προς τα έξω. Το υπόλοιπο υλικό μέσα στην κοιλότητα του καλουπιού, αφού παρεμποδίζεται να κινηθεί προς τα έξω αναγκάζεται να κινηθεί προς άλλες κατευθύνσεις, με αποτέλεσμα την ασφαλή πλήρωση της κοιλότητας.

Στη θερμή σφυρηλάτηση, λόγω του μεγάλου λόγου επιφάνεια/πάχος στην περιοχή της προεξοχής, αυτή λειτουργεί ως πτερύγιο, το οποίο σύμφωνα με τις αρχές μετάδοσης θερμότητας αποψύχεται ταχύτερα από το υπόλοιπο υλικό. Αποτέλεσμα αυτού είναι η αύξηση της αντίστασης του υλικού προς περαιτέρω παραμόρφωση στην περιοχή της προεξοχής και ο εξαναγκασμός της ροής του υπόλοιπου υλικού να κινηθεί μέσα στην κοιλότητα του καλουπιού.



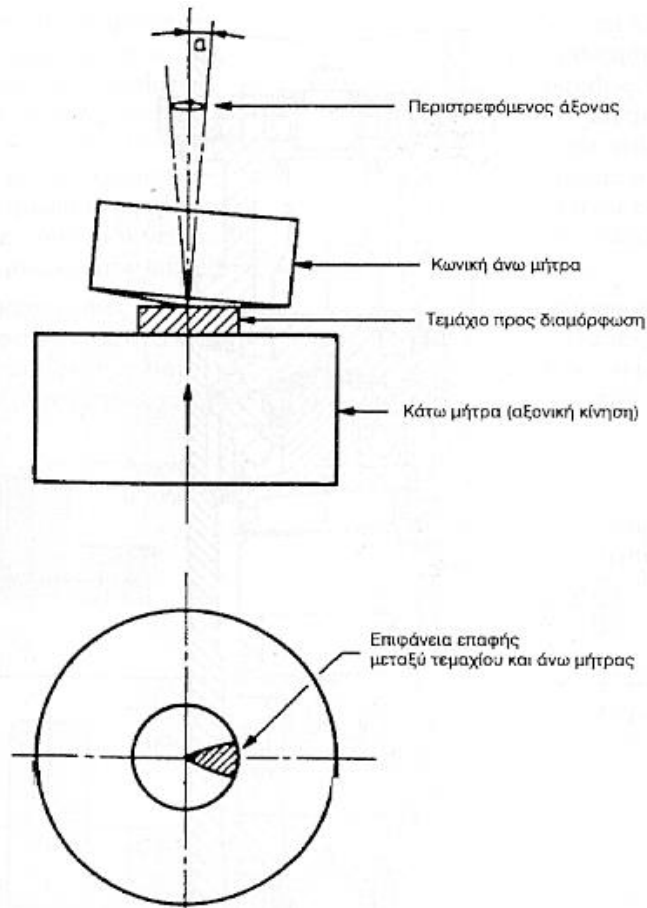
Σχήμα 1.3: Σφυρηλάτηση κλειστής μήτρας. (α) Διαδικασία πλήρωσης του καλουπιού, (β) Σφυρηλάτηση ακριβείας: (i) Απλής μορφής, (ii) Τυπικής μορφής, (iii) Near-net-shape.



Σχήμα 1.4: Σφυρηλάτηση κλειστής μήτρας με προεξοχή

1.2.4 ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΙΚΗ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗ

Η περιστροφική σφυρηλάτηση αποτελεί, σε ορισμένες περιπτώσεις, μια περαιτέρω βελτίωση της συμβατικής σφυρηλάτησης. Η αρχή λειτουργίας της φαίνεται διαγραμματικά στο σχήμα 1.5 όπου το αντικείμενο, αντί να διαμορφωθεί σε μια συμβατική πρέσα ή σφύρα, υπόκειται σε ένα συνδυασμό περιστροφής και συμπίεσης μεταξύ μιας επίπεδης κάτω πλάκας και μιας ταλαντευόμενης άνω μήτρας με κωνική επιφάνεια επαφής.



Σχήμα 1.5: Αρχή λειτουργίας της περιστροφικής σφυρηλάτησης

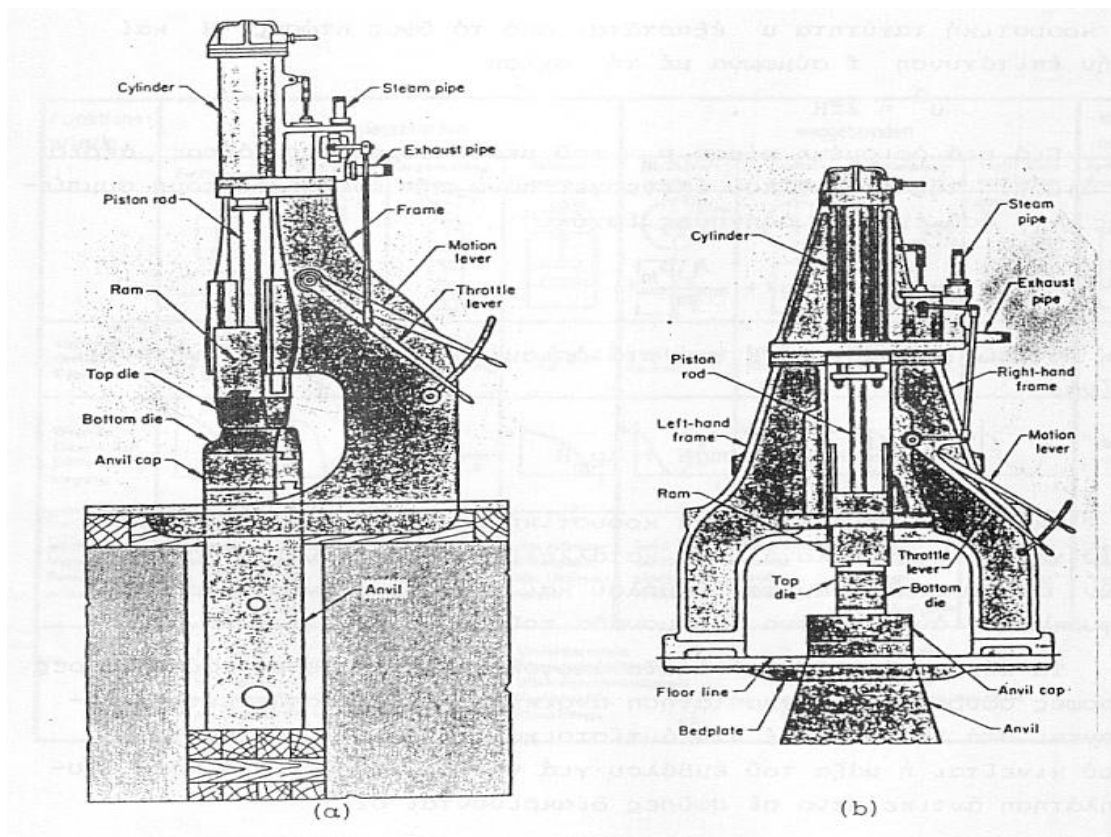
1.3 ΜΗΧΑΝΕΣ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ

Μέχρι περίπου το 1820 η σφυρηλάτηση ήταν κυρίως αντικείμενο του σιδηρουργού. Η χρήση των εργαλείων χειρός (σφύρα και αμόνι) αντικαταστάθηκε σήμερα από μηχανικά μέσα που εκτελούν την κατεργασία σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Στις αρχές του 20ου αιώνα είχε ήδη αναπτυχθεί όχι μόνο η κατασκευή των σφυρών, αλλά και η κατασκευή διαφόρων άλλων μηχανών ισχύος για σιδηρουργεία. Σήμερα η σφυρηλάτηση πραγματοποιείται σε σφύρες και πρέσες (μηχανικές και υδραυλικές) οι οποίες ανάλογα με τη διάταξη των εργαλείων χρησιμοποιούνται σε σφυρηλάτηση ανοικτής ή κλειστής μήτρας. Στη συνέχεια γίνεται αναλυτική περιγραφή αυτών των μηχανών.

1.3.1 ΣΦΥΡΕΣ

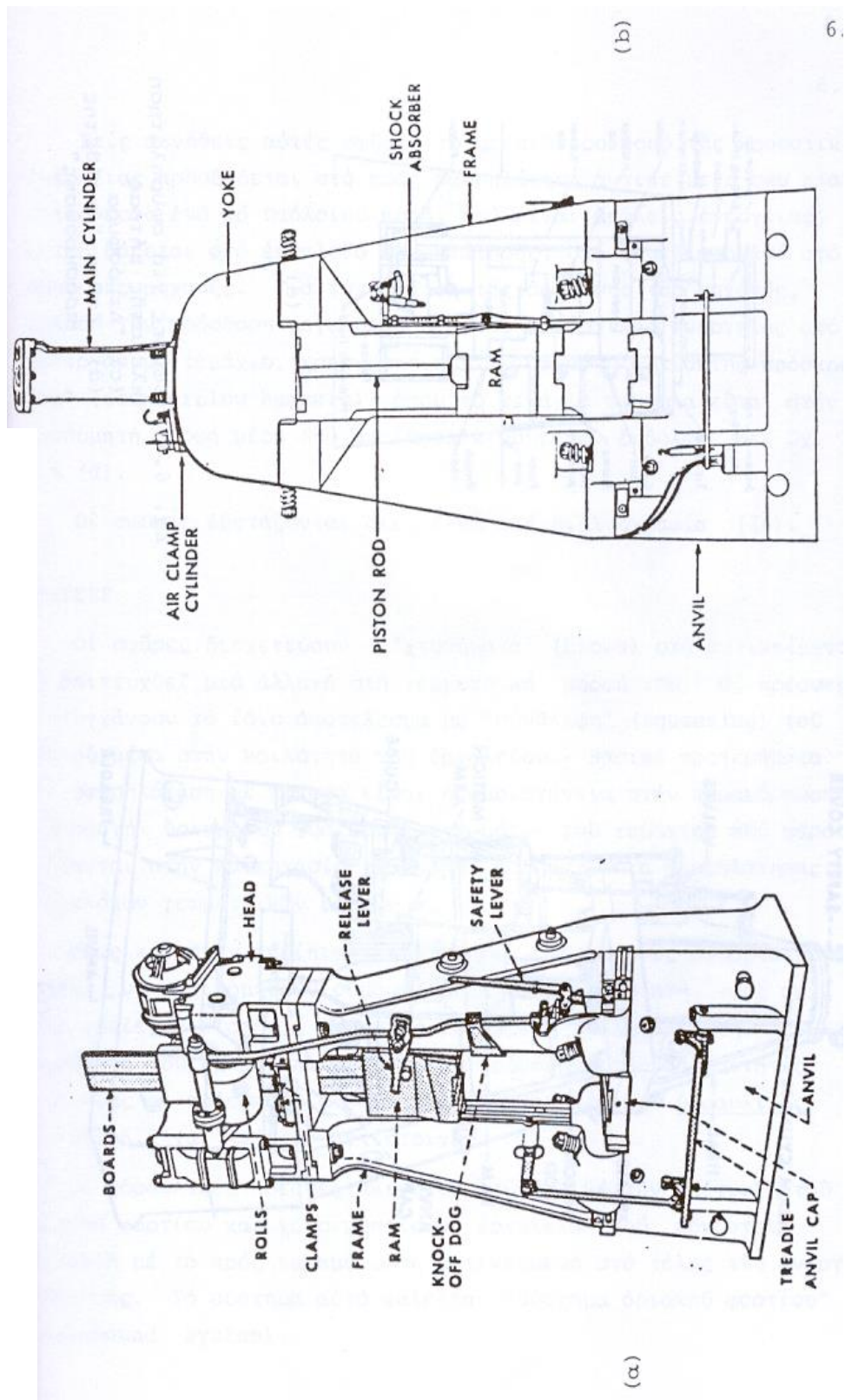
Οι σφύρες είναι μηχανές με κύριο χαρακτηριστικό την παραγόμενη κρουστική ενέργεια (energy bound) που το μεγαλύτερο μέρος της προσδίδεται στο προς σφυρηλάτηση αντικείμενο με τη μορφή πλαστικού έργου. Τα κύρια μέρη από τα οποία αποτελείται μια σφύρα και διάφορες μορφές σφυρών για σφυρηλάτηση ανοικτής και κλειστής μήτρας δίνονται στα σχήματα 1.6, 1.7 και 1.8. Ανάλογα με τον τρόπο που κινείται η μάζα του εμβόλου για να προσκρούσει στο προς σφυρηλάτηση αντικείμενο οι σφύρες διακρίνονται σε:

- Σφύρες πίπτουσας μάζας, σχήμα 1.7 (α) και (β), που η ανύψωση της μάζας στο επιθυμητό ύψος επιτυγχάνεται είτε μηχανικά, είτε πνευματικά με πεπιεσμένο αέρα.
- Αερόσφυρες ή Ατμόσφυρες που η μάζα επιταχύνεται μέσω πεπιεσμένου αέρα, αερίου ή ατμού. σχήμα 1.6 (α) και (β) και Σχήμα 1.8.

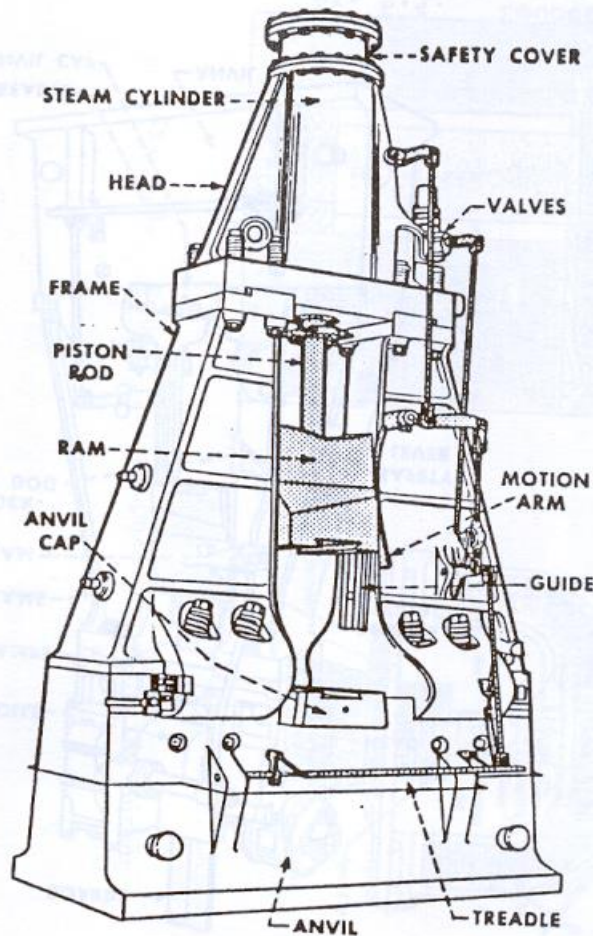


Σχήμα 1.6: Σφύρες για σφυρηλάτηση ανοικτής μήτρας

Στις συνήθεις αυτές σφύρες το μεγαλύτερο ποσό της κρουστικής ενέργειας προσδίδεται στο προς σφυρηλάτηση αντικείμενο σαν πλαστικό έργο ενώ το υπόλοιπο ποσό, που είναι απώλεια ενέργειας, μεταβιβάζεται στο εργαλείο σφυρηλάτησης, στη θεμελίωση και στο σώμα της μηχανής. Για την αύξηση της απόδοσης της μηχανής, δηλαδή την πρόσδοση μεγαλύτερου ποσού κρουστικής ενέργειας στο κατεργάσιμο τεμάχιο, χρησιμοποιούνται σφύρες «αντίθετης πρόσκρουσης» (counterblow hammers) όπου το τεμάχιο σφυρηλατείται στην επιθυμητή μορφή μέσω δυο αντίθετα κινουμένων εμβόλων.



Σχήμα 1.7: Σφύρες για σφυρηλάτηση κλειστής μήτρας. (α) και (β): Σφύρες πίπτουσας μάζας.



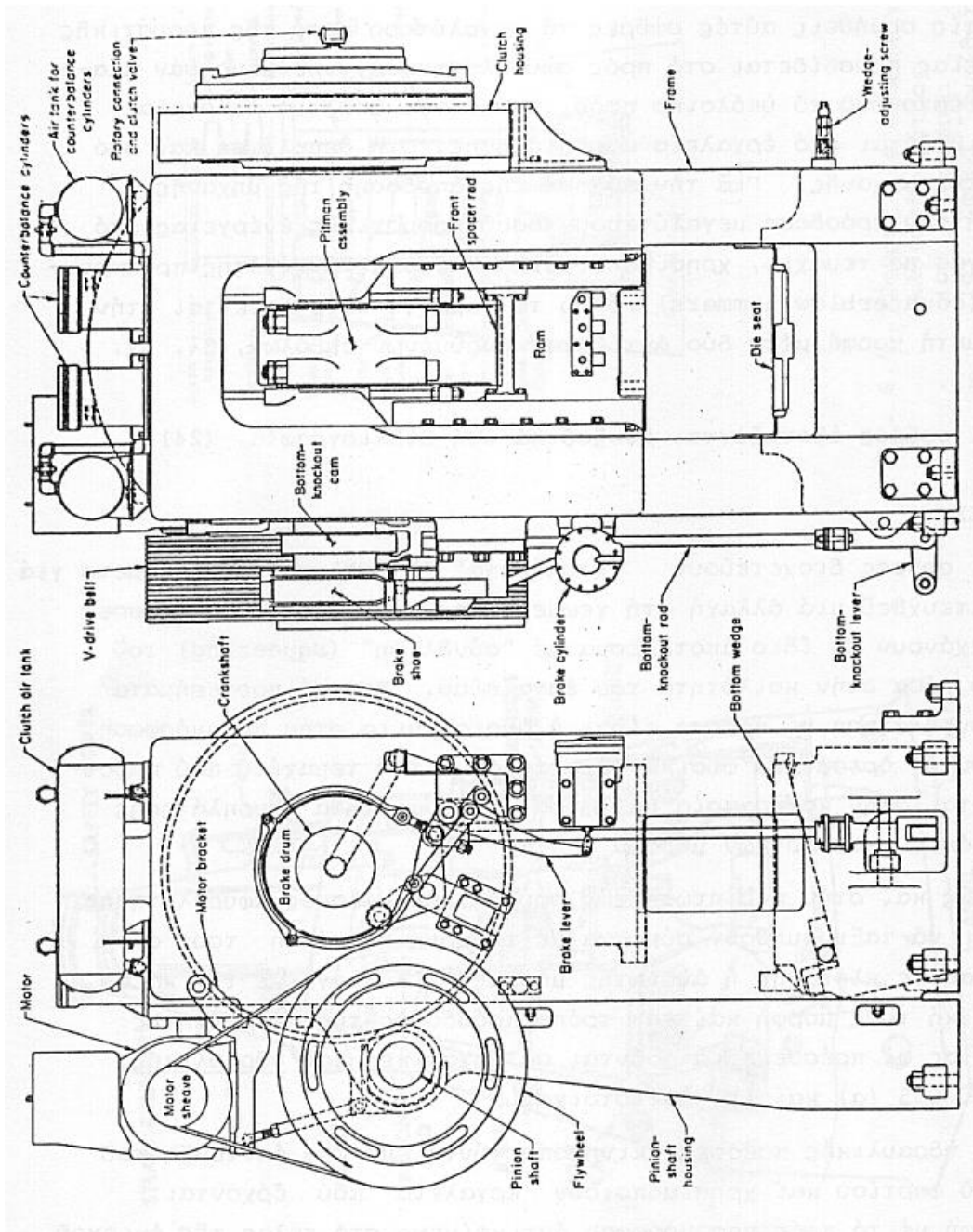
(c)

Σχήμα 1.8: Σφύρα για σφυρηλάτηση κλειστής μήτρας. Ατμόσφουρα

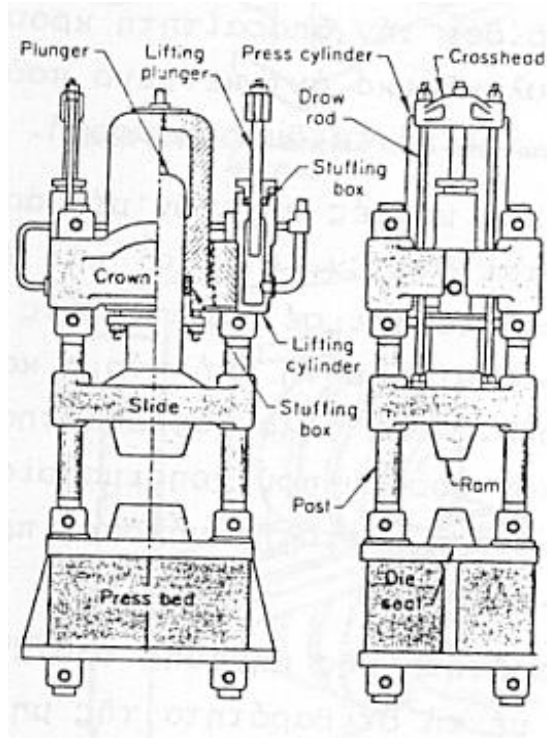
1.3.2 ΠΡΕΣΕΣ

Οι σφύρες διοχετεύουν «χτυπήματα» (blows) στο αντικείμενο για να επιτευχθεί μια αλλαγή στη γεωμετρική μορφή του. Οι πρέσες επιτυγχάνουν το ίδιο αποτέλεσμα με «σύνθλιψη» (squeezing) του υλικού μέσα στην κοιλότητα του εργαλείου. Βασικά προτερήματα στη σφυρηλάτηση με πρέσα είναι η ομοιογένεια στην παραμόρφωση, η αποφυγή ορισμένων φυσικών ελαττωμάτων του τεμαχίου που παρουσιάζονται στην κατεργασία με σφύρα, η δυνατότητα σφυρηλάτησης πολύπλοκων γεωμετρικών μορφών κλπ.

Όπως και στην περίπτωση των σφυρών, οι πρέσες σφυρηλάτησης μπορεί να ταξινομηθούν σύμφωνα με τη χρησιμοποίησή τους σε κατεργασίες ανοικτής ή κλειστής μήτρας. Ανάλογα με την κατασκευαστική τους μορφή και τον τρόπο πρόσδοσης της απαραίτητης ενέργειας οι πρέσες διαιρούνται σε μηχανικές και υδραυλικές, σχήμα 1.9 (α) και (b) αντίστοιχα.



Σχήμα 1.9: (α): Βασικά μέρη μιας μηχανικής πρέσας σφυρηλάτησης



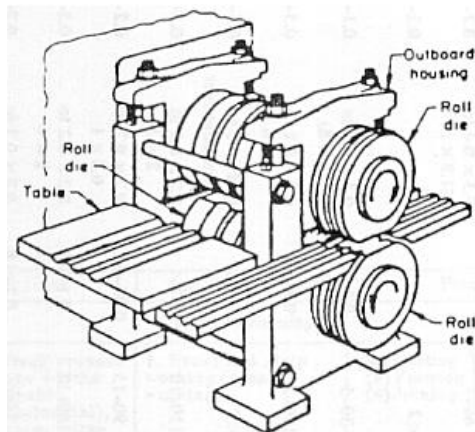
Σχήμα 1.10: Βασικά μέρη μιας υδραυλικής πρέσας σφυρηλάτησης

Οι υδραυλικές πρέσες ακινητοποιούνται με την επίτευξη του οριακού φορτίου και χρησιμοποιούν εργαλεία που έρχονται σε επαφή με το προς παραμόρφωση αντικείμενο στο τέλος της ενεργού διαδρομής. Το σύστημα αυτό καλείται «σύστημα οριακού φορτίου» (load-bound system).

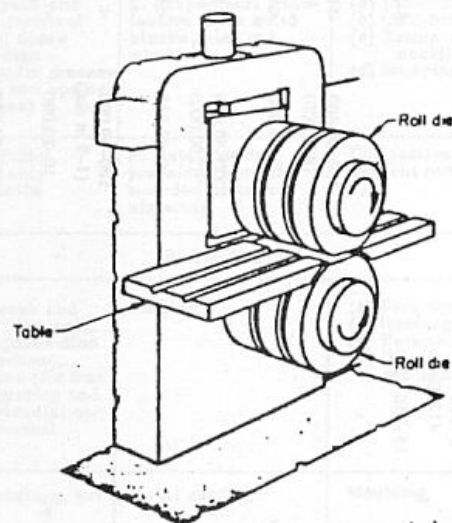
Οι μηχανικές πρέσες (εκτός από τις πρέσες με κοχλία τριβής) έχουν μια προκαθορισμένη διαδρομή και αναπτύσσουν μια άπειρη δύναμη στο τέλος της διαδρομής. Το σύστημα αυτό καλείται «σύστημα οριακής διαδρομής» (stroke-bound system).

1.3.3 ΑΛΛΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ

Εκτός από τις δύο βασικές κατηγορίες σφυρηλάτησης κλειστής και ανοιχτής μήτρας, στην πράξη χρησιμοποιούνται η οριζόντια σφυρηλάτηση και η σφυρηλάτηση με ράουλα. Αντιπροσωπευτικές μορφές μηχανών με ράουλα για τη σφυρηλάτηση τεμαχίου φαίνονται στο σχήμα 1.11. Στην οριζόντια σφυρηλάτηση χρησιμοποιούνται σφύρες όπου το έμβολο κινείται οριζόντια και προσδίδει την απαραίτητη κρουστική ενέργεια στο προς σφυρηλάτηση κυλινδρικό αντικείμενο που σε μία διαδοχή φάσεων διαμορφώνεται στην τελική επιθυμητή μορφή.



Roll forging machine with outboard housing

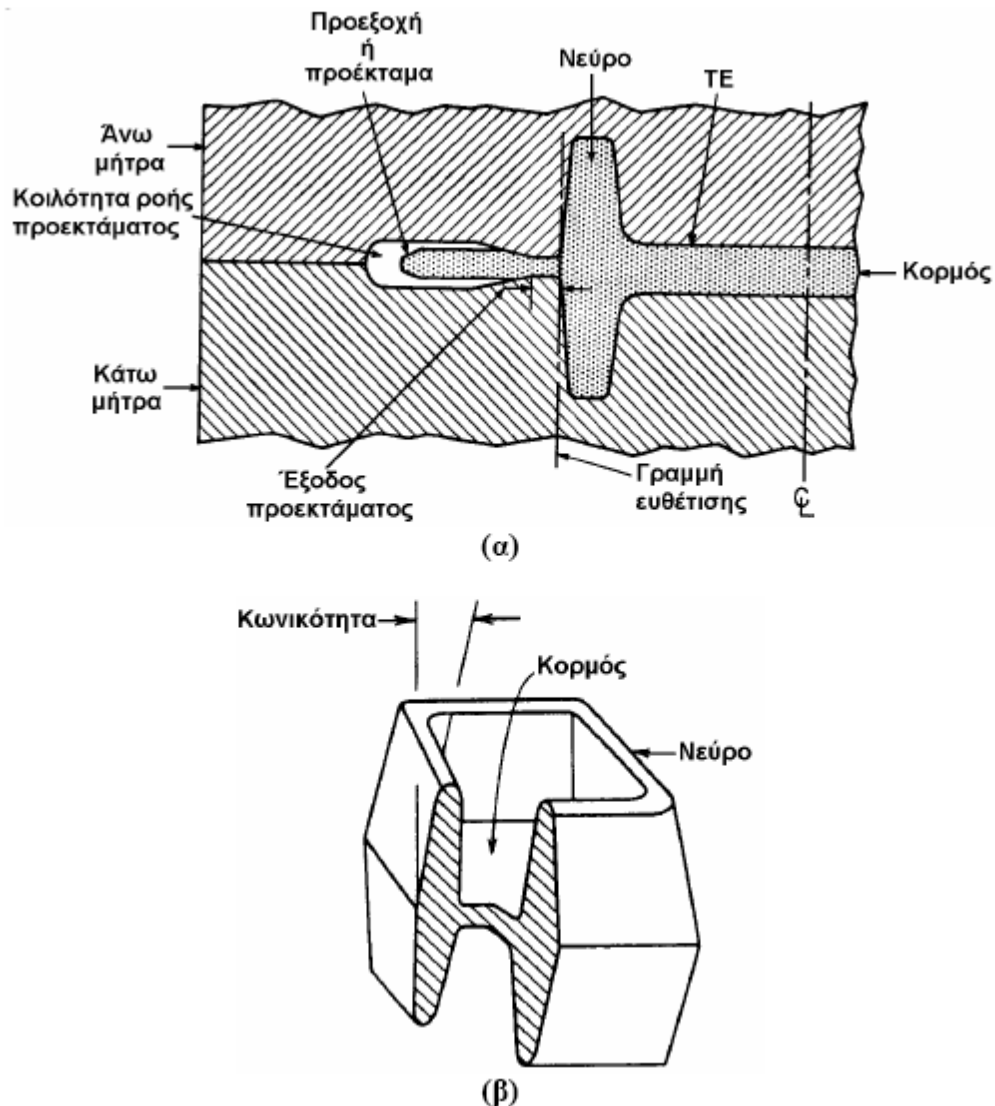


Overhang type of roll forging machine

Σχήμα 1.11: Μηχανές σφυρηλάτησης με κυλινδρικά ράουλα

1.4 ΕΡΓΑΛΕΙΑ (ΚΑΛΟΥΠΙΑ) ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ

Τα καλούπια σφυρηλάτησης κατασκευάζονται κατεξοχήν διμερή. Διακρίνουμε λοιπόν το άνω τμήμα και το κάτω τμήμα του καλουπιού. Οι κανόνες κατασκευής του καλουπιού αποβλέπουν αφενός στη διευκόλυνση της ροής του κατεργάσιμου υλικού και αφετέρου στην ευχερή απομάκρυνση του τεμαχίου από το καλούπι. Επομένως, η γεωμετρία του τεμαχίου σε κάθε φάση κατεργασίας (πάσο) παίζει πολύ ιδιαίτερο ρόλο στο σχεδιασμό του καλουπιού. Βάση των κατασκευαστικών στοιχείων που συναντώνται στα περισσότερα σφυρήλατα τεμάχια εισάγεται η ορολογία που περιγράφεται στο σχήμα 1.12.



Σχήμα 1.12: Χαρακτηριστική ορολογία στην κατασκευή καλουπιού σφυρηλάτησης. (α) Εγκάρσια διατομή τεμαχίου/καλουπιού (β) Τρισδιάστατη μορφή σφυρήλατου τεμαχίου

1.5 ΣΗΜΑΣΙΑ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΣΤΟΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΚΑΛΟΥΠΙΩΝ

Παρακάτω επισημαίνεται η σημασία διαφόρων παραμέτρων στο σχεδιασμό των καλουπιών.

1.5.1 ΓΡΑΜΜΗ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΥ

Σε αυτή συναντιούνται τα δύο τμήματα του καλουπιού. Η μορφή και η θέση της γραμμής διαχωρισμού είναι το πιο σημαντικό θέμα στο σχεδιασμό σφυρήλατων τεμαχίων. Η γραμμή διαχωρισμού μπορεί να είναι ευθεία (συμμετρικές μορφές σφυρήλατων) ή τεθλασμένη στον χώρο (πολύπλοκες γεωμετρικές μορφές). Εκτός από την προφανή ανάγκη εύκολης απομάκρυνσης του τεμαχίου από το καλούπι, επιδιώκεται η γραμμή διαχωρισμού να κείται σε ένα επίπεδο, να διευκολύνει τη ροή του υλικού, να μην οδηγεί σε ανισοζύγιο δυνάμεων στα τμήματα του καλουπιού και να εξασφαλίζει αποτελεσματικό προέκταμα.

1.5.2 ΚΩΝΙΚΟΤΗΤΑ

Ο ρόλος της κωνικότητας είναι πρωταρχικά η διευκόλυνση απομάκρυνσης του σφυρήλατου από τη μήτρα και σε ορισμένες περιπτώσεις η επίτευξη της επιθυμητής ροής υλικού.

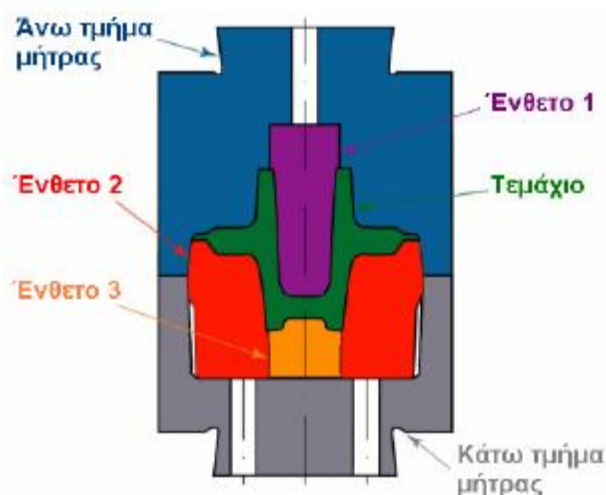
1.5.3 ΝΕΥΡΑ

Τα νεύρα είναι τμήματα του σφυρήλατου τεμαχίου που κείνται κάθετα προς το επίπεδο της γραμμής διαχωρισμού. Στην κοινή πρακτική συνιστάται να αποφεύγονται ογκώδη νεύρα διότι οδηγούν σε υπέρβαρα τεμάχια. Υπάρχουν όμως περιορισμοί σε αυτή την επιδίωξη που υπαγορεύονται από τις συνθήκες κατεργασίας, την γεωμετρία του τεμαχίου, τη θέση και διάταξη της γραμμής διαχωρισμού και την ολκιμότητα του κατεργάσιμου υλικού.

1.5.4 ΕΜΒΥΘΙΣΕΙΣ – ΚΟΡΜΟΙ - ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΕΣ

Ο σχηματισμός εμβυθίσεων στο κατεργάσιμο υλικό επιδιώκεται στα αρχικά και ενδιάμεσα στάδια κατεργασίας. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται ένθετα στοιχεία μέσα στο καλούπι που δρουν σαν είδος εμβόλου τοπικά (σχήμα 1.13). Οι εμβυθίσεις αυτές οδηγούν με τη σειρά τους στο σχηματισμό κορμών και νεύρων.

Οι καμπυλότητες στα άκρα των νευρών και των κορμών πρέπει να εξασφαλίζουν την αύξηση της διάρκειας ζωής του καλούπιού, αφενός με διευκόλυνση της ροής του υλικού μέσα στο καλούπι και αφετέρου με εξασφάλιση απρόσκοπτης απομάκρυνσης του τεμαχίου από το καλούπι.



Σχήμα 1.13: Διαμόρφωση εμβυθίσεων, νευρών και κορμού

1.5.5 ΠΡΟΕΚΤΑΜΑ

Συνιστώνται:

Τελικό πάχος προεκτάματος: ~3% του μέγιστου πάχους του σφυρήλατου τεμαχίου.

Μήκος εξόδου προεκτάματος: ~5πλάσιο του τελικού πάχους προεκτάματος.

1.5.6 ΥΛΙΚΑ ΚΑΛΟΥΠΙΩΝ

Επειδή οι περισσότερες σφυρηλατήσεις, και ειδικά οι μεγαλύτερου όγκου, πραγματοποιούνται σε υψηλές θερμοκρασίες, τα υλικά των καλουπιών πρέπει να έχουν αντοχή και δυσθραυστότητα στις θερμοκρασίες αυτές, εμβαπτότητα, αντίσταση σε μηχανικά και θερμικά σοκ, και αντίσταση σε φθορά- ειδικά σε φθορά λόγω τριβής.

Η επιλογή των υλικών των καλουπιών εξαρτάται από το μέγεθος, τη σύνθεση, τις ιδιότητες και την μορφή του τεμαχίου, τη θερμοκρασία σφυρηλάτησης, τον τύπο της κατεργασίας, το κόστος του υλικού του καλουπιού, τον αριθμό των πάσων, τα θερμικά χαρακτηριστικά του υλικού. Συνήθη υλικά καλουπιών είναι εργαλειοχάλυβες που περιέχουν χρώμιο, νικέλιο, μολυβδαίνιο και βανάδιο.

1.6 ΑΛΛΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ

1.6.1 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ

Κράματα Al	400 – 450 °C
Κράματα Cu	625 – 950 °C
Χάλυβες	925 – 1250 °C
Κράματα Ti	750 – 975 °C
Δύστηκτα κράματα	975 – 1650 °C

1.6.2 ΛΙΠΑΝΣΗ

Η παρουσία του λιπαντικού, επηρεάζει θετικά την τριβή και τη φθορά στη διεπιφάνεια εργαλείου/τεμαχίου, διευκολύνει τη ροή του υλικού στην κοιλότητα του καλουπιού, αποτελεί θερμικό προστατευτικό στρώμα μεταξύ θερμού τεμαχίου και σχετικά ψυχρού καλουπιού, μειώνοντας έτσι το ρυθμό απόψυξης του τεμαχίου. Το λιπαντικό, παίζει επίσης το ρόλο διαχωριστικού μέσου που εμποδίζει το τεμάχιο να «κολλήσει» στο καλούπι.

Χρησιμοποιούμενα λιπαντικά στη θερμή σφυρηλάτηση είναι ο γραφίτης, το διθειώδες μολυβδαίνιο, ύαλος (στερεά λιπαντικά). Στη ψυχρή σφυρηλάτηση χρησιμοποιούνται σάπωνες και ορυκτέλαια.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΟΔΟΝΤΩΤΟΙ ΤΡΟΧΟΙ

2.1 ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ

Για την μετάδοση περιστροφικής κινήσεως και την μεταφορά ισχύος από κινητήρια σε κινούμενη άτρακτο, δηλαδή από την άτρακτο της κινητήριας μηχανής (ηλεκτροκινητήρας, μηχανή εσωτερικής καύσεως, αεριο-ατμο-υδρο-στρόβιλος κλπ.) στην άτρακτο της κινουμένης μηχανής (εργομηχανή) χρησιμοποιούνται, εκτός των άλλων μηχανικών (ιμάντες, αλυσίδες, σύνδεσμοι, κλπ.) ή υδραυλικών–πνευματικών κλπ. τρόπων, και διάφοροι συνδυασμοί οδοντωτών τροχών.

Οι οδοντωτοί τροχοί είναι στοιχεία μηχανών που επιτυγχάνουν μετάδοση κινήσεως και μεταφορά ισχύος με την κατάλληλη διαδοχική εμπλοκή συνεργαζομένων οδόντων. Οι οδόντες είναι αλληπάλληλες εσοχές και προεξοχές της επιφανείας ενός οδοντωτού τροχού, τέτοιες ώστε να είναι δυνατή η συνεργασία του της εσοχής του ενός τροχού με την προεξοχή του συνεργαζομένου οδοντωτού τροχού.

Στους περισσότερους τύπους οδοντωτών τροχών οι οδόντες δεν είναι θεωρητικά απαραίτητοι για την μετάδοση περιστροφικής κινήσεως. Όμως, η ανάγκη μεταφοράς μεγάλης στρεπτικής ροπής (δηλαδή μεγάλης ισχύος) και σταθερής μεταδόσεως κινήσεως (δηλαδή σταθερών σχέσεων μεταδόσεως στροφών) από την κινητήρια στην κινούμενη άτρακτο καθιστά αναγκαία την ύπαρξη οδόντων.

2.2 ΕΙΔΗ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ

Οι άξονες περί τους οποίους περιστρέφονται δύο συνεργαζόμενοι οδοντωτοί τροχοί μπορεί να είναι:

- παράλληλοι σε απόσταση α
- τεμνόμενοι υπό γωνία δ
- ασύμβατοι σε απόσταση α και υπό γωνία δ

όπως φαίνονται στο παρακάτω σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1: Σχετική θέση αξόνων συνεργαζομένων τροχών

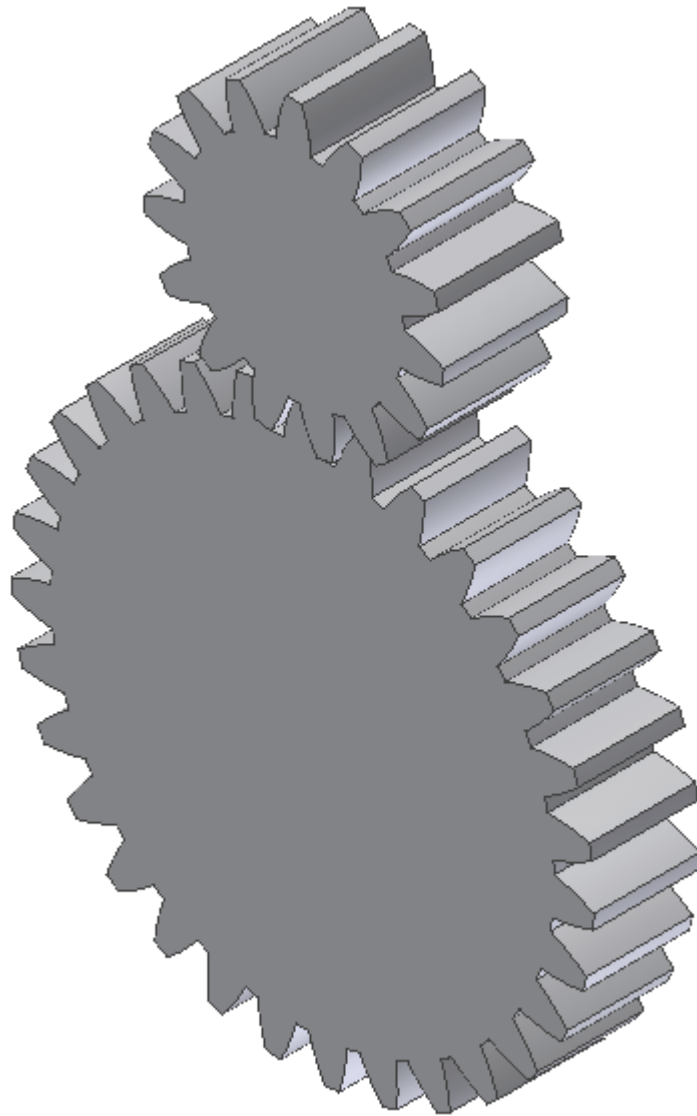
Η σχετική θέση των αξόνων αυτών είναι βασικής σημασίας για την μορφή των τροχών που θα χρησιμοποιηθούν. Έτσι οι τροχοί μπορεί να είναι:

- Μετωπικοί (με ευθείς ή ελικοειδείς οδόντες) οι οποίοι ονομάζονται και κυλινδρικοί
- Κωνικοί
- Ελικοειδείς ασύμβατων αξόνων
- Σύστημα ατέρμονα κοχλία – οδοντωτού τροχού

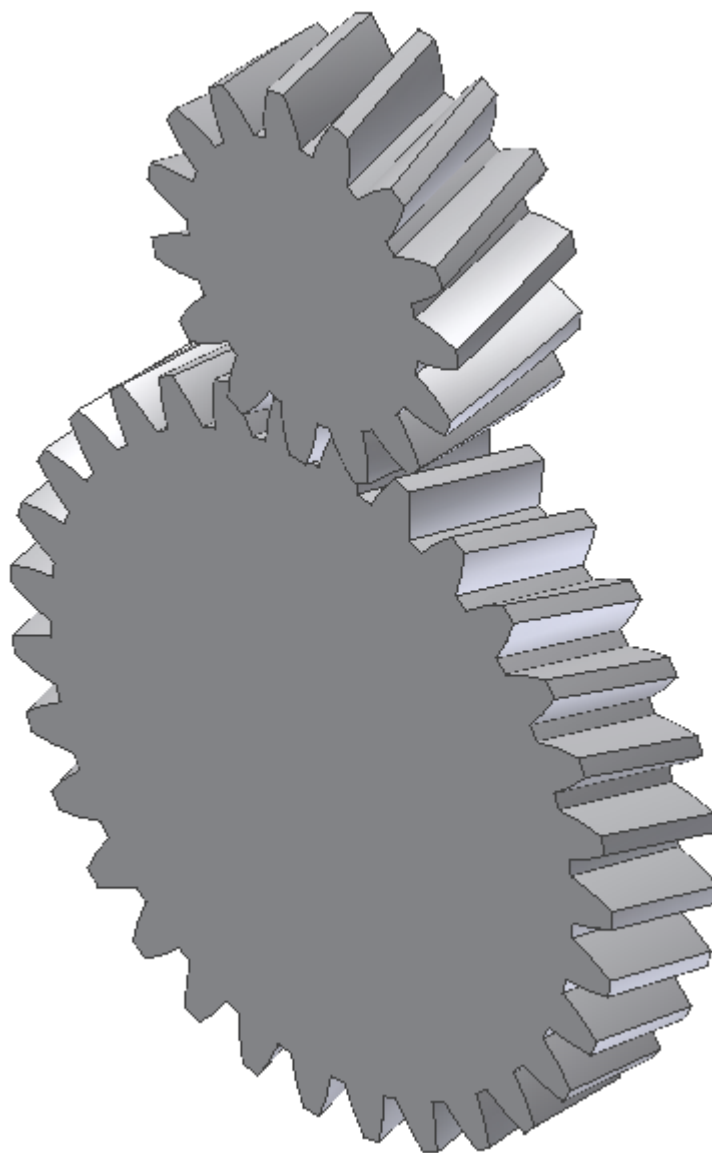
όπως αναλυτικότερα παρουσιάζονται παρακάτω.

2.2.1 ΜΕΤΩΠΙΚΟΙ ΟΔΟΝΤΩΤΟΙ ΤΡΟΧΟΙ

Οι μετωπικοί οδοντωτοί τροχοί χωρίζονται σε αυτούς με ευθείς οδόντες και σε αυτούς με ελικοειδείς οδόντες. Στην πρώτη κατηγορία οι οδόντες είναι παράλληλοι με τον άξονα του τροχού, ενώ στη δεύτερη είναι κεκλιμένοι ως προς τον άξονα του τροχού, ως τμήματα έλικας, σχηματίζοντας σταθερή γωνία μ' αυτόν, ενώ για μπορέσει να γίνει συνεργασία μεταξύ τους πρέπει σε μία βαθμίδα ο ένας να έχει δεξιόστροφους και ο άλλος αριστερόστροφους οδόντες. Οι μετωπικοί τροχοί ευθείας οδοντώσεως έχουν βαθμό επικάλυψης 1 έως 2 ενώ δεν ενδείκνυνται για μεγάλα φορτία γιατί προκαλούν θόρυβο και δημιουργούν μεγάλα δυναμικά φορτία. Αντίθετα οι μετωπικοί τροχοί ελικοειδούς οδοντώσεως έχουν μεγαλύτερο βαθμό επικάλυψης, αλλά μειονεκτούν στο θέμα ότι η ύπαρξη της γωνίας έλικας έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη αξονικού φορτίου επί των οδόντων, το οποίο καταπονεί τις σταθερές εδράσεις των ατράκτων. Οι μετωπικοί οδοντωτοί τροχοί μπορούν να έχουν εξωτερική οδόντωση, δηλαδή οι οδόντες να βρίσκονται στην εξωτερική επιφάνεια του τροχού ή εσωτερική οδόντωση, δηλαδή να βρίσκονται στην εσωτερική επιφάνεια του τροχού. 3-D μοντέλα ζευγών των παραπάνω τροχών παρατίθενται στα παρακάτω σχήματα 2.2 και 2.3 κατασκευασμένα με τη βοήθεια του προγράμματος CAD Autodesk Inventor.



Σχήμα 2.2: 3-D μοντέλο ζεύγους εξωτερικών μετωπικών οδοντωτών τροχών ευθείας οδοντώσεως



Σχήμα 2.3: 3–D μοντέλο ζεύγους εξωτερικών μετωπικών οδοντωτών τροχών ελικοειδούς οδοντώσεως

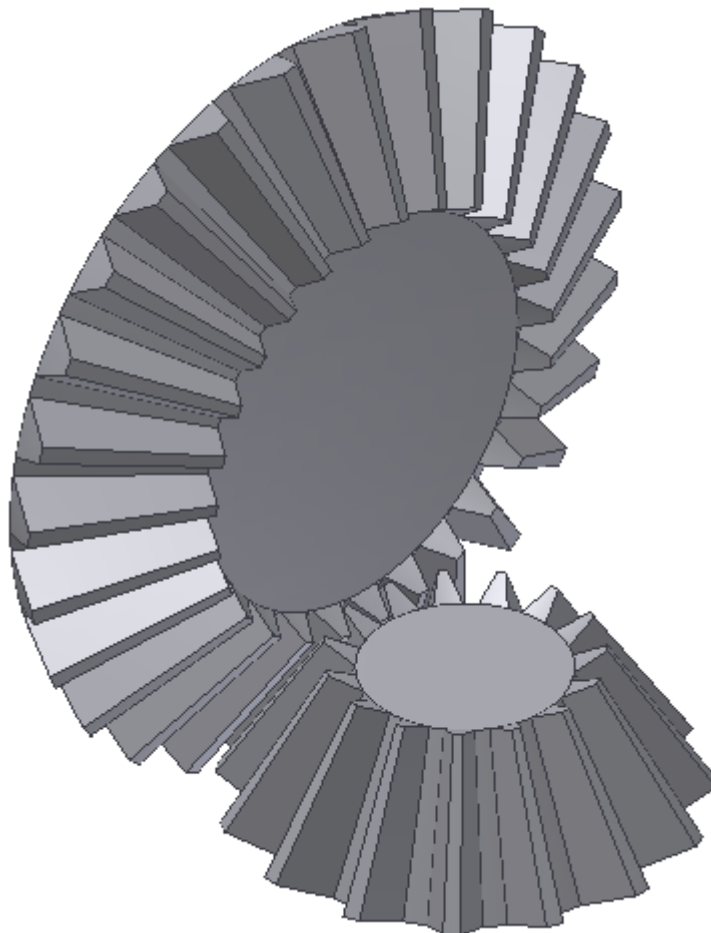
2.2.2 ΚΩΝΙΚΟΙ ΟΔΟΝΤΩΤΟΙ ΤΡΟΧΟΙ

Οι κωνικοί τροχοί χρησιμοποιούνται για την μετάδοση κινήσεως και μεταφορά ισχύος μεταξύ τεμνομένων ατράκτων. Οι τροχοί αυτοί έχουν μορφή κώνου του οποίου οι οδόντες μπορεί να είναι ευθείς ή τμήματα εξειλιγμένης ή τόξα κύκλου κλπ. Περισσότερο χρησιμοποιούμενοι είναι οι κωνικοί τροχοί με άξονες τεμνόμενους υπό γωνία 90° . Μολονότι, τόσο η κατασκευή των κωνικών τροχών (η οποία γίνεται σε ειδικές μηχανές κοπής) όσο και η συναρμολόγηση του μηχανισμού είναι πολυπλοκότερη εκείνης των μετωπικών τροχών, εν τούτοις οι κωνικοί τροχοί εφαρμόζονται συχνά στη μετάδοση κινήσεως και μεταφορά ισχύος.

Υπάρχουν διάφορα είδη κωνικών τροχών:

- Κωνικοί τροχοί με ευθείς οδόντες (Straight Bevel Gears)
- Κωνικοί τροχοί ZEROL
- Τοξωτοί κωνικοί τροχοί (Spiral Bevel Gears)
- Υποειδείς τροχοί (Hypoid Gears)

Ένα 3-D μοντέλο ζεύγους κωνικών τροχών με ευθείς οδόντες παρατίθεται στο παρακάτω σχήμα 2.4 κατασκευασμένο με τη βοήθεια του προγράμματος CAD Autodesk Inventor.



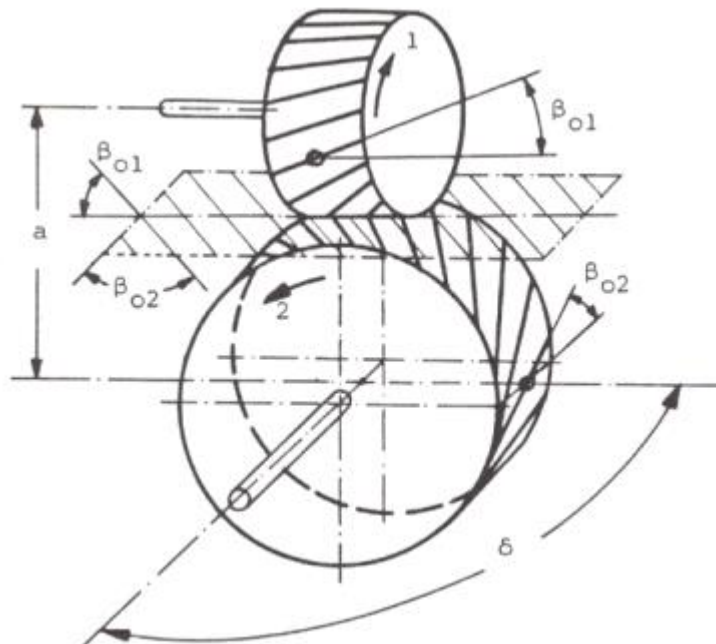
Σχήμα 2.4: 3-D μοντέλο ζεύγους κωνικών οδοντωτών τροχών ευθείας οδοντώσεως

2.2.3 ΕΛΙΚΟΙΕΙΔΕΙΣ ΟΔΟΝΤΩΤΟΙ ΤΡΟΧΟΙ ΑΣΥΜΒΑΤΩΝ ΑΞΟΝΩΝ

Οι οδοντωτοί αυτοί τροχοί είναι κυλινδρικοί και έχουν άξονες ασύμβατους σε απόσταση a και υπό γωνία δ , η οποία είναι τέτοια ώστε:

$$\delta = \beta_{01} + \beta_{02}$$

όπου β_{01} και β_{02} είναι οι κλίσεις των οδόντων των τροχών, σχήμα 2.5. Γενικώς είναι $\beta_{01} = \beta_{02}$.

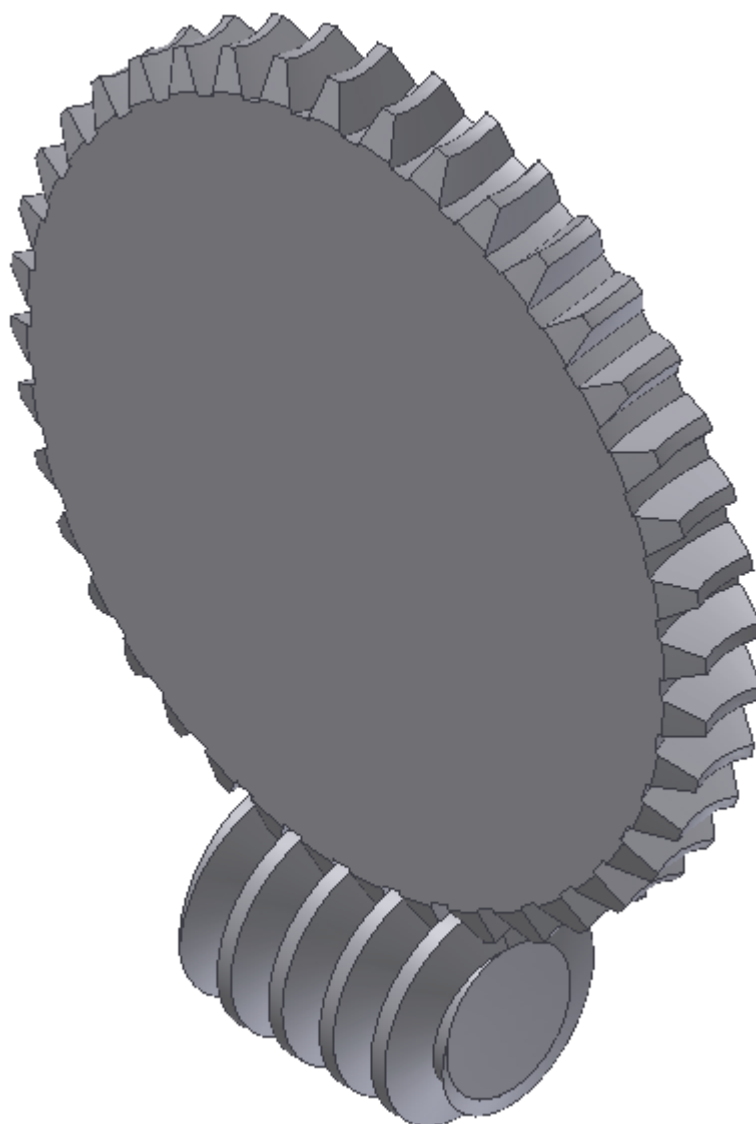


Σχήμα 2.5: Βαθμίδα ελικοειδών τροχών ασυμβάτων τροχών

Οι οδόντες δύο συνεργαζομένων ελικοειδών τροχών ασυμβάτων αξόνων έχουν σημειακή επαφή, η οποία μετατρέπεται σε γραμμική καθώς αυξάνει η φθορά των κατατομών. Λόγω του τρόπου επαφής τους οι τροχοί μπορούν να μεταφέρουν μικρά φορτία και για αυτό χρησιμοποιούνται κατά βάση μόνο για μετάδοση κινήσεως (όπως πχ. σε όργανα) και δεν ενδείκνυνται για μεταφορά ισχύος. Σ' αυτό συνηγορεί και ο μικρός βαθμός αποδόσεως των οδοντώσεων τους. Τέλος χρησιμοποιούνται για σχέσεις μεταδόσεως έως 5 και δεν είναι ευαίσθητοι σε μικρές μεταβολές αποστάσεως ή κλίσεως των αξόνων τους.

2.2.4 ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΤΕΡΜΟΝΑ ΚΟΧΛΙΑ – ΟΔΟΝΤΩΤΟΥ ΤΡΟΧΟΥ

Το σύστημα αυτό αποτελείται από έναν ατέρμονα κοχλία, που είναι ουσιαστικά ένας κοχλίας κινήσεως καταλλήλου σπειρώματος μίας η περισσοτέρων αρχών, ο οποίος συνεργάζεται με έναν οδοντωτό τροχό κατά τέτοιο τρόπο ώστε η συνεργασία τους μοιάζει με τον τρόπο εμπλοκής στη συνεργασία ενός κοχλία με το περικόχλιό του. Οι άξονές τους είναι συνήθως κάθετοι, αν και είναι δυνατόν να σχηματίζουν άλλη γωνία. Το σύστημα αυτό ενδείκνυται για μεταφορά μεγάλων φορτίων και για μεγάλες σχέσεις μεταδόσεως, έως και 200 : 1. Ένα 3-D μοντέλο του συγκεκριμένου συστήματος παρατίθεται στο παρακάτω σχήμα 2.6 κατασκευασμένο με τη βοήθεια του προγράμματος CAD Autodesk Inventor.



Σχήμα 2.6: 3-D μοντέλο συστήματος ατέρμονος κοχλία – οδοντωτού τροχού

2.3 ΜΕΓΕΘΗ ΟΔΟΝΤΩΣΕΩΝ

Με βάση όσα αναφέραμε παραπάνω είμαστε σε θέση να υπολογίσουμε τα βασικότερα μεγέθη των μετωπικών οδοντωτών τροχών κανονικής οδόντωσης δι' εξειλιγμένης.

2.3.1 ΒΗΜΑ ΟΔΟΝΤΩΝ – ΜΕΤΡΟ ΟΔΟΝΤΩΣΕΩΝ

Εάν Z είναι ο αριθμός οδόντων οδοντωτού τροχού, κανονικής μετωπικής τομής δι' εξειλιγμένης, το βήμα t_o στον αρχικό κύκλο θα είναι:

$$t_o = \frac{\pi d_o}{Z}$$

όπου:

- $d_o = 2 r_o$
- $r_o \rightarrow$ η ακτίνα του αρχικού κύκλου

Επίσης, ονομάζεται μέτρο οδοντώσεως (module) το μέγεθος:

$$m = \frac{d_o}{Z} = \frac{t_o}{\pi}$$

Το module είναι γεωμετρικό μέγεθος και λαμβάνει τυποποιημένες τιμές σε mm από τον πίνακα 2.1:

0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00
1,25	1,50	1,75	2,00	2,25	2,50	2,75	3,00
3,25	3,50	3,75	4,00	4,50	5,00	5,50	6,00
6,50	7,00	7,50	8,00	9,00	10,00	11,00	12,00
13,00	14,00	15,00	16,00	18,00	20,00	22,00	24,00
27,00	30,00	33,00	36,00	39,00	42,00	45,00	50,00

Πίνακας 2.1: Τυποποιημένες τιμές του module m σε mm για οδόντες δι' εξειλιγμένης

Σε τυποποιημένες οδοντώσεις το ύψος κεφαλής h_k ισούται με 1 m ενώ το ύψος ποδός h_f λαμβάνεται συνήθως ίσο με (1.25 ÷ 1.30) m . Αν ληφθεί το ύψος ποδός ίσο με 1.25 m τότε η ακτινική χάρη ισούται με 0.25 m . Είναι προφανείς οι παρακάτω σχέσεις:

- Διάμετρος κύκλου κεφαλής: $d_k = (Z + 2) m$
- Διάμετρος κύκλου ποδός: $d_f = d_o - 2 h_f = (Z - 2.5) m$

Το εργαζόμενο ύψος οδόντος είναι ίσο με 2 m .

Είναι προφανές ότι δύο συνεργαζόμενοι τροχοί θα έχουν το ίδιο βήμα και συνεπώς το ίδιο module, ως ανήκοντες στην ίδια οικογένεια οδοντωτών τροχών όπως αναφέρθηκε στη γενικευμένη θεωρία οδοντώσεως.

2.3.2 ΠΑΧΟΣ ΟΔΟΝΤΩΝ

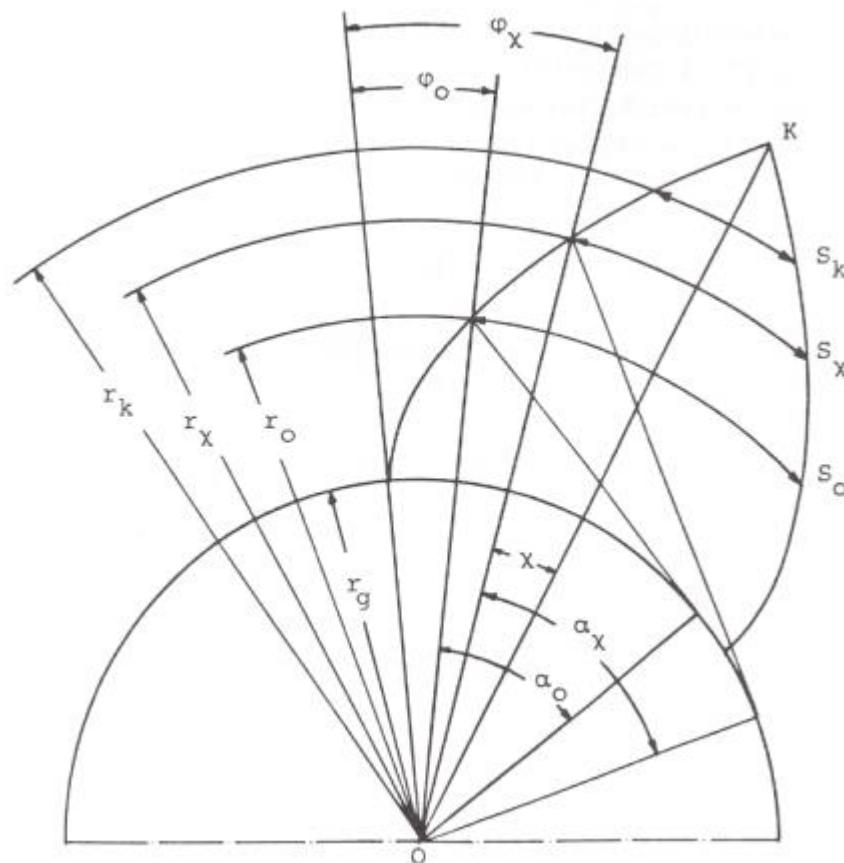
Με βάση αυτά που αναφέραμε παραπάνω περί εξειλιγμένης καμπύλης μπορούμε εύκολα να υπολογίσουμε το πάχος του οδόντος μετωπικού οδοντωτού τροχού στη μετωπική τομή σε ακτίνα r_x , σχήμα 2.7.

Εάν δεχθούμε ότι το πάχος του οδόντος στον αρχικό κύκλο είναι S_o τότε το διάκενο μεταξύ των οδόντων θα είναι:

$$l_o = t_o - S_o$$

Για να υπάρξει ομαλή συνεργασία των τροχών πρέπει να δεχθούμε την ύπαρξη τόσο χάρης των κατατομών S_e στον αρχικό κύκλο, όσο και ακτινικής χάρης. Η χάρη S_e των κατατομών στον αρχικό κύκλο δημιουργείται με την ελάττωση του πάχους των οδόντων και την αντίστοιχη αύξηση του διακένου τους, έτσι ώστε το άθροισμά τους να είναι το βήμα t_o . Συνήθως, ανάλογα με την κατεργασία του τροχού, λαμβάνεται:

$$S_o = (0.475 \div 0.5) t_o$$



Σχήμα 2.7: Πάχος οδόντος

Επομένως, σε κάθε περίπτωση είναι γνωστό το πάχος του οδόντος στον αρχικό κύκλο και με βάση αυτό υπολογίζεται το πάχος οδόντος σε οποιαδήποτε άλλη ακτίνα r_x ως κατωτέρω:

Στο σχήμα 2.8 η OK είναι ο άξονας συμμετρίας του οδόντος και S_o , S_x είναι τα πάχη του στις ακτίνες r_o , r_x αντίστοιχα, οπότε μπορούν να γραφούν οι εξής σχέσεις:

$$S_x = 2 \chi r_x$$

$$S_o = 2 (\varphi_x - \varphi_o + \chi) r_o$$

από τις οποίες με εξάλειψη του χ προκύπτει:

$$\frac{S_x}{r_x} = \frac{S_o}{r_o} + 2 (\varphi_o - \varphi_x)$$

Λόγοι αντοχής δεν επιτρέπουν την κατασκευή οδόντος με μηδενικό πάχος κεφαλής. δηλαδή σχηματισμό ακμής ή κορυφής Κ. Αντιθέτως επιβάλλεται στον οδόντα πάχος κεφαλής S_k , το οποίο αντιστοιχεί στην ακτίνα κεφαλής $r_k = r_o + h_k$ όπου το ύψος κεφαλής h_k σε τυποποιημένες οδοντώσεις λαμβάνεται ίσο με το module m της οδοντώσεως.

2.3.3 ΣΧΕΣΗ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ – ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΑΞΟΝΩΝ

Από κινηματικής πλευράς δύο συνεργαζόμενοι μετωπικοί οδοντωτοί τροχοί ισοδυναμούν με δύο κυλινδρικούς τροχούς χωρίς οδόντες, που έχουν ως άξονες περιστροφής τους ίδιους τους άξονες των οδοντωτών τροχών. Όταν οι δύο αυτοί κυλινδρικοί τροχοί κυλίνουν ο ένας επί του άλλου χωρίς ολίσθηση, τότε οι περιφερειακές του ταχύτητες στις κυλιόμενες επιφάνειες είναι ίσες, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι ο λόγος της γωνιακής ταχύτητας ω_1 της κινητήριας ατράκτου προς την γωνιακή ταχύτητα ω_2 της κινουμένης ατράκτου ισούται με τον λόγο της ακτίνας r_2 του τροχού 2 προς την ακτίνα r_1 του τροχού 1, δηλαδή:

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{r_2}{r_1}$$

όπως προκύπτει από την περιφερειακή ταχύτητα που είναι κοινή για τους τροχούς 1 και 2, δηλαδή:

$$V_1 = \omega_1 r_1 = \omega_2 r_2 = V_2$$

Ο παρακάτω λόγος ονομάζεται σχέση μεταδόσεως της βαθμίδας και μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$i_{12} = \frac{Z_2}{Z_1} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{d_{o2}}{d_{o1}}$$

Εάν Z_1 και Z_2 είναι οι αριθμοί οδόντων δύο συνεργαζομένων τροχών με ευθείς οδόντες, η απόσταση αξόνων των τροχών αυτών βρίσκεται από την σχέση:

$$a_{12} = r_{o1} + r_{o2} = (1 + i_{12}) \frac{m Z_1}{2}$$

2.3.4 ΓΩΝΙΑ ΕΠΑΦΗΣ

Γωνία επαφής (φ) είναι η οξεία γωνία μεταξύ της γραμμής ενεργείας και της κοινής εφαπτομένης των αρχικών κύκλων στο σημείο κυλίσεως C, εφ' όσων πρόκειται για κανονικές οδοντώσεις. Στις οδοντώσεις δι' εξηλιγμένης η γωνία αυτή είναι σταθερή και ονομάζεται γωνία εξηλιγμένης, ισούται επίσης με την ημιγωνία οδόντος του κανόνα, κατά τα προβλεπόμενα από την γενικευμένη θεωρία οδοντώσεως. Στο μετρικό σύστημα η γωνία εξηλιγμένης λαμβάνεται ίση με 20° για τυποποιημένες οδοντώσεις, ενώ στο αγγλοσαξονικό σύστημα η τιμή της μπορεί να είναι 20° ή 14.5° .

Σε μη τυποποιημένες οδοντώσεις η γωνία εξηλιγμένης μπορεί να λάβει οποιαδήποτε επιθυμητή τιμή. Η μεταβολή της γωνίας αυτής έχει επίδραση στο μέγεθος των αναπτυσσομένων στους οδόντες φορτίων, στον βαθμό επικαλύψεως και στον ελάχιστο αριθμό οδόντων του τροχού.

2.3.5 ΒΑΘΜΟΣ ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΩΣ Ή ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΕΠΑΦΗΣ

Έχει ορισθεί ότι μήκος επαφών είναι το μήκος τόξου του αρχικού κύκλου το οποίο διατρέχει η εργαζόμενη πλευρά του οδόντος ενός οδοντωτού τροχού από το πρώτο μέχρι και το τελευταίο σημείο επαφής της με την συνεργαζόμενη πλευρά του οδόντος του άλλου τροχού.

Αναφερόμενοι στο σχήμα 2.8 της επόμενης σελίδας διακρίνουμε διάφορες θέσεις της κατατομής M_1 του οδόντος του τροχού 1 καθώς αυτή συνεργάζεται, κατά μήκος του τμήματος επαφών AB, με την κατατομή N_2 του οδόντος του τροχού 2. Όταν η κατατομή M_1 διέρχεται από το αρχικό σημείο κυλίσεως C, φέρεται η ακτίνα καμπυλότητας MM' η οποία τέμνει τον αρχικό κύκλο του τροχού 1 στο σημείο F. Ομοίως όταν η κατατομή N_2 διέρχεται από το σημείο C φέρεται η ακτίνα καμπυλότητας της εξηλιγμένης στο σημείο N που είναι εφαπτόμενη του βασικού κύκλου.

Όταν ο τροχός 1 στραφεί κατά γωνία θ_1 τότε το σημείο F θα συμπίσει με το σημείο C και προφανώς το σημείο 1' θα συμπίσει με το σημείο 1 και το σημείο 1 θα συμπίσει με το σημείο 1'', δηλαδή:

$$\theta_1 = \widehat{FO_1C} = \widehat{1'O_11} = \widehat{1O_11''}$$

Από τις ιδιότητες της εξειλιγμένης ισχύει:

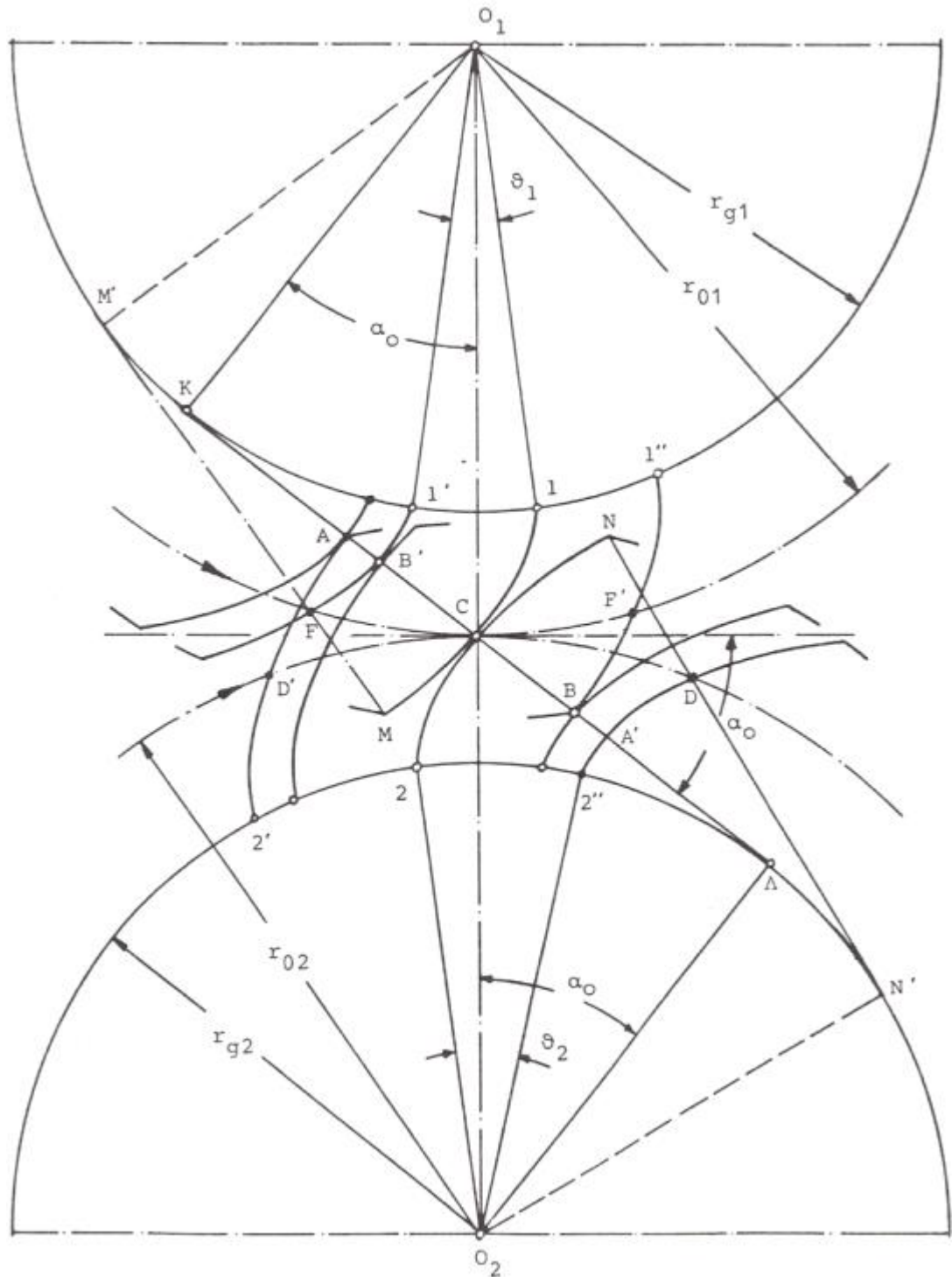
$$\overline{FM} = \widehat{1'1} = r_{g1}\theta_1 = r_{o1}\cos\alpha_o\theta_1$$

όμως

$$\widehat{FC} = \widehat{CF'} = r_{o1}\theta_1$$

οπότε,

$$\overline{FM} = \widehat{FC} \cos\alpha_o$$



Σχήμα 2.8: Συνεργαζόμενες κατατομές

Όταν το σημείο M λάβει την θέση B τότε η ακτίνα καμπυλότητας MM' θα συμπίψει με την τροχιά επαφών και θα λάβει την θέση BK. Έτσι, αφού το F θα συμπίψει με το C και η κατατομή 1M θα βρεθεί στη θέση $1''B$, από την ισότητα των τετραπλεύρων $MM'O11$ και $BKO11''$, καθώς και από όσα αναφέρθηκαν για τις θέσεις της κατατομής M1 προκύπτει ότι το σημείο B' είναι συμμετρικό του σημείου B προς το σημείο C. Κατόπιν αυτών, θα είναι:

$$\overline{BC} = \overline{MF}$$

ως τμήματα της ακτίνας καμπυλότητας περιλαμβανόμενα μεταξύ κύκλου κεφαλής και αρχικού κύκλου. Επομένως,

$$\overline{BC} = \widehat{CF}' \cos\alpha_0$$

Με όμοιο τρόπο αποδεικνύεται ότι το σημείο A' είναι συμμετρικό του A ως προς το σημείο C και ότι

$$\overline{ND} = \overline{AC} = \overline{CA'}$$

$$\theta_2 = \widehat{CO_2D} = \widehat{2O_22''}$$

$$\overline{ND} = \widehat{22''} = r_{g2}\theta_2 = r_{o2} \cos\alpha_0\theta_2$$

$$\overline{CD} = r_{o2}\theta_2$$

οπότε,

$$\overline{AC} = \widehat{D'C} \cos\alpha_0$$

Επειδή γίνεται κύλιση χωρίς ολίσθηση των αρχικών κύκλων, θα πρέπει τα επιμέρους τόξα των κυλιόμενων αρχικών κύκλων πριν και μετά το αρχικό σημείο C να είναι ίσα. Επομένως το μήκος επαφών eo είναι το τόξο D'CF' έτσι ώστε

$$e_o = \widehat{D'CF}' = \widehat{D'C} + \widehat{CF}'$$

Αθροίζοντας τις εξισώσεις κατά μέλη βρίσκουμε:

$$\overline{AC} + \overline{BC} = (\widehat{D'C} + \widehat{CF'})\cos\alpha_0$$

ή

$$AB = e_0 \cos\alpha_0$$

Έχει ορισθεί ως βαθμός επικάλυψης ή διάρκεια επαφής ε ο λόγος του μήκους επαφών εο προς το βήμα του αρχικού κύκλου t_0 , δηλαδή:

$$\varepsilon = \frac{e_0}{t_0} = \frac{AB}{t_0 \cos\alpha_0} = \frac{AB}{t_g}$$

όπου: $t_g = t_0 \cos\alpha_0 = \pi m \cos\alpha_0$

είναι το βήμα της οδοντώσεως στον βασικό κύκλο. Από την παραπάνω σχέση φαίνεται ότι ο βαθμός επικάλυψης είναι και ο αριθμός των βημάτων του βασικού κύκλου t_g που περιέχονται στο τμήμα επαφών AB.

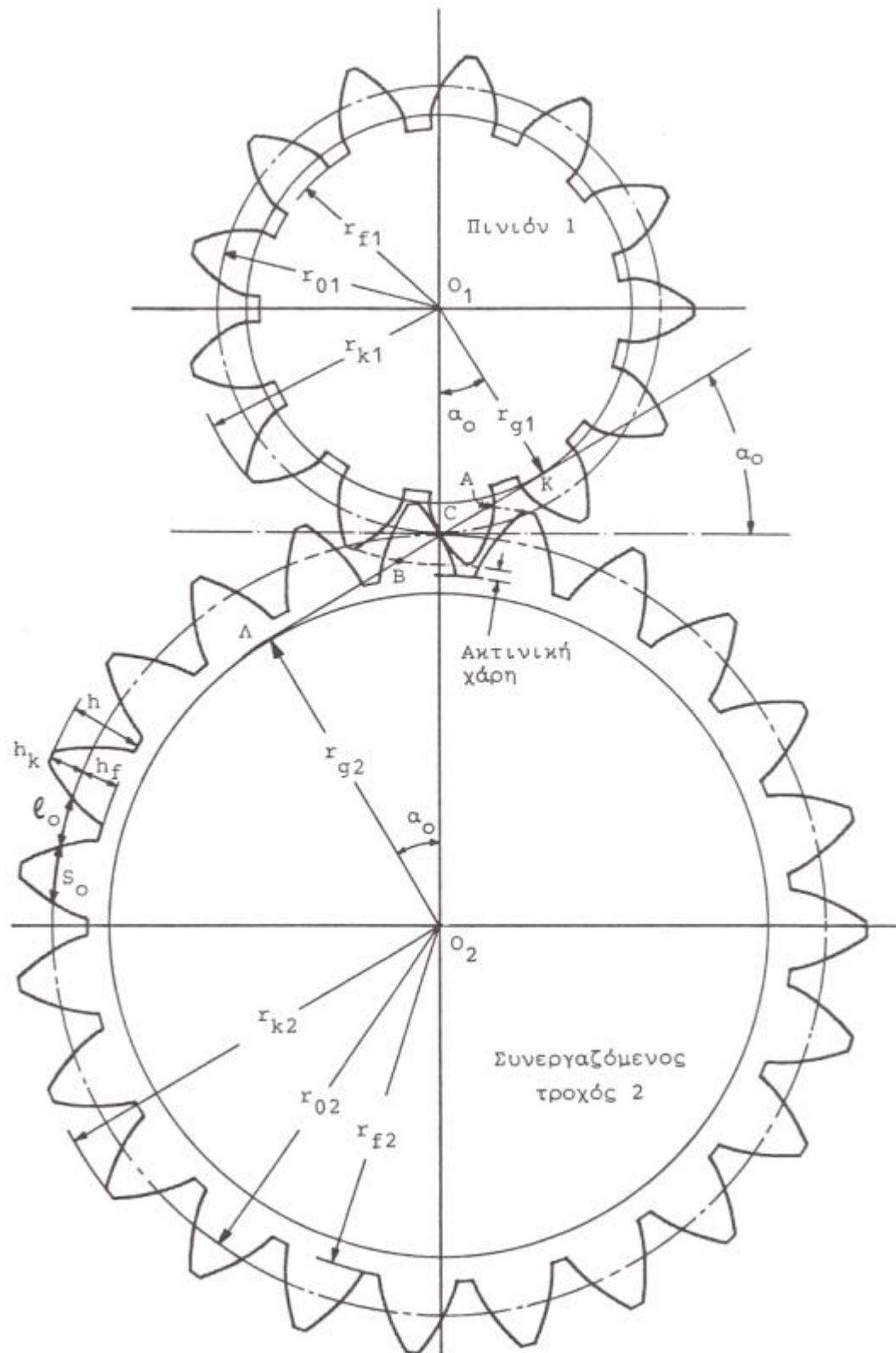
Στο σχήμα 2.9 δίνονται όλα τα χαρακτηριστικά μεγέθη δύο συνεργαζομένων τροχών με ευθείς οδόντες και κανονική οδόντωση δι' εξηλιγμένης και ζητείται να υπολογισθεί ο βαθμός επικάλυψης της βαθμίδας. Βάσει της ανωτέρω σχέσης αρκεί να υπολογισθεί το ευθύγραμμο τμήμα AB.

Έτσι:

$$AB = BC + CA$$

Όμως,

$$BC = BK + CK$$



Σχήμα 2.9: Χαρακτηριστικά μεγέθη συνεργαζόμενων τροχών

όπου:

$$BK = \sqrt{BO_1^2 - KO_1^2}$$

$$BO_1 = r_{k1} = r_{o1} + h_{k1}$$

$$KO_1 = r_{g1} = r_{o1} \cos \alpha_o$$

Σε τυποποιημένες οδοντώσεις το ύψος κεφαλής οδόντος είναι ίσο με το module, δηλαδή:

$$h_{k1} = h_{k2} = h_k = 1,0 m$$

Από αντικατάσταση προκύπτει:

$$BC = \sqrt{(r_{o1} + m)^2 - r_{o1}^2 \cos^2 \alpha_o} - r_{o1} \sin \alpha_o$$

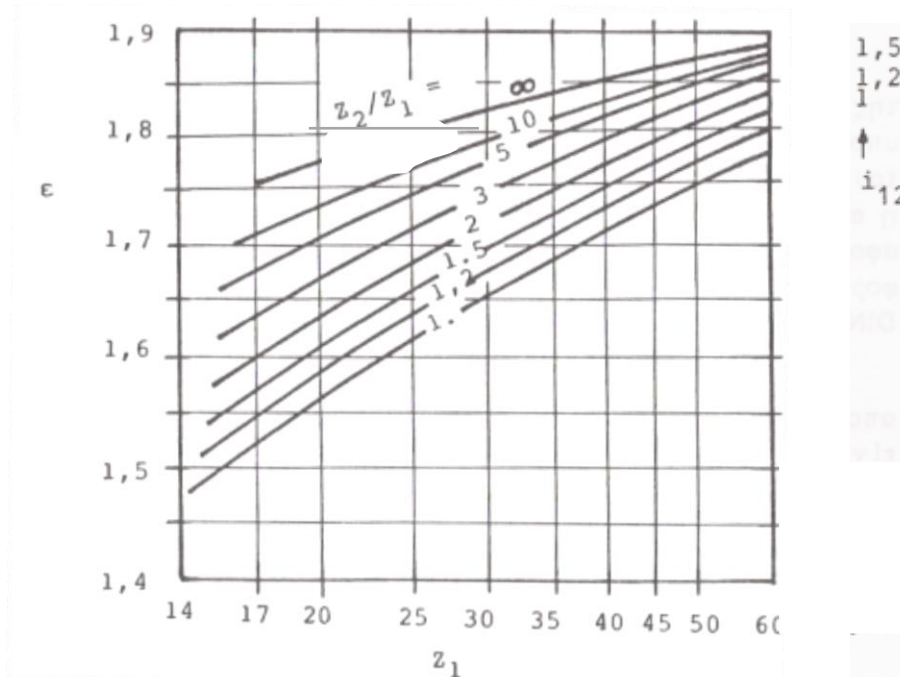
Ομοίως αποδεικνύεται ότι:

$$CA = \sqrt{(r_{o2} + m)^2 - r_{o2}^2 \cos^2 \alpha_o} - r_{o2} \sin \alpha_o$$

Τελικά, με συνδυασμό των παραπάνω εξισώσεων προκύπτει η παρακάτω εξίσωση για τον βαθμό επικάλυψης:

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{(r_{o1} + m)^2 - r_{o1}^2 \cos^2 \alpha_o} + \sqrt{(r_{o2} + m)^2 - r_{o2}^2 \cos^2 \alpha_o} - (r_{o1} + r_{o2}) \sin \alpha_o}{\pi m \cos \alpha_o}$$

Ένας ακόμη τρόπος υπολογισμού του βαθμού επικάλυψης ο οποίος είναι πιο προσεγγιστικός για δεδομένο αριθμό οδόντων Z_1 του πινιόν και δεδομένη σχέση μετάδοσης i_{12} της βαθμίδας, μπορεί γίνει από το παρακάτω σχήμα 2.10.

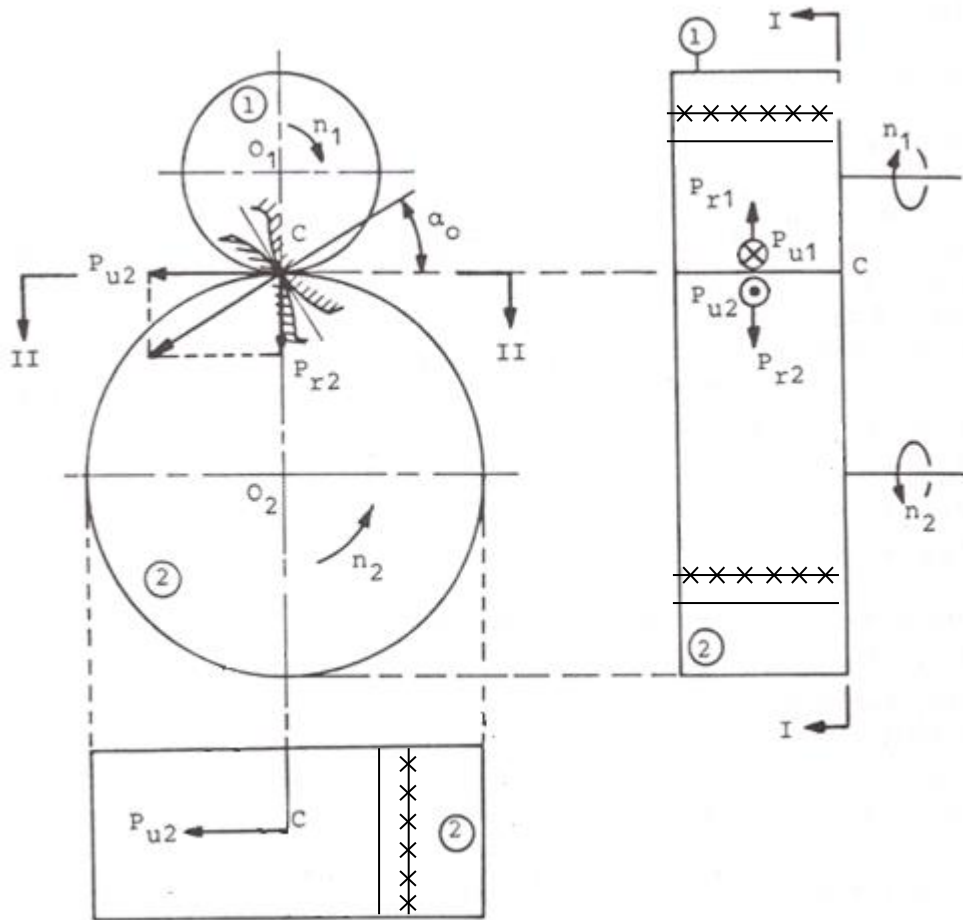


Σχήμα 2.10: Βαθμός επικαλύψεως ϵ συναρτήσει της σχέσης μεταδόσεως i_{12} βαθμίδας

2.4 ΦΟΡΤΙΣΗ ΤΩΝ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ

Στο σχήμα 2.11 οι τροχοί της βαθμίδας είναι μετωπικοί με ευθεία οδόντωση δι' εξειλιγμένης. Η ολική δύναμη P που ασκείται στον οδόντα του τροχού 2, επί της γραμμής ενεργείας, αναλύεται σε δύο συνιστώσες, την ακτινική P_{r2} και την περιφερειακή P_{u2} . Οι δυνάμεις αυτές αναφέρονται στο σημείο κυλίσεως C .

Στον τροχό 1 ασκούνται οι δυνάμεις P_{u1} , P_{r1} , που λόγω της αρχής δράση = αντίδραση είναι ίσες και αντίθετες με τις αντίστοιχες δυνάμεις του τροχού 2. Επομένως θα λέμε ότι στο σημείο κυλίσεως της βαθμίδας ασκούνται οι δυνάμεις P_u , P_r και θα εννοούμε ότι αυτές οι δυνάμεις ασκούνται σε καθεμία από τις συνεργαζόμενες κατατομές.



Σχήμα 2.11: Δυνάμεις επί των οδόντων

Στην επάνω δεξιά θέση του σχήμα 2.11 φαίνονται οι εργαζόμενες πλευρές των οδόντων που συνεργάζονται στο σημείο κλίσεως C. Η όψη I – I είναι η μετωπική τομή των τροχών και η όψη II – II εξετάζει τον τροχό 2.

Εάν υποθεθεί ότι η προς μεταφορά (μέσω της βαθμίδας) ισχύς είναι N με n_1 στροφές (ανά μονάδα χρόνου) του πινιόν, τότε η στρεπτική ροπή στο πινιόν θα είναι:

$$M_{d1} = \frac{N}{\omega_1}$$

όπου: $\omega_1 = 2 \pi n_1$ είναι η γωνιακή ταχύτητα του πινιόν.

Ο παρακάτω τύπος χρησιμοποιείται με επιτυχία για τον υπολογισμό της στρεπτικής ροπής:

$$M_d = 71620 \frac{N}{n}$$

όπου:

- $M_d \rightarrow$ η στρεπτική ροπή του τροχού (Kp · cm)
- $N \rightarrow$ η ισχύς που μεταφέρεται από την βαθμίδα (PS)
- $n \rightarrow$ ο αριθμός στροφών του τροχού (rpm)

Η περιφερειακή δύναμη που θα αναπτυχθεί στην βαθμίδα δίνεται από τη σχέση:

$$P_u = \frac{2 M_{d1}}{d_{o1}} = \frac{2 M_{d2}}{d_{o2}}$$

όπου:

- d_{o1} , $d_{o2} \rightarrow$ η διάμετρος του αρχικού κύκλου των τροχών 1 και 2 αντίστοιχα (mm)

Η ακτινική δύναμη προκύπτει από την όψη I – I μέσω της γωνίας α_o ως εξής:

$$P_r = P_u \tan \alpha_o$$

Η συνολική δύναμη P που ασκείται στον τροχό δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$P = \sqrt{P_u^2 + P_r^2}$$

και με αντικατάσταση προκύπτει η τελική σχέση της συνολικής δύναμης P:

$$P = \sqrt{\left(\frac{2 M_{d1}}{d_{o1}}\right)^2 + \left(\frac{2 M_{d1}}{d_{o1}} \tan \alpha_o\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{2 M_{d2}}{d_{o2}}\right)^2 + \left(\frac{2 M_{d2}}{d_{o2}} \tan \alpha_o\right)^2}$$

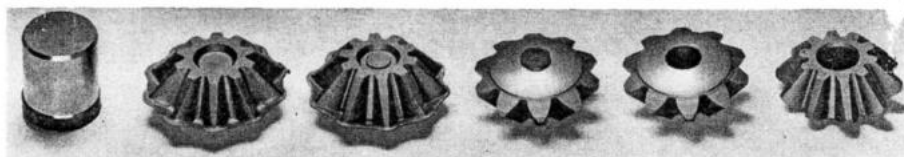
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι οδοντωτοί τροχοί κατασκευάζονται κυρίως με κατεργασίες κοπής μετάλλου ή με συνδυασμό συμβατικής θερμής σφυρηλάτησης και κοπής. Οι μέθοδοι αυτές είναι ιδιαίτερα ακριβές και απαιτούν μεγάλο χρόνο κατεργασίας. Οι νεότερες, όμως, εξελίξεις στη βιομηχανία σφυρηλάτησης επιτρέπουν την κατασκευή οδοντωτών τροχών και εξαρτημάτων τους με τεχνικές σφυρηλάτησης ακριβείας. Η σφυρηλάτηση ακριβείας έχει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους διαμόρφωσης των οδοντωτών τροχών, γιατί επιτρέπει την κατασκευή τους χωρίς προεξοχή και συνεπώς χωρίς την ανάγκη για πρόσθετες κατεργασίες. Κατά συνέπεια η εφαρμογή αυτής της τεχνολογίας παρέχει σημαντικά οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη εξαιτίας της εξοικονόμησης υλικού αλλά και της υψηλότερης παραγωγικότητας. Επιπλέον, οι οδοντωτοί τροχοί που παράγονται με σφυρηλάτηση ακριβείας έχουν καλύτερες μηχανικές ιδιότητες σε σχέση με εκείνους των συμβατικών μεθόδων. Αυτό κυρίως συμβαίνει γιατί η μικροδομή των πρώτων παραμένει αναλλοίωτη λόγω της απουσίας εκτεταμένων κατεργασιών.

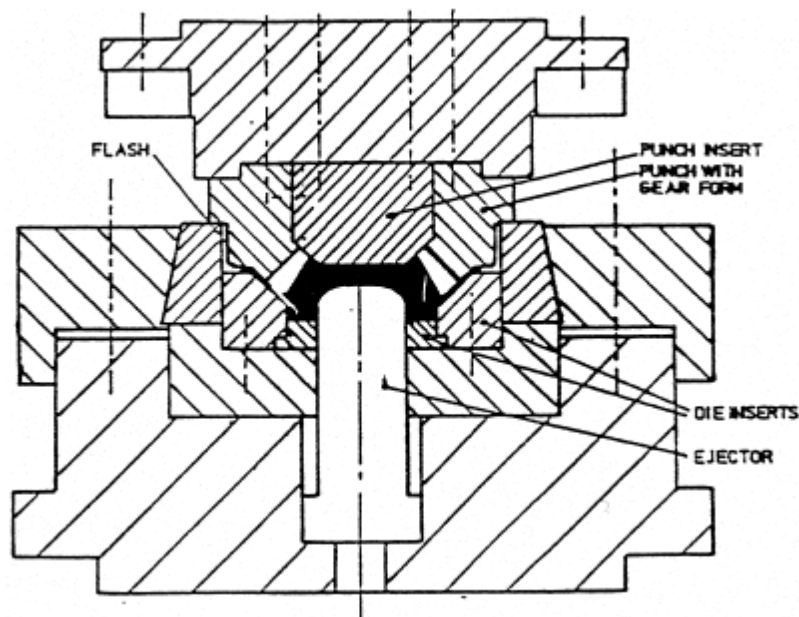
3.2 ΚΩΝΙΚΟΙ ΟΔΟΝΤΩΤΟΙ ΤΡΟΧΟΙ (BEVEL GEARS)

Στο σχήμα 3.1 φαίνεται η σειρά των κατεργασιών για την κατασκευή ενός κωνικού οδοντωτού τροχού.



Σχήμα 3.1: Κλασική τεχνολογία σφυρηλάτησης οδοντωτού τροχού

Από τα έξι στάδια μόνο τα δύο είναι σφυρηλάτηση. Η μπιγέτα βγαίνει από το καλούπι για να απομακρυνθεί το ελαττωματικό υλικό. Η υψηλή ποιότητα των σημερινών καλουπιών καθιστά μη απαραίτητη αυτή τη διαδικασία. Στο σχήμα 3.2 φαίνεται μια μήτρα σφυρηλάτησης δύο τμημάτων και η προεξοχή (flash) που είναι αναπόφευκτη. Η τελευταία απομακρύνεται συνήθως με τόννευση.



Σχήμα 3.2: Μήτρα σφυρηλάτησης γωνιακού οδοντωτού τροχού

Είναι όμως δυνατό να παραχθούν και οδοντωτοί τροχοί χωρίς προεξοχή με σφυρηλάτηση τελείως κλειστής μήτρας. Συνήθως χρησιμοποιείται ψυχρή σφυρηλάτηση για την επίτευξη μέγιστης ακρίβειας. Τέλος, κωνικοί τροχοί παράγονται με περιστροφική σφυρηλάτηση επιτρέποντας την χρήση μηχανών μικρότερης ισχύος για τέτοιου είδους κατεργασίες.

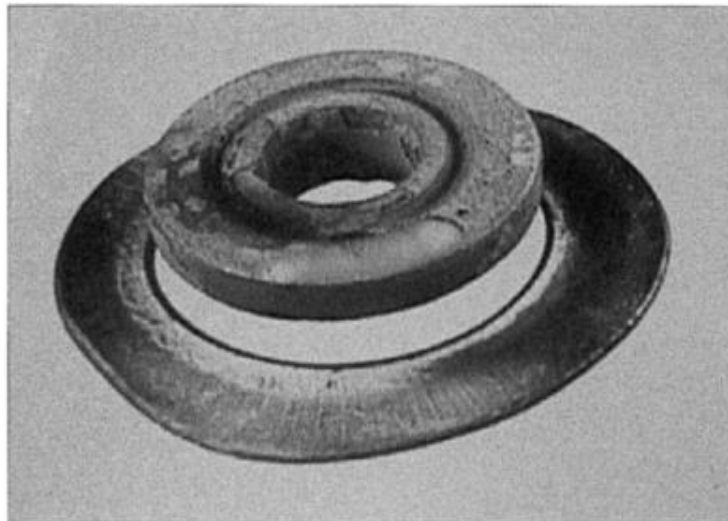
3.3 ΤΡΟΧΟΙ ΧΩΡΙΣ ΟΔΟΝΤΩΣΗ (GEAR BLANKS)

Οι οδοντωτοί τροχοί για μεταφορά ισχύος (γρανάζια κιβωτίων ταχυτήτων) είναι συνήθως λεπτοί σε σύγκριση με τις διαμέτρους τους και συχνά έχουν διάφορες διαμορφώσεις στη μία πλευρά γεγονός που καθιστά ακατάλληλη την παραγωγή τους με εκβολή. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται πιο συχνά για την κατασκευή τους είναι η θερμή σφυρηλάτηση με τελείως κλειστή μήτρα. Ωστόσο η κατασκευή ελικοειδών οδοντώσεων με σφυρηλάτηση δεν είναι αποδεκτή μέθοδος γιατί τα δόντια δεν μπορούν να σφυρηλατηθούν στις τελικές τους διαστάσεις. Επίσης διάφορα προβλήματα που σχετίζονται με τις κατεργασίες φινιρίσματος καθιστούν την σφυρηλάτηση των οδοντώσεων πολύ ακριβή σε σχέση με τις συμβατικές κατεργασίες. Γι' αυτούς τους λόγους τα γρανάζια για τη μεταφορά ισχύος σφυρηλατούνται έχοντας μόνο κάποιες διαμορφώσεις ενώ η περιοχή της βασικής οδόντωσης αφήνεται κενή για να διαμορφωθεί αργότερα με την παραδοσιακή μέθοδο. Το σχήμα 3.3 δείχνει τέτοια γρανάζια με κενή την περιοχή της οδόντωσης, που έχουν παραχθεί με ημίθερμη σφυρηλάτηση σε τελείως κλειστή μήτρα.



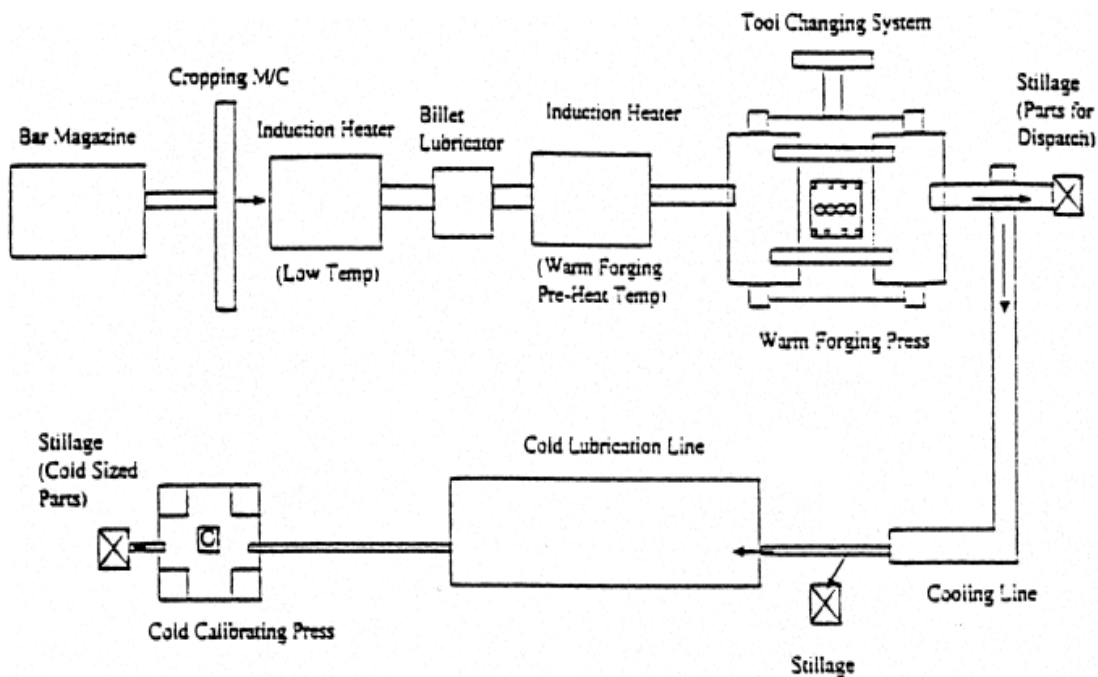
Σχήμα 3.3: Γρανάζια με κενή την περιοχή οδόντωσης- νέα τεχνολογία

Το σχήμα 3.4 δείχνει έναν τροχό με κενή περιοχή οδόντωσης που έχει παραχθεί με την παραδοσιακή μέθοδο της θερμής σφυρηλάτησης. Η προεξοχή και η κακή ποιότητα επιφάνειας είναι ορατές και η έλλειψη διαστασιακής ακρίβειας διαπιστώνεται εύκολα.



Σχήμα 3.4: Γρανάζια με κενή την περιοχή οδόντωσης- παραδοσιακή τεχνολογία

Αντίθετα τα γρανάζια στο σχήμα 3.3 έχουν καλή ποιότητα επιφάνειας, διαστασιακή ακρίβεια και συνεπώς μπορούν να διαμορφωθούν άμεσα με τórνευση οι οδοντώσεις. Η διάταξη μιας τυπικής γραμμής σφυρηλάτησης για την παραγωγή αυτού του τύπου τροχών (gear blanks) φαίνεται στο σχήμα 3.5.

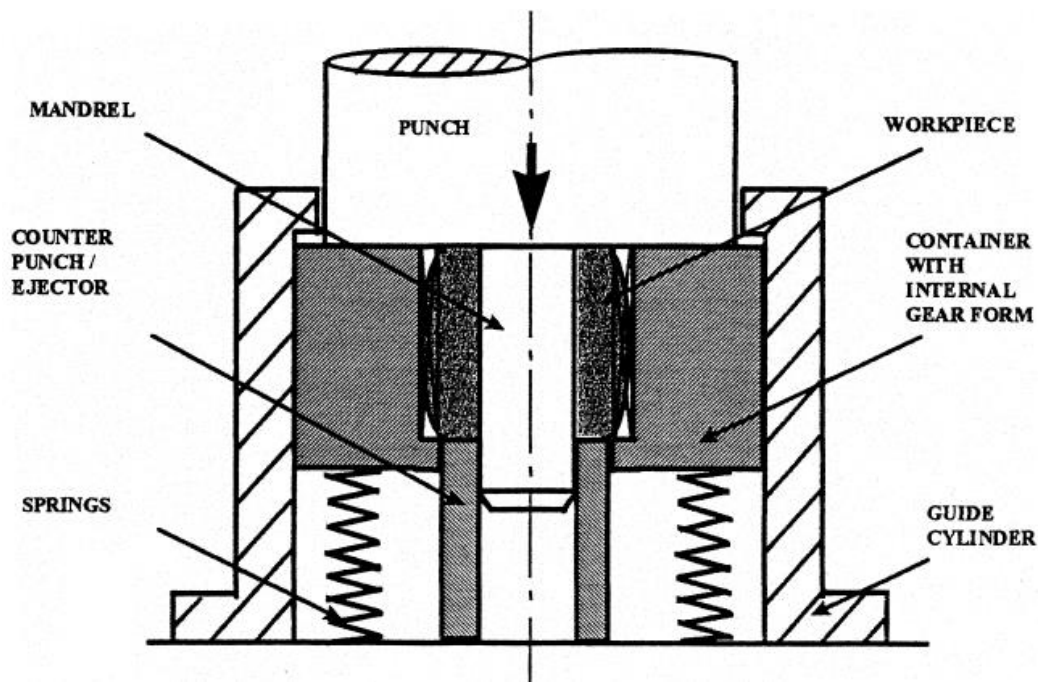


Σχήμα 3.5: Τυπική γραμμή σφυρηλάτησης για τροχούς χωρίς οδόντωση

Το ακατέργαστο υλικό είναι συνήθως χαλύβδινες μπιγέτες με τις κατάλληλες διαστάσεις και βάρος. Για υψηλή παραγωγικότητα η θέρμανση, η λίπανση και η σφυρηλάτηση πραγματοποιούνται διαδοχικά και αυτόματα στη γραμμή παραγωγής. Η θέρμανση γίνεται με συναγωγή και σε δύο στάδια. Ένας μικρός θερμαντήρας δίνει στην μπιγέτα μια θερμοκρασία μεταξύ 120 °C και 150 °C. Μετά οι μπιγέτες ψεκάζονται με το λιπαντικό και οδηγούνται στον κυρίως θερμαντήρα που τους προσδίδει την θερμοκρασία σφυρηλάτησης. Τουλάχιστον τρεις φάσεις σφυρηλάτησης λαμβάνουν χώρα. Μία για τη συμπίεση και τη μορφοποίηση της μπιγέτας, μία για τη διάνοιξη της οπής και μία για την πρόσδοση του τελικού σχήματος. Μετά τη σφυρηλάτηση τα τεμάχια ψύχονται κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες. Κατά τη διάρκεια της κατεργασίας υπάρχει έλεγχος της θερμοκρασίας της μήτρας και της λίπανσης ώστε να πάρουμε τις ακριβείς διαστάσεις των σφυρηλάτων τεμαχίων.

3.4 ΟΔΟΝΤΩΤΟΙ ΤΡΟΧΟΙ ΜΕ ΕΘΥΕΙΑ ΚΑΙ ΕΛΙΚΟΕΙΔΗ ΟΔΟΝΤΩΣΗ (SPUR AND HELICAL GEARS)

Μία εύχρηστη διάταξη μήτρας για την παραγωγή τροχών με ευθεία και ελικοειδή οδόντωση φαίνεται στο σχήμα 3.6.



Σχήμα 3.6: Τελείως κλειστή μήτρα σφυρηλάτησης τροχών με ευθεία και ελικοειδή οδόντωση

Ένα συμπαγές τεμάχιο (workpiece) μορφοποιείται μεταξύ του άνω και κάτω μέρους της μήτρας ή οποία είναι τελείως κλειστή. Το υλικό ωθείται στην οπή του από ένα έμβολο (mandrel) προσαρμοσμένο στην πρέσα και η περιφερειακή του επιφάνεια ρέει ώστε να πληρώσει τη μήτρα (container). Υπό την πίεση της πρέσας η μήτρα ωθείται προς τα κάτω οδηγούμενη από τον εξωλκέα (counter punch/ejector). Επειδή η μήτρα είναι τελείως κλειστή, δε δημιουργείται προεξοχή, άλλα επειδή το τεμάχιο θερμαίνεται για να ρέει πιο εύκολα στη μήτρα, η οδόντωση δεν παίρνει την τελική, καθαρή της μορφή. Στα σχήματα 3.7 και 3.8 φαίνονται δυο οδοντωτοί τροχοί που φτιάχτηκαν με μια τέτοια μήτρα.



Σχήμα 3.7: Οδοντωτός τροχός



Σχήμα 3.8: Οδοντωτός τροχός

3.5 ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ

Γενικά οι εκτεταμένες κατεργασίες χύτευσης και διαμόρφωσης χρησιμοποιούνται για τη διαμόρφωση σύνθετων υλικών. Εξαιτίας της μεγάλης ποσότητας υλικού και ειδικά της

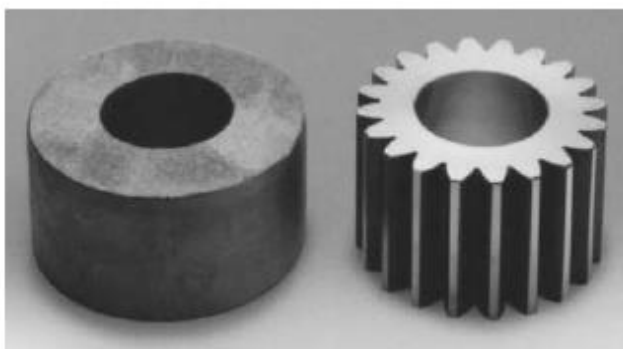
εσωτερικής αντοχής των χυτών και διαμορφωμένων τεμαχίων όπως οι οδοντωτοί τροχοί τα τεμάχια αυτά σφυρηλατούνται και τελειώνουν με φινίρισμα. Η ακρίβεια στη σφυρηλάτηση είναι μια καινοτόμα κατεργασία για τη διαμόρφωση ιδιαίτερα υψηλών τάσεων σχεδόν καθαρού σχήματος συστατικών. Ανήκει στην κατηγορία της σφυρηλάτησης και είναι λιγότερο ακαριαία σε σχέση με την σφυρηλάτηση κλειστής μήτρας.

Είναι προφανές ότι ο όρος «ακρίβεια στη σφυρηλάτηση» αναφέρεται στην παραγωγή ενός καθαρού σχήματος ή σχεδόν καθαρού σχήματος στις συνθήκες σφυρηλάτησης. Ο όρος καθαρό σχήμα ή σχεδόν καθαρό υποδεικνύει ότι δεν απαιτείται καμία μεταγενέστερη κατεργασία ή φινίρισμα της επιφάνειας σφυρηλάτησης. Κατά συνέπεια ένα καθαρό σχήμα σφυρηλάτησης δεν απαιτεί περαιτέρω εργασία σε κάθε μια από τις σφυρηλατημένες επιφάνειες παρά το γεγονός πως μπορεί να απαιτούνται δευτερεύουσες εργασίες για την παραγωγή μικρότερων οπών, στοιχείων κτλ (ASM International 2005).

Η σφυρηλάτηση σχεδόν καθαρού σχήματος σημαίνει πως είτε μια είτε περισσότερες αλλά όχι όλες οι επιφάνειες είναι καθαρές ή υπάρχει μία επιφάνεια η οποία απαιτεί ελάχιστη περαιτέρω κατεργασία ή φινίρισμα. Η ακριβής σφυρηλάτηση μερικές φορές περιγράφεται ως σφυρηλάτηση κλειστής ανοχής προκειμένου να δοθεί έμφαση στον αποκλειστικό στόχο επίτευξης μέσω της θερμής σφυρηλάτησης, των ανοχών στη διαστασιολόγηση και στην επιφάνεια του τελικού κομματιού.

Τα τελευταία χρόνια οι μέθοδοι διαμόρφωσης μέσω υπολογιστή (CAD/CAM) εφαρμόζονται στις διάφορες κατεργασίες. Αυτή η υπολογιστική προσέγγιση εφαρμόζεται στη θερμή σφυρηλάτηση ακριβείας των σπειροειδών κωνικών, των μετωπικών και των ελικοειδών οδοντωτών τροχών στις συμβατικές πρέσες, γεγονός που επιτρέπει στο σχεδιαστή της μήτρας να εξετάζει λεπτομερώς τις διάφορες λειτουργικές παραμέτρους (φορτία, τάσεις και θερμοκρασία) στο σχεδιασμό της μήτρας.

Οι ακριβείς οδοντωτοί τροχοί θερμής σφυρηλάτησης έχουν τα ίδια πλεονεκτήματα με τους οδοντωτούς τροχούς κοπής και τους χυτούς οδοντωτούς τροχούς όπου υπάρχει λίγη ή καθόλου απώλεια υλικού.



Σχήμα 3.9: Εξοικονόμηση υλικού/ βάρους χρησιμοποιώντας τη σφυρηλάτηση σχεδόν καθαρού σχήματος (ASM International 2005).

Η εξοικονόμηση υλικού συνοδεύεται από εξοικονόμηση κόστους τόσο του υλικού όσο και της κατεργασίας. Επιπλέον οι σφυρηλατοί οδοντωτοί τροχοί ακριβείας έχουν το πλεονέκτημα του αυξανόμενου φορτίου. Αυτή η επιπρόσθετη δύναμη στο σχηματισμό της

αυξανόμενης κόπωσης οφείλεται στη διαφορετική ροή κόκκων ανάμεσα στους τροχούς κοπής και στους σφυρήλατους. Η ροή των κόκκων στους οδοντωτούς τροχούς κοπής καθορίζεται από τον προσανατολισμό της έλασης της ράβδου και δεν έχει καμία σχέση με το περίγραμμα των οδόντων του τροχού.

Οι περισσότεροι σφυρήλατοι τροχοί που παράγονται σήμερα είναι σχεδόν καθαρού σχήματος. Οι οδόντες των οδοντωτών τροχών σφυρηλατούνται με απομάκρυνση του υλικού γύρω από το προφίλ του οδόντα.

Οι κατεργασίες διαμόρφωσης ξεκινούν με χαλύβδινες ράβδους που συνήθως περιστρέφονται και γυαλίζονται προκειμένου να βελτιωθεί η επιφάνεια τους και κόβονται στο επιθυμητό ακριβές βάρος. Το ακριβές βάρος είναι κρίσιμο επειδή η ποσότητα του χάλυβα πρέπει να γεμίζει πλήρως τη μήτρα για να παράγεται πλήρως το προφίλ του τροχού. Πριν τη σφυρηλάτηση οι ράβδοι θερμαίνονται από τους 925 °C έως τους 1230 °C σε ηλεκτρικούς φούρνους που ελέγχονται από οπτικά πυρόμετρα με ακρίβεια ± 14 °C.

Οι μηχανικές πρέσες σφυρηλάτησης με ένα κτύπημα σχηματίζουν σχεδόν καθαρού σχήματος οδοντωτούς τροχούς με πλήρη αξιοποίηση των διαθέσιμων αποθεμάτων. Σκοπός της αρχικής κατεργασίας είναι να σπάσει τη ράβδο και να διαστασιοποιηθεί η εξωτερική διάμετρος ακριβώς στην διάμετρο της μήτρας. Στη συνέχεια, οι ράβδοι τοποθετούνται στη μήτρα του φινιρίσματος. Μετά τη σφυρηλάτηση ένα υδραυλικό σύστημα εξώθησης αμέσως εξάγει τον οδοντωτό τροχό από τη μήτρα φινιρίσματος. Μετά από την υδραυλική εξαγωγή του ακατέργαστου οδοντωτού τροχού από τη μήτρα γίνεται η τοποθέτησή του σε μια μήτρα κοπής όπου ανοίγεται η σπή. Στη συνέχεια, ο τροχός ψύχεται σε ατμοσφαιρική θερμοκρασία για περίπου 24 ώρες. Μετά την ψύξη είναι έτοιμος για φινίρισμα.

Οι οδοντωτοί τροχοί σχεδόν καθαρού σχήματος μπορούν να παραχθούν από οποιοδήποτε σκληρυμένο χάλυβα στις πέντε βασικές διαμορφώσεις τους: σπειροειδείς κωνικούς, ελικοειδείς, απευθείας κωνικοί, μετωπικοί τροχοί με 1mm ανοχή και μετωπικοί οδοντωτοί τροχοί με ανοχές από 0.1 έως 0.3 mm. Οι διαμέτροι των σχεδόν καθαρού σχήματος οδοντωτών τροχών μπορούν να είναι πάνω από 425 mm με ανοχές από 0.1 έως 1.5 mm. ειδικότερα για τις διάφορες διαμορφώσεις οδοντωτών τροχών ισχύει:

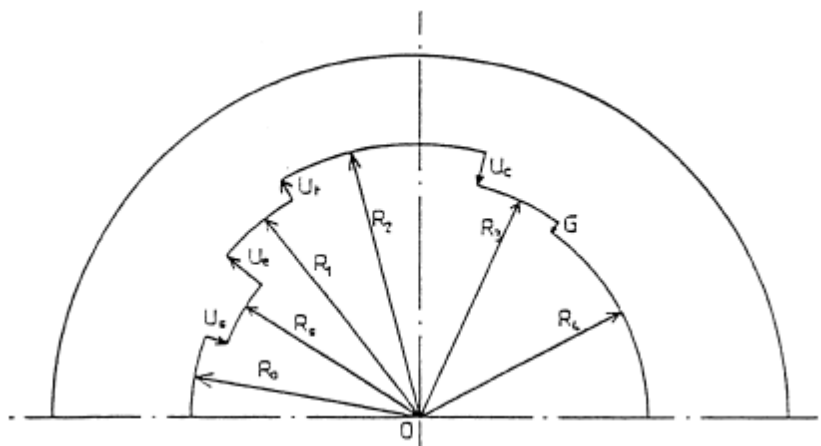
- Οι σπειροειδείς κωνικοί τροχοί μπορούν να παραχθούν με διαμέτρους μεγαλύτερες των 425 mm με 0.5 mm ελάχιστο υλικό ανά πλευρά.
- Οι επίπεδοι κωνικοί τροχοί μπορεί να έχουν διαμορφώσεις και ιδιότητες παρόμοιες με τους σπειροειδείς κωνικούς τροχούς.
- Οι ελικοειδείς τροχοί μπορούν να έχουν διαμέτρους μεγαλύτερες από 250 mm και βάρος μεγαλύτερο από 40 kg.
- Οι μετωπικοί τροχοί με ανοχές της τάξης του 1 mm μπορούν να παραχθούν με διάμετρο μεγαλύτερη από 400 mm και βάρος 135 kg.
- Οι μετωπικοί οδοντωτοί τροχοί με ανοχή υλικού από 0.1 έως 0.3 mm μπορούν να παραχθούν με διάμετρο μεγαλύτερη των 250 mm και πάχος μετώπου μεγαλύτερο από 150 mm. Ο συγκεκριμένος τύπος οδοντωτών τροχών απαιτεί μια κατεργασία τελειώματος λείανσης ή στίλβωσης.
-



Σχήμα 3.10: Παράδειγμα σφυρηλάτου οδοντωτού τροχού ακριβείας σχεδόν καθαρού σχήματος (ASM International 2005).

3.6 ΑΚΡΙΒΕΙΑ ΤΩΝ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ

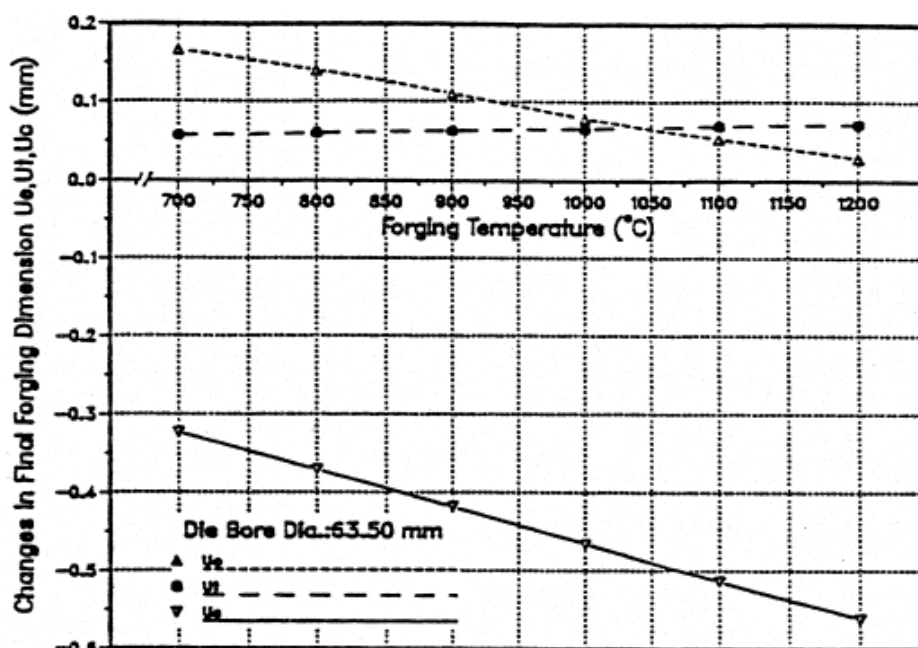
Η ακρίβεια των οδοντώσεων που παράγονται με σφυρηλάτηση εξαρτάται από την ακρίβεια των διαστάσεων της μήτρας και αυτή με τη σειρά της εξαρτάται από τρεις παράγοντες που φαίνονται στο σχήμα 3.11, για κυκλικές μορφές.



Σχήμα 3.11: Παράγοντες που επηρεάζουν την ακρίβεια σφυρηλάτησης

Οι παράγοντες αυτοί είναι: διαστολή λόγω της πίεσης σφυρηλάτησης U_s , η θερμική διαστολή U_t , και η συστολή U_c που λαμβάνει χώρα κατά την απόψυξη του τεμαχίου ως την θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η διάσταση G που φαίνεται στο σχήμα 3.11 δείχνει την ανοχή που πρέπει να έχει η μήτρα όταν κατασκευάζεται με ηλεκτροδιάβρωση (EDM). Η επιθυμητή διάσταση R_0 επιτυγχάνεται λαμβάνοντας υπόψη την αθροιστική επίδραση και των τριών παραπάνω παραγόντων. Το σχετικό μέγεθος αυτών των επιδράσεων μπορεί να υπολογιστεί

από το σχήμα 3.12 το οποίο αναφέρεται στη σφυρηλάτηση κυλινδρικών τεμαχίων ονομαστικής διαμέτρου 63,5 mm.

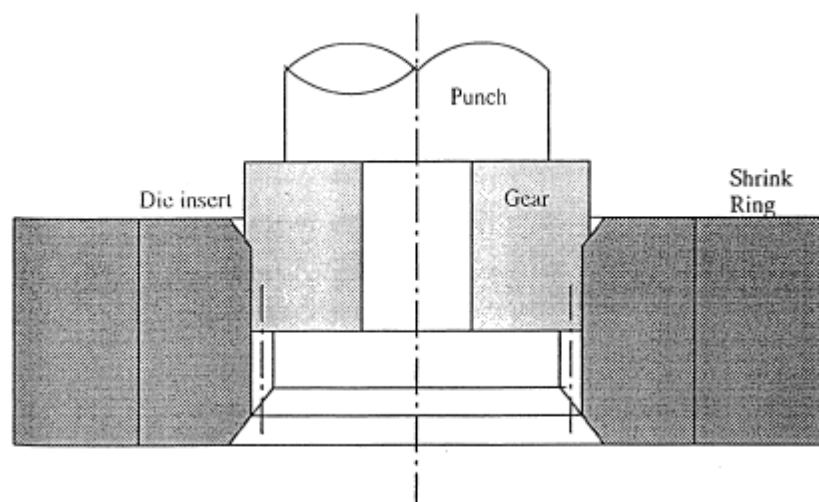


Theoretical variations of final forging dimension with forging temperature in forging steel cylinders

Σχήμα 3.12: Σχετική επίδραση των διαφόρων παραμέτρων στην ακρίβεια σφυρηλάτησης

Η ελαστική διαστολή της μήτρας μειώνεται καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία σφυρηλάτησης γιατί τότε αναπτύσσονται μικρότερες πιέσεις στα τοιχώματα της μήτρας. Αντίθετα όσο αυξάνεται η θερμοκρασία σφυρηλάτησης τόσο αυξάνεται η θερμική διαστολή της μήτρας. Ο παράγοντας με τη μεγαλύτερη επίδραση στις διαστάσεις είναι η θερμική συστολή του σφυρηλατημένου τεμαχίου. Είναι προφανές ότι μεγάλη ακρίβεια μπορεί να επιτευχθεί μόνο όταν οι τιμές της θερμοκρασίας και της πίεσης παραμένουν σταθερές κατά τη διάρκεια της κατεργασίας και η μέγιστη ακρίβεια επιτυγχάνεται όταν τα προς κατεργασία τεμάχια δεν προθερμαίνονται.

Για να βελτιώσουμε την ακρίβεια των οδοντωτών τροχών με ευθεία και ελικοειδή οδόντωση προτείνονται διάφορες μέθοδοι ψυχρής σφυρηλάτησης. Έρευνες έδειξαν ότι μια κατεργασία τύπου «σιδερώματος» έχει την δυνατότητα να αυξήσει την ακρίβεια της οδόντωσης ικανοποιώντας τις υψηλές προδιαγραφές της βιομηχανίας αυτοκίνησης. Παρακάτω φαίνεται η σχηματική παράσταση της μεθόδου αυτής (Σχήμα 3.13). Το γρανάζι που σφυρηλατείται έχει μεγαλύτερη διάμετρο από τη μήτρα. Το «σιδερώμα» είναι βασικά η ώθηση του υπερμεγέθους τεμαχίου μέσα στη μήτρα όπως φαίνεται στο σχήμα. Έτσι μόνο ένα λεπτό εξωτερικό μέρος της οδόντωσης μορφοποιείται. Σε πειράματα που έγιναν διαπιστώθηκε ότι η επιφάνεια των δοντιών είχε φινίρισμα 0,5 μm RMS.



Σχήμα 3.13: Σχηματική παράσταση της μεθόδου «σιδερώματος»

Τα αποτελέσματα που φαίνονται στον πίνακα 3.1 δείχνουν ότι εκτός από το ίχνος των δοντιών, τα ελαττώματα των σφυρήλατων τροχών έχουν μειωθεί σημαντικά με τη μέθοδο του «σιδερώματος». Η επιφανειακή τραχύτητα RMS που επιτεύχθηκε είναι περίπου 1 μm. Γενικά η ποιότητα των οδοντωτών τροχών βελτιώθηκε περίπου κατά δύο κλάσεις στην κλίμακα AGMA.

Changes in gear form accuracy through ironing

Feature	Finishing die		Induction hardened			
	LH	RH	As-forged		Ironed	
			LH	RH	LH	RH
Pressure angle deg.	0.12	0.10	0.73	0.58	0.19	0.16
Involute (μm)	15	13	57	46	27	22
Tooth trace (μm)	8	5	105	94	93	66
Max. cum pitch (μm)	38	25	180	163	113	101
Adj. pitch (μm)	12	9	73	28	21	16
Tooth thickness (μm)	31	12	468	285	55	46
Runout (μm)	32		96		62	

Πίνακας 3.1: Αλλαγές στην ακρίβεια των τροχών με τη χρήση «σιδερώματος»

3.7 ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ

Οι επιδράσεις στη μικροδομή των οδοντωτών τροχών οι οποίες μπορούν να προκληθούν από την επιλογή διαφορετικών συνθηκών κατεργασίας, αναφέρονται συνοπτικά παρακάτω.

- Η ροή των κόκκων ακολουθεί το προφίλ της οδόντωσης και το μέγεθος των κόκκων τείνει να είναι μικρότερο κοντά στην επιφάνεια των δοντιών, εξαιτίας της μεγαλύτερης παραμόρφωσης σε αυτή τη περιοχή.

- Η θέρμανση σε κανονική ατμόσφαιρα τείνει να προκαλέσει απανθράκωση η οποία είναι μεγαλύτερη στις άκρες των δοντιών.
- Οι οδοντωτοί τροχοί από κατάλληλα κράματα μπορεί να υποστούν σκλήρυνση με βαφή από τη θερμοκρασία της σφυρηλάτησης.
- Οι προεξανθρακωμένες μπιγέτες που πρόκειται να σφυρηλατηθούν, πρέπει να προθερμανθούν σε μη οξειδωτικό περιβάλλον για να αποφευχθεί απώλεια άνθρακα. Το στρώμα άνθρακα τείνει να διαχυθεί προς το εσωτερικό κατά τη θέρμανση και λεπταίνει στην άκρη των δοντιών κατά τη διάρκεια της σφυρηλάτησης.

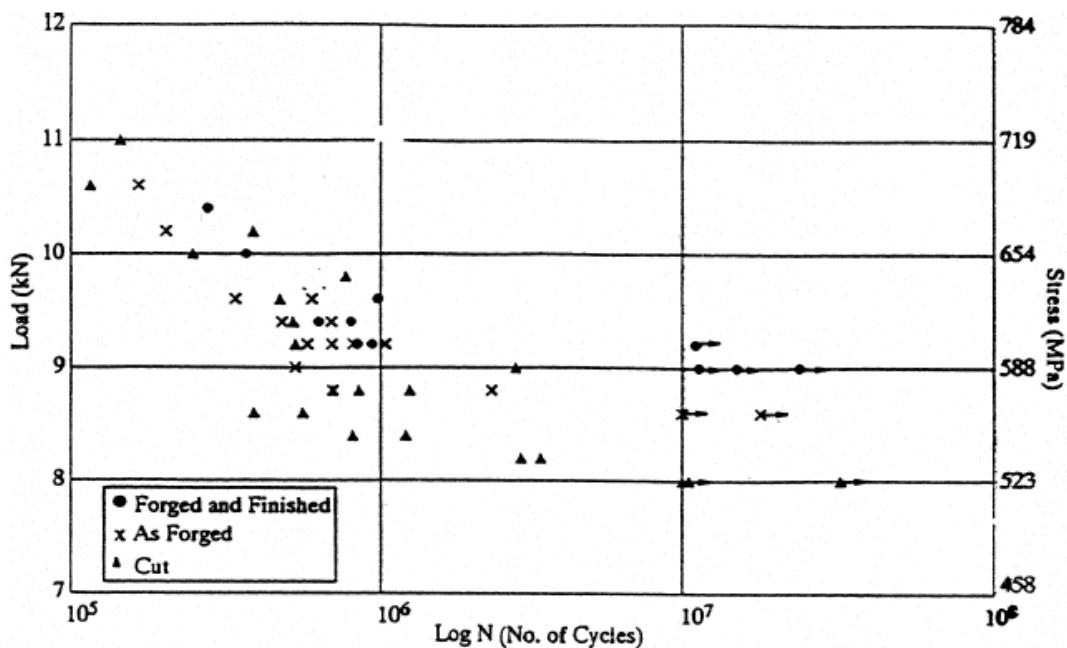
Η δυναμική αντοχή των σφυρήλατων οδοντώσεων είναι μεγαλύτερη από αυτών που φτιάχνονται με συμβατικές μεθόδους. Αυτό φαίνεται στον πίνακα 3.2 στην περίπτωση αντοχής σε κρούση, χαλύβδινων BS 817M40 οδοντωτών τροχών με σκληρότητα H_v 300.

Impact strength of gears 6

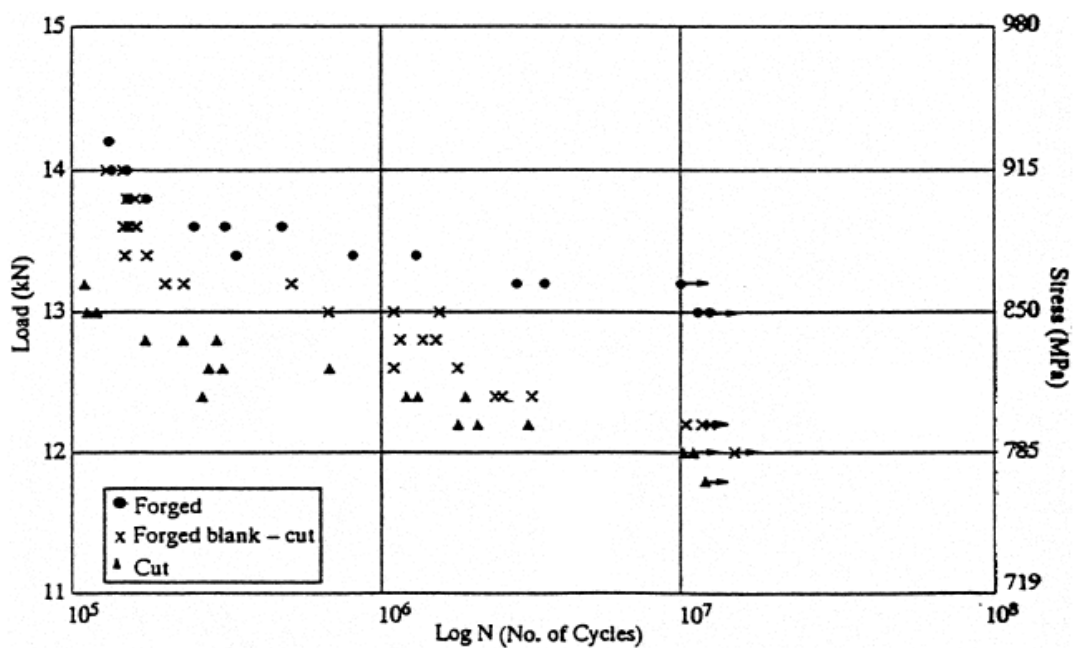
Method of manufacture		
Fully forged	Machined from forged blank	Machined from rolled bar
51.5	41.0	38.6
49.1	37.1	34.8
49.4	36.4	38.5
51.4	38.0	40.5
50.7	37.1	39.0
52.6	37.0	41.6

Πίνακας 3.2: Αντοχή σε κρούση οδοντωτών τροχών

Είναι φανερό ότι η αντοχή σε κρούση των πλήρως σφυρήλατων οδοντωτών τροχών είναι περίπου 30 % μεγαλύτερη από εκείνη των οδοντωτών τροχών που φτιάχνονται με κατεργασίες είτε από τροχούς χωρίς οδόντωση (gear blanks) είτε από μπιγέτες. Τα αποτελέσματα των δοκιμών κοπώσεως σε οδοντωτούς τροχούς από χάλυβα BS 817M40 φαίνονται στα σχήματα 3.14 και 3.15. Είναι προφανές ότι το όριο κοπώσεως των σφυρήλατων οδοντώσεων είναι σημαντικά υψηλότερο από αυτών που παρήχθησαν με κοπή. Εξαιτίας του γεγονότος ότι μετά τη θερμική επεξεργασία τα πλαϊνά των οδοντώσεων είχαν φθαρεί μόνο πάνω από τον βασικό κύκλο, η επιφάνεια της ρίζας ποδός των σφυρήλατων οδοντώσεων, ήταν πιο τραχιά από την αντίστοιχη των προερχόμενων από κοπή. Για να επιτύχουμε ισοδυναμία των γραναζιών, η επιφάνεια της ρίζας ποδός ορισμένων σφυρήλατων οδοντωτών τροχών φινιρίστηκε με το χέρι. Αυτά αναφέρονται ως «forged and finished» (σφυρηλατημένα και φινιρισμένα) και τα αποτελέσματα του σχήματος 3.14 δείχνουν ότι η αντοχή τους σε κόπωση είναι η μεγαλύτερη. Ακολουθούν τα γρανάζια με επαγωγική θερμική σκλήρυνση με μεγαλύτερη αντοχή σε κόπωση από το γρανάζια με κοπή. Η ίδια σειρά αντοχής σε κόπωση προκύπτει και από τα αποτελέσματα του σχήματος 3.15.



Σχήμα 3.14: Αντοχή σε κόπωση οδοντωτών τροχών



Σχήμα 3.15: Αντοχή σε κόπωση οδοντωτών τροχών

3.8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η τεχνολογία σφυρηλάτησης βρίσκεται στο επίπεδο όπου κωνικοί οδοντωτοί τροχοί μπορούν να σφυρηλατηθούν στο τελικό τους σχήμα (net-shape). Οδοντωτοί τροχοί με ευθεία και ελικοειδή οδόντωση μπορούν να παραχθούν με ψυχρή σφυρηλάτηση με μεγάλη ακρίβεια διαστάσεων. Ωστόσο, ορισμένα είδη οδοντωτών τροχών υψηλών απαιτήσεων (π.χ. γρανάζια για κιβώτια ταχυτήτων οχημάτων) δεν μπορούν ακόμα να παραχθούν με εμπορικά βιώσιμες τεχνικές σφυρηλάτησης. Συνολικά όμως μπορούμε να πούμε πως τα σφυρήλατα γρανάζια έχουν ίδιες και καλύτερες ιδιότητες σε σύγκριση με τα παραχθέντα με μηχανουργικές κατεργασίες γι' αυτό και μπορούν να τα αντικαταστήσουν σε πολλές εφαρμογές.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

4.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η ραγδαία εξέλιξη των τελευταίων ετών στη Μηχανολογία οφείλεται, χωρίς αμφιβολία, στην εισαγωγή των ηλεκτρονικών υπολογιστών σε όλους τους επιμέρους τομείς της. Σε σχέση με τις κατασκευαστικές επιστήμες, η δυνατότητα “απεικόνισης” της γεωμετρίας μιας μηχανολογικής κατασκευής στον ηλεκτρονικό υπολογιστή, καθώς και η δυνατότητα “προσομοίωσης” της στατικής, δυναμικής, θερμικής, ρευστοδυναμικής, κλπ. συμπεριφοράς της, αποτελούν επιτεύγματα των τελευταίων ετών και αλλάζουν σημαντικά τόσο την εκπαίδευση όσο και την επαγγελματική πράξη του μηχανολόγου μηχανικού.

- ✚ Η σχεδίαση με τη βοήθεια Η/Υ (Computer-Aided Design: CAD) είναι μια τεχνολογία που χρησιμοποιεί Η/Υ για την υποβοήθηση της δημιουργίας, τροποποίησης και βελτιστοποίησης ενός σχεδιασμού.
- ✚ Η ανάλυση με τη βοήθεια Η/Υ (Computer-Aided Engineering: CAE) είναι μια τεχνολογία που ασχολείται με την χρήση υπολογιστικών συστημάτων για την ανάλυση γεωμετρίας CAD, που επιτρέπει στον σχεδιαστή να προσομοιώσει και μελετήσει τον τρόπο με τον οποίο θα συμπεριφερθεί το προϊόν έτσι ώστε ο σχεδιασμός να επιδέχεται εύκολα αποπεράτωση και βελτιστοποίηση. Η κυρίαρχη μέθοδος CAE είναι αυτή των Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Method: FEM).

4.2 ΟΡΙΣΜΟΣ CAD

Η σχεδίαση με τη βοήθεια Η/Υ (Computer-Aided Design: CAD) είναι μια τεχνολογία που χρησιμοποιεί Η/Υ για την υποβοήθηση της δημιουργίας, τροποποίησης και βελτιστοποίησης ενός σχεδιασμού. Με τον όρο CAD εννοούμε τη δημιουργία γεωμετρικών απεικονίσεων στον ηλεκτρονικό υπολογιστή. Προφανώς δεν περιοριζόμαστε στην γνωστή διαδικασία αντικατάστασης του drafting, δηλ. του δισδιάστατου (2-D) παραδοσιακού σχεδίου του μηχανικού, αλλά κυρίως στην περίπτωση τρισδιάστατης (3-D) απεικόνισης κατασκευών ή δομών, όπου χρησιμοποιούνται αυτοματοποιημένες διαδικασίες προσέγγισης επιφανειών (μέσω των παρεμβολών Coons, Bezier και Nurbs) ή/και όγκων. Έτσι, είναι πολύ ευκολότερη και ελέγξιμη η αλλαγή της γεωμετρίας ενός μηχανολογικού εξαρτήματος μέχρις ότου ο μελετητής καταλήξει σε μία καταρχήν αποδεκτή κατασκευαστική λύση. Επιπλέον, όλα τα συστήματα CAD διαθέτουν κατάλληλα φίλτρα – interfaces (DXF, IGES, STEP) που δίνουν τη δυνατότητα μεταφοράς της γεωμετρικής πληροφορίας από το ένα σύστημα στο άλλο (εναλλαξιμότητα).

Τα εργαλεία CAD μπορούν να ποικίλουν μεταξύ γεωμετρικών εργαλείων διαχείρισης σχημάτων (ένα άκρο), μέχρι εξειδικευμένα προγράμματα εφαρμογών όπως ανάλυση και βελτιστοποίηση (άλλο άκρο). Μεταξύ αυτών των δύο άκρων, τυπικά εργαλεία που είναι διαθέσιμα επί του παρόντος, περιλαμβάνουν ανάλυση ανοχών, υπολογισμούς ιδιοτήτων μάζας (κέντρα βάρους, ροπές αδρανείας, κλπ.), μοντελοποίησης με πεπερασμένα στοιχεία (FEM) και οπτικής απεικόνισης (visualization) των αποτελεσμάτων της ανάλυσης, μεταξύ άλλων. Ο σημαντικότερος ρόλος του CAD είναι ο καθορισμός της γεωμετρίας του υπό

σχεδιασμού προϊόντος που είναι ουσιώδης σε όλες τις επόμενες φάσεις του κύκλου. Στη συνέχεια, η εν λόγω γεωμετρία αξιοποιείται από το CAE.

4.3 ΟΡΙΣΜΟΣ CAE

Η ανάλυση με τη βοήθεια Η/Υ (Computer-Aided Engineering: CAE) είναι μια τεχνολογία που ασχολείται με την χρήση υπολογιστικών συστημάτων για την ανάλυση γεωμετρίας CAD, που επιτρέπει στον σχεδιαστή να προσομοιώσει και μελετήσει τον τρόπο με τον οποίο θα συμπεριφερθεί το προϊόν έτσι ώστε ο σχεδιασμός να επιδέχεται εύκολα αποπεράτωση και βελτιστοποίηση. Τα εργαλεία CAE διατίθενται σε ευρεία κλίμακα αναλύσεων. Κινηματικά προγράμματα, για παράδειγμα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάλυση λειτουργίας μηχανών. Προγράμματα δυναμικής ανάλυσης μεγάλων μετατοπίσεων μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην προσομοίωση σύνθετων συναρμολογημένων δομών όπως λ.χ. τα οχήματα ή συσκευασιών σε πτώση επί του εδάφους.

Μεταξύ των πλέον διαδεδομένων μεθόδων ανάλυσης είναι η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Method: FEM) που επιτρέπει τη στατική και δυναμική ανάλυση τάσεων και μετατοπίσεων, θερμική ανάλυση, ρευστομηχανική και αεροδυναμική ανάλυση, ακουστική ανάλυση, κατανομή μαγνητικού πεδίου ή και άλλων πεδίων. Η εφαρμογή της FEM απαιτεί τη χρήση ενός απλουστευμένου αφαιρετικού μοντέλου που πρέπει να γεννηθεί είτε με αλληλεπίδραση του χρήστη ή και αυτόματα. Το λογισμικό που καθιστά δυνατή την κατασκευή του αφαιρετικού μοντέλου και τη γένεση των πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί τους προ-επεξεργαστές (pre-processors). Μετά την εκτέλεση της ανάλυσης σε κάθε στοιχείο, ο Η/Υ συγκεντρώνει τα αποτελέσματα και τα εμφανίζει με ευανάγνωστο οπτικό τρόπο. Περιοχές υψηλών τάσεων μπορεί να παριστάνονται με κόκκινο χρώμα για παράδειγμα. Το λογισμικό τέτοιων απεικονίσεων αποτελεί τους λεγόμενους μετα-επεξεργαστές (post-processors).

Επίσης, είναι διαθέσιμα πολλά εργαλεία βελτιστοποίησης σχεδιασμού. Παρόλο που τα εργαλεία βελτιστοποίησης μπορούν να θεωρηθούν σαν εργαλεία CAE, συνήθως ταξινομούνται με ξεχωριστό τρόπο. Διάφορες ερευνητικές προσπάθειες εξελίσσονται προς την κατεύθυνση αυτόματου σχεδιασμού με ολοκλήρωση των διαδικασιών βελτιστοποίησης και ανάλυσης. Σε αυτές τις προσεγγίσεις, γίνεται η παραδοχή ενός απλού αρχικού σχήματος σχεδιασμού, όπως ένα ορθογώνιο παραλληλόγραμμο για δισδιάστατο εξάρτημα που αποτελείται από μικρά στοιχεία διαφορετικών πυκνοτήτων. Κατόπιν, εκτελείται η διαδικασία βελτιστοποίησης προς υπολογισμό των βέλτιστων τιμών αυτών των πυκνοτήτων που αποβλέπει στην επίτευξη ενός στόχου με παράλληλη ικανοποίηση των συνθηκών τάσεων ή/και μετατοπίσεων. Συνήθως ο στόχος είναι η επίτευξη του ελάχιστου βάρους. Με βάση τις βέλτιστες τιμές πυκνοτήτων, το βέλτιστο σχήμα του σχεδιασμού λαμβάνεται με απαλοιφή των στοιχείων χαμηλής πυκνότητας.

Η γοητεία των μεθόδων ανάλυσης και βελτιστοποίησης είναι ότι επιτρέπουν στον μηχανικό να δει τον τρόπο με τον οποίο το προϊόν θα συμπεριφερθεί και του επιτρέπει να επισημάνει τα όποια λάθη έχουν γίνει μέχρι τη στιγμή εκείνη, προτού προχωρήσει σε χρονοβόρες και δαπανηρές διαδικασίες κατασκευής και ελέγχου φυσικών πρωτοτύπων. Επειδή το κόστος μελέτης μεταβάλλεται εκθετικά στα τελευταία στάδια ανάπτυξης και παραγωγής του προϊόντος, η πρώιμη βελτιστοποίηση και εξευγενισμός που επιτυγχάνεται από την ανάλυση CAE τελικά αποπληρώνεται με μείωση χρόνου και κόστους.

4.4 ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Ένα από τα πρώτα μελήματα του μηχανικού όταν αυτός αναλάβει την ανάπτυξη ενός μοντέλου είναι η επιλογή των κατάλληλων πεπερασμένων στοιχείων. Ακόμη και σε δισδιάστατες κατασκευές η χρήση τριγωνικών στοιχείων τριών κόμβων και τετραπλευρικών στοιχείων τεσσάρων κόμβων δεν είναι η μόνη επιλογή του, ανάλογα με τις δυνατότητες του διαθέσιμου λογισμικού. Πράγματι, μια από τις κρίσιμότερες αποφάσεις είναι η επιλογή των κατάλληλων στοιχείων με τον κατάλληλο αριθμό κόμβων από την διαθέσιμη βιβλιοθήκη στοιχείων. Επιπρόσθετα, το πλήθος των στοιχείων (με άλλα λόγια το μέσο μέγεθος των στοιχείων) που πρέπει να χρησιμοποιηθούν για την επίλυση ενός συγκεκριμένου προβλήματος είναι αποτέλεσμα της κρίσης του μηχανικού. Σαν γενικός κανόνας, όσο μεγαλύτερο είναι το πλήθος των κόμβων και των στοιχείων (στην *h* version) ή όσο μεγαλύτερος ο βαθμός πολυωνύμου της συνάρτησης μορφής (στην *p* version), τόσο ακριβέστερη είναι η λύση των πεπερασμένων στοιχείων, αλλά επίσης τόσο πιο δαπανηρή είναι η επίλυση. Οι διάφοροι τύποι πεπερασμένων στοιχείων εισάγονται παρακάτω. Ένα άλλο σημαντικό πρόβλημα είναι η γένεση πλέγματος του υπό ανάλυση αντικειμένου, ειδικά όταν έχει περίπλοκο γεωμετρικό σχήμα. Η δημιουργία τρισδιάστατων πλεγμάτων είναι μια διαδικασία που απαιτεί πολλές εργατώρες και είναι επιρρεπής σε σφάλματα. Γίνονται πολλές προσπάθειες αυτόματης γένεσης πλεγμάτων που να συνδέονται με συστήματα μοντελοποίησης όγκου (*solid modeling*).

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

Σημειώσεις:

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

4.4.1 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ – ΤΥΠΟΙ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

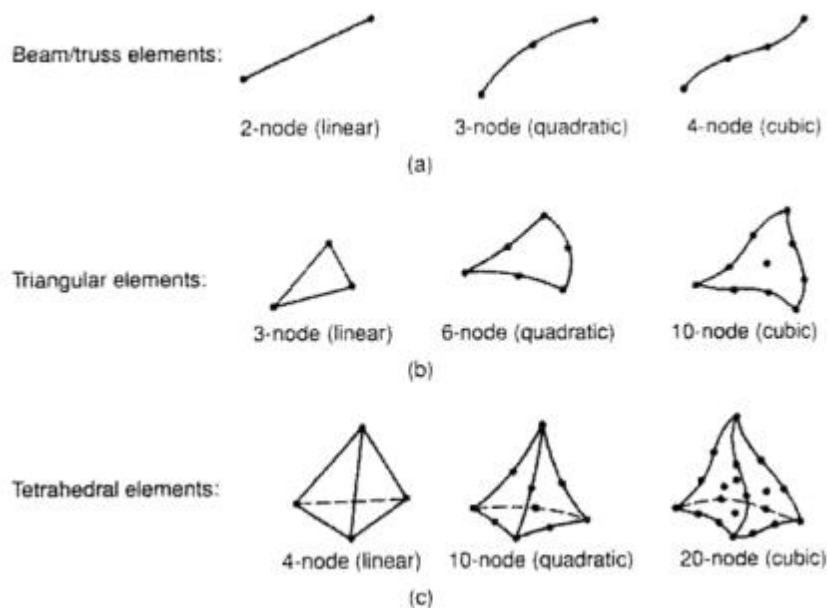
Το σύνολο των απαραίτητων διαδικασιών για την ανάπτυξη ενός πλήρους μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων, δηλ. η εισαγωγή της γεωμετρίας, η γένεση του πλέγματος, η επιβολή στηρίξεων και φόρτισης αποτελούν αυτό που συνοπτικά ονομάζεται μοντελοποίηση πεπερασμένων στοιχείων (*finite-element modeling*), η οποία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

Ο προ-επεξεργαστής (*pre-processor*) ξεκινάει από τη γεωμετρία του αντικείμενου ή του πεδίου ορισμού του προβλήματος. Παραδοσιακά συστήματα FEA (*Finite Element Analysis*) είχαν μόνο στοιχειώδεις λειτουργίες μοντελοποίησης, αλλά σήμερα τα περισσότερα είτε

προσφέρουν προηγμένες δυνατότητες ή έχουν στενούς δεσμούς με συστήματα CAD (μερικές φορές και τα δύο). Συστήματα που στηρίζονται σε γεωμετρική μοντελοποίηση CAD είτε εργάζονται απευθείας με το μοντέλο CAD ή μεταφράζουν και εισάγουν τη γεωμετρία. Η απευθείας σύνδεση με CAD κερδίζει όλο και μεγαλύτερο έδαφος διότι εξαλείφει τα βήματα μετάφρασης την απώλεια δεδομένων και μικραίνει τον κύκλο σχεδιασμού-ανάλυσης-αλλαγής. Περαιτέρω, η χρήση συστήματος CAD διευκολύνει τη μοντελοποίηση και παρέχει πιο ισχυρές λειτουργίες δημιουργίας και αλλαγής σύνθετης γεωμετρίας. Πράγματι, σήμερα τα περισσότερα υβριδικά συστήματα μοντελοποίησης (με ολοκληρωμένη μοντελοποίηση όγκου, επιφάνειας και wireframe, και παραμετρικών μεθόδων που στηρίζονται σε features) μπορούν να κτίσουν οποιαδήποτε γεωμετρία απαιτείται για ανάλυση. Τα περισσότερα συστήματα FEA δίνουν επίσης έμφαση στη δυνατότητα που έχουν να εισάγουν τη γεωμετρία, είτε μέσω τυποποιήσεων όπως το IGES ή απευθείας από συγκεκριμένα συστήματα CAD. Ωστόσο, η απευθείας χρήση δεν είναι πάντα άμεσα εφαρμόσιμη. Το μοντέλο μπορεί να φαίνεται στο μάτι ότι είναι τέλειο αλλά μπορεί στην πραγματικότητα να έχει σφάλματα που αποκαλύπτονται στο σύστημα FEA, κυρίως κατά την διαδικασία γένεσης πλέγματος. Μερικά συστήματα προσφέρουν λειτουργίες που μπορούν να «καθαρίσουν» την εισαγόμενη γεωμετρία. Επιπλέον, ακόμη και αν η γεωμετρία CAD δεν περιέχει σφάλματα, η ανάλυση δεν απαιτεί όλες τις λεπτομέρειές του, οπότε μερικές από αυτές (π.χ. ένα fillet) θα μπορούσαν να απαλειφθούν. Μερικά συστήματα διαθέτουν τέτοιες αυτόματες δυνατότητες απενεργοποίησης γεωμετρικών οντοτήτων.

Το επόμενο στάδιο είναι η δημιουργία πλέγματος και κατανομής κόμβων. Όταν σε κάθε πλέγμα αποδίδονται κόμβοι, τότε αυτό μετατρέπεται σε πεπερασμένο στοιχείο. Η γένεση πλέγματος είναι το πλέον σημαντικό και δύσκολο στάδιο της μοντελοποίησης πεπερασμένων στοιχείων. Για τη διευκόλυνση αυτού του σταδίου, σήμερα όλα τα συστήματα προσφέρουν δυνατότητες αυτόματης γένεσης πλέγματος. Η τυπική προσέγγιση είναι να προσφέρουν αυτόματο πλέγμα τετραεδρικών στοιχείων για στερεή γεωμετρία και τετραπλευρικά ή τριγωνικά στοιχεία για επιφάνεια στον τρισδιάστατο χώρο (κελύφη, επίπεδη εντακτική ή επίπεδη παραμορφωσιακή κατάσταση). Πολλά συστήματα επιτρέπουν στους χρήστες να επέμβουν στις παραμέτρους αυτόματης γένεσης πλέγματος όπως η πυκνότητα πλέγματος. Αυτές επιπλέον επιτρέπουν τοπική επέμβαση σε κρίσιμες περιοχές. Πολλά συστήματα επιτρέπουν τη διασύνδεση πλέγματος με τη γεωμετρία έτσι ώστε κάθε αλλαγή αυτής να αντανakλάται αυτόματα στο πλέγμα.

Τα διάφορα στοιχεία που υποστηρίζονται από ένα σύστημα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων αποτελούν τη λεγόμενη βιβλιοθήκη στοιχείων (element library). Όσο πιο μεγάλο το είδος των στοιχείων τόσο περισσότερα είδη προβλημάτων μπορούν να επιλυθούν. Το Σχήμα 4.1 δείχνει τυπικά πεπερασμένα στοιχεία που υποστηρίζονται από τους περισσότερους κώδικες. Να σημειωθεί ότι το ίδιο πλέγμα μπορεί να αντιστοιχεί σε διαφορετικά πεπερασμένα στοιχεία ανάλογα με τον αριθμό κόμβων που αποδίδονται σε αυτό. Τέλος, οι ζώνες στις οποίες αναμένεται απότομη μεταβολή στη συμπεριφορά των προς επίλυση αγνώστων (όπως συγκέντρωση τάσεων γύρω από οπές) πρέπει να διακριτοποιηθούν από στοιχεία μεγαλύτερης πυκνότητας πλέγματος από εκείνες που εμφανίζουν προοδευτική μεταβολή.



Σχήμα 4.1: Τύποι πεπερασμένων στοιχείων για (a) μονοδιάστατα, (b) δισδιάστατα και (c) τρισδιάστατα προβλήματα

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

Αφού επιλεγεί η διάταξη των στοιχείων, καθορίζεται ο τύπος της ανάλυσης (π.χ., στατική ή δυναμική, γραμμική ή μη-γραμμική, επίπεδη εντατική κατάσταση, και επίπεδη παραμορφωσιακή κατάσταση). Επίσης, οι άγνωστοι ή αλλιώς οι βαθμοί ελευθερίας συσχετίζονται με τους κόμβους. Οι άγνωστοι περιέχουν μετατοπίσεις, περιστροφές, θερμοκρασία, ροή θερμότητας, κ.ο.κ. Κατόπιν καθορίζονται οι οριακές συνθήκες. Οριακές συνθήκες όπως μετατοπίσεις, δυνάμεις, και θερμοκρασίες συνήθως είναι γνωστές για το συνεχές τμήμα του συνόρου του αντικειμένου. Αυτές οι οριακές συνθήκες πρέπει να εκφραστούν σαν ένα σύνολο τιμών μετατοπίσεων, δυνάμεων, ή θερμοκρασιών σε συγκεκριμένους κόμβους των πεπερασμένων στοιχείων. Ωστόσο, μερικές φορές τα πεπερασμένα στοιχεία πρέπει να γεννηθούν χωρίς να έχουν οριακές συνθήκες. Εάν πρόκειται να εισαχθούν σημειακά φορτία, πρέπει να δημιουργηθούν κόμβοι στα αντίστοιχα σημεία εφαρμογής τους. Τα περισσότερα συστήματα που είναι συνδεδεμένα με CAD επιτρέπουν στο χρήστη να ορίσει τις οριακές συνθήκες στη γεωμετρία CAD, και σε αυτή την περίπτωση οι οριακές συνθήκες μετατρέπονται σε ισοδύναμες οριακές συνθήκες στους κόμβους του πλέγματος από το ίδιο το σύστημα. Οι περισσότεροι μοντελοποιητές πεπερασμένων στοιχείων επίσης παρέχουν έναν αριθμό τρόπων εύκολου καθορισμού των

φορτίσεων και των οριακών συνθηκών για το χειρισμό ευρείας κλίμακας προβλημάτων και ρεαλιστικών συνθηκών.

Σε κάθε πεπερασμένο στοιχείο πρέπει επίσης να αποδοθούν ιδιότητες υλικού. Αυτές οι ιδιότητες είναι τυπικά το μέτρο ελαστικότητας του Young, και ο λόγος του Poisson (για ελαστικές κατασκευές). Το πάχος στοιχείων κελύφους και πλακών διαχειρίζεται περισσότερο σαν ιδιότητα του υλικού παρά σαν γεωμετρική ιδιότητα για την αποφυγή επίλυσης του προβλήματος στις τρεις διαστάσεις. Άλλες ιδιότητες υλικών περιλαμβάνουν θερμικές ιδιότητες (ειδική θερμότητα, συντελεστής αγωγιμότητας, λανθάνουσα θερμότητα, κλπ), ιξωδοελαστικότητα, κλπ, για άλλου τύπου προβλήματα. Γίνεται μόνο μια απλή παραδοχή: σε διαφορετικές περιοχές στοιχείων αποδίδονται διαφορετικές ιδιότητες υλικών. Αυτό λ.χ. δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να αναλύσει ένα αντικείμενο κατασκευασμένο από σύνθετο υλικό. Ένα κρίσιμο ζήτημα στην ανάλυση σύνθετων υλικών είναι η διαχείριση της διεπιφάνειας μεταξύ των στρώσεων προκειμένου να υπολογισθεί η αποκόλληση (delamination).

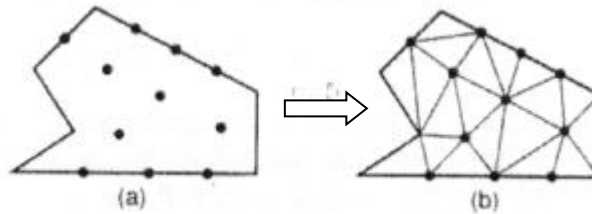
Από τη στιγμή που ορισθεί το μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων επιλέγοντας όλες τις παραμέτρους του πλέγματος, το μοντέλο εισάγεται στον κώδικα που εκτελεί την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. Μετά την αριθμητική επίλυση, τα αποτελέσματα απεικονίζονται σε ένα στάδιο που παραδοσιακά ονομάζεται μετα-επεξεργαστής (post-processor). Τα περισσότερα πακέτα προσφέρουν ποικίλους τρόπους καταλογοποίησης, εκτίμησης και απεικόνισης των αποτελεσμάτων, τα οποία τυπικά περιλαμβάνουν τάσεις, παραμορφώσεις, και παραμορφωμένο σχήμα της κατασκευής. Ο παραδοσιακός τρόπος είναι υπό μορφή ζωνών «ισοτασικών» επιφανειών κυρίως με χρήση χρωματικής κλίμακας. Στην περίπτωση δυναμικής ανάλυσης όλα τα πακέτα διαθέτουν animation, τόσο για την εποπτεία των ιδιόμορφων ταλάντωσης όσον και για την προσφερόμενη χρονική ολοκλήρωση που είναι το μοναδικό εργαλείο στην περίπτωση μη-γραμμικών αναλύσεων. Επίσης, πολλά συστήματα διαθέτουν τη δυνατότητα εξαγωγής αποτελεσμάτων σε μορφή που μπορούν να αξιοποιηθούν περαιτέρω, σαν κείμενα, παρουσιάσεις, videos, e-mail, ή αποστολή στο διαδίκτυο.

4.4.2 ΑΥΤΟΜΑΤΗ ΓΕΝΕΣΗ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ

Η γένεση πλέγματος συνεπάγεται τη δημιουργία κομβικών συντεταγμένων και στοιχείων. Περιλαμβάνει επίσης την αυτόματη αρίθμηση των κόμβων και στοιχείων βασισμένων στην ελάχιστη αλληλεπίδραση με τον χρήστη. Έτσι, υποτίθεται ότι οι μέθοδοι αυτόματης γένεσης πλέγματος απαιτούν μόνο το γεωμετρικό μοντέλο (γεωμετρία και τοπολογία) του προς διακριτοποίηση αντικειμένου, τα χαρακτηριστικά του πλέγματος όπως πυκνότητα πλέγματος και τύπος στοιχείου, και τις οριακές συνθήκες, περιλαμβάνοντας σαν είσοδο συνθήκες φόρτισης. Άλλες μέθοδοι που απαιτούν πρόσθετη είσοδο, όπως υποδιαίρεση του αντικειμένου σε υποχωρία ή υποπεριοχές, ταξινομούνται σαν ημιαυτόματες μέθοδοι. Εν συντομία, εισάγουμε τις μεθόδους γένεσης πλέγματος με βάση την ταξινόμηση που πρότεινε ο Ho-Le (1988).

- **Μέθοδος Σύνδεσης Κόμβων (N.C.A.)**

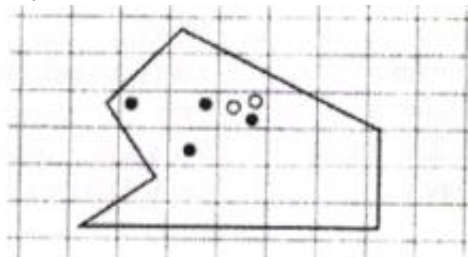
Η μέθοδος σύνδεσης κόμβων (node connection approach) προκειμένου να παράγουν πλέγμα είναι πολύ δημοφιλής διότι είναι πολύ απλή στη σύλληψη της. Οι δύο κύριες φάσεις αυτής της προσέγγισης είναι (i) η γένεση κόμβων που δείχνονται στο Σχήμα 4.2 (a), και (ii) η γένεση στοιχείων στο Σχήμα 4.2 (b).



Σχήμα 4.2: Μέθοδος σύνδεσης κόμβων

Γένεση κόμβων: Δημοσιευμένα έργα περιλαμβάνουν τα ακόλουθα.

- **Μέθοδος του Cavendish** (1974). Σε αυτή τη μέθοδο, εισάγονται αρχικά κόμβοι στο σύνορο του αντικειμένου με το χέρι του χρήστη (manually). Κατόπιν οι εσωτερικοί κόμβοι γεννώνται αυτόματα έτσι ώστε να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις πυκνότητας πλέγματος. Το αντικείμενο υποδιαιρείται σε ένα πλήθος ζωνών διαφορετικών επιθυμητών μεγεθών στοιχείων. Στη ζώνη i , υπερτίθεται ένα τετραγωνικό grid βήματος $r(i)$. Το Σχήμα 4.3 δείχνει ένα υπερτιθέμενο μονό grid, που βασίζεται στην παραδοχή ότι είναι επιθυμητή η ομοιόμορφη πυκνότητα πλέγματος. Για κάθε τετράγωνο του grid, γεννιέται με τρόπο τυχαίο ένας εσωτερικός κόμβος. Αυτό μπορεί να γίνει παράγοντας τυχαίους αριθμούς μεταξύ 0 και 1 δύο φορές, μια για την κατεύθυνση x και μια για την κατεύθυνση y , και υπολογίζοντας την ισοδύναμη θέση των τιμών x και y . Εάν ο παραγόμενος κόμβος πέφτει μέσα στο αντικείμενο και έχει απόσταση από το σύνορο μεγαλύτερη από το $r(i)$, αλλά και από τους προηγούμενα παραγόμενους κόμβους, τότε γίνεται αποδεκτός. Εάν όχι, ένας άλλος κόμβος παράγεται τυχαία και ελέγχεται. Εάν δεν καταστεί δυνατόν να βρεθεί ένας αποδεκτός κόμβος μετά από ένα συγκεκριμένο αριθμό προσπαθειών (ας πούμε, πέντε), τότε το εν λόγω τετράγωνο παραλείπεται και θεωρείται το επόμενο. Η μέθοδος αυτή είναι επεκτάσιμη και στις 3 διαστάσεις, με τη διαφορά ότι χρησιμοποιείται τρισδιάστατο grid.
- **Μέθοδος του Shimada** (1992). Αυτή η μέθοδος γεμίζει το εσωτερικό του προς διακριτοποίηση αντικειμένου με «φουσαλίδες» όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.3, και λαμβάνει τα κέντρα τους σαν κόμβους. Το μέγεθος κάθε φουσαλίδας προσδιορίζεται από την κατανομή θερμοκρασίας που αντιστοιχεί στην επιθυμητή πυκνότητα πλέγματος. Κατόπιν οι θέσεις των φουσαλίδων προσδιορίζονται από την ικανοποίηση της ισορροπίας των εσωτερικών δυνάμεων μεταξύ αυτών.



Σχήμα 4.3: Μέθοδος γένεσης κόμβων κατά Cavendish

Γένεση στοιχείων: Σε αυτή τη δεύτερη φάση, κόμβοι που γεννήθηκαν στην προηγούμενη φάση συνδέονται για να αποτελέσουν στοιχεία έτσι ώστε να μην επικαλύπτονται και να καλύπτεται ολόκληρο το χωρίο. Αναφερόμαστε στη μέθοδο του Lee διότι αυτή μπορεί να

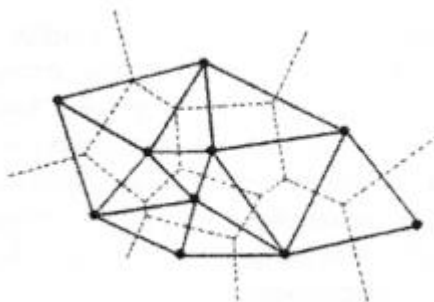
οδηγήσει σε τετραπλευρικά στοιχεία. Ωστόσο, η μέθοδος τριγωνοποίησης του Delaunay είναι η πλέον διαδεδομένη μέθοδος σύνδεσης κόμβων. Στις επεξηγήσεις που ακολουθούν, θεωρούμε στοιχεία που έχουν κόμβους μόνο στις κορυφές τους. Εάν επιθυμούμε στοιχεία με ενδιάμεσους κόμβους, τότε αυτοί προκύπτουν εύκολα από τους γωνιακούς.

- **Μέθοδος Lee** (1983). Σε αυτή τη μέθοδο, επί του αντικειμένου υπερτίθεται ένα τετραγωνικό πλέγμα υποβάθρου (grid) του οποίου το βήμα είναι ίσο προς το επιθυμητό μέγεθος στοιχείων. Κατόπιν οι κόμβοι που παρήχθησαν στην προηγούμενη φάση συσχετίζονται με τα κελιά του πλέγματος υποβάθρου. Τα κελιά και οι αντίστοιχοι κόμβοι επισκέπτονται στήλη-προς-στήλη από αριστερά προς τα δεξιά και, μέσα στην ίδια στήλη, από τα κάτω προς τα πάνω. Μέσα σε ένα κελί, οι κόμβοι διατάσσονται κατά σειρά αύξουσας τετμημένης x . Κόμβοι με την ίδια τετμημένη x , διατάσσονται κατά σειρά αύξουσας τεταγμένης y . Οι κόμβοι επισκέπτονται κατά σειρά και, για κάθε κόμβο, οι γειτονικοί κόμβοι βρίσκονται έτσι ώστε να διαμορφώνουν τους κόμβους ενός καλοσχηματισμένου τετραπλεύρου. Στην περίπτωση αδυναμίας σχηματισμού καλώς ορισμένου τετραπλεύρου, δημιουργείται αντίστοιχο τριγωνικό στοιχείο.
- **Μέθοδος τριγωνοποίησης Delaunay**. Αυτή είναι η πλέον διαδεδομένη μέθοδος γένεσης τριγώνων που συνδέει δεδομένους κόμβους διότι μεγιστοποιεί το άθροισμα των μικρότερων γωνιών σε όλα τα τρίγωνα που δημιουργούνται. Έτσι, αποφεύγονται τα λεπτά τρίγωνα.

Μια τυπική τριγωνοποίηση Delaunay ξεκινάει από ένα διάγραμμα Voronoi ή Dirichlet tessellation. Ένα διάγραμμα Voronoi ενός συνόλου N σημείων, $P_i (i=1,2,\dots,N)$, αποτελείται από N πολύγωνα (πολύεδρα στις 3 διαστάσεις), V_i καθένα των οποίων έχει κέντρο το σημείο P_i έτσι ώστε ο γεωμετρικός τόπος των σημείων του επιπέδου (του χώρου στις 3 διαστάσεις) που είναι πλησιέστερα στον κόμβο i , να περιλαμβάνονται στον V_i . Μαθηματικά, το V_i (επιφάνεια ή όγκος) εκφράζεται ως:

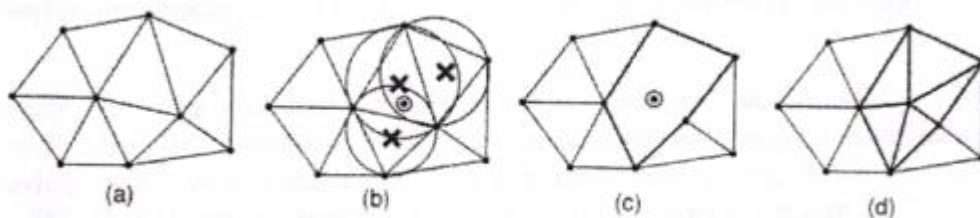
$$V_i = \{x: |x - P_i| < |x - P_j| \text{ για όλα τα } j \neq i\}$$

όπου $|\dots|$ συμβολίζει το μέτρο του διανύσματος εντός του και κάθε V_i , είναι ένα κυρτό πολύγωνο (πολύεδρο) που περιβάλλεται από γραμμές (επίπεδα) τέμνοντα κάθετα τις γραμμές μεταξύ P_i , και των γειτονικών του κόμβων. Αυτή η διαίρεση του (δισδιάστατου ή τρισδιάστατου) χώρου από ένα σύνολο V_i καλείται Dirichlet tessellation. Κάθε πολύγωνο (πολύεδρο) Voronoi έχει έναν κόμβο που συνδέεται με αυτό. Μετά τη γένεση του διαγράμματος Voronoi, μπορούμε να δημιουργήσουμε τριγωνικά (τετραεδρικά, στις 3 διαστάσεις) στοιχεία συνδέοντας τα σημεία που σχετίζονται με γειτονικά πολύγωνα (πολύεδρα) Voronoi. Το Σχήμα 4.4 δείχνει το διάγραμμα Voronoi και την αντιστοιχούσα τριγωνοποίηση Delaunay για 10 κόμβους στη δισδιάστατη περίπτωση.



Σχήμα 4.4: Διάγραμμα Voronoi και η αντιστοιχούσα τριγωνοποίηση Delaunay

Η τριγωνοποίηση Delaunay μπορεί να γεννηθεί απευθείας από το δεδομένο σύνολο σημείων (κόμβων) χωρίς να είναι απαραίτητη πρώτα να έχει γίνει το διάγραμμα Voronoi, χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο του Watson για τη δισδιάστατη τριγωνοποίηση. Σε αυτόν τον αλγόριθμο, ένα τρίγωνο διαμορφώνεται από τρία μη-συνευθειακά σημεία όταν ένας κύκλος που περνάει από αυτά, και ονομάζεται περιγεγραμμένος του τριγώνου, δεν περιλαμβάνει καθόλου άλλα σημεία. Ο αλγόριθμος υλοποιείται ως ακολούθως. Στην αρχή διαμορφώνεται ένα τρίγωνο T_0 , που περιέχει όλους τους κόμβους· μπορεί να πρέπει να εισαχθούν επιπλέον σημεία στις κορυφές του T_0 . Τότε εισάγουμε κόμβους από ένα δεδομένο σύνολο, έναν προς ένα, και βρίσκουμε τα τρίγωνα έκαστο των οποίων ο περιγεγραμμένος κύκλος περικλείει τον κόμβο. Αυτά τα πολύγωνα, που ονομάζονται τεμνόμενα πολύγωνα (intersection polygons), απαλείφονται. Στο Σχήμα 4.5 (b), τα τεμνόμενα πολυώνυμα συμβολίζονται με \times όταν ένας νέος κόμβος \odot εισάγεται στα υπάρχοντα τρίγωνα, όπως στο Σχήμα 4.5 (a), που γεννώνται από τους ήδη εισαχθέντες κόμβους. Το Σχήμα 4.5 (c) δείχνει το αποτέλεσμα μετά την απαλοιφή των τεμνόμενων αυτών πολυγώνων. Κατόπιν, νέα τρίγωνα διαμορφώνονται συνδέοντας τον νέο κόμβο με τις κορυφές των τεμνόμενων επιπέδων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.5 (d). Τελικά, τα τρίγωνα που είναι συνδεδεμένα με τα επιπλέον σημεία που διαμορφώνουν το T_0 , απαλείφονται. Αυτή η διαδικασία μπορεί εύκολα να επεκταθεί για τρισδιάστατη γένεση πλεγμάτων στοιχείων χρησιμοποιώντας περιγεγραμμένες σφαίρες από 4 κόμβους αντί περιγεγραμμένους κύκλους από 3 κόμβους. Ωστόσο, η τρισδιάστατη τριγωνοποίηση Delaunay μπορεί να περιέχει πολύ λεπτά τετράεδρα, ενώ η δισδιάστατη τριγωνοποίηση Delaunay είναι, με κάποια έννοια, η βέλτιστη τριγωνοποίηση για ένα δεδομένο σύνολο σημείων.

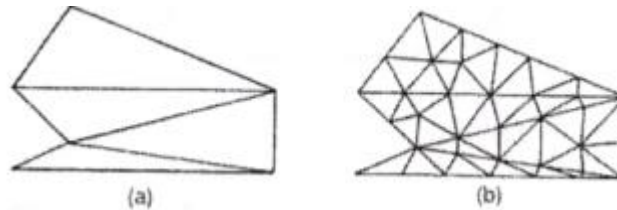


Σχήμα 4.5: Αλγόριθμος τριγωνοποίησης του Watson

- **Μέθοδος Αποσύζευξης Τοπολογίας (T.D.A.)**

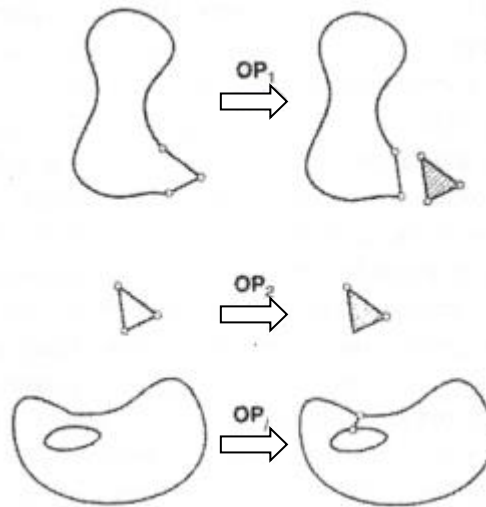
Η δισδιάστατη μέθοδος αποσύζευξης τοπολογίας (topology decomposition approach) αναπτύχθηκε από τον Wordenweber (1984). Σύμφωνα με αυτήν την προσέγγιση, το

αντικείμενο προσεγγίζεται από ένα πολύγωνο και το τελευταίο κατακερματίζεται σε ένα σύνολο μεγάλων στοιχείων συνδέοντας τις κορυφές προς διαμόρφωση τριγώνων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.6 (a). Κατόπιν, αυτά τα μεγάλα στοιχεία εκλεπτύνονται ώστε να ικανοποιήσουν την απαιτούμενη πυκνότητα κατανομής πλέγματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.6 (b). Το μέγεθος των στοιχείων και το σχήμα τους δεν είναι δυνατόν να ελεγχθούν εξωτερικά διότι τα μεγάλα στοιχεία προσδιορίζονται μόνο τους από την αρχική τοπολογία του αντικείμενου, ιδιαίτερα από την κατανομή των κορυφών. Οι κορυφές που ανήκουν στο ίδιο μεγάλο στοιχείο μπορούν να προσδιορισθούν από τη μέθοδο τριγωνοποίησης Delaunay που περιγράφηκε σε παραπάνω ενότητα.



Σχήμα 4.6: Παράδειγμα μεθόδου τοπολογικής αποσύζευξης

Κατά τη διαδικασία γένεσης ενός συνόλου τριγώνων από τις κορυφές, ο Wordenweber εισήγαγε και εφάρμοσε επίσης τους λεγόμενους τελεστές Euler με τον τρόπο που αυτοί χρησιμοποιούνται στη μοντελοποίηση όγκων. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.7, πρώτος εφαρμόζεται ο τελεστής Wordenweber (1984) OP_1 για να απαλείψει τις τρύπες στο αντικείμενο. Κατόπιν διαμορφώνονται τα τρίγωνα από τις κορυφές και αποχωρίζονται από το αντικείμενο εφαρμόζοντας επαναληπτικά τον τελεστή OP_1 μέχρις ότου απομείνουν μόνον 3 κορυφές. Τελικά, εφαρμόζεται ο τελεστής OP_2 για να διαμορφώσει το τελευταίο τρίγωνο.

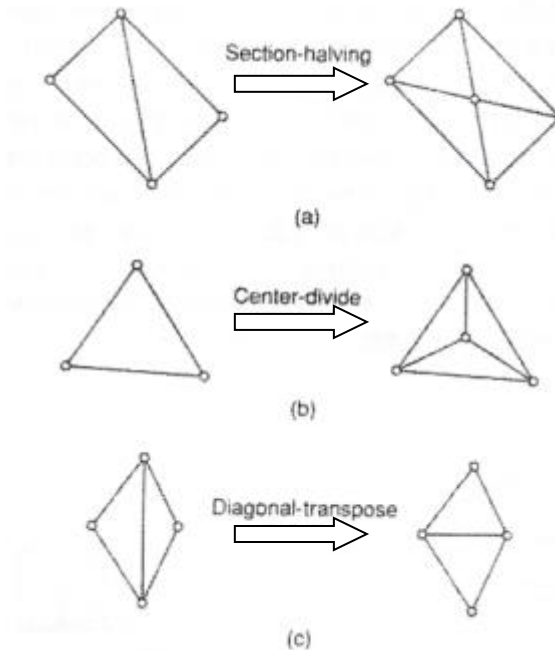


Σχήμα 4.7: Τελεστές που χρησιμοποιούνται για να διαμορφώσουν τρίγωνα

Μόλις το αντικείμενο μετατραπεί σε ένα σύνολο μεγάλων τριγώνων, κάθε τρίγωνο εκλεπτύνεται έτσι ώστε να υπακούει στην απαιτούμενη πυκνότητα πλέγματος. Για την εκλέπτυνση μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι ακόλουθες τρεις μέθοδοι που δείχνονται στο Σχήμα 4.8. Το Σχήμα 4.8 (a) δείχνει μια μέθοδο που εφαρμόζεται όταν δύο λεπτά τρίγωνα συναντώνται κατά μήκος της μακρύτερης πλευράς τους. Δηλαδή, προστίθεται ένας κόμβος στην κοινή ακμή, και τα γειτονικά στοιχεία υποδιαιρούνται συνδέοντας τους κόμβους τους με τον νέο κόμβο. Σχήμα 4.8 (b), ένα μεγάλο τριγωνικό στοιχείο υποδιαιρείται προσθέτοντας ένα νέο κόμβο στο κέντρο βάρους του. Όταν το υποδιαιρέσουμε με τους τρόπους που

περιγράψαμε παραπάνω, μπορεί να συναντήσουμε λεπτά τρίγωνα όπως φαίνονται στο Σχήμα 4.8 (c). Αυτά τα τρίγωνα είναι ήδη αρκετά μικρά για τη δοθείσα πυκνότητα πλέγματος.

Σε αυτή την περίπτωση, μπορούμε να βελτιώσουμε την ποιότητα του πλέγματος στρίβοντας τη διαγώνιο του τετραπλεύρου που διαμορφώνεται από τις κορυφές των δύο αρχικών τριγώνων. Παρατηρείστε ότι το αποτέλεσμα της ανάλυσης των πεπερασμένων στοιχείων μπορεί να μην είναι αρκετά ακριβές εάν υπάρχουν πάρα πολλά λεπτά στοιχεία.



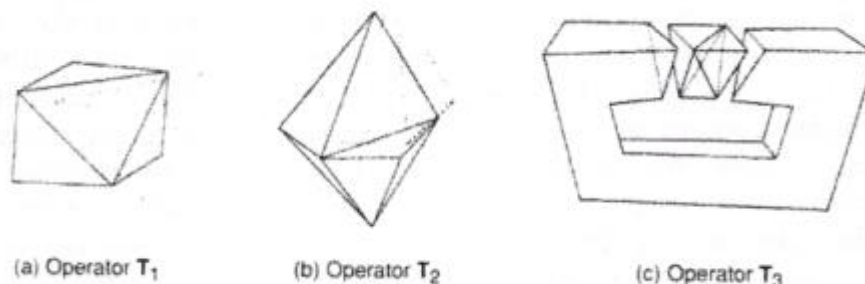
Σχήμα 4.8: Μέθοδοι εκλέπτυνσης τριγώνων

Η μέθοδος της τοπολογικής αποσύζευξης μπορεί να επεκταθεί στην τρισδιάστατη γένεση πλέγματος. Το αντικείμενο προσεγγίζεται από ένα πολύεδρο, και το πολύεδρο κατατέμνεται σε τετραεδρικά στοιχεία συνδέοντας τις κορυφές τους. Κατόπιν, τα τετραεδρικά στοιχεία εκλεπτύνονται με υποδιαίρεση. Οι Woo και Thomasma (1984) πρότειναν τελεστές παραπλήσιους με αυτούς που πρότεινε ο Wordenweber για να διευκολύνει τον σχηματισμό των τετραεδρικών στοιχείων. Αυτοί οι τελεστές, που δείχνονται στο Σχήμα 4.9, χρησιμοποιούνται για τον σχηματισμό τετραέδρων ως εξής:

Πρώτα, εφαρμόζεται ο τελεστής T_3 για να απαλείψει τις οπές του αντικειμένου αποτέμνοντας το κατάλληλο τμήμα του έτσι ώστε η οπή να αποκαλυφθεί, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.9 (c). Σημειώστε ότι σε αυτό το στάδιο τρία τετράεδρα διαμορφώνονται σαν αποτέλεσμα παράπλευρης διαδικασίας.

Κατόπιν, οι κυρτές κορυφές στις οποίες όπου συναντώνται τρεις ακμές, που καλούνται convex trivalent vertices (κορυφές), διαχωρίζονται από το αντικείμενο εφαρμόζοντας τον τελεστή T_1 , όπως εικονίζεται στο Σχήμα 4.9 (a). Αυτός ο τελεστής εφαρμόζεται επαναληπτικά μέχρις ότου δεν υπάρξει καμία κυρτή trivalent κορυφή. Εάν όλες οι κορυφές που απομένουν δεν είναι convex trivalent, τότε ο τελεστής T_2 εφαρμόζεται για να σκάψει ένα τετράεδρο, όπως εικονίζεται στο Σχήμα 4.9 (b). Αυτός ο τελεστής παρέχει τις νέες convex trivalent κορυφές και έτσι ο T_1 εφαρμόζεται ξανά.

Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται μέχρις ότου το αντικείμενο περιορισθεί σε ένα μονό τετράεδρο.

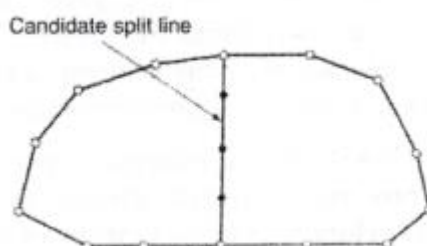


Σχήμα 4.9: Τελεστές αποσύζευξης γεωμετρίας στις 3 διαστάσεις

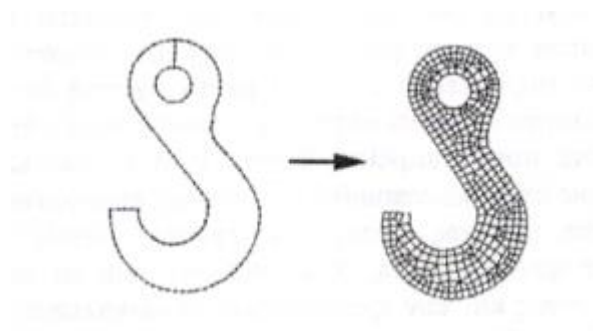
- **Μέθοδος Αποσύζευξης Γεωμετρίας (G.D.A.)**

Οι μέθοδοι αποσύζευξης γεωμετρίας (geometry decomposition approaches) εμπίπτουν σε δύο κατηγορίες: σε αυτές που βασίζονται σε αναδρομές και αυτές που βασίζονται σε επαναλήψεις. Στη συνέχεια επεξηγούμε μόνο τη μέθοδο αναδρομής καθώς αυτή είναι επεκτάσιμη στις τρεις διαστάσεις.

Η μέθοδος αναδρομικής αποσύζευξης (recursive geometry decomposition method) γεννά τριγωνικά και τετρακομβικά στοιχεία στις 2 διαστάσεις με τον ακόλουθο τρόπο. Πρώτα, το αρχικό αντικείμενο διαιρείται σε κυρτά μέρη είτε με το χέρι ή αυτόματα. Αυτόματη αποσύζευξη αντικειμένου σε κυρτά τμήματα περιγράφεται από τον Bykat (1976). Για κάθε κυρτό τμήμα, εισάγονται κόμβοι στο σύνορο του έτσι ώστε να ικανοποιήσει την επιθυμητή πυκνότητα πλέγματος. Κατόπιν, κάθε κυρτό τμήμα υποδιαιρείται προσεγγιστικά στο μέσον του «μακρύτερου άξονα», όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.10. Στη συνέχεια, εισάγονται περισσότεροι κόμβοι κατά μήκος της διαχωριστικής γραμμής σύμφωνα με τις απαιτήσεις της πυκνότητας πλέγματος, και τα δύο ήμισυ υποδιαιρούνται επαναληπτικά μέχρις ότου γίνουν τρίγωνα ή τετράπλευρα. Μερικές μέθοδοι επαναλαμβάνουν την υποδιαίρεση μέχρις ότου μέχρις ότου καταλήξει σε εξάγωνα ή οκτάγωνα και παράγουν τριγωνικά και τετραπλευρικά στοιχεία από αυτά σύμφωνα με προ-αποθηκευμένα πρότυπα. Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατόν να πάρουμε περισσότερα τριγωνικά ή τετραπλευρικά στοιχεία. Το Σχήμα 4.11 δείχνει ένα παράδειγμα γένεσης πλέγματος με χρήση μιας επαναληπτικής μεθόδου.



Σχήμα 4.10: Υποδιαίρεση με διαχωριστική γραμμή (split line)



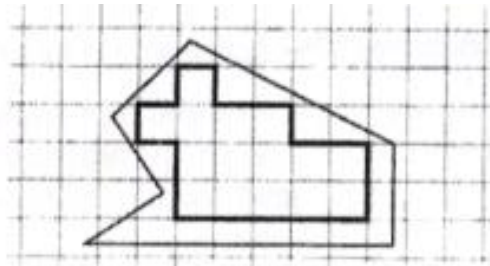
Σχήμα 4.11: Παράδειγμα γένεσης πλέγματος με χρήση μιας επαναληπτικής μεθόδου

Η βασική μέθοδος που περιγράφηκε παραπάνω μπορεί να επεκταθεί και στη γένεση τρισδιάστατου πλέγματος. Σε αυτή την περίπτωση το αντικείμενο υποδιαιρείται σε δύο υπο-όγκους μέσω ενός διαχωριστικού επιπέδου, μέχρις ότου όλοι οι όγκοι περιορισθούν σε τετράεδρα. Σε αντίθεση με τη δισδιάστατη περίπτωση όπου μπορούν να παραχθούν τετράπλευρα, δεν είναι δυνατόν να γεννηθούν τετράεδρα με απευθείας τρόπο. Ωστόσο, κάθε τετράεδρο μπορεί να υποδιαιρεθεί σε 4 εξάεδρα, ή στοιχεία brick, εάν είναι επιθυμητό.

- **Μέθοδος Βάσει Πλέγματος (G.B.A.)**

Η μέθοδος βάσει πλέγματος (grid-based approach) προκύπτει από την παρατήρηση ότι ένα grid μοιάζει με ένα πλέγμα και ότι αυτό μπορεί να μετασχηματισθεί στο τελευταίο υπό την προϋπόθεση ότι τα κελιά του grid κατά μήκος του συνόρου του αντικειμένου μπορούν να μετασχηματιστούν σε στοιχεία.

Η μέθοδος των Thacker, Gonzalez και Putland (1980) είναι ίσως η πρώτη σχετική δημοσίευση που έκανε χρήση της μεθόδου βάσει grid. Σε αυτή τη μέθοδο ένα αντικείμενο αρχικά επικαλύπτεται από ένα τριγωνικό grid και τα σημεία του grid που πέφτουν εκτός αντικειμένου εξαλείφονται, αφήνοντας ένα σύνορο μορφής zigzag. Τα σημεία του grid που βρίσκονται πάνω στο zigzag σύνορο μετακινούνται προς το σύνορο του αντικειμένου ώστε να αποτελέσουν το τελικό πλέγμα. Οι διαφοροποιήσεις αυτής έγκειται στον τρόπο διαχείρισης του συνόρου. Ο Kikuchi (1986) επέκτεινε τη μέθοδο έτσι ώστε εκτός από κυρίως τετράπλευρα να περιλαμβάνει ακόμη και μερικά τρίγωνα, χρησιμοποιώντας ορθογωνικό grid, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.12. Ένα πρόβλημα και των δύο αυτών μεθόδων είναι ότι μικρά γεωμετρικά χαρακτηριστικά, με πολύ μικρές ακμές σε σχέση με το βήμα του grid, χάνονται. Σε άλλες μεθόδους τα σημεία του zigzag συνόρου δεν μετακινούνται στο σύνορο του αντικειμένου. Αντ' αυτού, δημιουργούνται τριγωνικά στοιχεία στην περιοχή μεταξύ zigzag και συνόρου αντικειμένου μέσω ενός αλγορίθμου τριγωνοποίησης.



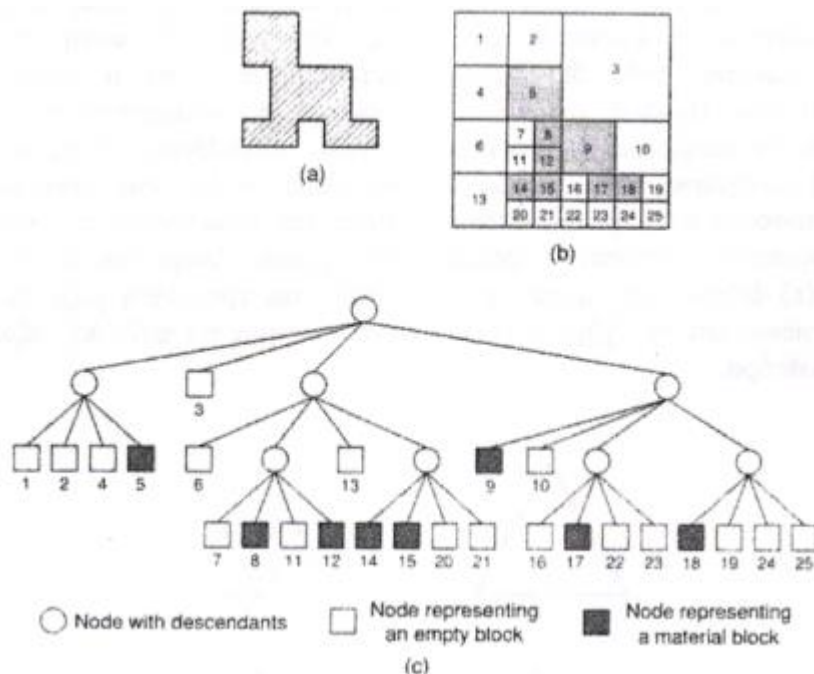
Σχήμα 4.12: Χρήση ορθογωνικού grid για τη μέθοδο “grid-based”

Οι Yerry και Shephard (1983) χρησιμοποίησαν μια δενδρική (quadree) αναπαράσταση του αντικειμένου για τη γένεση πλεγμάτων. Ένα quadree είναι το δισδιάστατο ανάλογο του octree. Παριστά ένα δισδιάστατο αντικείμενο, σαν αυτό που φαίνεται στο Σχήμα 4.13 (a), σαν ένα σύνολο τετραγώνων έκαστο διαφορετικού μεγέθους με επαναληπτική υποδιαίρεση της root square που περικλείει το αντικείμενο. Το Σχήμα 4.13 (b) δείχνει τη διαδικασία υποδιαίρεσης του αντικειμένου, και το Σχήμα 4.13 (c) δείχνει την αναπαράσταση quadree αυτής της υποδιαίρεσης. Τα πλέγματα γεννώνται ως εξής:

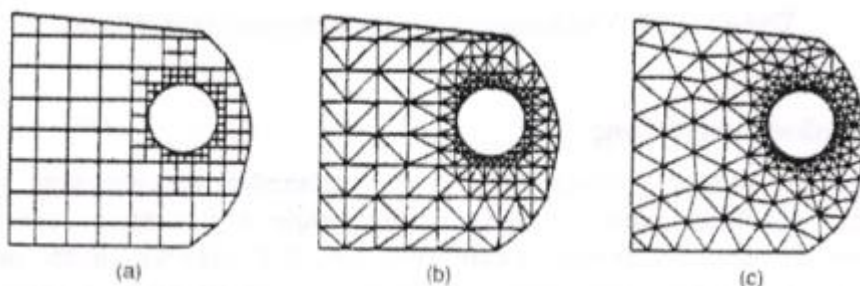
Βήμα 1: Δημιουργείται ένα root square που περικλείει το αντικείμενο και υποδιαιρείται σε τέσσερα τέταρτα (quadrants) υποδιπλασιάζοντας τις πλευρές του. Κατόπιν κάθε τέταρτο ταξινομείται ανάλογα με τη σχετική θέση του ως προς το αντικείμενο. Εάν το τέταρτο δεν είναι ούτε πλήρως εντός αλλά ούτε και πλήρως εκτός του αντικειμένου, τότε αυτό διαιρείται ξανά. Αυτή η διαδικασία υποδιαίρεσης επαναλαμβάνεται μέχρις ότου ικανοποιηθεί η κατανομή πυκνότητας πλέγματος και τα τέταρτα βρεθούν είτε πλήρως εντός (“completely inside”) αντικειμένου ή επικαλύπτονται (“overlapping”). Έτσι, το αντικείμενο που θα παριστάνεται από τη συλλογή των πλήρως εντός και των τροποποιημένων επικαλυπτόμενων τετάρτων θα φαίνεται όπως στο Σχήμα 4.14 (a).

Βήμα 2: Κάθε τροποποιημένο επικαλυπτόμενο τέταρτο διαιρείται μέσα στα τριγωνικά στοιχεία χρησιμοποιώντας το αποθηκευμένο πρότυπο (prestored template) που

βασίζεται στο σχήμα του τετάρτου. Κατόπιν, το «εντελώς εντός» τέταρτο επίσης υποδιαιρείται ώστε να ικανοποιήσει την προσαρμογή του πλέγματος με τα γειτονικά πλέγματα. Δυο γειτονικά στοιχεία ονομάζονται συμβατά (conforming) εάν μοιράζονται μια πλήρη ακμή (μια ολόκληρη έδρα σε 3-D στοιχεία). Το Σχήμα 4.14 (b) δείχνει το αποτέλεσμα της γένεσης πλέγματος.



Σχήμα 4.13: Μέθοδος σύνδεσης κόμβων

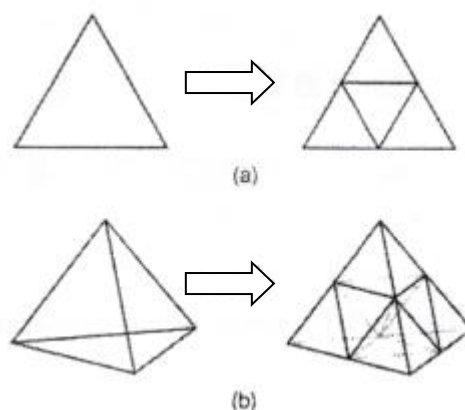


Σχήμα 4.14: Γένεση πλέγματος με χρήση παράστασης quadree

Βήμα 3: Οι κόμβοι των στοιχείων μετακινούνται ελαφρώς (adjustment) έτσι ώστε να βελτιώσουν τα σχήματα των πλεγμάτων. Το Σχήμα 4.14 (c) δείχνει το αποτέλεσμα της εξομάλυνσης του πλέγματος. Η μέθοδος εξομάλυνσης αναφέρεται αργότερα. Αυτή η μέθοδος έχει επεκταθεί και στις 3 διαστάσεις χρησιμοποιώντας κωδικοποίηση octree. Στις τρεις διαστάσεις, τα «επικαλυπτόμενα» όγδοα (octants) τροποποιούνται έτσι ώστε να καταλαμβάνουν μόνον τον εσωτερικό χώρο του αντικειμένου και κατόπιν διασπάζεται σε τετράεδρα όπως τα τροποποιημένα επικαλυπτόμενα τέταρτα διασπώνται σε τρίγωνα στις δύο διαστάσεις. Το τροποποιημένο επικαλυπτόμενο όγδοο πρέπει να διασπασθεί σε τετράεδρα που ικανοποιούν την συμβιβασιμότητα του πλέγματος με τα γειτονικά όγδοα. Θεωρώντας όλες τις ειδικές περιπτώσεις, αυτό

απαιτεί ένα περίπλοκο αλγόριθμο. Πράγματι, ούτε και η διάσπαση του τροποποιημένου τετάρτου στις δύο διαστάσεις είναι εύκολο πρόβλημα.

Οι Jung και Lee (1993) πρότειναν μια νέα μέθοδο, αρχίζοντας από τη τριγωνική ρίζα (τετράεδρη ρίζα στις 3 διαστάσεις) αντί της τετραγωνικής ρίζας (κυβικής ρίζας) για να αποφύγουν τη δυσκολία που μόλις αναφέραμε. Σε αυτή τη μέθοδο, η παράσταση quadree ενός δισδιάστατου αντικειμένου είναι η προσέγγιση του αντικειμένου σαν σύνολο τριγώνων. Παρόμοια, η αναπαράσταση octree ενός τρισδιάστατου αντικειμένου θα ήταν ένα σύνολο τετραέδρων. Έτσι μπορούμε να λάβουμε τα πλέγματα συλλέγοντας τα «εντελώς εντός» και «επικαλυπτόμενα» τρίγωνα (τετράεδρα στις τρεις διαστάσεις) μετά από μετακίνηση των κορυφών των «επικαλυπτόμενων» τριγώνων (τετράεδρα) στο αρχικό σύνορο του αντικειμένου. Το Σχήμα 4.15 (a) δείχνει τον τρόπο με τον οποίο μια τριγωνική ρίζα διασπάται σε τέσσερα τρίγωνα, και το Σχήμα 4.15 (b) δείχνει πως μια τετραεδρική ρίζα διασπάται σε οκτώ τετράεδρα.



Σχήμα 4.15: Υποδιαίρεση του τριγώνου και τετραέδρου

- **Μέθοδος Απεικόνισης**

Η μέθοδος απεικόνισης χρησιμοποιείται στις περισσότερες εμπορικές γεννήτριες πλέγματος. Η μέθοδος αυτή απαιτεί την υποδιαίρεση του προς διακριτοποίηση αντικειμένου σε περιοχές ειδικής τοπολογίας. Στις 2 διαστάσεις, αυτές οι περιοχές έχουν τέσσερις πλευρές· στις τρεις διαστάσεις, αυτές οι περιοχές είναι μορφής «κουτιού» (boxlike). Μέσα σε κάθε περιοχή, το πλέγμα παράγεται αυτόματα με απεικόνιση της περιοχής προς ένα κανονικοποιημένο χωρίο αναφοράς (ένα κανονικό τρίγωνο ή τετράπλευρο στις δύο διαστάσεις και ένα κύβο στις τρεις διαστάσεις), δημιουργώντας διακριτοποίηση στο κανονικοποιημένο χωρίο με βάση την επιθυμητή πυκνότητα πλέγματος, και επαναπεικόνιση του διακριτοποιημένου χωρίου προς την αρχική περιοχή του πραγματικού αντικειμένου. Κατόπιν, το τελικό πλέγμα προκύπτει από συνένωση των περιοχών που διακριτοποιήθηκαν ανεξάρτητα μεταξύ τους. Οι κοινές πλευρές που μοιράζονται σε γειτονικές περιοχές πρέπει να έχουν τον ίδιο αριθμό κόμβων έτσι ώστε να ικανοποιούν το συμβιβαστό του πλέγματος (mesh conformity). Η απαίτηση αυτή μπορεί να επιβληθεί με επέμβαση του χρήστη ή αλγοριθμικά την ώρα που παράγονται τα πλέγματα γειτονικών περιοχών. Πολλές μέθοδοι απεικόνισης μπορούν να εφαρμοσθούν.

- **Βελτίωση Ποιότητας Πλέγματος**

Μερικές μέθοδοι γένεσης πλέγματος, κυρίως εκείνες που βασίζονται στην προσέγγιση κατακερματισμού της τοπολογίας, δεν παράγουν αρχικό πλέγμα επαρκές για την περαιτέρω ανάλυση. Έτσι, πρέπει να ακολουθήσουμε μια πορεία τριών βημάτων ώστε να το βελτιώσουμε:

- Εάν τα στοιχεία που παράγονται δεν είναι του επιθυμητού τύπου, τότε τα υποδιαιρούμε στον επιθυμητό τύπο.
- Εάν τα στοιχεία δεν έχουν μεγέθη συμβατά με την επιθυμητή κατανομή πυκνότητας πλέγματος, τότε τα εκλεπτύνουμε.
- Εάν τα στοιχεία δεν είναι καλοσχηματισμένα, τότε εφαρμόζουμε μια τεχνική εξομάλυνσης (smoothing technique).

4.4.3 ΕΙΔΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Οι δυνατότητες των πακέτων πεπερασμένων στοιχείων είναι πολλές. Εκτός από τις τετριμμένες ελαστικές αναλύσεις, σε πολλά από αυτά τα πακέτα υπάρχουν δυνατότητες επίλυσης ποικίλων άλλων προβλημάτων σε μεγάλο τμήμα των εξισώσεων που διέπουν τα φυσικά φαινόμενα: θερμικά, ακουστικά, ηλεκτρικά, μαγνητικά (δινορεύματα: eddy-current), ηλεκτρομαγνητικά, υδροδυναμικά, ρευστομηχανικά, περιγραφής διάβρωσης υλικών, κλπ. Το σύνολο αυτό των δυνατοτήτων συνήθως αποδίδεται με τον όρο “Multi-Physics”, δηλαδή επίλυση των ποικίλων εξισώσεων της Φυσικής.

- **Καθορισμός του Είδους Ανάλυσης**

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

Η πλέον αρχική επιλογή είναι ο καθορισμός του φυσικού φαινομένου, το οποίο καλείται ο μελετητής να προσομοιώσει. Για παράδειγμα, ελαστική ανάλυση (elastic analysis) ή πρόβλημα δυναμικού (potential problem). Τα προβλήματα δυναμικού αφορούν την επίλυση των εξισώσεων Laplace και Poisson που διέπουν τη μηχανική ατρίβους ρευστού, μετάδοση θερμότητας, κλπ.

Μια δεύτερη επιλογή που καλείται να κάνει ο μελετητής είναι ο καθορισμός του προβλήματος σαν:

Στατικό πρόβλημα (static analysis), δηλαδή μη-εξαρτημένο από το χρόνο, ή *Δυναμικό πρόβλημα* (dynamic analysis), δηλαδή χρονικά εξαρτώμενο. Παραδείγματα είναι η ταλάντωση μιας μηχανής, ο ερπυσμός και η χαλάρωση, η διάδοση ήχου στον αέρα ή σε άλλο μέσον, κλπ.

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

Γραμμικό λέγεται ένα πρόβλημα στο οποίο εάν διπλασιασθεί το μέγεθος των εξωτερικών δράσεων (π.χ. δυνάμεων) τότε διπλασιάζεται το μέγεθος του αποτελέσματος (π.χ. μετατοπίσεων). Τα περισσότερα προβλήματα της πράξης είναι (ή μάλλον θεωρούνται) γραμμικά.

Μη γραμμικό λέγεται ένα πρόβλημα στο οποίο δεν ισχύει η αναλογία που αναφέρθηκε προηγούμενα. Σε «ελαστικά» προβλήματα η μη-γραμμικότητα

μπορεί να οφείλεται στο ελαστοπλαστικό υλικό (material nonlinearity) ή στην μεταβαλλόμενη επαφή μεταξύ δύο ή περισσότερων σωμάτων (geometrical nonlinearity). Και στις δύο αυτές περιπτώσεις, το μητρώο δυσκαμψίας δεν είναι σταθερό αλλά είναι συνάρτηση των μετατοπίσεων. Μη-γραμμικότητες υπάρχουν και σε προβλήματα δυναμικού, π.χ. όταν ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας.

- **Στάδια Ανάλυσης Πεπερασμένων Στοιχείων**

Για τη μοντελοποίηση μιας κατασκευής με πεπερασμένα στοιχεία διακρίνουμε τα ακόλουθα στάδια:

1^ο Στάδιο → Κατασκευή της γεωμετρίας.

2^ο Στάδιο → Επιλογή του είδους των πεπερασμένων στοιχείων και διακριτοποίηση της γεωμετρίας σε πεπερασμένα στοιχεία.

3^ο Στάδιο → Ορισμός των μηχανικών και φυσικών ιδιοτήτων των υλικών (μπορεί να γίνει και σε προηγούμενο στάδιο) και επιβολή των οριακών συνθηκών.

4^ο Στάδιο → Επιλογή του τρόπου επίλυσης (γραμμικό – μη γραμμικό μεταβατικό – υπολογισμός ιδιοσυχνοτήτων κ.α.) και επίλυση.

5^ο Στάδιο → Ανάγνωση των αποτελεσμάτων και γραφική αναπαράστασή τους.

- **Είδος Πεπερασμένων Στοιχείων**

Τα βασικά πεπερασμένα στοιχεία είναι:

- Ράβδος (2 κόμβοι)
- Σύρμα – σχοινί
- Δοκός (2 κόμβοι)
- Επίπεδη εντατική καταπόνηση (3 μέχρι 9 κόμβοι)
- Επίπεδη παραμορφωσιακή κατάσταση (3 μέχρι 9 κόμβοι)
- Αξονοσυμμετρικό με αξονοσυμμετρική φόρτιση (3 μέχρι 9 κόμβοι)
- Αξονοσυμμετρικό με τυχαία φόρτιση (που αναλύεται σε αρμονικές)
- Πλάκα (3 μέχρι 9 κόμβοι)
- Μembrάνη
- Κέλυφος
- Ορθοτροπικό – πολυστρωματικό υλικό
- Τετράεδρο (3 κόμβοι)
- Πρίσμα (π.χ. 6 κόμβοι)
- Εξάεδρο (8 κόμβοι)

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

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΘΕΡΜΗΣ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ ΟΔΟΝΤΩΤΟΥ ΤΡΟΧΟΥ

5.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η προσομοίωση θερμής σφυρηλάτησης ακριβείας μετωπικού οδοντωτού τροχού ευθείας οδόντωσης και η μελέτη αντοχής της μήτρας σφυρηλάτησης της οποίας τα σχέδια δίνονται στην παράγραφο 5.3.3 του παρόντος κεφαλαίου.

Σε προηγούμενες μελέτες που πραγματοποιήθηκαν, βλ. Ζηρδέλης 2012, έγινε μια προσπάθεια προσομοίωσης της κατεργασίας της ψυχρής σφυρηλάτησης χρησιμοποιώντας ως υλικά δοκιμίου, αλουμίνιο και χαλκό. Στην συγκεκριμένη μελέτη θεωρήθηκε μόνο το δοκίμιο ως παραμορφώσιμο και η υπόλοιπη μήτρα ως απαραμόρφωτη με το λογισμικό MSC MARC. Σε μελέτη αντοχής που πραγματοποιήθηκε, βλ. Τζιρίτης 2013, έγινε πρώτα η προσομοίωση της σφυρηλάτησης με το λογισμικό MSC MARC και στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε το πακέτο πεπερασμένων στοιχείων ANSYS, όπου εισήχθησαν τα φορτία που δέχεται η μήτρα μόνο στο τελευταίο βήμα της κατεργασίας όπου έχει ολοκληρωθεί η κατασκευή του οδοντωτού τροχού και μελετήθηκε η στατική αντοχή σε εκείνο το χρονικό σημείο όπου παρατηρούνται και τα μέγιστα φορτία. Και στις δύο παραπάνω μελέτες η προσομοίωση της σφυρηλάτησης πραγματοποιήθηκε στο $\frac{1}{2}$ του οδόντος του οδοντωτού τροχού λόγω συμμετρίας.

Στην παρούσα μελέτη γίνεται μια προσπάθεια μελέτης της κατεργασίας της θερμής σφυρηλάτησης σε δοκίμια από αλουμίνιο έτσι ώστε να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα για την επίδραση της θερμοκρασίας στο φορτίο σφυρηλάτησης και τη φόρτιση της μήτρας, αλλά και να συγκριθεί το αποτέλεσμα με αυτό της ψυχρής σφυρηλάτησης.

Η προσομοίωση της σφυρηλάτησης με πεπερασμένα στοιχεία οδηγεί σε υψηλή παραμόρφωση του πλέγματος και κατά συνέπεια αδυναμία επίλυσης. Για αυτό το λόγο, η προσομοίωση έγινε ειδικά στο λογισμικό DEFORM 3D λόγω των ιδιαίτερων δυνατοτήτων που προσφέρει με την αυτόματη αναδημιουργία και προσαρμογή του πλέγματος (remeshing) των πεπερασμένων στοιχείων κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Η προτίμηση του λογισμικού πακέτου DEFORM 3D από αυτό του MSC MARC έγκειται στο γεγονός ότι το πρώτο έχει το επιπλέον χαρακτηριστικό ότι μπορεί να παρεισάγει (interpolate) τις δυνάμεις και θερμοκρασίες του δοκιμίου, σε μια φάση της κατεργασίας, στα τμήματα της μήτρας που έρχεται σε επαφή ώστε να πραγματοποιηθεί μελέτη αντοχής της μήτρας στην συγκεκριμένη φάση.

Στη συνέχεια παρατίθενται στοιχεία των λογισμικών πακέτων που χρησιμοποιήθηκαν, τα αναλυτικά στοιχεία του υπό κατασκευή οδοντωτού και της μήτρας σφυρηλάτησης και παρουσιάζεται αναλυτικά μία προσομοίωση θερμής σφυρηλάτησης με το DEFORM 3D.

5.2 ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ

5.2.1 ΓΕΝΙΚΑ

Για τον σχεδιασμό της μήτρας σφυρηλάτησης και τον ορισμό της συμμετρίας χρησιμοποιήθηκε το πακέτο λογισμικού **SOLIDWORKS**, ενώ για την προσομοίωση της κατεργασίας και τη μελέτη αντοχής της μήτρας χρησιμοποιήθηκε το πακέτο λογισμικού **DEFORM 3D**. Και τα δύο είναι πακέτα λογισμικού **CAE (Computer Aided Engineering)** που περιέχουν προϊόντα σχεδιασμού, προσομοίωσης, ανάλυσης και επεξεργασίας αποτελεσμάτων διαφορετικών δυνατοτήτων το καθένα. Η προσομοίωση και ανάλυση σχεδόν πάντα επιτυγχάνεται με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων (**FEM**) χρησιμοποιώντας ειδικούς αλγόριθμους για αυτό το σκοπό.

5.2.2 ΠΑΚΕΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ DEFORM 3D (10.2)

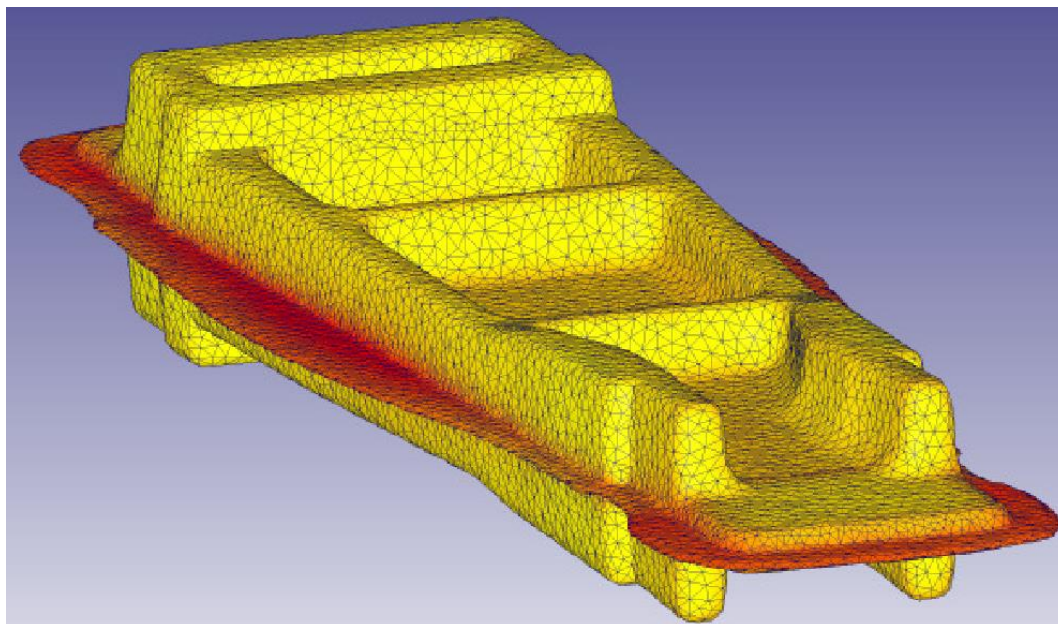
Το πακέτο λογισμικού **DEFORM 3D**, είναι ένα ένα ισχυρό σύστημα προσομοίωσης που σχεδιάστηκε για να αναλύσει την τρισδιάστατη (3D) ροή σε διαδικασίες διαμόρφωσης μετάλλων με σύνθετες γεωμετρίες. Το Deform-3D είναι ένα πρακτικό και αποτελεσματικό εργαλείο για την πρόβλεψη της ροής υλικού σε βιομηχανικές εργασίες διαμορφώσεως χωρίς το κόστος και την καθυστέρηση των δοκιμών παραγωγής και κατανάλωσης.

Τυπικές εφαρμογές περιλαμβάνουν:

- σφυρηλάτηση
- μηχανική κατεργασία
- έλαση
- διέλαση
- κοίλανση
- οδοντώσεις
- συμπίεση

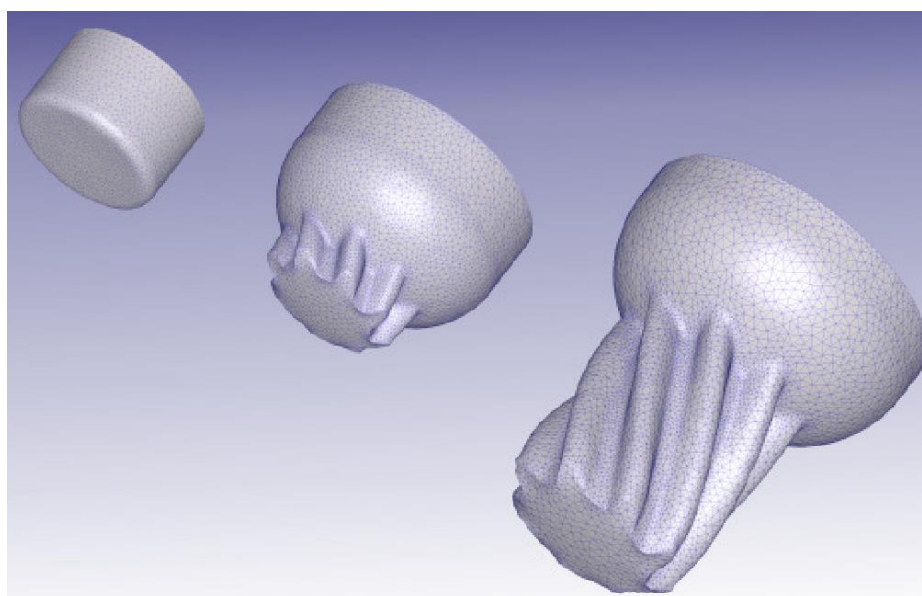
Βασισμένο στην μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, το DEFORM-3D έχει αποδειχθεί ότι είναι μια ακριβής και ισχυρή λύση σε βιομηχανικές εφαρμογές για περισσότερο από δύο δεκαετίες. Η μηχανή προσομοίωσης είναι σε θέση να προβλέπει μεγάλης παραμόρφωσης ροή υλικού και θερμική συμπεριφορά με μεγάλη ακρίβεια.

Η αυτόματη γεννήτρια Mesh (AMG) παράγει ένα βελτιστοποιημένο σύστημα πλέγματος όπου το τοπικό μέγεθος στοιχείου βασίζεται στη συγκεκριμένη διαδικασία που αναλύεται. Αυτό διευκολύνει την βελτιωμένη ανάλυση των χαρακτηριστικών του τεμαχίου, διατηρώντας παράλληλα καλό έλεγχο του συνολικού μέγεθος του προβλήματος και των υπολογιστικών απαιτήσεων. Μία πυκνότητα τοπικού πλέγματος που ορίζεται από τον χρήστη παρέχει στους προηγμένους χρήστες ένα ευέλικτο έλεγχο για να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις τους.

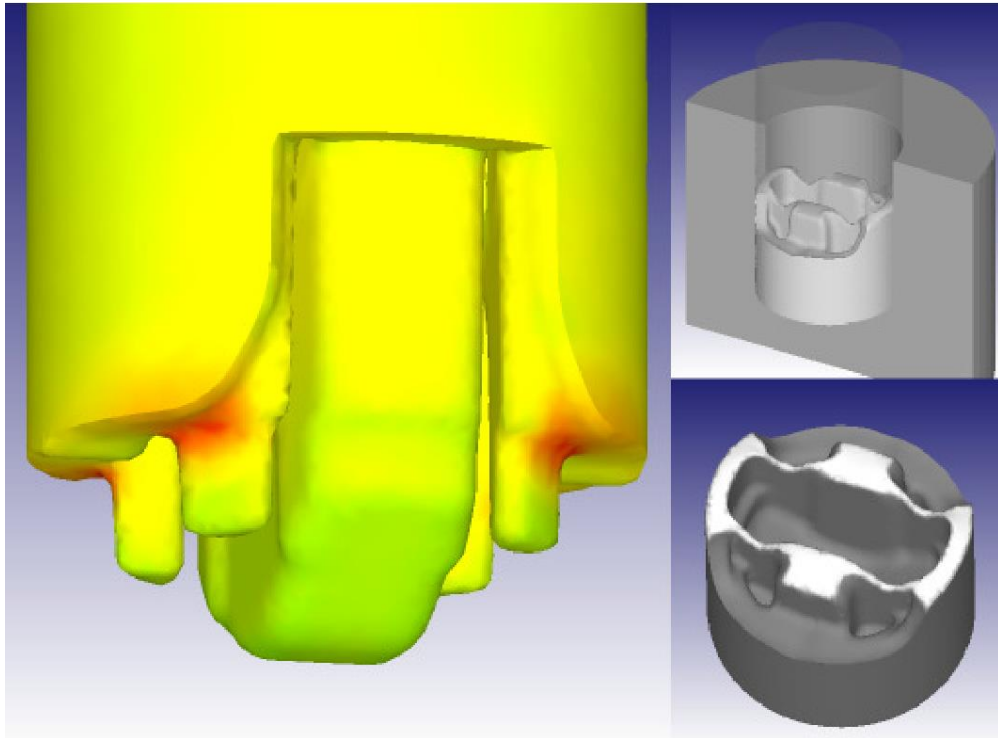


Σχήμα 5.1: Παράδειγμα «έξυπνου» πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων στο DEFORM-3D

Ενώ το DEFORM-3D παρέχει εξελιγμένες δυνατότητες ανάλυσης, η γραφική διεπαφή χρήστη είναι εύχρηστη και εύκολη στην εκμάθηση. Επιπλέον, παρέχει βοηθητικά προγράμματα για να χειριστούν την 3D γεωμετρία, συμπεριλαμβανομένων δυνατοτήτων πρόσθεσης και αφαίρεσης υλικού. Κατεργασίες αποβολής υλικού μπορούν επίσης να αναλυθούν, καθώς και σύνθετες μηχανουργικές εργασίες. Το DEFORM-3D είναι το θεμέλιο για ένα ολοκληρωμένο σύστημα μοντελοποίησης που ενσωματώνει την παραγωγή πρώτων υλών, τη διαμόρφωση, τη θερμική επεξεργασία, τη μηχανουργική κατεργασία, τη μηχανική σύνδεση και την έλαση.



Σχήμα 5.2: Παράδειγμα ψυχρής διέλασης ελικοειδών οδοντωτών τροχών στο DEFORM-3D

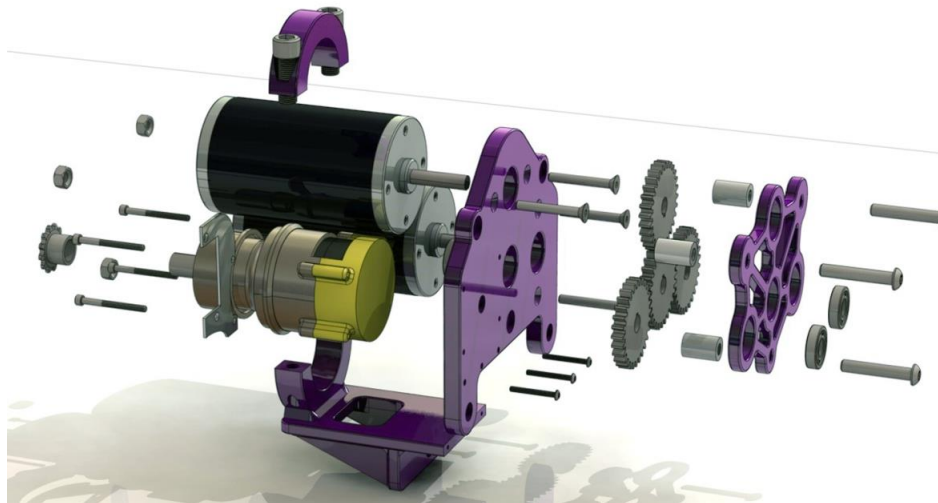


Σχήμα 5.3: Παράδειγμα σφυρηλάτησης και μελέτης αντοχής της μήτρας στο DEFORM-3D

5.2.3 ΣΧΕΔΙΑΣΤΙΚΟ ΠΑΚΕΤΟ SOLIDWORKS

Το λογισμικό SolidWorks είναι ένα **ολοκληρωμένο λογισμικό CAD–CAE–CAM–Flow** το οποίο είναι προσανατολισμένο κυρίως στο τομέα του ολοκληρωμένου σχεδιασμού μηχανημάτων και ενδείκνυται τόσο για **δισδιάστατα** (2D) όσο και για **τρισδιάστατα** (3D) σχέδια αλλά και στην εναλλαγή μεταξύ τους. Οι δυνατότητες του λογισμικού είναι πάρα πολλές, μερικές από τις οποίες είναι:

- Μοντελοποίηση εξαρτημάτων και συναρμολογημάτων με αποτελεσματικότητα.
- Αυτόματη δημιουργία κατασκευαστικών σχεδίων.
- Προσομοίωση ρεαλιστικής μετάδοσης κίνησης και μηχανικών αλληλεπιδράσεων.
- **Ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων** με το πρόσθετο: CosmosWorks.
- **Προσομοίωση ροής ρευστού** με το πρόσθετο: Flow Simulation.
- **Προσομοίωση** κοπής σε εργαλειομηχανή CNC και εξαγωγή G-κώδικα με το πρόσθετο: SolidCam
- Έχει ενσωματωμένα εργαλεία:
 - τυποποιημένων **μηχανολογικών εξαρτημάτων** (ρουλεμάν, τροχοί, κοχλίες κτλ).
 - **συγκολλήσεων** και μεταλλικών κατασκευών.
 - σχεδίασης μεταλλικών επιφανειών (Sheet Metal).
 - σχεδίασης **καλουπιών**.



Σχήμα 5.4: Συναρμογή κατασκευασμένη στο SOLIDWORKS



Σχήμα 5.5: Πολύπλοκη συναρμογή κατασκευασμένη στο SOLIDWORKS



Σχήμα 5.6: Σχέδιο Μοτοσυκλέτας στο SOLIDWORKS

5.3 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΟΔΟΝΤΩΤΟΥ ΤΡΟΧΟΥ ΚΑΙ ΜΗΤΡΑΣ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ**5.3.1 ΓΕΝΙΚΑ**

Παρακάτω παρατίθενται οι αναλυτικές διαστάσεις του υπό κατασκευή οδοντωτού τροχού, του αρχικού δοκιμίου και της μήτρας σφυρηλάτησης με τη βοήθεια του λογισμικού SOLIDWORKS.

Σημαντική παρατήρηση

Τα σχέδια της μήτρας, του εμβόλου και του οδοντωτού τροχού είναι έργο εξολοκλήρου του μεταπτυχιακού φοιτητή Κιτσάκη Παναγιώτη στο πλαίσιο εκπόνησης της Διπλωματικής του εργασίας, με θέμα Σχεδιομελέτη κατασκευής σύνθετου καλουπιού σφυρηλάτησης οδοντωτών τροχών ευθείας οδόντωσης, τα οποία παραχώρησε για τη μελέτη αντοχής.

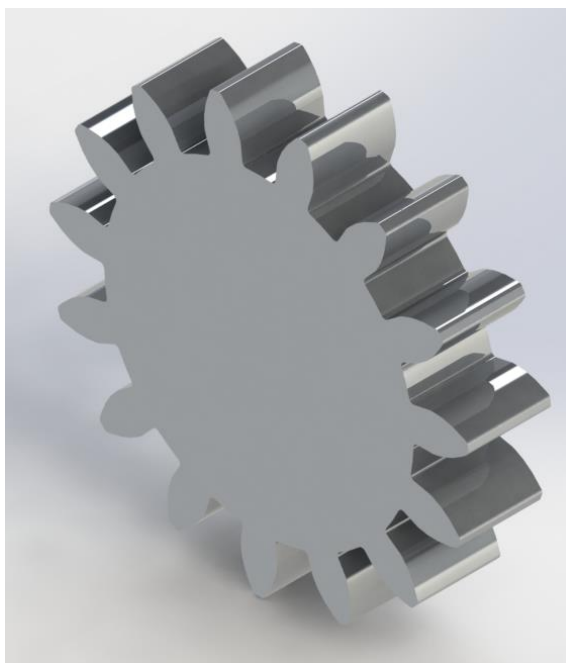
5.3.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΟΔΟΝΤΩΤΟΥ ΤΡΟΧΟΥ

Παρακάτω δίνονται τα αναλυτικά στοιχεία του τροχού:

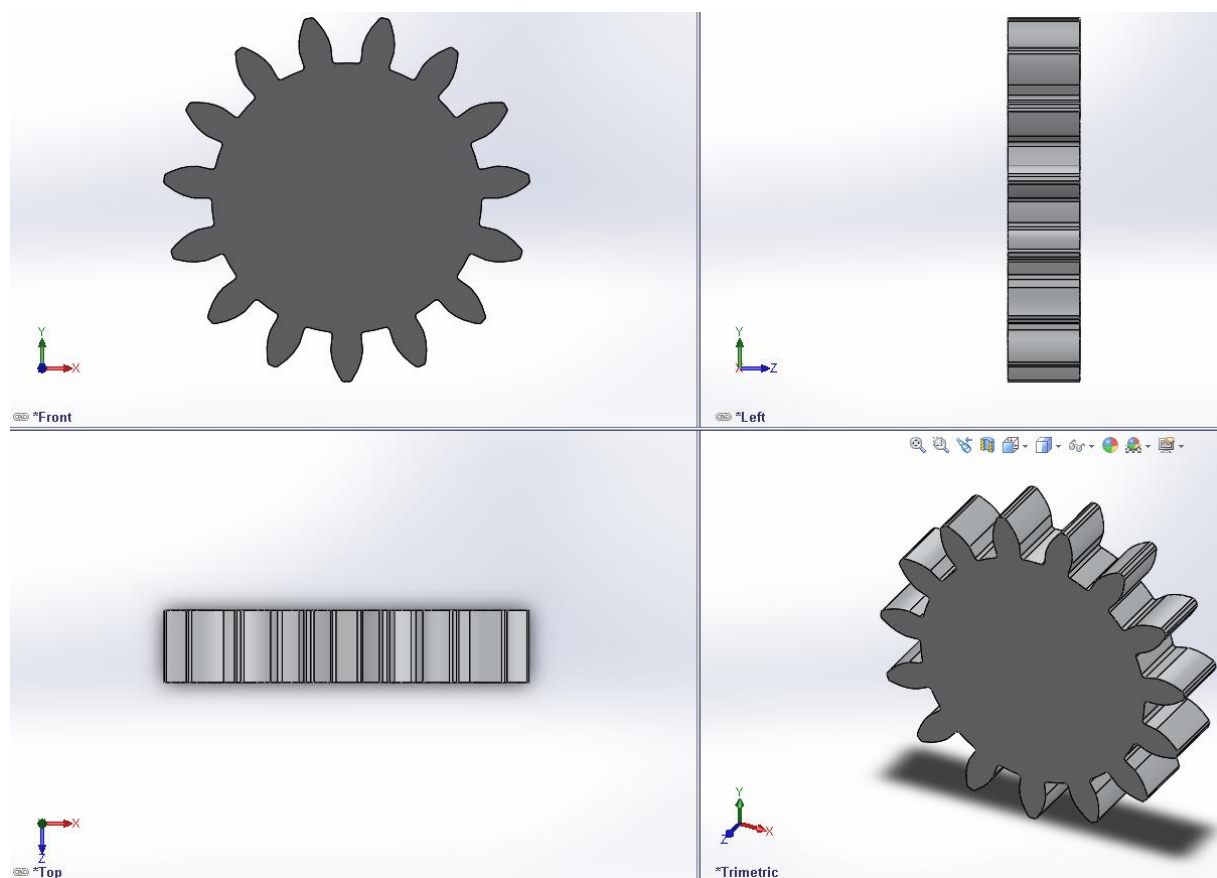
Αριθμός δοντιών	$N = 15$ δόντια	15 δόντια
Module	$m = 3$ mm	3 mm
Γωνία εξελιγμένης, deg	$\varphi = 20^\circ$	20 deg
Γωνία εξελιγμένης, rad	$\varphi_{rad} = 0,348889$ rad	0.349 rad
Ύψος κεφαλής (addendum)	$h_k = m = 3$ mm	3 mm
Ύψος ποδός (dedendum)	$h_\pi = 1,25m = 3,75$ mm	3.75 mm
Αρχική διάμετρος	$D = mN = 45$ mm	45 mm
Εξωτερική διάμετρος	$D_o = D + 2m = m(N + 2) = 51$ mm	51 mm
Διάμετρος βάσης ή ποδός	$D_b = D_\pi = D \cos \varphi = 42,28889$ mm	42.289 mm
Διάμετρος ρίζας	$D_r = D - 2,5m = m(N - 2,5) = 37,5$ mm	37.5 mm
Βήμα αρχικού κύκλου	$p = m\pi = 9,42$ mm	9.42 mm
Βήμα κύκλου βάσης	$pb = m\pi \cos \varphi = 8,852474$ mm	8.852 mm
Πάχος δοντιού στον αρχικό κύκλο	$t = m\pi/2 = 4,71$ mm	4.71 mm
Πάχος τροχού	$\alpha = 10$ mm	10 mm

Πίνακας 5.1: Σχέσεις μεγεθών μετωπικού οδοντωτού τροχού

Η τελική μορφή του οδοντωτού τροχού παρουσιάζεται αμέσως παρακάτω με τη βοήθεια του σχεδιαστικού πακέτου SOLIDWORKS:

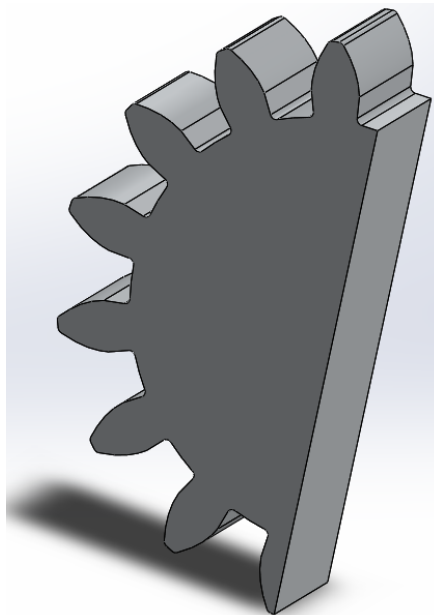


Σχήμα 5.7: Τρισδιάστατη απεικόνιση του οδοντωτού τροχού (SOLIDWORKS)



Σχήμα 5.8: Διάφορες όψεις του οδοντωτού τροχού (SOLIDWORKS)

Η μικρότερη συμμετρία που μπορεί να υπάρξει στον οδοντωτό τροχό είναι κατά $\frac{1}{2}$ δόντι, δηλαδή έχουμε συμμετρία κατά το $\frac{1}{30}$ του οδοντωτού τροχού. Στη περίπτωση μας όμως, επειδή η ελάχιστη συμμετρία που μπορεί να μας δώσει ολόκληρο το καλούπι σφυρηλάτησης είναι $\frac{1}{2}$ του συνολικού καλούπιού η συμμετρία που επιλέγουμε να γίνει η προσομοίωση της θερμής σφυρηλάτησης είναι $\frac{1}{2}$ γρανάζι. Αμέσως παρακάτω παρουσιάζεται το συμμετρικό τμήμα του οδοντωτού τροχού:



Σχήμα 5.9: Συμμετρικό τμήμα οδοντωτού τροχού που θα προσομοιωθεί (SOLIDWORKS)

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται το εμβαδό της επιφάνειας και ο όγκος τόσο ολόκληρου του οδοντωτού όσο και του συμμετρικού κατά το ήμισυ, στοιχεία απαραίτητα για του υπολογισμό του αρχικού δοκιμίου που θα σφυρηλατηθεί.

ΟΛΟΚΛΗΡΟΣ ΟΔΟΝΤΩΤΟΣ ΤΡΟΧΟΣ	
Ύψος γραναζιού	10 mm
Εμβαδό επιφάνειας	1470.673 mm ²
Όγκος γραναζιού (10 mm)	14706.734 mm ³
ΣΥΜΜΕΤΡΙΑ (180°)	
Εμβαδό επιφάνειας	735.337 mm ²
Όγκος γραναζιού (10 mm)	7353.367 mm ³

Πίνακας 5.2: Εμβαδό επιφάνειας και όγκος ολόκληρου οδοντωτού τροχού και συμμετρίας

5.3.3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΡΧΙΚΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

Ο όγκος του οδοντωτού τροχού ισούται με $14706,734 \text{ mm}^3$ βάση του οποίου θα γίνει και ο υπολογισμός των διαστάσεων του κυλινδρικού δοκιμίου το οποίο και θα σφυρηλατηθεί. Η ακτίνα του δοκιμίου λαμβάνεται ελάχιστα μικρότερη από την ακτίνα ποδός του τροχού, $r_{\delta} = 18,65 \text{ mm}$. Και σε συνδυασμό με ένα συντελεστή μείωσης όγκου 2.1% που υφίσταται το δοκίμιο από τη κατεργασία της σφυρηλάτησης, το ύψος του κυλινδρικού δοκιμίου θα ισούται με:

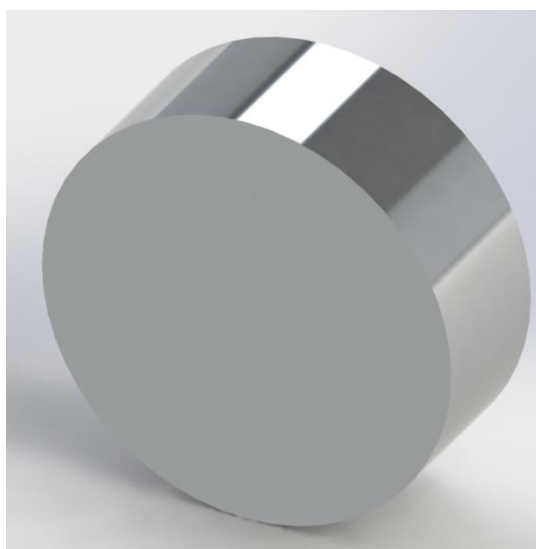
$$h_{\delta} = 15015,576 \text{ mm}^3 / (\pi \cdot 18,65^2 \text{ mm}^2) = 13.74 \text{ mm}$$

Στον παρακάτω πίνακα συγκεντρώνονται οι διαστάσεις του αρχικού δοκιμίου καθώς και ο όγκος και το εμβαδό της επιφάνειας.

Ακτίνα δοκιμίου	18.65 mm
Συντελεστής μείωσης όγκου	0.021
Όγκος ολόκληρου δοκιμίου	$15015,576 \text{ mm}^3$
Όγκος συμμετρίας (180°)	$7507,790 \text{ mm}^3$
Ύψος δοκιμίου	13.74 mm

Πίνακας 5.3: Εμβαδό επιφάνειας και όγκος ολόκληρου δοκιμίου και συμμετρίας

Αμέσως παρακάτω, παρουσιάζεται το αρχικό κυλινδρικό δοκίμιο σχεδιασμένο με το σχεδιαστικό πακέτο SOLIDWORKS.



Σχήμα 5.10: Τρισδιάστατη απεικόνιση του αρχικού δοκιμίου (SOLIDWORKS)

5.3.4 ΜΗΤΡΑ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ ΟΔΟΝΤΩΤΟΥ ΤΡΟΧΟΥ

Η μήτρα αυτή έχει σχεδιαστεί για την σφυρηλάτηση οδοντωτών τροχών διάφορων μεγεθών που περιλαμβάνουν αριθμό οδόντων μεταξύ 10 και 20 και module μεταξύ 2 mm και 4 mm. Συγκεκριμένα, οι συνδυασμοί των οδοντωτών τροχών που προορίζεται να κατασκευάσει η συγκεκριμένη μήτρα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

A/A	ΑΡΙΘΜΟΣ ΟΔΟΝΤΩΝ z	MODULE m (mm)
1	10	2
2		3
3		4
4	15	2
5		3
6		4
7	20	2
8		3
9		4

Πίνακας 5.4: Συνδυασμοί των υπό κατασκευή οδοντωτών τροχών

Άρα, συνολικά η συγκεκριμένη μελέτη έχει ως στόχο να μελετήσει την δυνατότητα κατασκευής 9 διαφορετικών οδοντωτών τροχών με τη χρήση μιας μήτρας σφυρηλάτησης.

Ο σκοπός κατασκευής της μήτρας είναι καθαρά ερευνητικός προκειμένου να διερευνηθεί η δυνατότητα κατασκευής οδοντωτών τροχών διάφορων διαστάσεων με τη μέθοδο της σφυρηλάτησης ακριβείας έτσι ώστε να μελετηθεί η ακρίβεια της κατεργασίας σε σύνθετες γεωμετρικές διαφορετικού μεγέθους καθώς και η επίδραση βασικών παραμέτρων των οδοντωτών τροχών, όπως είναι ο αριθμός των οδόντων και module στο φορτίο σφυρηλάτησης και το φορτίο που δέχεται ολόκληρη η μήτρα.

Στην περίπτωση μας θα χρησιμοποιηθεί μόνο η μήτρα κατασκευής οδοντωτών τροχών με διαστάσεις $N = 15$ οδόντες και $module\ m = 3\ mm$. Η παρουσίαση του καλουπιού επιτεύχθηκε με τη βοήθεια του λογισμικού Solidworks. Η μήτρα είναι κλειστού τύπου και το έμβολο είναι σκαλιστό οδοντωτής μορφής ενώ διαθέτει τέσσερις δακτυλίους για την εισαγωγή πύρων με σκοπό τη σταθερή οδήγηση τους κατά τη διάρκεια της κατεργασίας. Το κέλυφος διαθέτει αντίστοιχα τέσσερις τυφλές οπές για την τοποθέτηση των πύρων.

Γενικά, τα διάφορα εξαρτήματα της μήτρας δίνονται στον παρακάτω πίνακα με αρίθμηση:

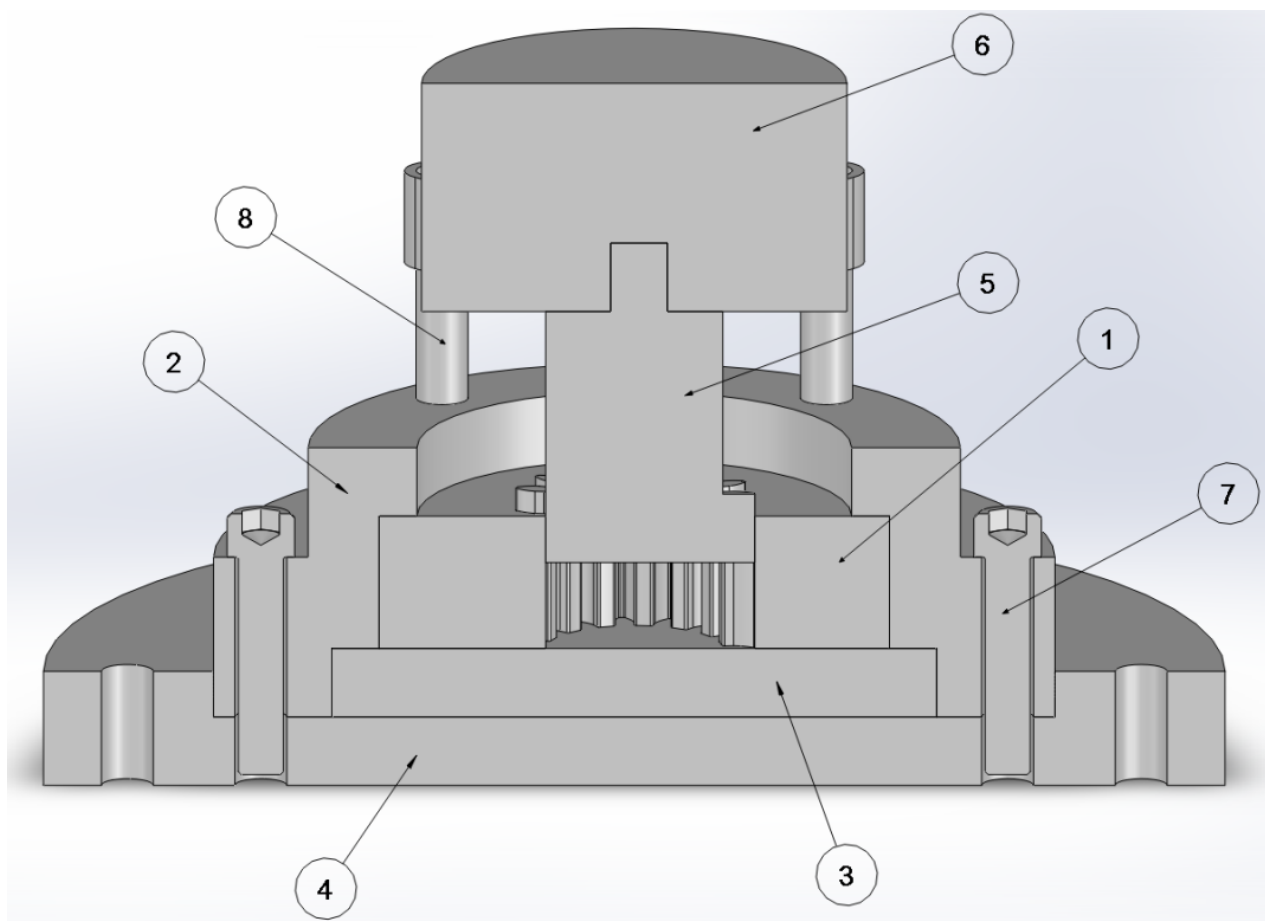
A/A	ΕΞΑΡΤΗΜΑ
1	Μήτρα
2	Κέλυφος
3	Βάση Μήτρας
4	Βάση Κελύφους

5	Έμβολο
6	Άνω Έμβολο
7	4 Κοχλίες συγκράτησης 3/8"
8	4 Πύροι

Πίνακας 5.5: Αρίθμηση των επιμέρους εξαρτημάτων της μήτρας σφυρηλάτησης

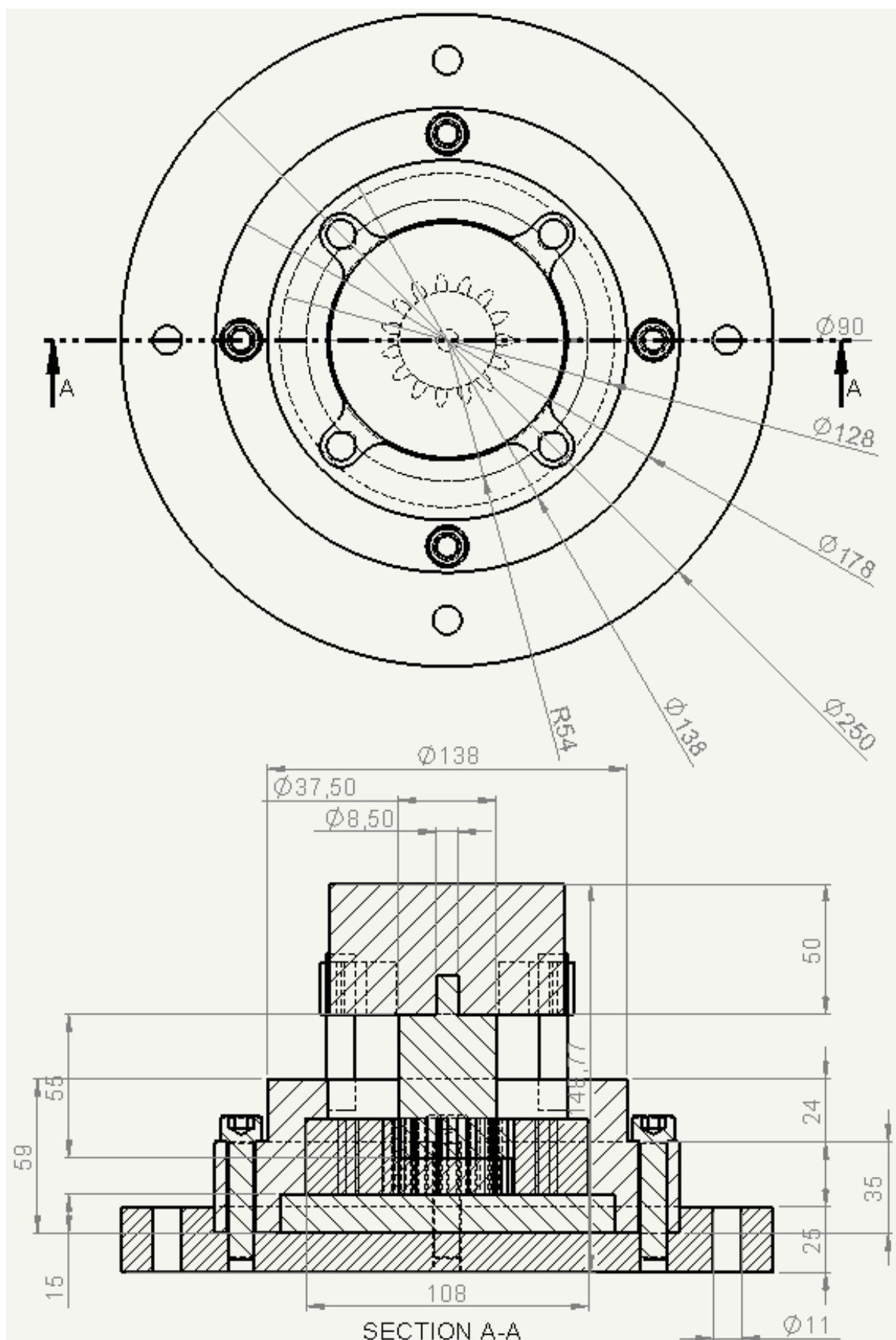
Οι τέσσερις Κοχλίες συνδέουν το Κέλυφος με τη Βάση του Κελύφους με διαμπερείς οπές χωρίς τη χρήση περικοχλίου και είναι τύπου HX-SHCS 0.375-24x1.875x1.875-N. Επίσης τέσσερις ιδίου μεγέθους οπές έχουν σχεδιασθεί περιμετρικά της Βάσης του Κελύφους για τη στήριξη της όλης κατασκευής.

Η μήτρα και το έμβολο σχεδιάστηκαν έχοντας ως οδηγό, για την γεωμετρία των οδοντώσεων, τον οδοντωτό τροχό που παρουσιάστηκε προηγουμένως. Αμέσως παρακάτω παρατίθεται η τρισδιάστατη τομή της μήτρας.



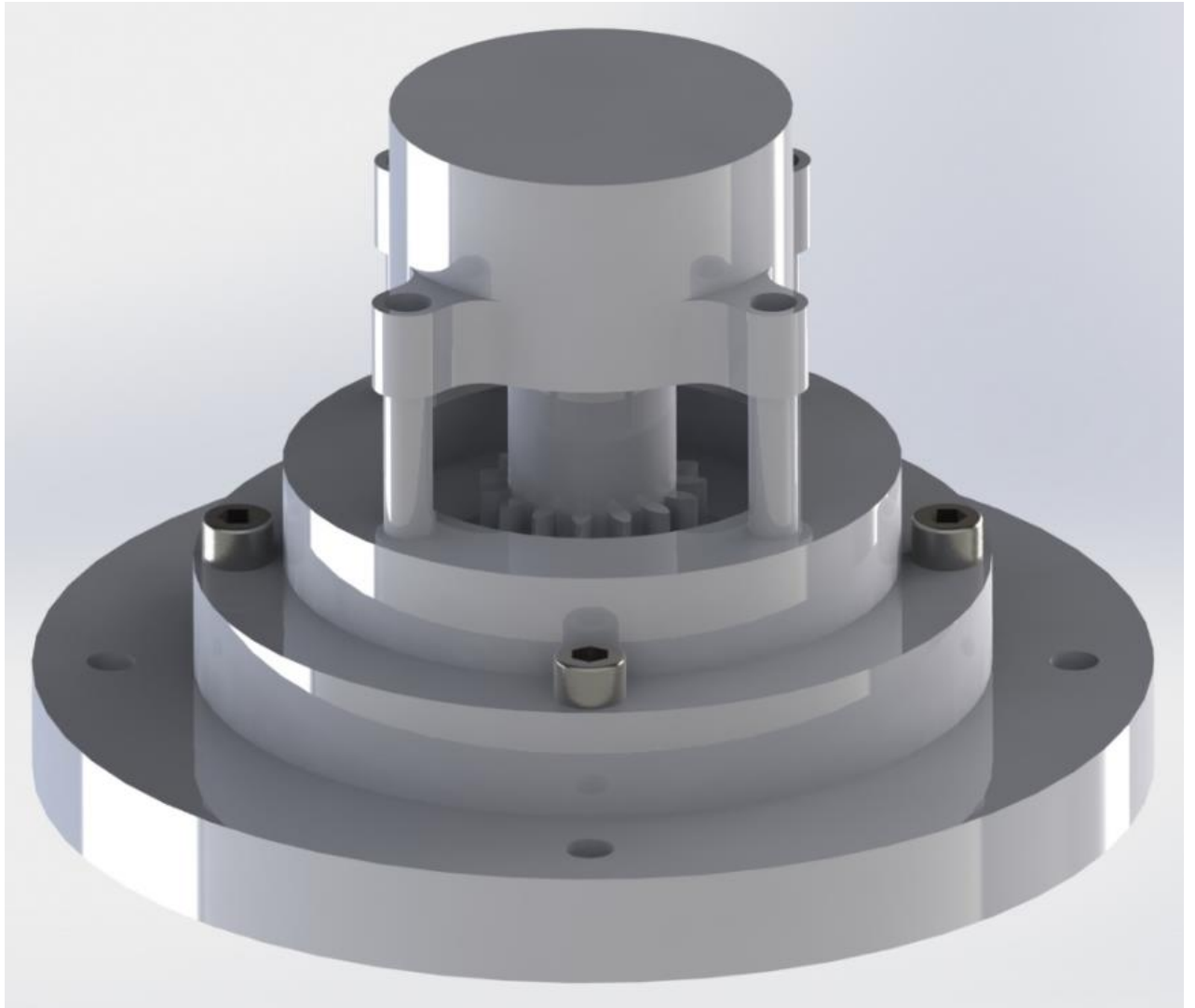
Σχήμα 5.11: Τρισδιάστατη τομή μήτρας (N = 15 όδοντες, m = 3 mm) (SOLIDWORKS)

Αμέσως παρακάτω παρατίθεται η κάτοψη και η πρόοψη σε τομή της μήτρας σφυρηλάτησης με τις βασικές διαστάσεις.



Σχήμα 5.12: Κάτοψη και πρόψη σε τομή μήτρας ($N = 15$ όδοντες, $m = 3$ mm) (SOLIDWORKS)

Τέλος, αμέσως παρακάτω παρατίθεται μία τρισδιάστατη ρεαλιστική απεικόνιση της στο Solidworks.

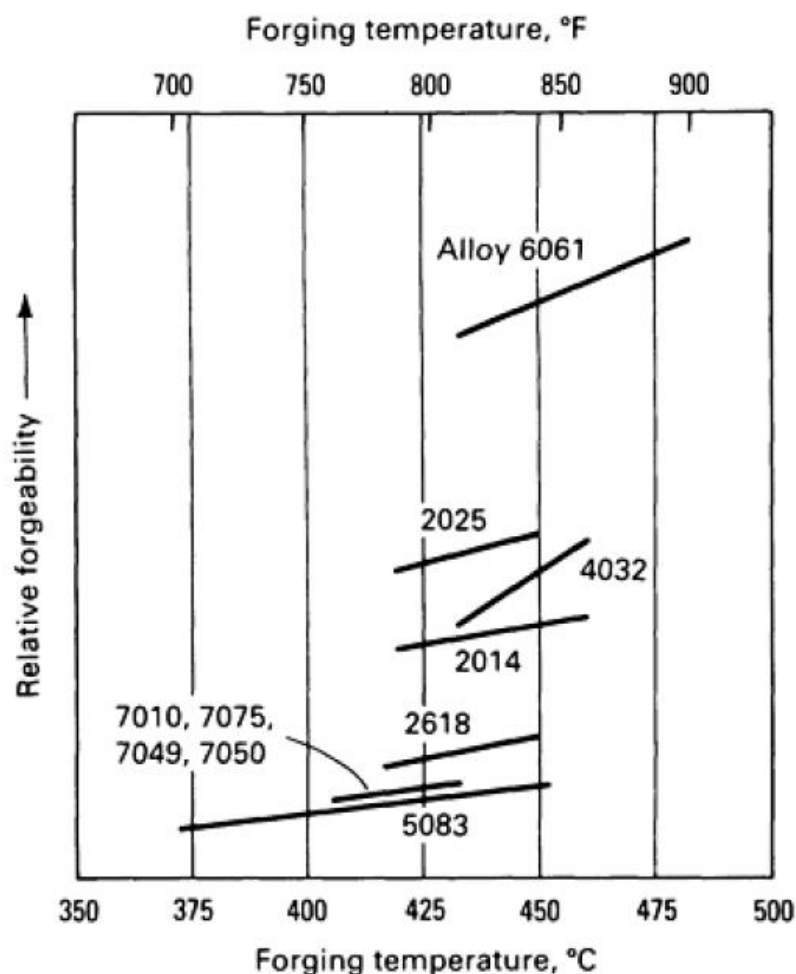


Σχήμα 5.13: Τρισδιάστατη ρεαλιστική απεικόνιση μήτρας ($N = 15$ όδοντες, $m = 3$ mm)
(SOLIDWORKS)

5.4 ΥΛΙΚΑ & ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ

5.4.1 ΥΛΙΚΟ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

Για τις προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκε το κράμα αλουμινίου 6061-T6 που ενδείκνυται για θερμή σφυρηλάτηση λόγω της μεγάλης ικανότητας σφυρηλασίας (forgeability) που έχει. Στο παρακάτω σχήμα παρατίθενται δέκα χαρακτηριστικά κράματα αλουμινίου με την ικανότητα σφυρηλασίας τους σε διάφορες θερμοκρασίες.



Σχήμα 5.14: Ικανότητα σφυρηλασίας και διάφορες θερμοκρασίες διαφόρων κραμάτων αλουμινίου

Όπως παρατηρούμε και από το παραπάνω σχήμα, η ικανότητα σφυρηλασίας αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας, ενώ για το επιλεγθέν κράμα (6061-T6) που παρουσιάζει την μεγαλύτερη ικανότητα η δραστικότερη περιοχή σφυρηλάτησης είναι μεταξύ των θερμοκρασιών 430 °C και 480 °C.

Τα πλήρη χαρακτηριστικά των υλικού 6061-T6 παρουσιάζονται στο «παράρτημα Α» της εργασίας και επιλέχθηκε από τη βιβλιοθήκη του πακέτου πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε (DEFORM 3D).

5.4.2 ΥΛΙΚΟ ΜΗΤΡΑΣ & ΤΡΟΠΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

Το υλικό κατασκευής όλων των τμημάτων της μήτρας εκτός των κοχλιών σύσφιξης είναι εργαλειοχάλυβας AISI H-13 που ενδείκνυται για την κατασκευή εργαλείων και μητρών κατεργασιών διαμόρφωσης όπως σφυρηλάτηση, έλαση, διέλαση κ.τ.λ.

Αμέσως παρακάτω παρουσιάζονται οι μηχανικές και φυσικές ιδιότητες τόσο του δοκιμίου, όσο και του καλουπιού οι οποίες ελήφθησαν από μελέτη διέλασης ίδιων υλικών.

Properties	Workpiece (6061 Al alloy)	Tooling (H-13 tool steel)
Density (kg/m ³)	2690	7760
Young's modulus (N/mm ²)	69,000	210,000
Poisson's ratio	0.293	0.30
Coefficient of thermal expansion (1/°C)	23.6 × 10 ⁻⁶	10.4 × 10 ⁻⁶ (100°C) 11.5 × 10 ⁻⁶ (200°C) 28.4 × 10 ⁻⁶ (425°C) 28.7 × 10 ⁻⁶ (540°C)
Specific heat (N/mm ² °C)	2.39	5.6
Thermal conductivity (W/m°C)	180	28.6 (215°C) 28.4 (350°C) 28.4 (475°C) 28.7 (605°C)
Heat transfer coefficient between workpiece and die/liner/stem (N/°C s mm)	4.0	4.0
Heat transfer coefficient between die-container and air (N/°C s mm)	0.10	0.10
Emissivity	0.05	0.15

Πίνακας 5.6: Μηχανικές και φυσικές ιδιότητες του δοκιμίου και του καλουπιού

Τα πλήρη χαρακτηριστικά των υλικού AISI H-13 παρουσιάζονται στο «παράρτημα Α» της εργασίας και επιλέχθηκε από τη βιβλιοθήκη του πακέτου πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε (DEFORM 3D).

Η κατασκευή όλων των τμημάτων της μήτρας έχουν κατασκευασθεί σε κέντρο κατεργασιών CNC με τη χρήση κατεργασιών αποβολής υλικού και συγκεκριμένα φρεζάρισμα (milling), τórνευση (turning), διάτρηση (drilling) και σπειροτόμηση (thread-cutting). Προκειμένου να εξασφαλιστούν υψηλότερες πιέσεις διαμόρφωσης και ελαχιστοποίησης της ελαστικής παραμόρφωσης, μετά την κοπή των τμημάτων πραγματοποιήθηκε βαφή και επαναφορά προκειμένου να επιτευχθεί σκλήρυνση σε 100 HRC.

5.4.3 ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ

Πραγματοποιήθηκε σφυρηλάτηση ακριβείας σε διάφορες θερμοκρασίες του δοκιμίου οι οποίες παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα.

A/A	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ (T _δ)	ΕΙΔΟΣ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ (T _κ)
1	20 °C	Ψυχρή σφυρηλάτηση	20 °C
2	100 °C		
3	200 °C	Ημίθερμη σφυρηλάτηση	
4	300 °C		
5	400 °C	Θερμή σφυρηλάτηση	
6	430 °C		
7	480 °C		
8	500 °C		

Πίνακας 5.7: Παρουσίαση θερμοκρασιών και ειδών σφυρηλάτησης

Όπως παρατηρούμε επιλέχθηκαν 8 διαφορετικές θερμοκρασίες δοκιμίου από τις οποίες οι δύο πρώτες αντιστοιχούν σε ψυχρή σφυρηλάτηση και οι υπόλοιπες έξι αντιστοιχούν σε θερμή σφυρηλάτηση λαμβάνοντας υπόψη μας ότι το σημείο τήξης του υλικού μας είναι $T_m = 620\text{ }^\circ\text{C}$. Οπότε έχουμε:

- Ψυχρή σφυρηλάτηση: $T < 0,3 \cdot T_m \rightarrow T < 0,3 \cdot 620\text{ }^\circ\text{C} \rightarrow T < 186\text{ }^\circ\text{C}$
- Θερμή σφυρηλάτηση: $T > 0,5 \cdot T_m \rightarrow T > 0,5 \cdot 620\text{ }^\circ\text{C} \rightarrow T > 310\text{ }^\circ\text{C}$
- Ημίθερμη σφυρηλάτηση: $0,3 \cdot T_m < T < 0,5 \cdot T_m \rightarrow 186\text{ }^\circ\text{C} < T < 310\text{ }^\circ\text{C}$

Η ταχύτητα του εμβόλου σφυρηλάτησης επιλέχθηκε 15 mm/sec η οποία ανταποκρίνεται σε πραγματικές συνθήκες σφυρηλάτησης για να ληφθεί υπόψη ο θερμοκρασιακός παράγοντας και η επίδραση του.

Ο συντελεστής τριβής που χρησιμοποιήθηκε στις προσομοιώσεις είναι $\mu = 0.3$ μεταξύ δοκιμίου και μήτρας και $\mu = 0.12$ μεταξύ των τμημάτων της μήτρας σύμφωνα με επιστημονικές μελέτες που έχουν γίνει σε παρόμοια θέματα με τα ίδια υλικά.

Όσον αφορά την τοποθέτηση των μητρών σφυρηλάτησης πάνω στην πρέσα, το κέλυφος των μητρών δένεται στην τράπεζα της εργαλειομηχανής ενώ το άνω τμήμα του εμβόλου τοποθετείται στο έμβολο της πρέσας.

Τέλος, κατά την κατεργασία χρησιμοποιήθηκε λίπανση, η οποία με την τραχύτητα των επιφανειών μας έδωσε τον συντελεστή τριβής που χρησιμοποιήθηκε.

5.5 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΘΕΡΜΗΣ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΜΕ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΠΑΚΕΤΟ DEFORM 3D

Αμέσως παρακάτω παρατίθενται τα βήματα της προσομοίωσης της θερμής σφυρηλάτησης ακριβείας. Συγκεκριμένα, στη συνέχεια περιγράφεται αναλυτικά μια προσομοίωση θερμής σφυρηλάτησης με τα ληφθέντα αποτελέσματα.

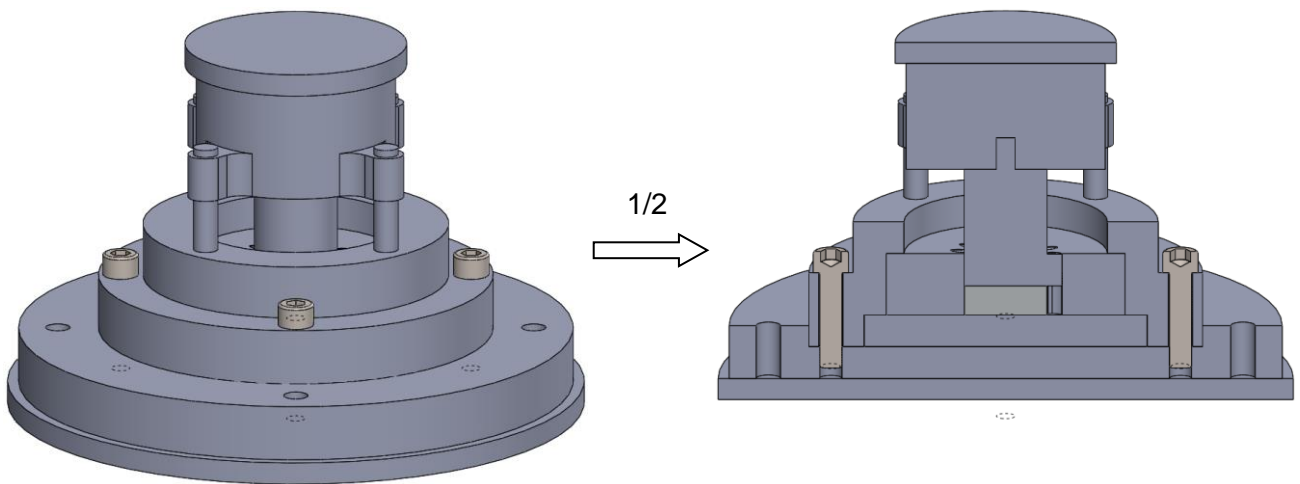
5.5.1 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΣΥΜΜΕΤΡΙΑΣ ΚΑΙ ΕΞΑΓΩΓΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΑΠΟ ΤΟ SOLIDWORKS

Όπως αναφέραμε και παραπάνω, στο δοκίμιο έχουμε ελάχιστη συμμετρία κατά $\frac{1}{2}$ δόντι του τροχού, δηλαδή κατά 12° , ενώ στο καλούπι της σφυρηλάτησης έχουμε ελάχιστη συμμετρία 180° . Για αυτό τον λόγο, επιλέγουμε στο δοκίμιο να έχουμε συμμετρία κατά 180° για να πραγματοποιήσουμε έπειτα τη μελέτη αντοχής στη μήτρα.

Συγκεκριμένα, η διαδικασία δημιουργίας της συμμετρικής γεωμετρίας γίνεται στο περιβάλλον του σχεδιαστικού πακέτου SOLIDWORKS χρησιμοποιώντας ολόκληρη την γεωμετρία και αποκόπτοντας την μισή χρησιμοποιώντας την εντολή:

Assembly → Assembly Features → Extruded Cut

Αμέσως παρακάτω παρατίθεται η διαδικασία δημιουργίας της συμμετρικής γεωμετρίας στο SOLIDWORKS.



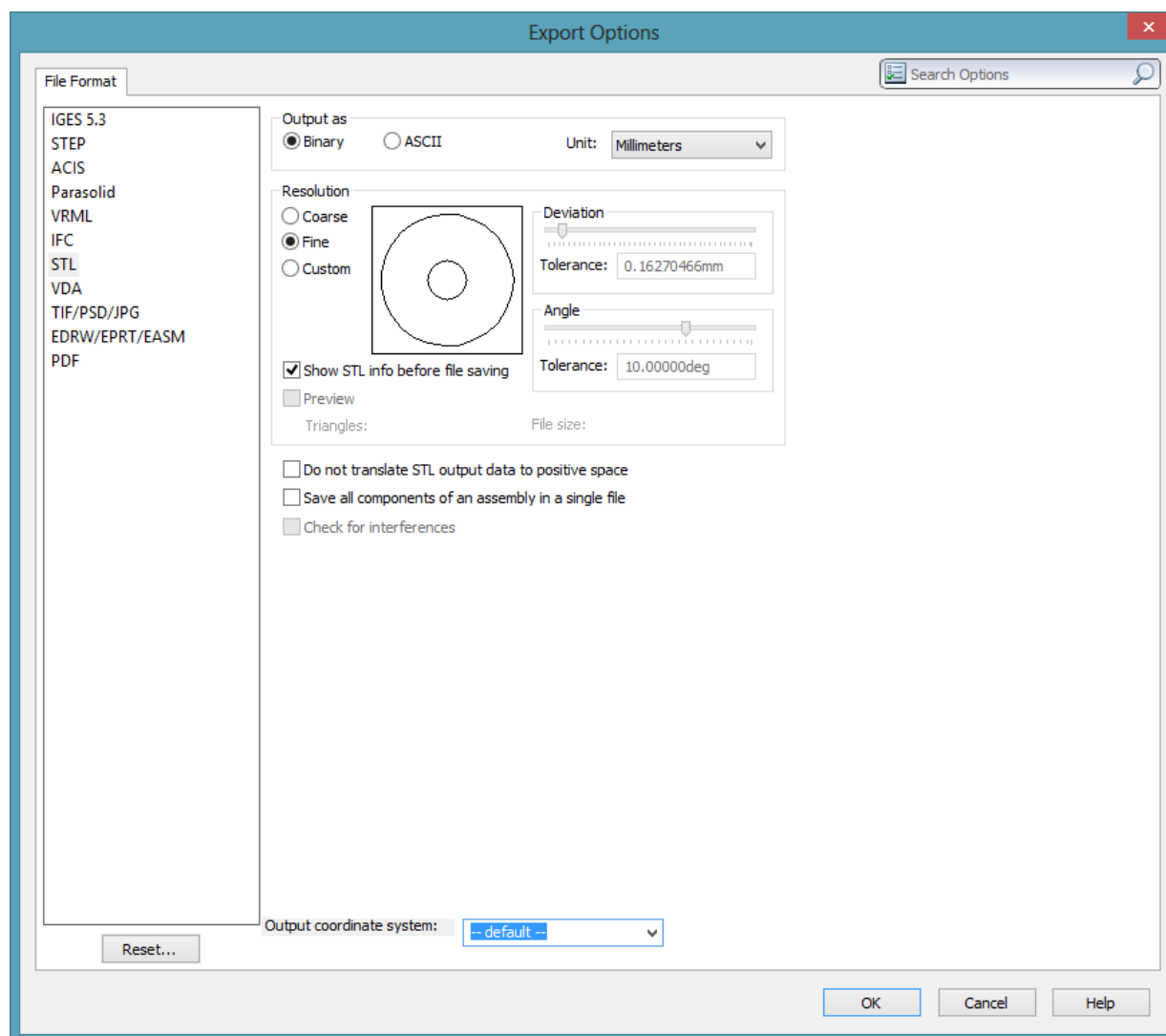
Σχήμα 5.15: Δημιουργία συμμετρικής γεωμετρίας (SOLIDWORKS)

Στη συνέχεια, στο περιβάλλον του SOLIDWORKS, αποθηκεύουμε τη γεωμετρία σε μορφή STL προκειμένου να την εισάγουμε στο DEFORM 3D με την ακολουθία εντολών:

File → Save As → STL

Αμέσως παρακάτω παρατίθεται το παράθυρο επιλογών για την μορφή αρχείων STL στο οποίο επιλέγουμε:

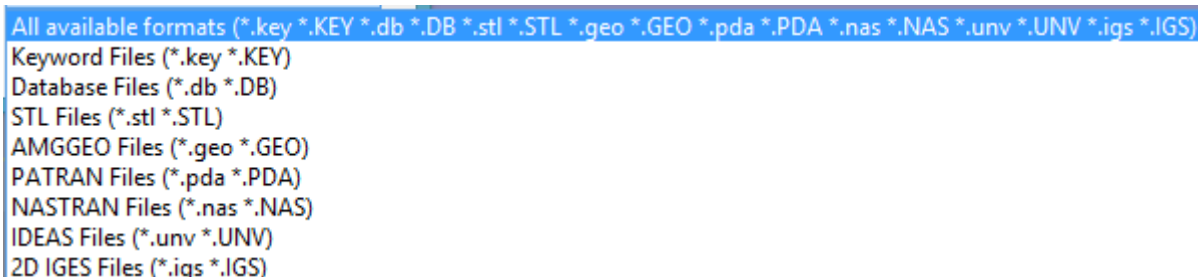
- μονάδα μέτρησης: mm,
- ποιότητα ανάλυσης: καλή
- σύστημα συντεταγμένων: προκαθορισμένο



Σχήμα 5.16: Παράθυρο επιλογών μορφής αρχείων STL (SOLIDWORKS)

Εδώ αξίζει να παρατηρήσουμε ότι όταν αποθηκεύουμε σε μορφή STL, αποθηκεύεται το κάθε τμήμα της συναρμολογημένης μήτρας ξεχωριστά, αλλά σύμφωνα με το σύστημα συντεταγμένων που έχουμε ορίσει σε ολόκληρη την συναρμογή. Στην περίπτωση μας το σημείο (0,0,0) είναι στο μέσον της βάσης του δοκιμίου.

Οι υπόλοιπες μορφές αρχείων γεωμετρίας που μπορούμε να εισάγουμε στο DEFORM 3D φαίνονται στο παρακάτω σχήμα και από τις οποίες παρατηρούμε ότι μόνο η μορφή STL είναι συμβατή με το SOLIDWORKS.



Σχήμα 5.17: Μορφές αρχείων γεωμετρίας που μπορούν να εισαχθούν (DEFORM 3D)

Χρησιμοποιώντας την ακολουθία εντολών:

File → Import → IGES

εισάγουμε την γεωμετρία της μήτρας και του εμβόλου που έχουμε δημιουργήσει στο σχεδιαστικό πακέτο SOLIDWORKS. Στη συνέχεια, αφαιρούμε τις περιττές επιφάνειες και καμπύλες για να πάρουμε μόνο αυτές που μας ενδιαφέρουν, ώσπου παίρνουμε τελικά το παρακάτω σχήμα, όπου μπορούμε να διακρίνουμε τη μήτρα σφυρηλάτησης και το έμβολο σε συμμετρία ενός δοντιού.

5.5.2 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΝΕΑΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΣΤΟ DEFORM 3D

Στη συνέχεια δημιουργούμε μία νέα προσομοίωση στο περιβάλλον του πακέτου πεπερασμένων στοιχείων DEFORM 3D χρησιμοποιώντας την ακολουθία εντολών:

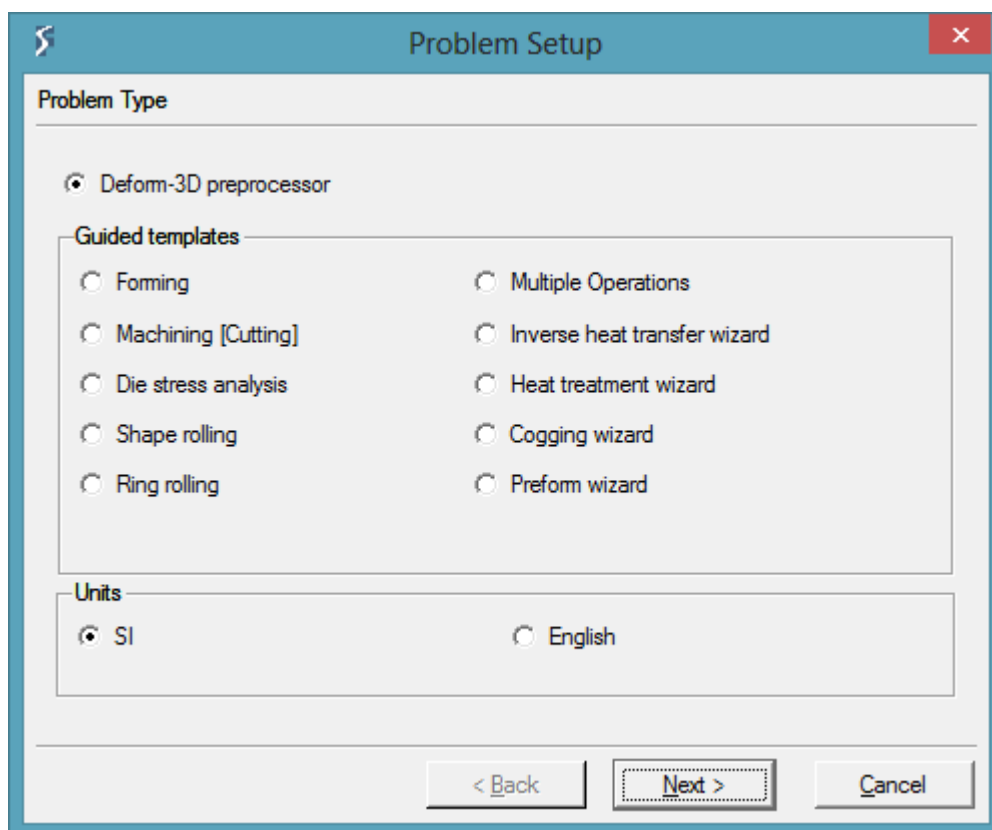
File → New Problem

Από το παράθυρο επιλογών που εμφανίζεται επιλέγουμε:

- Είδος προβλήματος: Deform-3D preprocessor
- Σύστημα μονάδων: SI

Όπως παρατηρούμε στο παράθυρο επιλογών, υπάρχουν προκαθορισμένοι τύποι προβλημάτων που μπορεί να επιλύσει το DEFORM 3D που περιλαμβάνουν εκτός των άλλων:

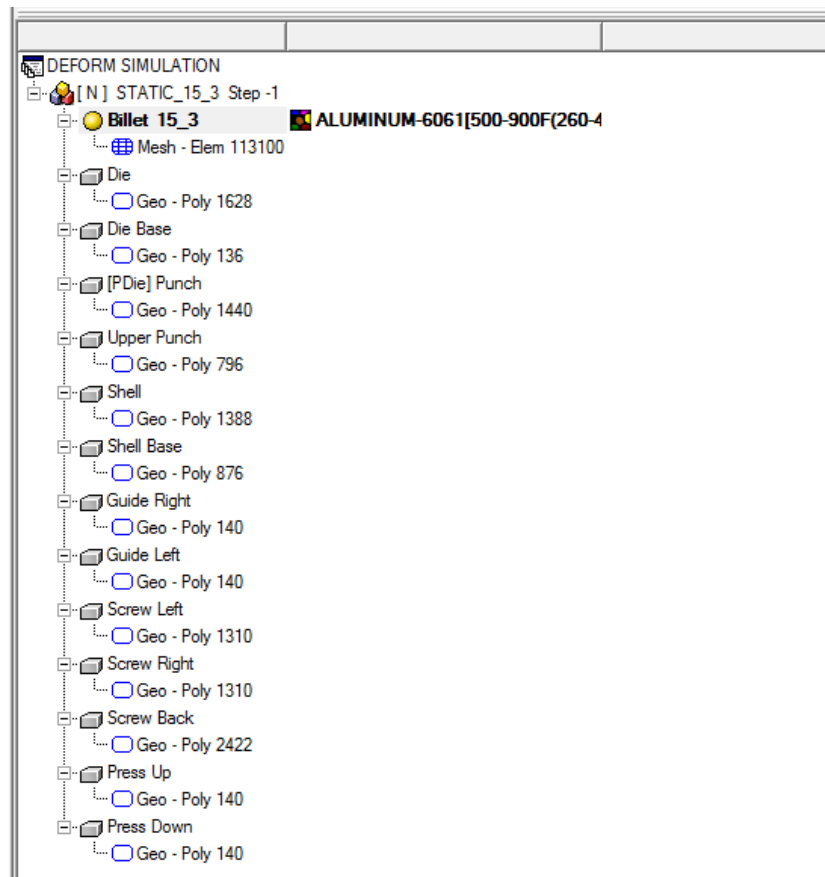
- Διαμόρφωση (forming)
- Ανάλυση αντοχής μήτρας (Die stress analysis)
- Κοπές (Cutting)
- Έλαση (Rolling)



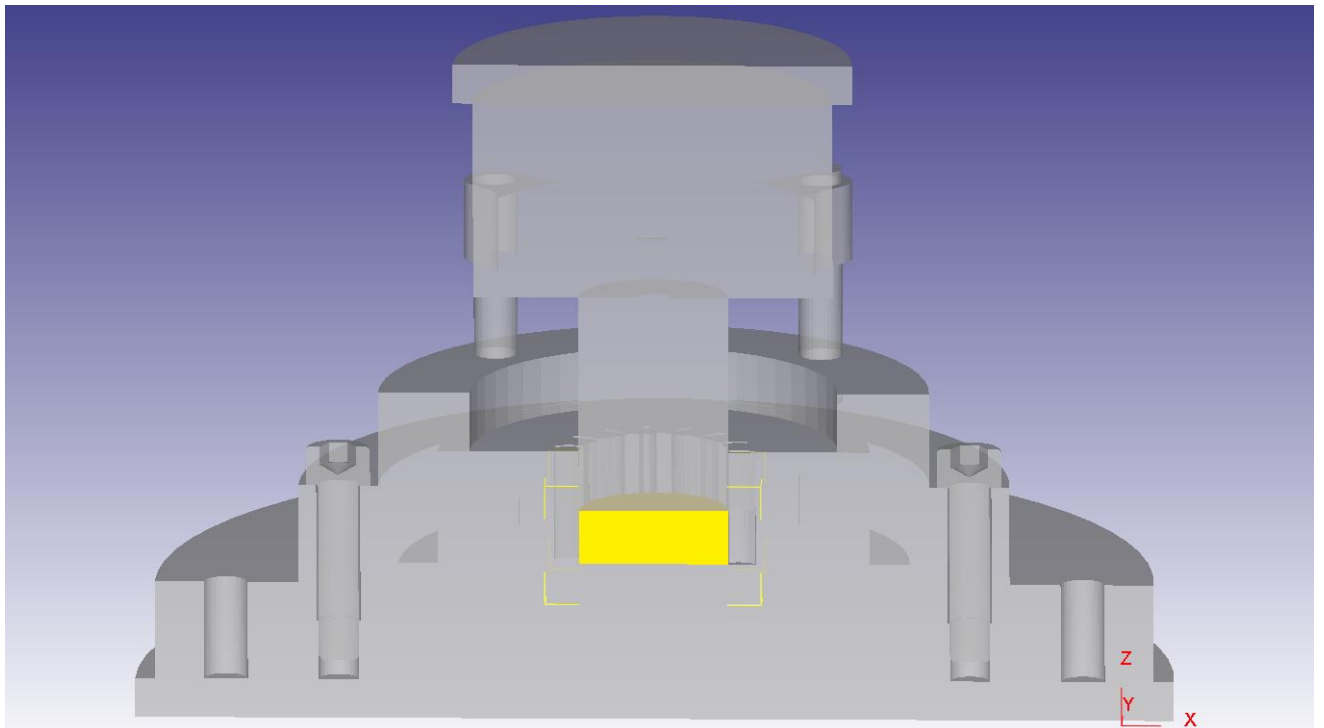
Σχήμα 5.18: Παράθυρο επιλογών νέου προβλήματος (DEFORM 3D)

5.5.3 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΣΤΟ DEFORM 3D ΚΑΙ ΟΡΙΣΜΟΣ ΕΙΔΟΥΣ ΤΜΗΜΑΤΩΝ

Στη συνέχεια, εισάγουμε ένα-ένα τα τμήματα της μήτρας και τα ονομάζουμε για να μπορούμε να τα επεξεργαστούμε στη συνέχεια. Επίσης ορίζουμε το δοκίμιο (Billet) ως παραμορφώσιμο (plastic) και όλα τα υπόλοιπα τμήματα ως απαραμόρφωτα (Rigid).



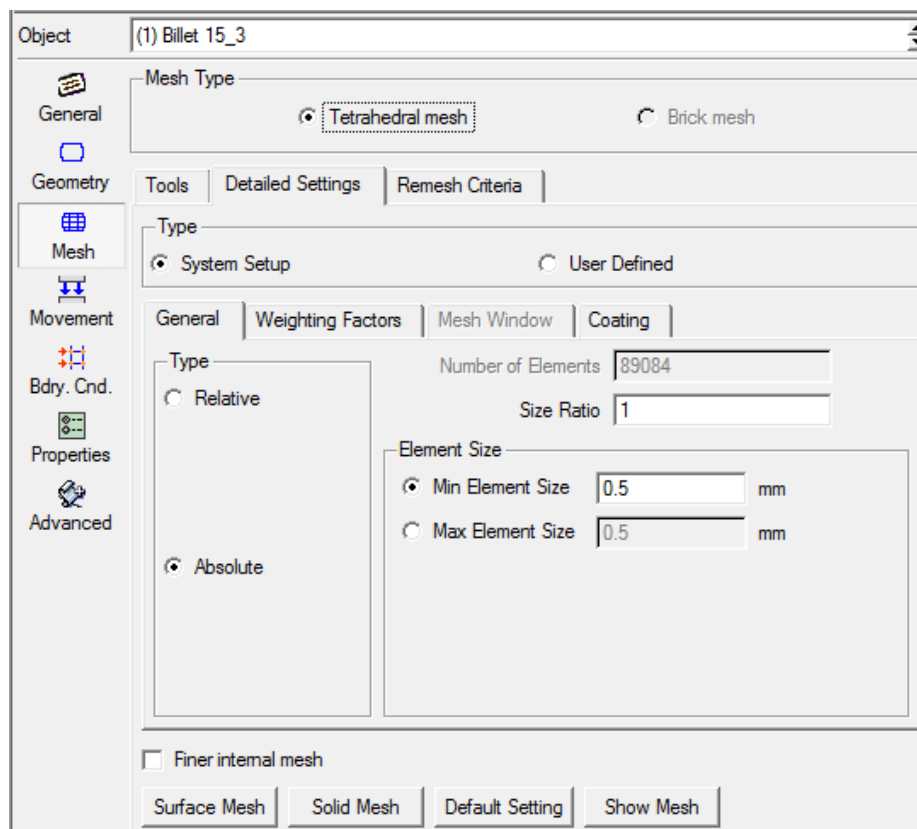
Σχήμα 5.19: Παράθυρο ορισμού ονομάτων και τύπου τμημάτων της μήτρας (DEFORM 3D)



Σχήμα 5.20: Γεωμετρία που έχει εισαχθεί από SOLIDWORKS και έχει επεξεργαστεί στο DEFORM 3D

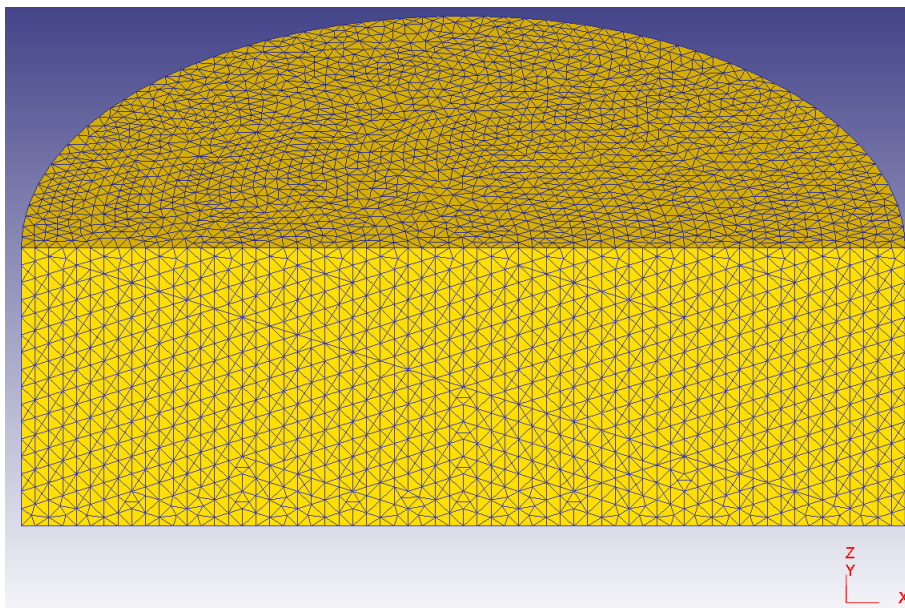
5.5.4 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Τα πεπερασμένα στοιχεία χρησιμοποιεί το DEFORM 3D είναι τετραεδρικά. Επιλέγουμε χειροκίνητη δημιουργία πλέγματος στο δοκίμιο όπου ορίζουμε ως μέγεθος ακμής του πεπερασμένου στοιχείου (min element size) είναι: 0,5 mm. Επίσης ορίζουμε ως αναλογία μεγέθους των πεπερασμένων στοιχείων (size ratio) ίσο με: 1, προκειμένου όλα τα στοιχεία να έχουν το ίδιο μέγεθος.



Σχήμα 5.21: Παράθυρο επιλογών ορισμού πεπερασμένων στοιχείων (DEFORM 3D)

Στη συνέχεια δημιουργούμε επιφανειακό πλέγμα (Surface Mesh) και στη συνέχεια συμπαγές πλέγμα (Solid Mesh) και παίρνουμε τελικά το παρακάτω σχήμα όπου διακρίνονται καθαρά τα τετραεδρικά πεπερασμένα στοιχεία που δημιουργήθηκαν.



Σχήμα 5.22: Πλέγμα τετραεδρικών πεπερασμένων στοιχείων (DEFORM 3D)

Ο αριθμός των πεπερασμένων στοιχείων είναι 115648, ενώ ο αριθμός των κόμβων που έχουν δημιουργηθεί είναι 24780.

5.5.5 ΟΡΙΣΜΟΣ ΥΛΙΚΟΥ

Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε για τις προσομοιώσεις επιλέχθηκε από την ιστοσελίδα: www.matweb.com και είναι:

- Κράμα αλουμινίου 6061-T6

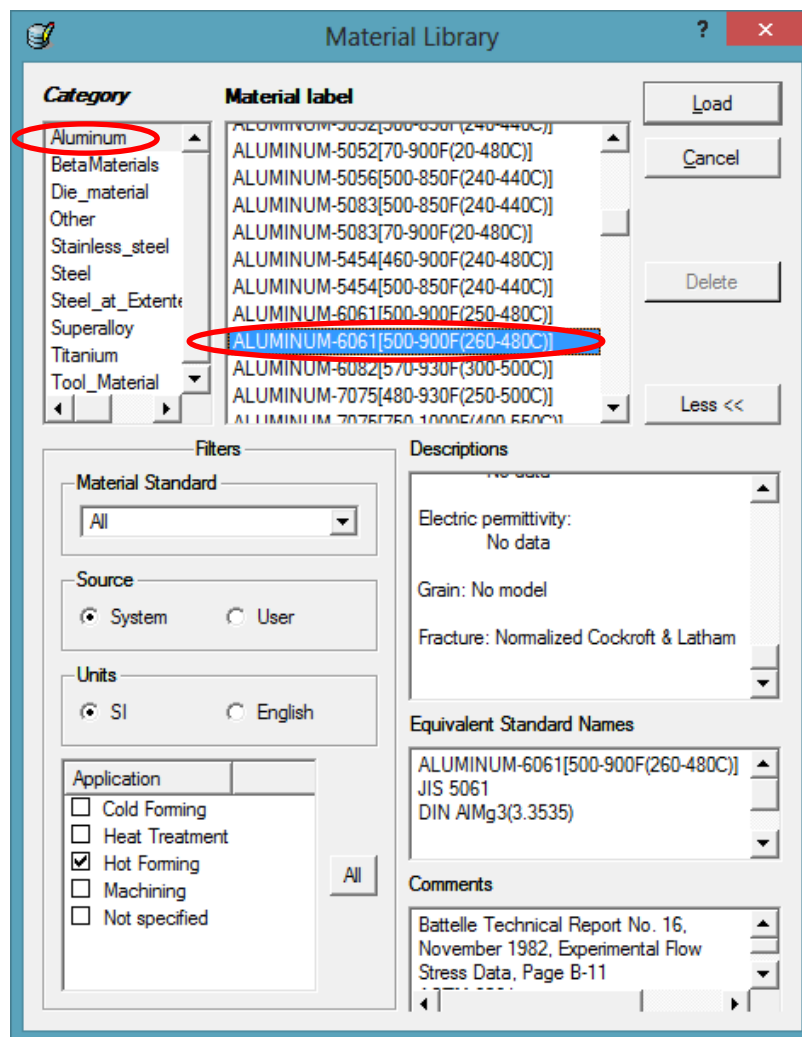
Το υλικό επιλέχθηκε από τη βιβλιοθήκη υλικών του DEFORM 3D χρησιμοποιώντας τις παρακάτω παραμέτρους:

- Κατηγορία: Αλουμίνιο
- Σύστημα μονάδων: SI
- Εφαρμογή: Θερμή παραμόρφωση

Τα υλικό είναι ισότροπο με πλαστικές και ελαστικές ιδιότητες, ενώ το μέτρο ελαστικότητας και ο αριθμός Poisson, δίνεται αμέσως παρακάτω:

- Κράμα Αλουμινίου (**AI 6061-T6**)
Μέτρο ελαστικότητας: 68,9 GPa
Αριθμός Poisson: 0,33

Αμέσως παρακάτω φαίνεται ορισμός του υλικού που έγινε από τη βιβλιοθήκη του DEFORM 3D.



Σχήμα 5.23: Επιλογή του **Αλουμινίου 6061-T6** ως υλικό από τη βιβλιοθήκη υλικών (*DEFORM 3D*)

Τα πλήρη χαρακτηριστικά των υλικού 6061-T6 παρουσιάζονται στο «παράρτημα Α» της εργασίας.

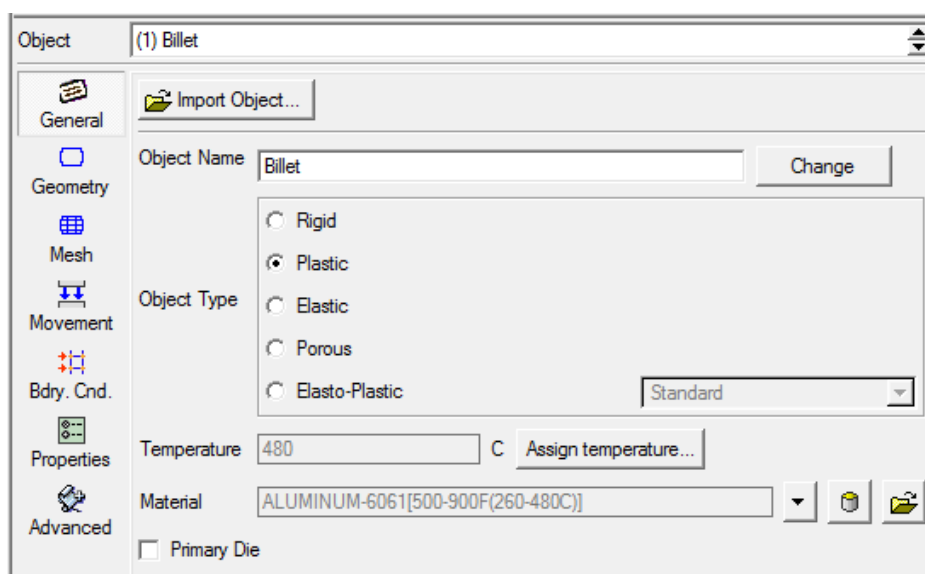
5.5.6 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Έπειτα, ορίζουμε τα διάφορα στοιχεία που απαρτίζουν το μοντέλο προσομοίωσης και τα οποία είναι:

- Το παραμορφώσιμο σώμα (Plastic)
 - Δοκίμιο (Billet)
- Τα απαραμόρφωτα σώματα (Rigid)
 - Μήτρα (Die)
 - Βάση Μήτρας (Die Base)
 - Έμβολο (Punch)
 - Άνω τμήμα Εμβόλου (Upper Punch)
 - Κέλυφος (Shell)
 - Βάση Κελύφους (Shell Base)
 - Οδηγοί (Guides)
 - Κοχλίες (Screws)
 - Άνω Πρέσα (Press Up)
 - Κάτω Πρέσα (Press Down)
- Οι επιφάνειες συμμετρίας
 - Η συμμετρία εφαρμόζεται σε όλα τα σώματα εκτός από τον ένα κοχλία και τους δύο οδηγούς που δεν τέμνονται από την επιφάνεια συμμετρίας.

Για τον ορισμό του παραμορφώσιμου σώματος ορίζουμε τις εξής παραμέτρους στο μενού επιλογών του DEFORM 3D:

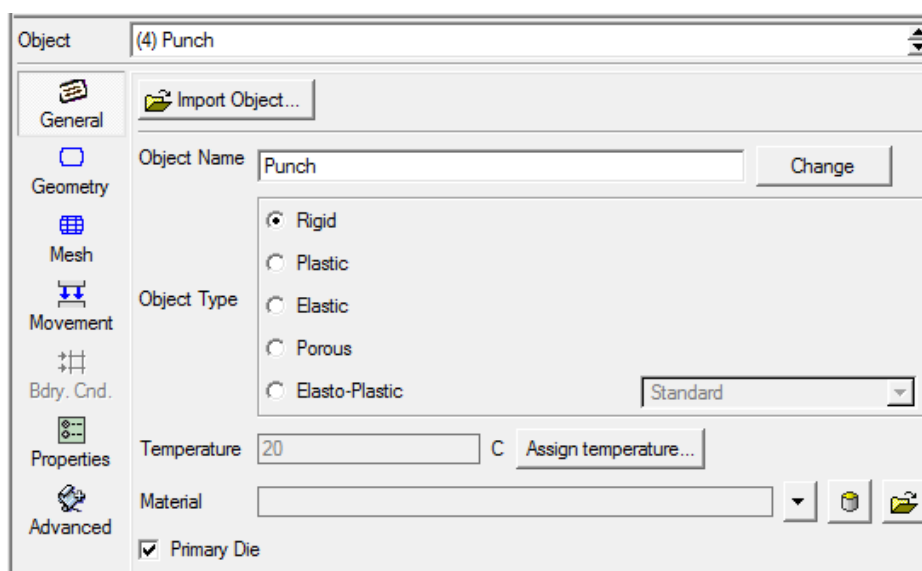
- Τύπος σώματος: Πλαστικό (Plastic)
- Θερμοκρασία: 480 °C (στο συγκεκριμένο παράδειγμα προσομοίωσης)
- Υλικό: Αλουμίνιο 6061-T6



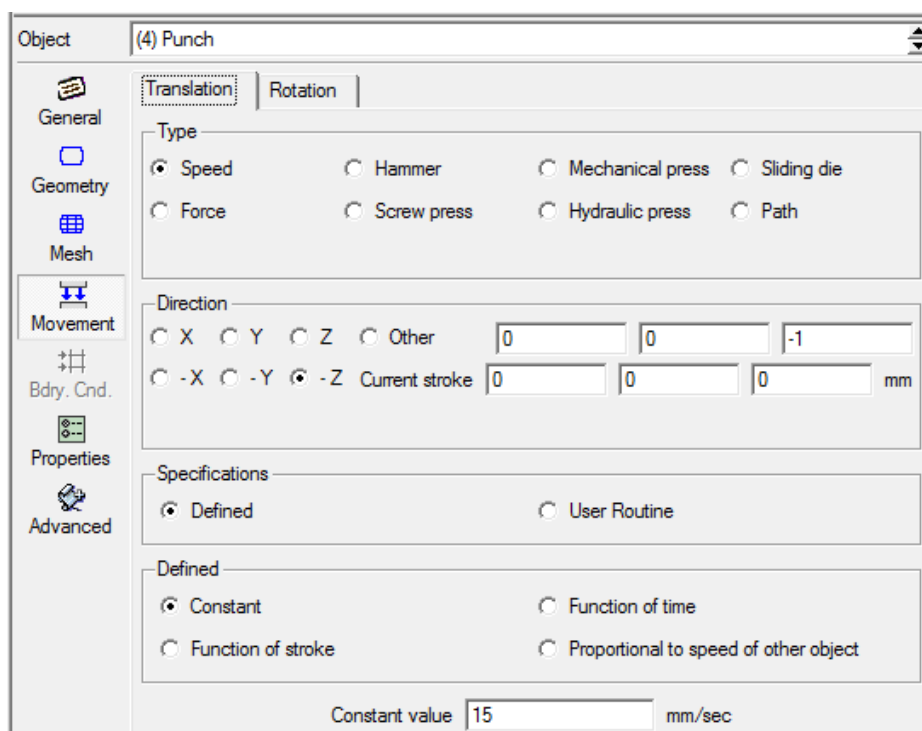
Σχήμα 5.24: Επιλογές του παραμορφώσιμου σώματος (DEFORM 3D)

Για τον ορισμό των απαραμόρφωτων σωμάτων ορίζουμε τις εξής παραμέτρους στο μενού επιλογών του DEFORM 3D:

- Τύπος σώματος: Απαράμορφωτο (Rigid)
- Θερμοκρασία: 20 °C
- Ταχύτητα: 15 mm/sec στον άξονα -Z (ταχύτητα ορίζουμε μόνο στα σώματα που κινούνται, δηλαδή στο έμβολο, το άνω τμήμα του εμβόλου και το άνω τμήμα της πρέσας)



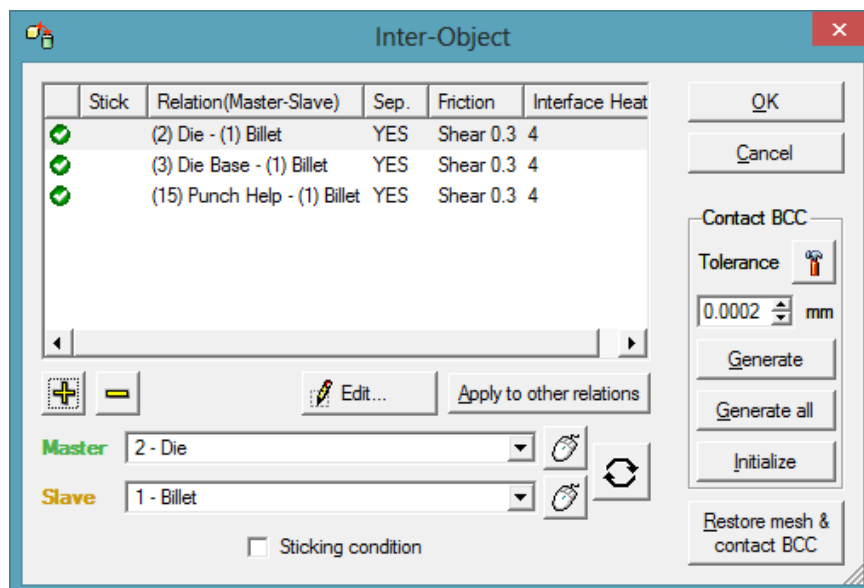
Σχήμα 5.25: Επιλογές ενός απαραμόρφωτου σώματος (έμβολο) (DEFORM 3D)



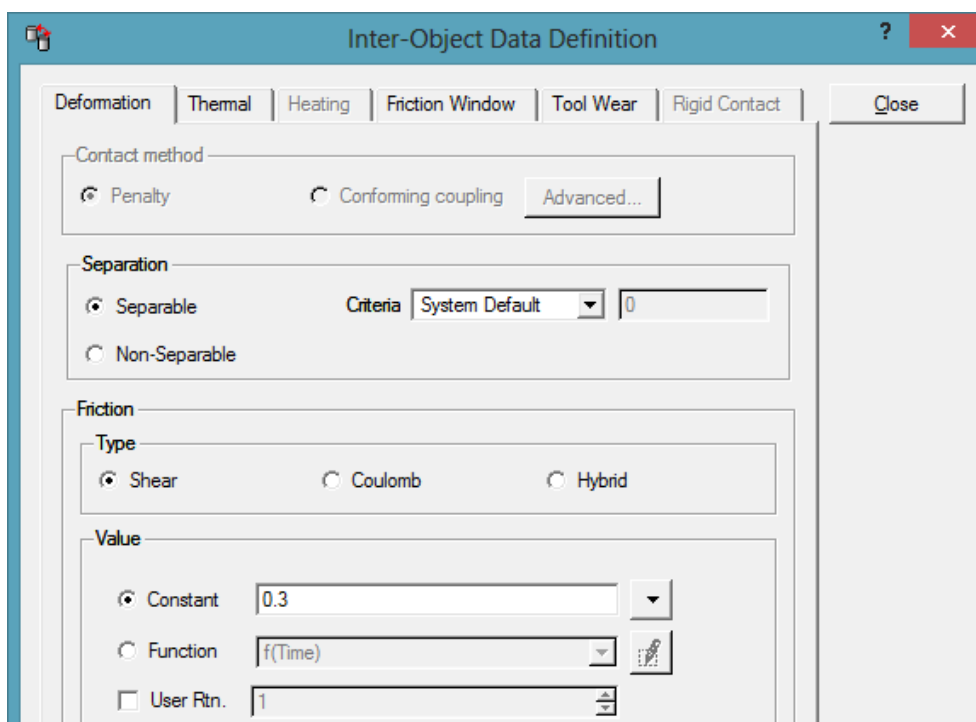
Σχήμα 5.26: Επιλογή ταχύτητας του απαραμόρφωτου σώματος (έμβολο) (DEFORM 3D)

5.5.7 ΟΡΙΣΜΟΣ ΕΠΑΦΗΣ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

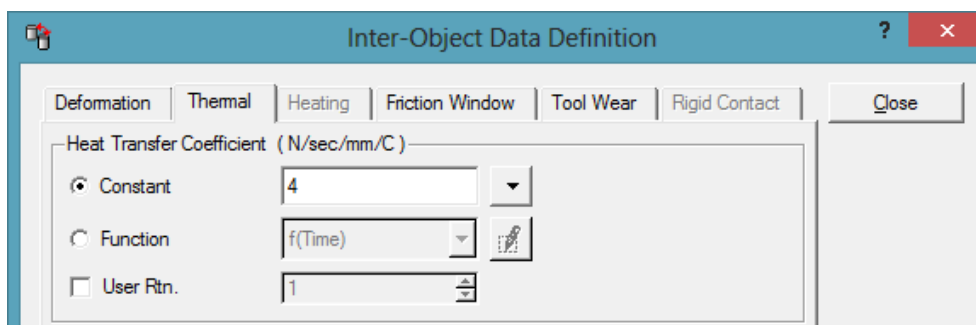
Στη συνέχεια ορίζουμε την επαφή μεταξύ του παραμορφώσιμου και των απαραμόρφωτων στοιχείων του μοντέλου μας. Έτσι, μεταξύ των στοιχείων ορίζουμε επαφή (Touching), η οποία μεταξύ των απαραμόρφωτων σωμάτων με το παραμορφώσιμο έχει και έναν συντελεστή τριβής, ο οποίος έχει προαναφερθεί και στη συγκεκριμένη προσομοίωση παίρνει την τιμή $\mu = 0.3$ ενώ ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας 4 N/sec/mm/C .



Σχήμα 5.27: Ορισμός των επαφών μεταξύ των στοιχείων (DEFORM 3D)



Σχήμα 5.28: Ορισμός του συντελεστή τριβής μεταξύ των στοιχείων (DEFORM 3D)

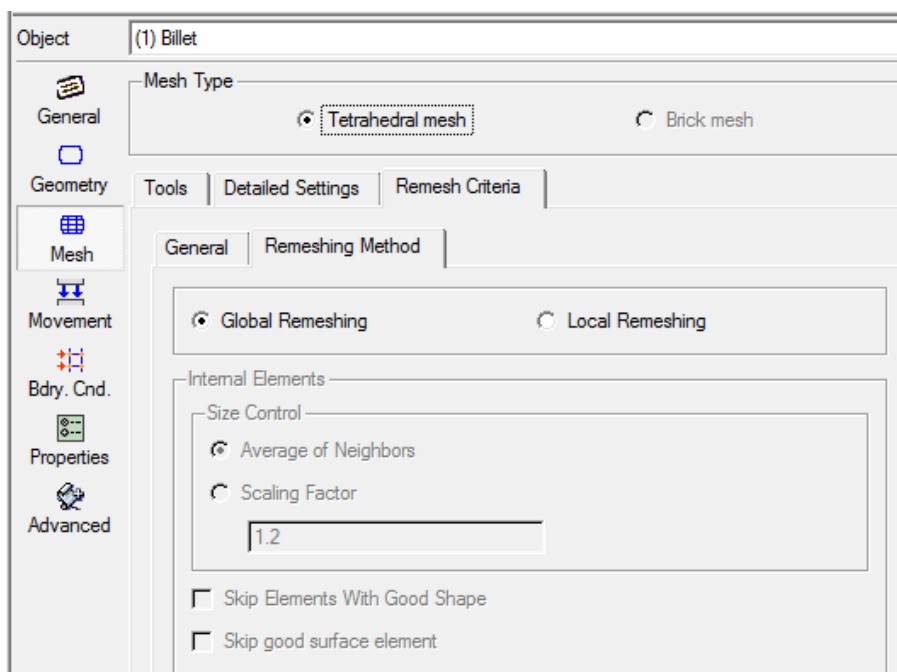


Σχήμα 5.29: Ορισμός του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας μεταξύ των στοιχείων (DEFORM 3D)

5.5.8 ΕΠΑΝΑΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ (REMESHING)

Όπως έχουμε προαναφέρει, σημαντικό πλεονέκτημα του DEFORM 3D είναι η επαναδημιουργία πλέγματος (Remeshing). Στη κατεργασία της σφυρηλάτησης, αυτό το χαρακτηριστικό είναι απαραίτητο μιας και έχουμε μεγάλη παραμόρφωση των στοιχείων. Οι επιλογές του Remeshing επιλέχθηκαν έτσι ώστε να ενεργοποιείται η αναδημιουργία πλέγματος όταν υπάρχει μεγάλη παραμόρφωση στα πεπερασμένα στοιχεία καθώς και όταν υπάρχει εισχώρηση κάποιων πεπερασμένων στα απααραμόρφωτα τοιχώματα.

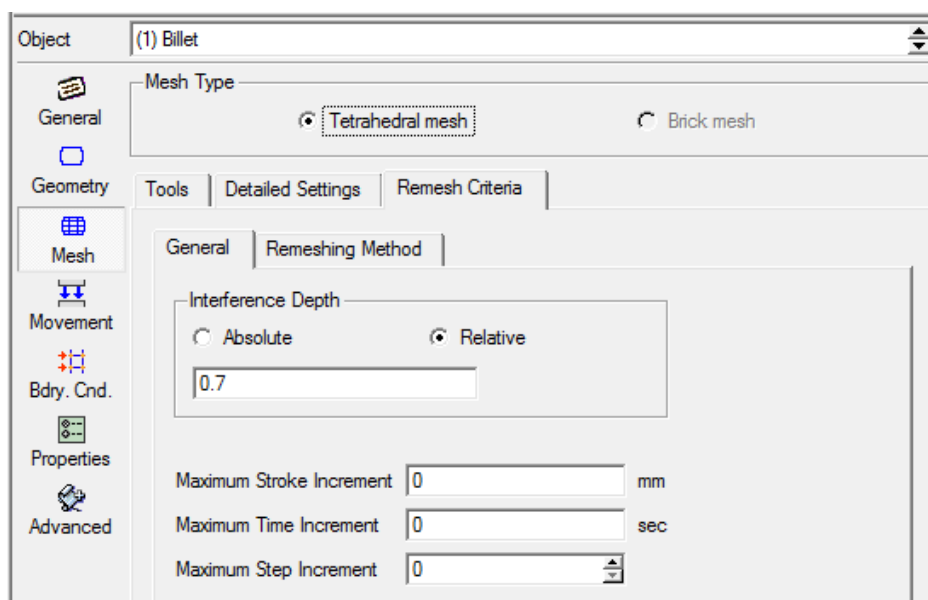
Θα χρησιμοποιήσουμε 3-D global remeshing με τετραεδρικά πεπερασμένα στοιχεία. Έχει αποδειχθεί ότι η δημιουργία πλέγματος με τετραεδρικά πεπερασμένα στοιχεία είναι πιο ακριβής και πιο γρήγορη στην επίλυση, σε σχέση με άλλα πλέγματα.



Σχήμα 5.30: Ορισμός του τύπου Remeshing (DEFORM 3D)

Στη συνέχεια ορίζουμε ως κριτήριο επαναδημιουργίας του πλέγματος όταν η ακμή ενός πεπερασμένου στοιχείου εισχωρήσει στο απααραμόρφωτο σώμα κατά ένα ποσοστό. Η

απόσταση εισχώρησης λαμβάνεται διαφορετικά και εξαρτάται από το αν η απόσταση είναι αρνητική ή θετική. Στην περίπτωση μας έχουμε επιλέξει σχετική απόσταση εισχώρησης (Relative Interference Depth) 0.7. Αυτό σημαίνει όταν, μετά από έλεγχο του προγράμματος, αν κάποιο πεπερασμένο στοιχείο εισέλθει πάνω από το 70% μέσα στα απαραμόρφωτα τοιχώματα ενεργοποιείται το remeshing. Η τιμή αυτή είναι προτεινόμενη από το πρόγραμμα και μετά από δοκιμές δίνει σταθεροποιημένα αποτελέσματα.



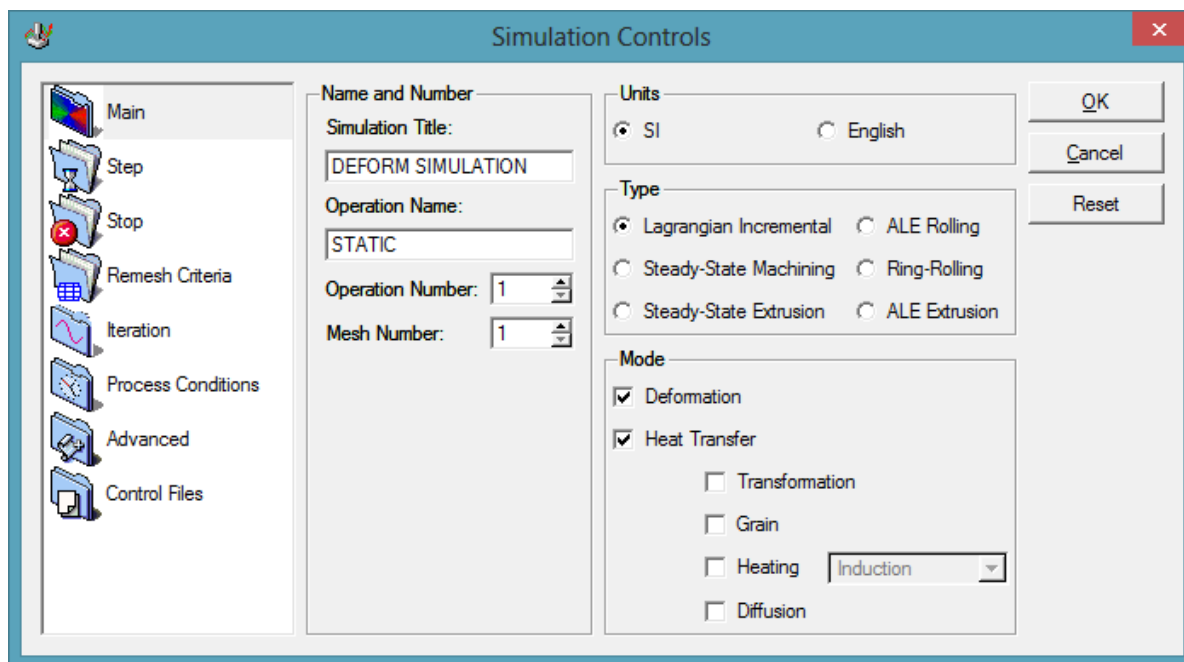
Σχήμα 5.31: Ορισμός της ενεργοποίησης του Remeshing (DEFORM 3D)

5.5.9 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στη συνέχεια, θα ορίσουμε τις επιλογές ελέγχου της προσομοίωσης του μοντέλου μας, χρησιμοποιώντας την ακολουθία εντολών:

Input → Simulation Controls

Αφού δώσουμε όνομα στην προσομοίωση και στην διαδικασία παίρνουμε το ακόλουθο παράθυρο επιλογών:

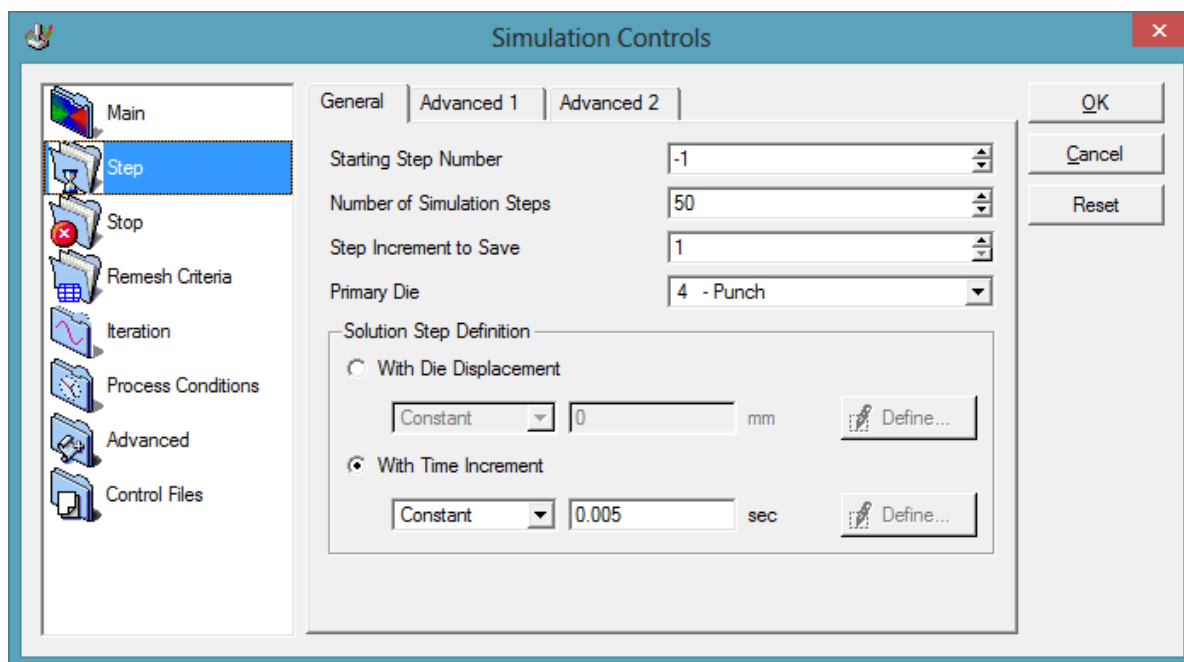


Σχήμα 5.32: Παράθυρο επιλογών της διεργασίας (*DEFORM 3D*)

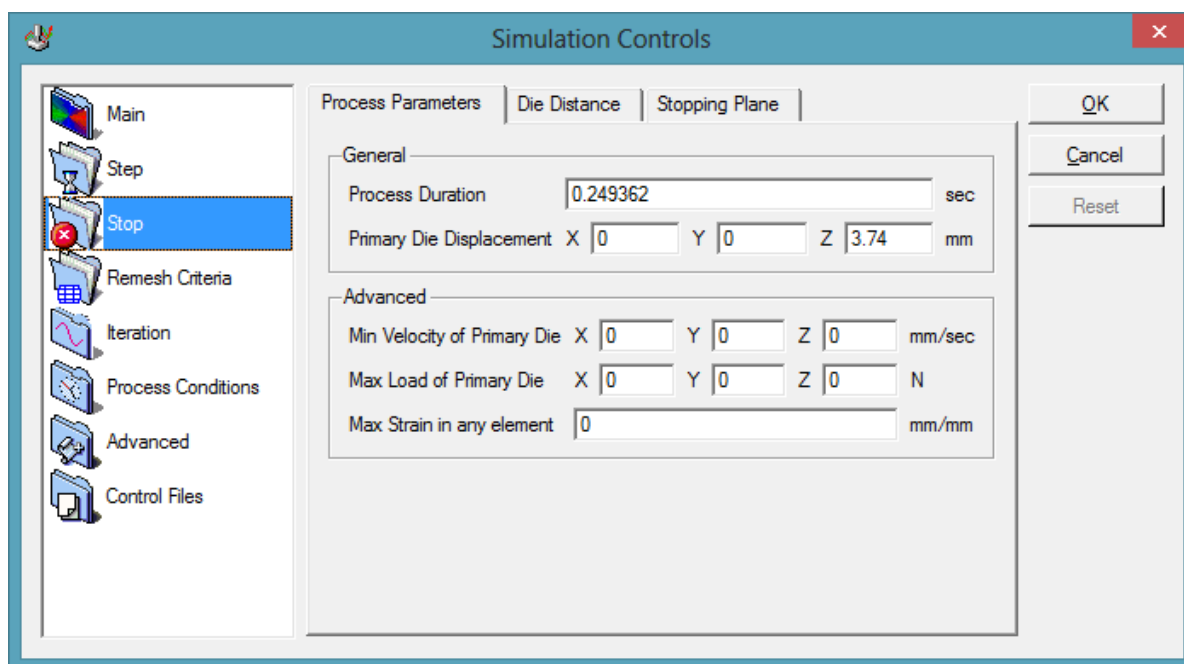
Ορίζουμε τις εξής παραμέτρους στο μενού επιλογών του DEFORM 3D:

- Σύστημα μονάδων: SI
- Τύπος επίλυσης: Lagrangian Incremental (χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις διαμόρφωσης και θερμικών προβλημάτων)
- Τύποι προσομοίωσης
 - Παραμόρφωση
 - Μεταφορά θερμότητας

Στη συνέχεια, ορίζουμε τις επιλογές της υπόθεσης φόρτισης, όπου διακρίνουμε τον χρόνο φόρτισης, οποίος ισούται με 0,25 sec, όσος χρόνος χρειάζεται για κατέλθει το εμβολο 3.74 mm, σύμφωνα με την ταχύτητα εμβόλου που έχουμε ορίσει και ισούται με 15 mm/sec. Ο χρόνος αυτός υποδιαιρείται σε 50 βήματα (Steps) των 0.005 sec το ένα. Επίσης, στις επιλογές ορίζουμε ως βασική μήτρα το έμβολο.



Σχήμα 5.33: Παράθυρο επιλογών βημάτων της διεργασίας (DEFORM 3D)



Σχήμα 5.34: Παράθυρο επιλογών τερματισμού της διεργασίας (DEFORM 3D)

Αφού ολοκληρώσαμε όλες τις απαραίτητες ρυθμίσεις της ανάλυσης, δημιουργούμε το αρχείο δεδομένων της προσομοίωσης χρησιμοποιώντας την ακολουθία εντολών:

Input → Database Generator

5.5.10 ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Στη συνέχεια, αφού έχει δημιουργηθεί η βάση δεδομένων της προσομοίωσης προχωρούμε στην επίλυσή της χρησιμοποιώντας την ακολουθία εντολών:

Simulator → Run

Κατά τη διάρκεια της επίλυσης μπορούμε να βλέπουμε την εξέλιξη της με γραφικό περιβάλλον χρησιμοποιώντας την ακολουθία εντολών:

Simulator → Simulation Graphics

Επίσης, κατά τη διάρκεια της επίλυσης μπορούμε να βλέπουμε την εξέλιξη της βήμα – βήμα από το συνεχόμενα ανανεώσιμο σημειωματάριο του προγράμματος όπου μπορούμε εκτός των άλλων να ελέγχουμε:

- τον χρόνο επίλυσης του κάθε βήματος
- τον αριθμό των επιμέρους βημάτων που χρειάστηκαν
- την ενεργοποίηση της αναδημιουργίας πλέγματος

Μετά την ολοκλήρωση της επίλυσης το πρόγραμμα μας δίνει ένα περιληπτικό πίνακα στον οποίο παρουσιάζονται:

- ο αριθμός των βημάτων που χρειάστηκαν
- ο αριθμός των πλεγμάτων που δημιουργήθηκαν
- ο χρόνος προσομοίωσης του κάθε βήματος
- η μετατόπιση του εμβόλου σε κάθε βήμα

5.5.11 ΛΗΨΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Μετά την επιτυχή επίλυση του μοντέλου, παίρνουμε τα ζητούμενα αποτελέσματα χρησιμοποιώντας την ακολουθία εντολών:

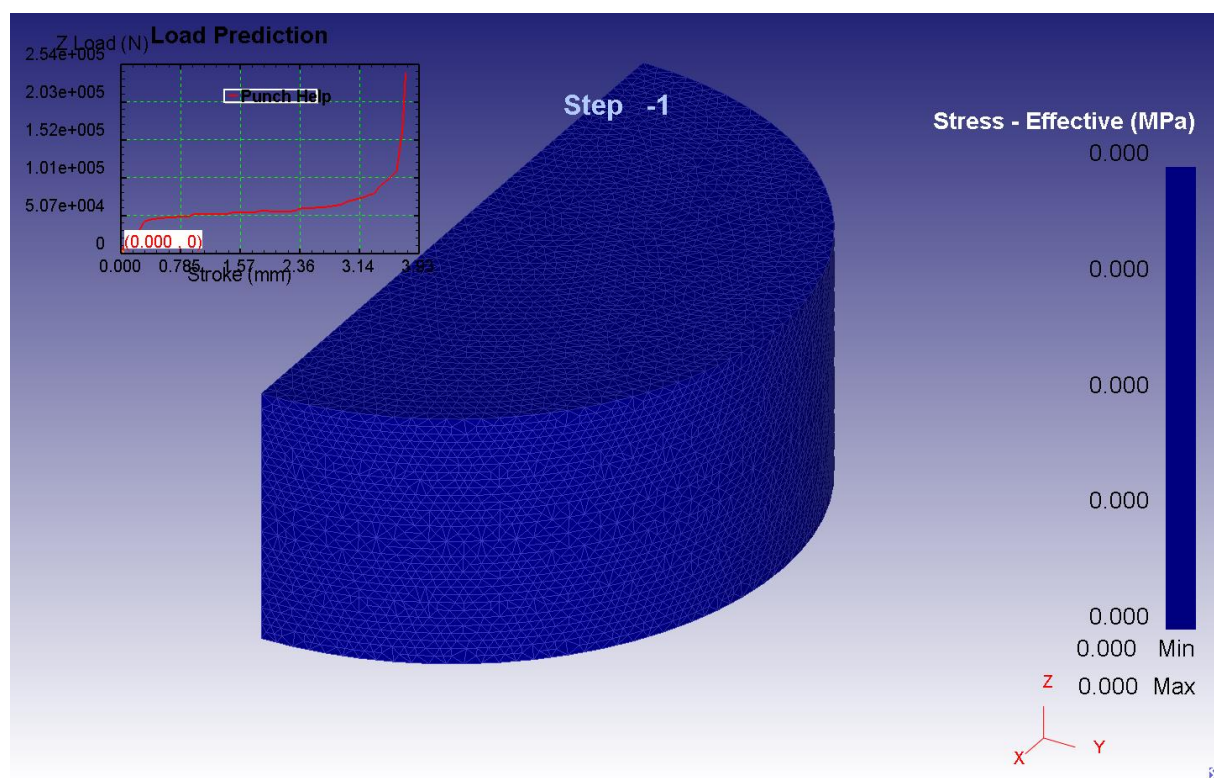
Post processor → DEFORM 3D Post

έτσι, το πρόγραμμα μας οδηγεί στο περιβάλλον εμφάνισης των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης που περιλαμβάνουν:

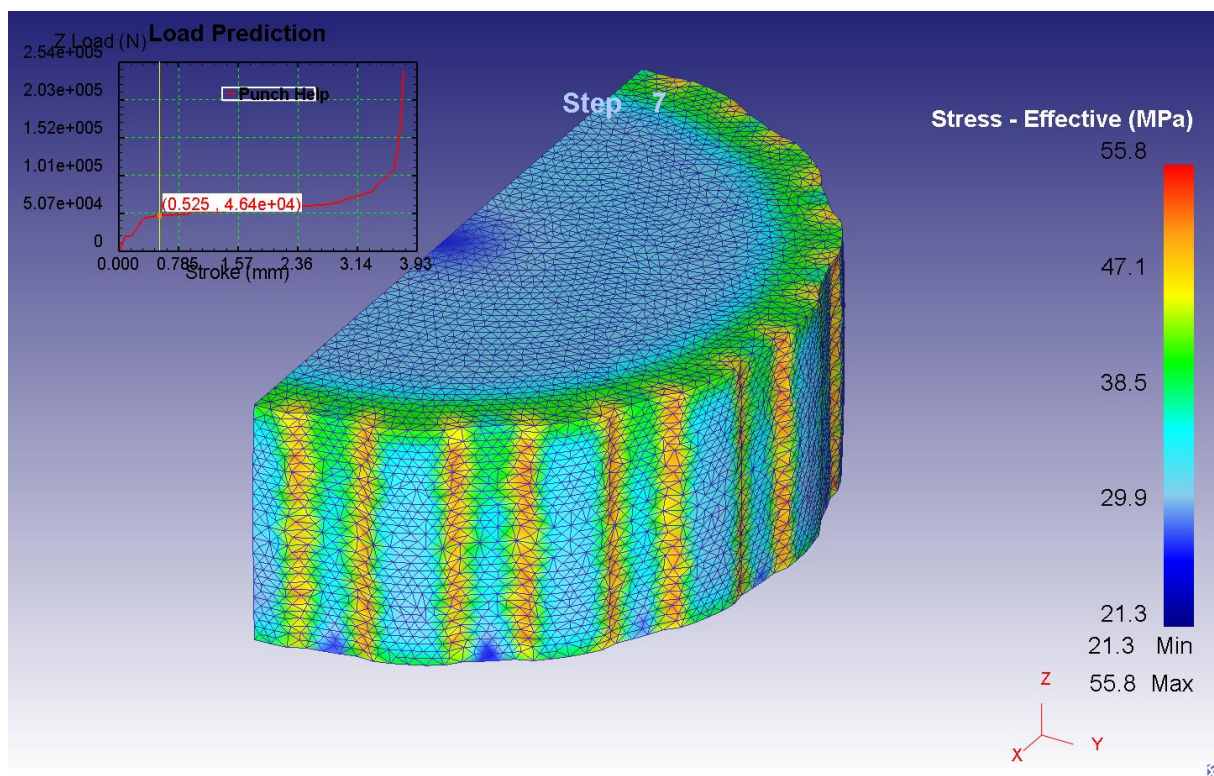
- Ισοδύναμες τάσεις του δοκιμίου κατά Von Mises
- Θερμοκρασία του δοκιμίου
- Φορτίο σφυρηλάτησης που δέχεται το έμβολο, η μήτρα και η βάση της μήτρας
- Μεταβολή του όγκου του δοκιμίου κατά τη σφυρηλάτηση

Αμέσως παρακάτω θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα των ισοδύναμων τάσεων κατά Von Mises σε N/mm^2 (MPa) για μετατόπιση του εμβόλου κατά 0,5 mm περίπου, ενώ πάνω αριστερά παρουσιάζεται και το φορτίο σφυρηλάτησης του εμβόλου σε N.

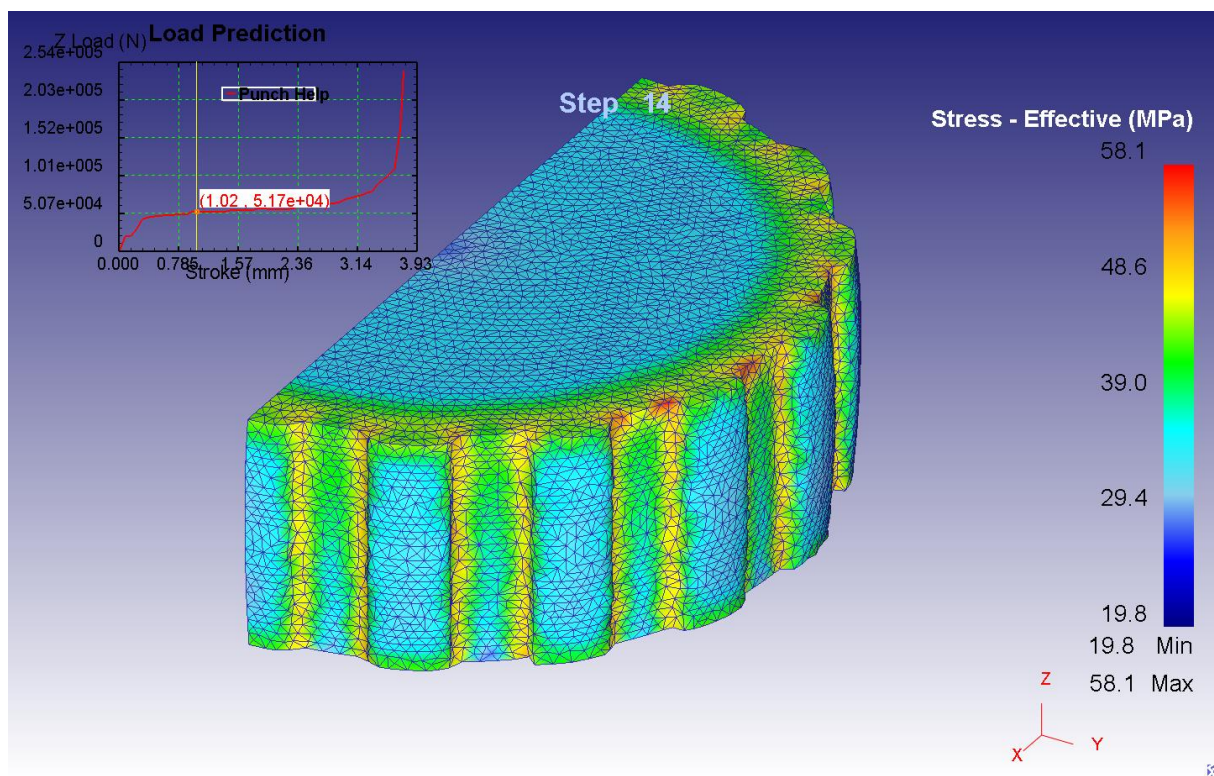
ΙΣΟΔΥΝΑΜΕΣ ΤΑΣΕΙΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΚΑΤΑ VON MISES



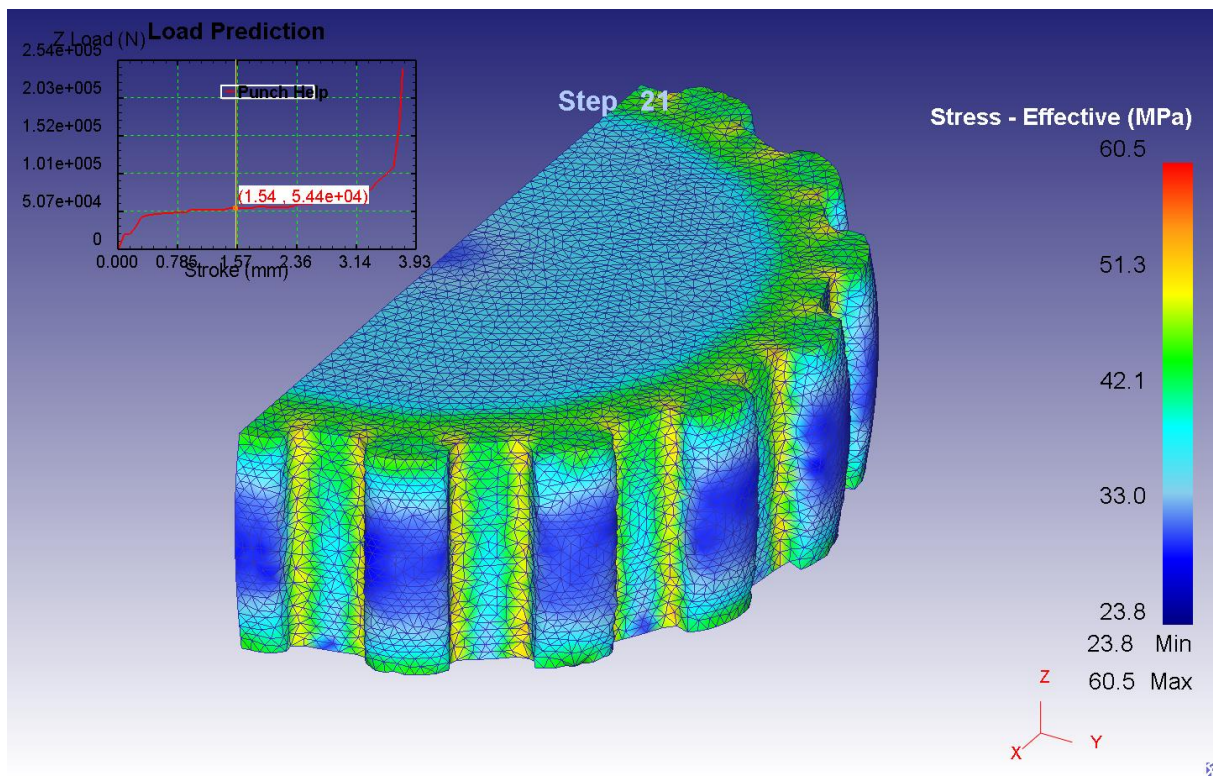
Σχήμα 5.35: Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για μετατόπιση 0 mm (DEFORM 3D)



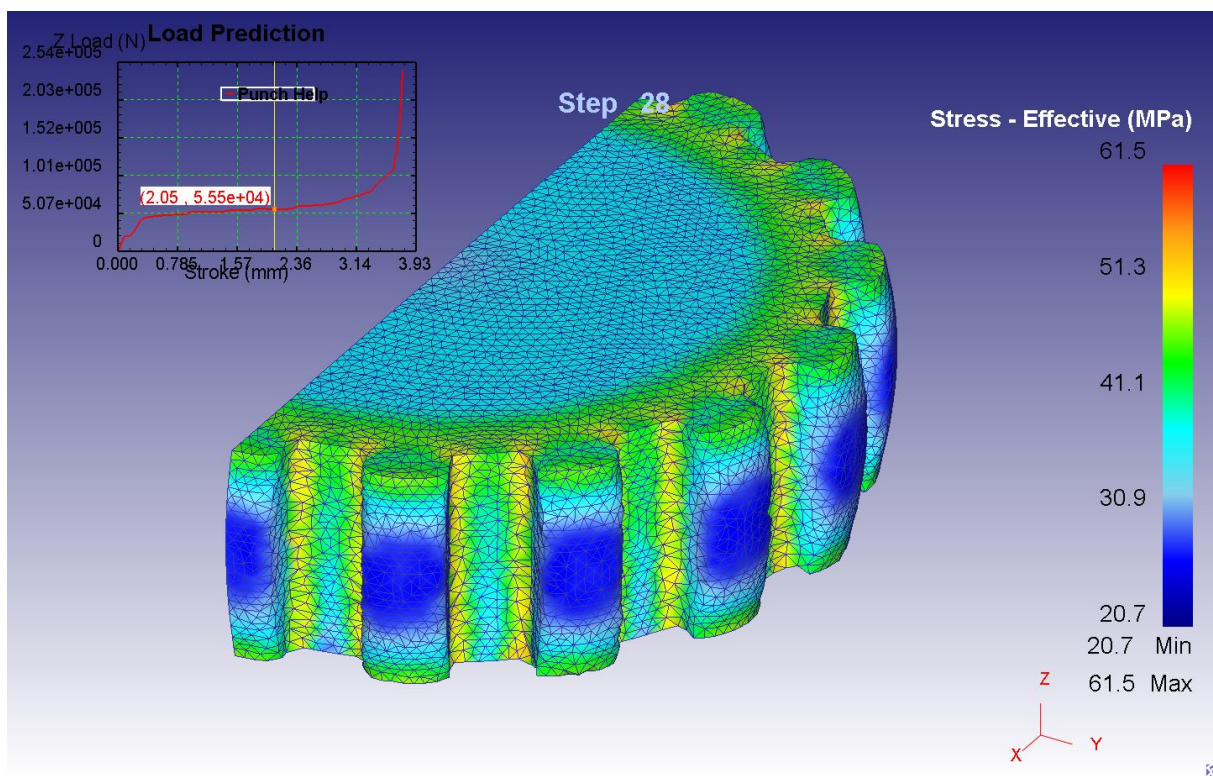
Σχήμα 5.36: Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για μετατόπιση 0,525 mm (DEFORM 3D)



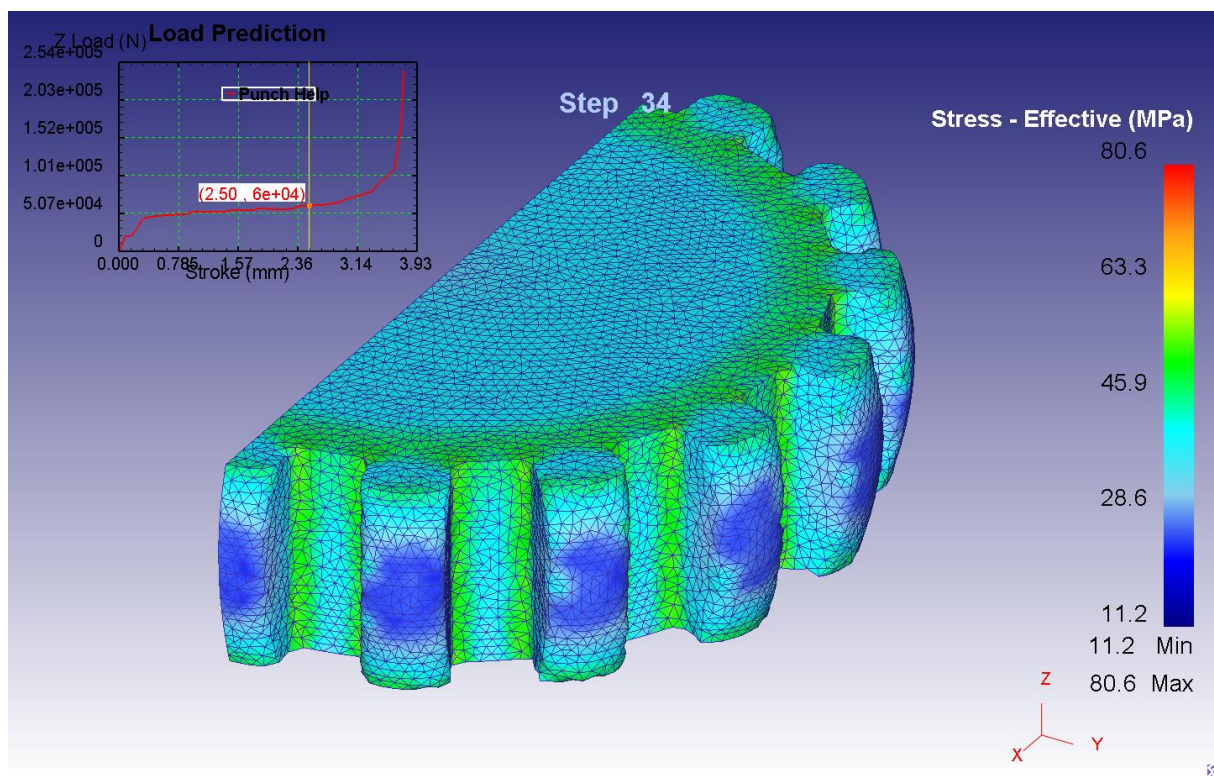
Σχήμα 5.37: Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για μετατόπιση 1,02 mm (DEFORM 3D)



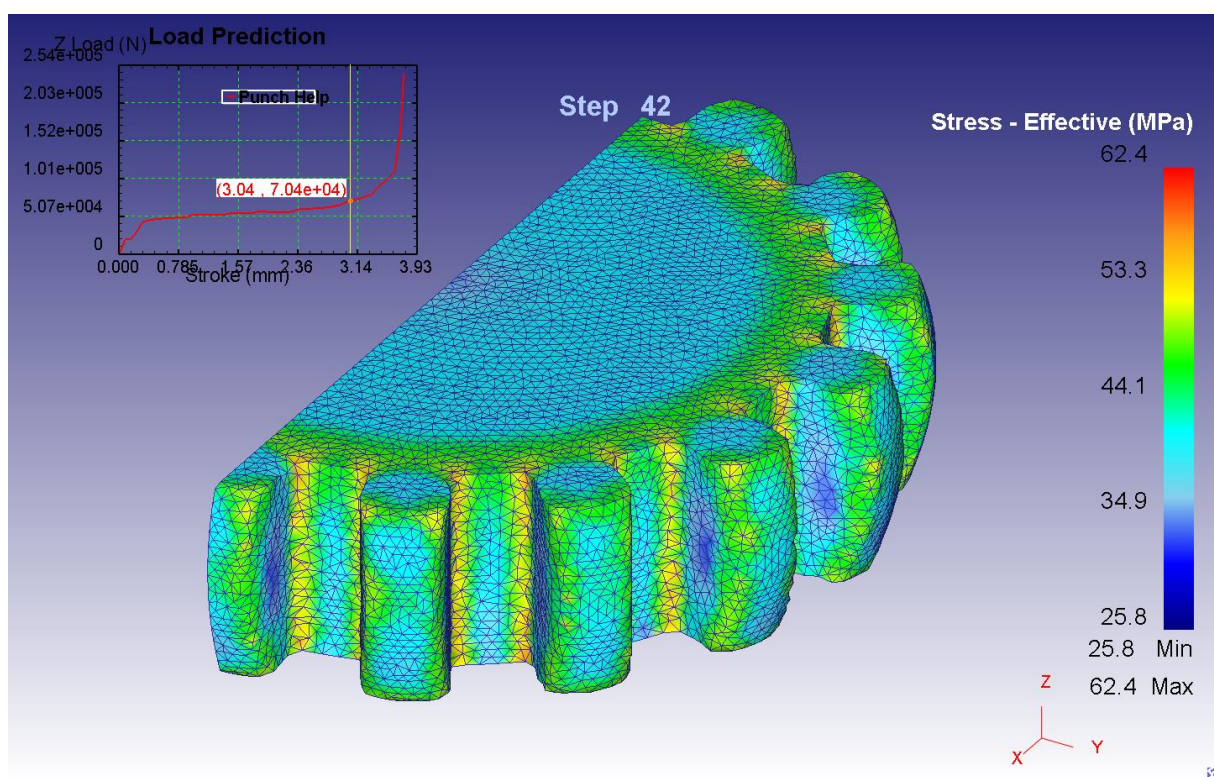
Σχήμα 5.38: Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για μετατόπιση 1,54 mm (DEFORM 3D)



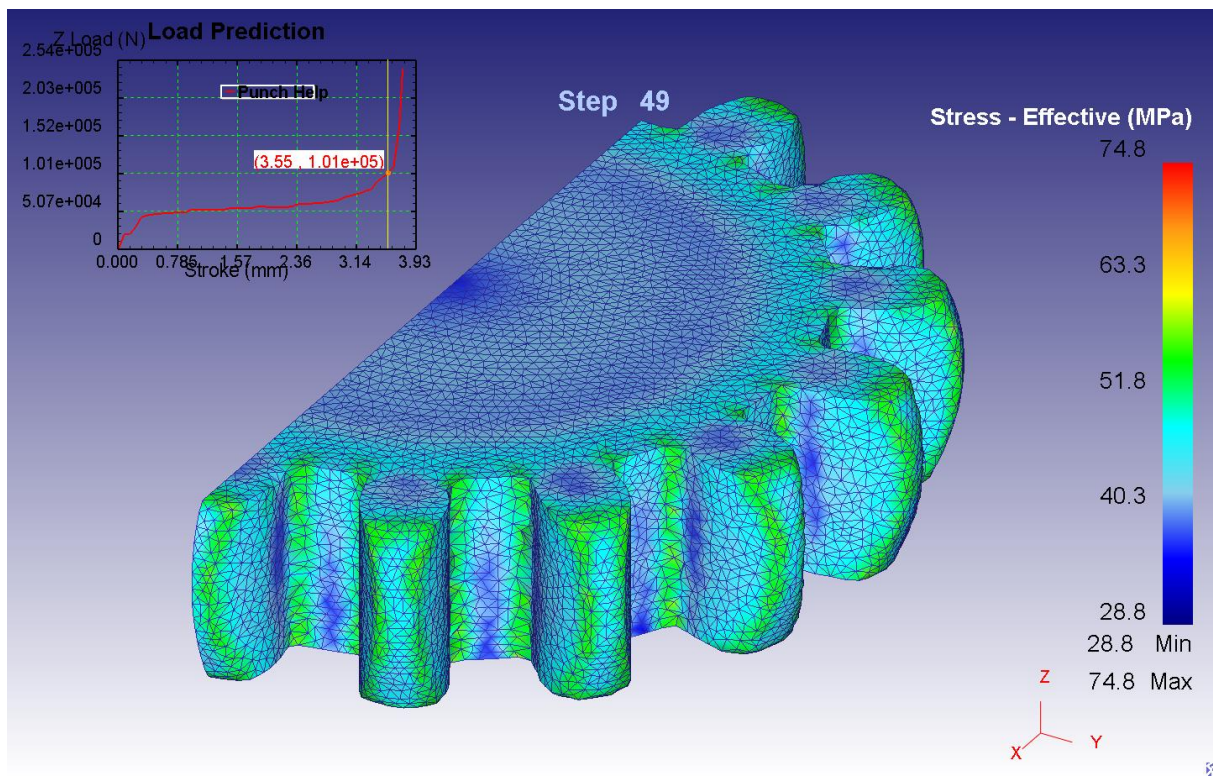
Σχήμα 5.39: Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για μετατόπιση 2,05 mm (DEFORM 3D)



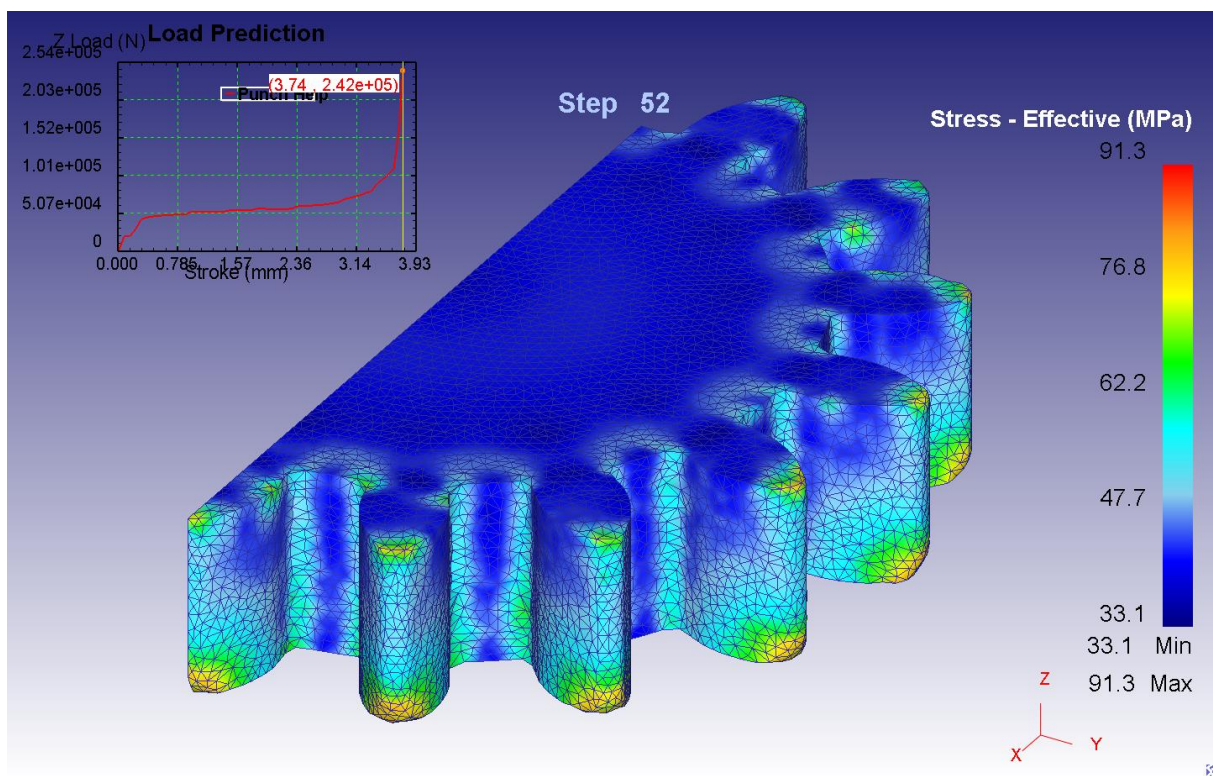
Σχήμα 5.40: Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για μετατόπιση 2,50 mm (DEFORM 3D)



Σχήμα 5.41: Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για μετατόπιση 3,04 mm (DEFORM 3D)



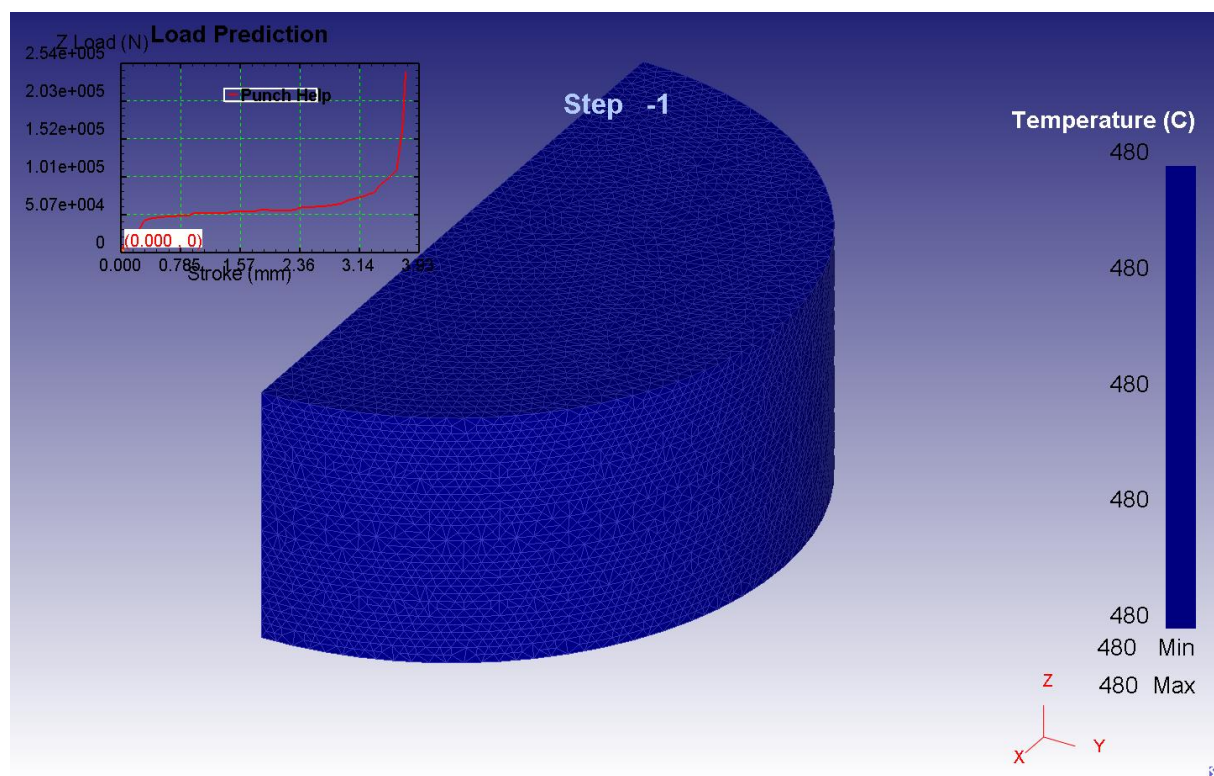
Σχήμα 5.42: Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για μετατόπιση 3,55 mm (DEFORM 3D)



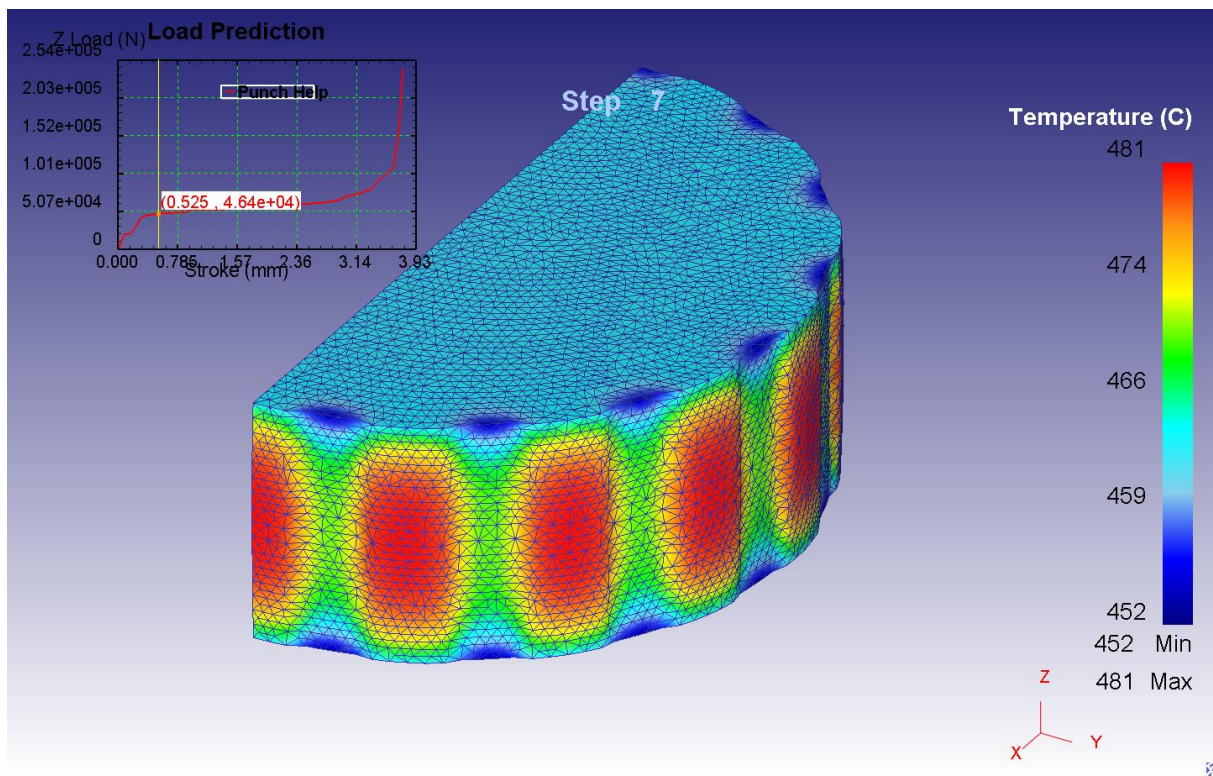
Σχήμα 5.43: Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για μετατόπιση 3,74 mm (DEFORM 3D)

Αμέσως παρακάτω θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα της θερμοκρασίας του δοκιμίου σε βαθμούς κελσίου (°C) για μετατόπιση του εμβόλου κατά 0,5 mm περίπου, ενώ πάνω αριστερά παρουσιάζεται και το φορτίο σφυρηλάτησης του εμβόλου σε N.

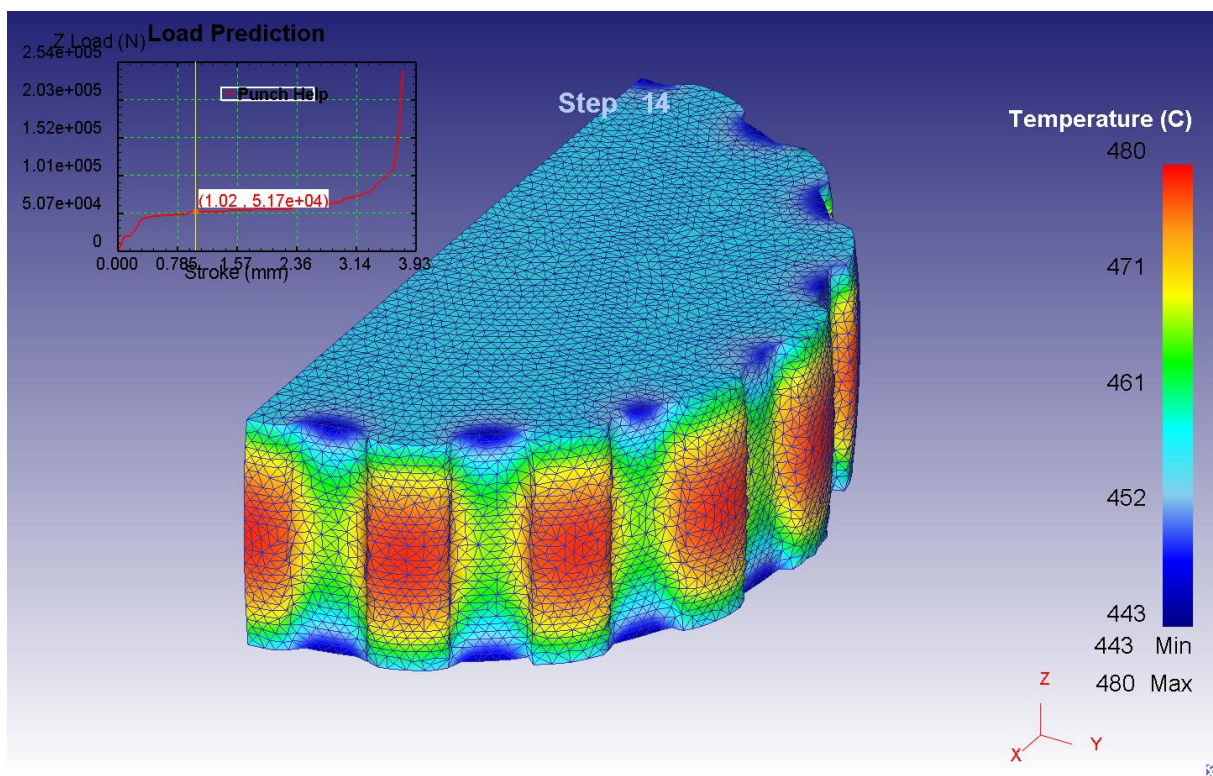
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ



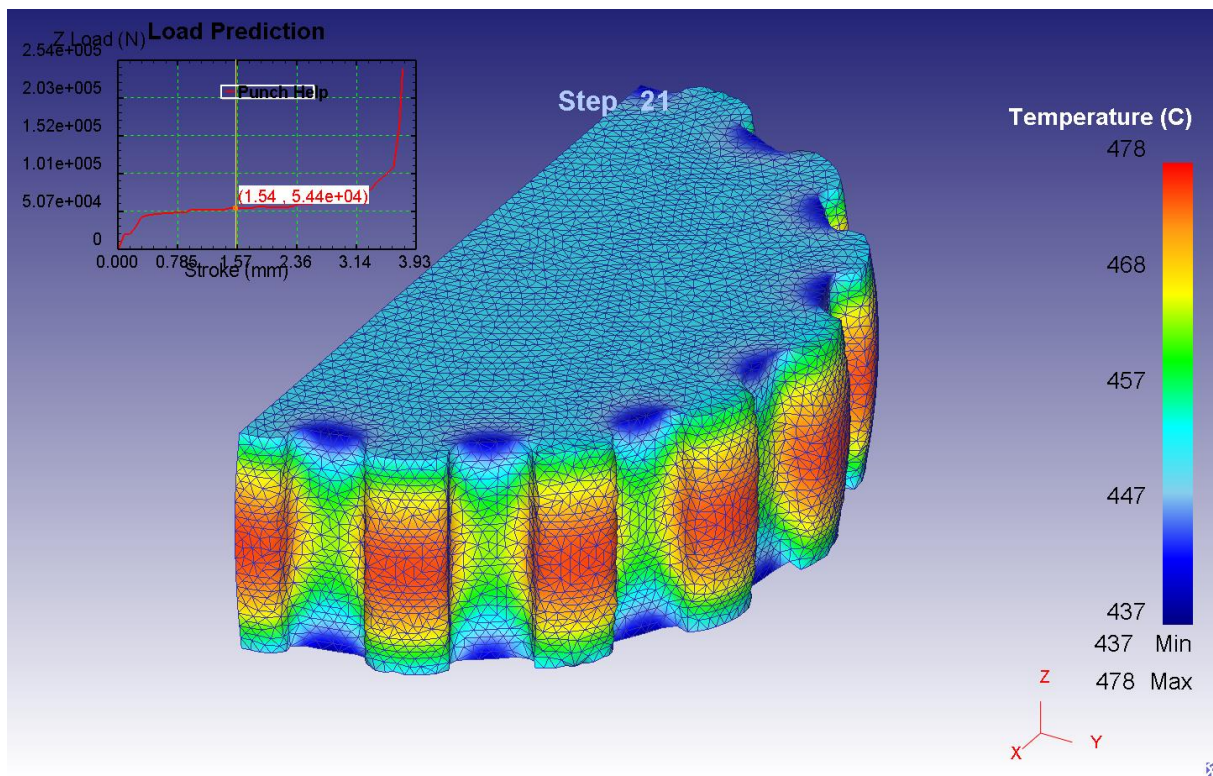
Σχήμα 5.44: Θερμοκρασία για μετατόπιση 0 mm (DEFORM 3D)



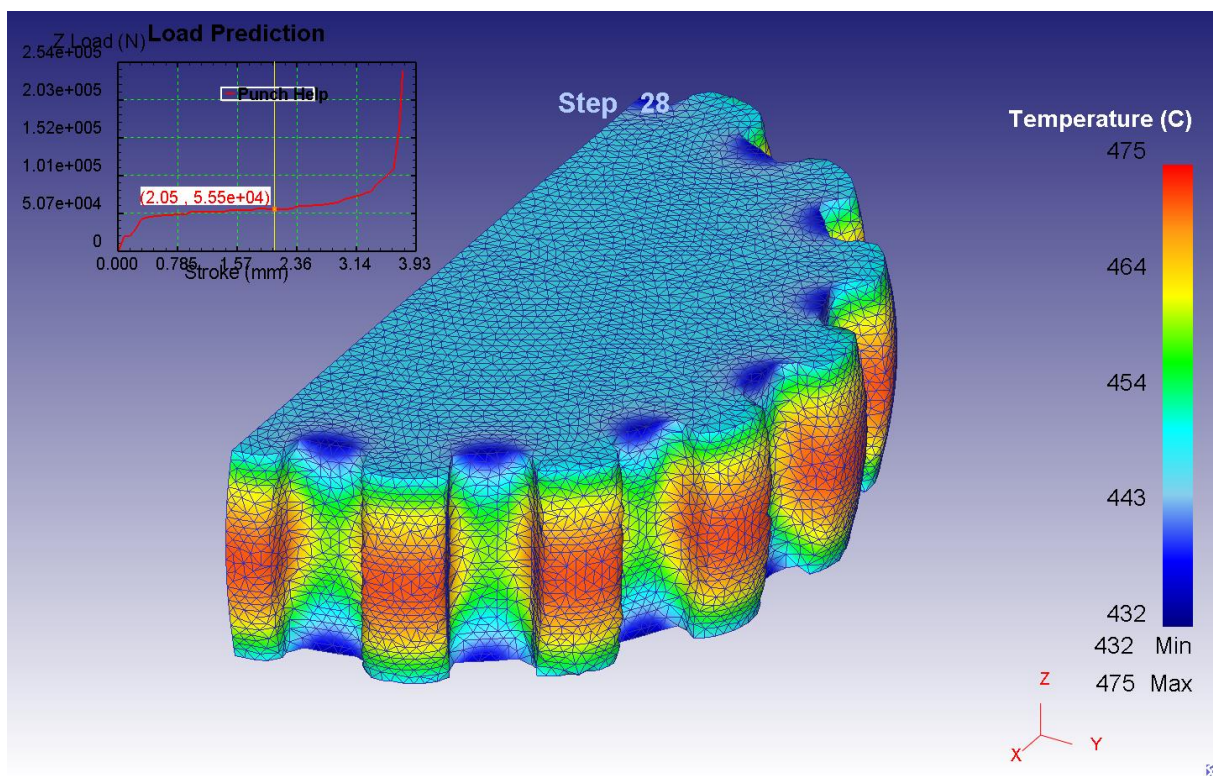
Σχήμα 5.45: Θερμοκρασία για μετατόπιση 0,525 mm (DEFORM 3D)



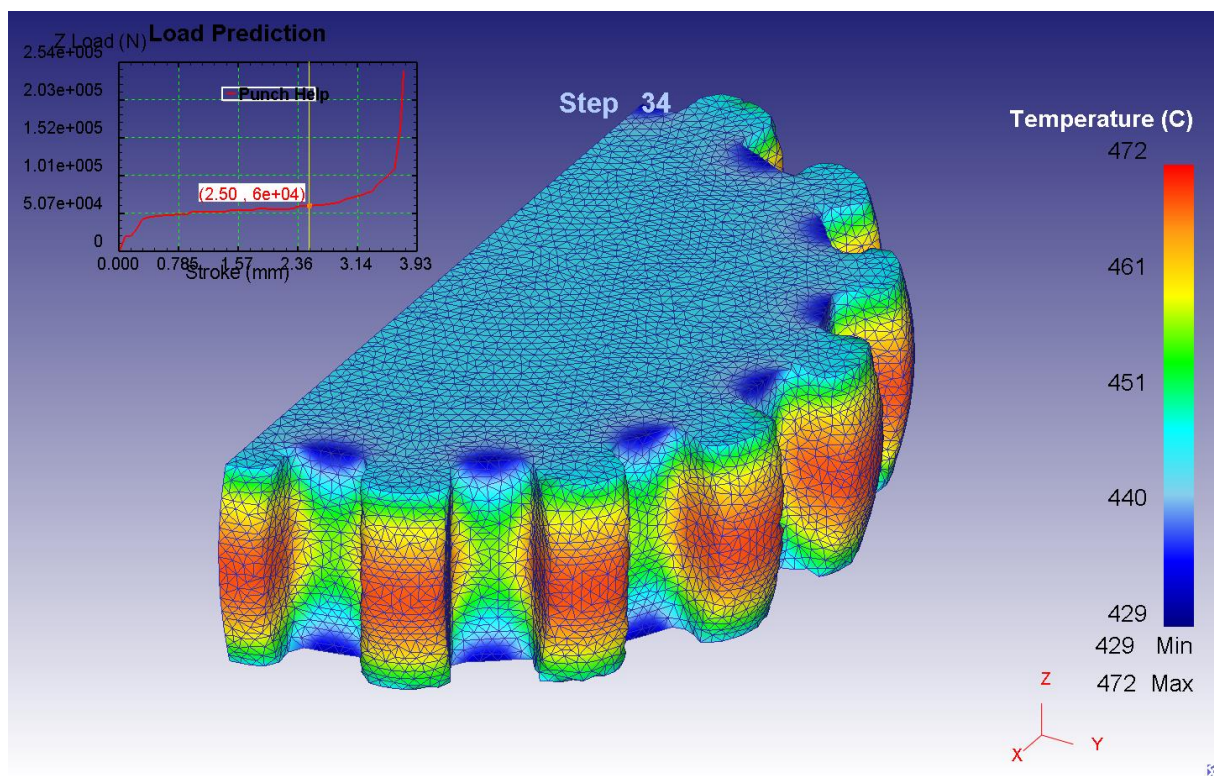
Σχήμα 5.46: Θερμοκρασία για μετατόπιση 1,02 mm (DEFORM 3D)



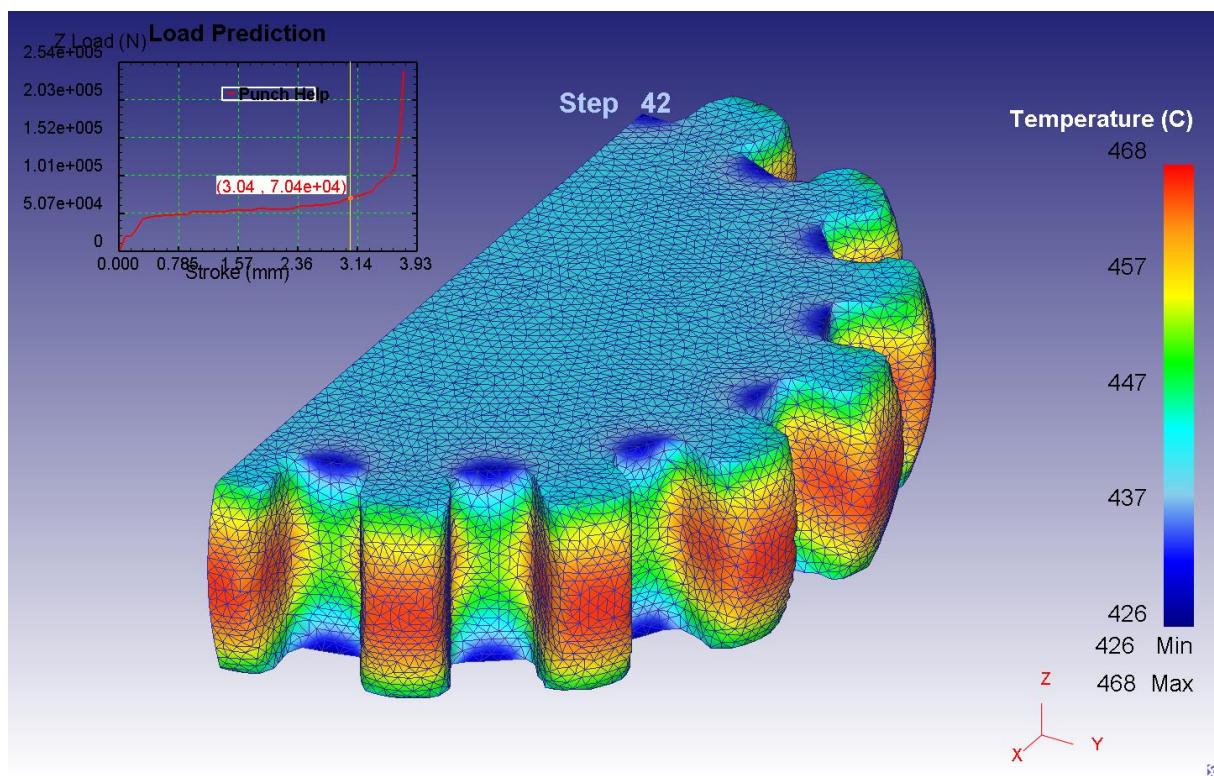
Σχήμα 5.47: Θερμοκρασία για μετατόπιση 1,54 mm (DEFORM 3D)



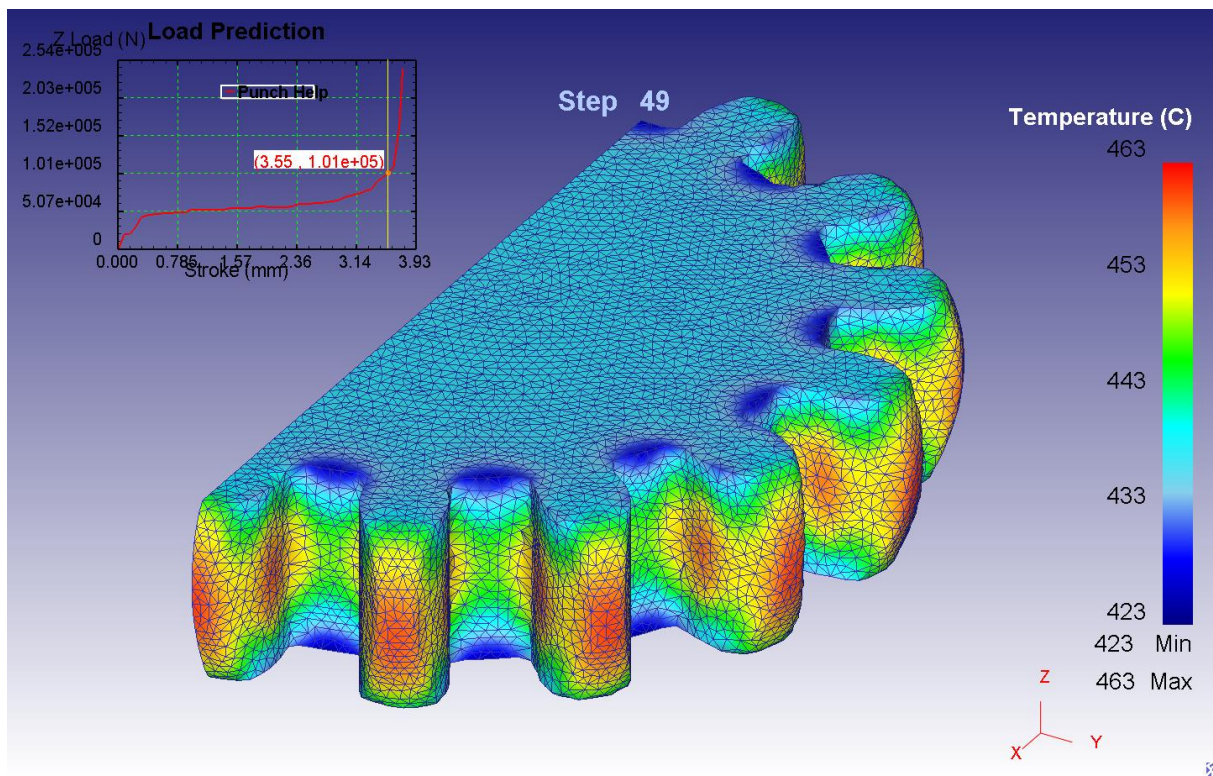
Σχήμα 5.48: Θερμοκρασία για μετατόπιση 2,05 mm (DEFORM 3D)



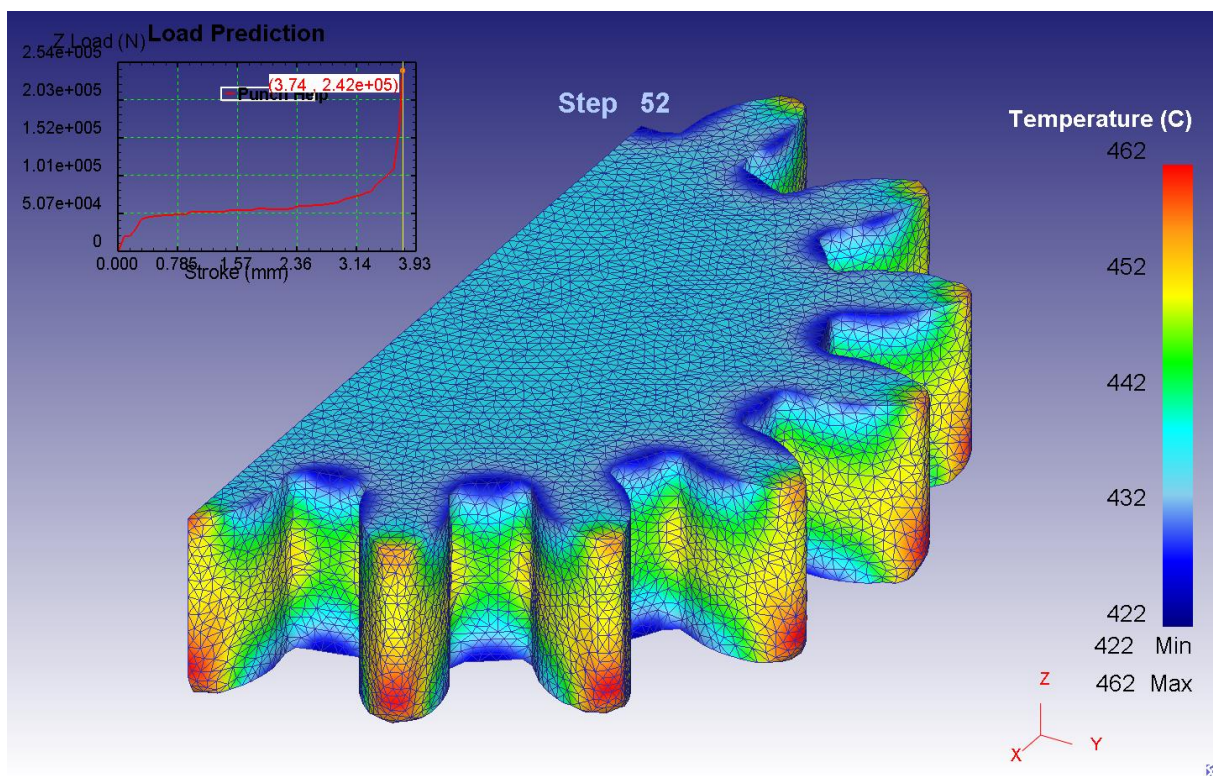
Σχήμα 5.49: Θερμοκρασία για μετατόπιση 2,50 mm (DEFORM 3D)



Σχήμα 5.50: Θερμοκρασία για μετατόπιση 3,04 mm (DEFORM 3D)



Σχήμα 5.51: Θερμοκρασία για μετατόπιση 3,55 mm (DEFORM 3D)

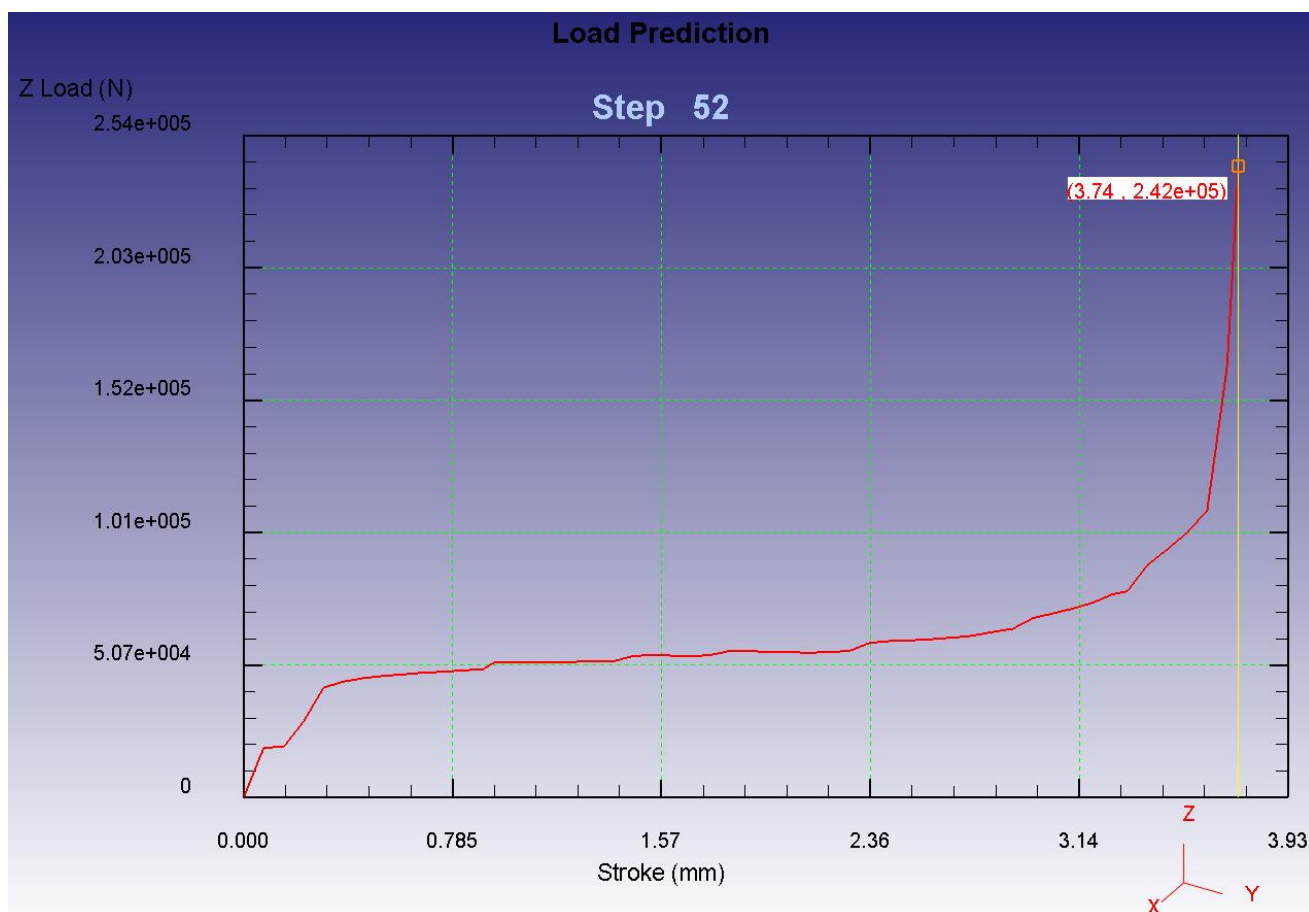


Σχήμα 5.52: Θερμοκρασία για μετατόπιση 3,74 mm (DEFORM 3D)

Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας την εντολή:

Tools → Graph

μπορούμε να υπολογίσουμε τη δύναμη που δέχεται το έμβολο κατά τον άξονα Z από τη παραμόρφωση του κυλινδρικού δοκιμίου.



Σχήμα 5.53: Δύναμη εμβόλου κατά τον άξονα Z

Παρατηρούμε ότι στα τελευταία βήματα της προσομοίωσης παρατηρείται μεγάλη αύξηση του φορτίου με κορύφωση στα 242 kN στο τελευταίο βήμα.

Περισσότερα συμπεράσματα και συγκρίσεις μεταξύ των διαγραμμάτων όλων των προσομοιώσεων θα πραγματοποιηθούν στο κεφάλαιο 7 της εργασίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΜΕΛΕΤΗ ΑΝΤΟΧΗΣ ΜΗΤΡΑΣ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ

6.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

Στο τμήμα αυτό της εργασίας θα πραγματοποιηθεί η μελέτη αντοχής της μήτρας σφυρηλάτησης με το πακέτο πεπερασμένων στοιχείων DEFORM 3D. Συγκεκριμένα θα χρησιμοποιηθεί το τελευταίο βήμα της αντίστοιχης προσομοίωσης σφυρηλάτησης όπου εμφανίζονται και τα μεγαλύτερα φορτία από το δοκίμιο προς τη μήτρα σφυρηλάτησης. Όπως έχουμε προαναφέρει το DEFORM 3D έχει τη δυνατότητα να παρεισάγει (interpolate) τις δυνάμεις του δοκιμίου, σε μια φάση της κατεργασίας, στα τμήματα της μήτρας που έρχεται σε επαφή ώστε να πραγματοποιηθεί μελέτη αντοχής της μήτρας στην συγκεκριμένη φάση.

6.2 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΜΕΛΕΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ

Αμέσως παρακάτω παρατίθενται τα βήματα της μελέτης αντοχής της μήτρας σφυρηλάτησης. Συγκεκριμένα, στη συνέχεια περιγράφεται αναλυτικά μια μελέτη αντοχής μήτρας θερμής σφυρηλάτησης με τα ληφθέντα αποτελέσματα.

6.2.1 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΝΕΑΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΤΟ DEFORM 3D

Για να δημιουργήσουμε μια νέα μελέτη αντοχής στο περιβάλλον του πακέτου πεπερασμένων στοιχείων DEFORM 3D χρησιμοποιούμε την ακολουθία εντολών:

File → New Problem

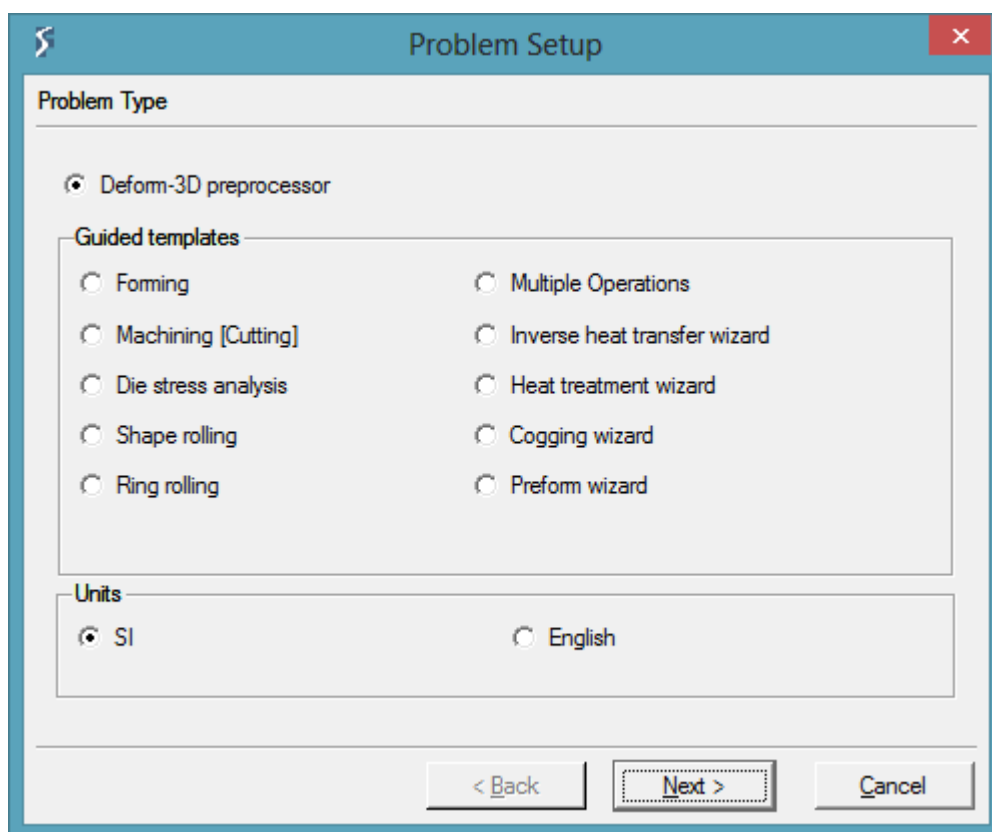
Από το παράθυρο επιλογών που εμφανίζεται επιλέγουμε:

- Είδος προβλήματος: Deform-3D preprocessor
- Σύστημα μονάδων: SI

Όπως παρατηρούμε στο παράθυρο επιλογών, υπάρχουν προκαθορισμένοι τύποι προβλημάτων που μπορεί να επιλύσει το DEFORM 3D που περιλαμβάνουν εκτός των άλλων:

- Διαμόρφωση (forming)
- Ανάλυση αντοχής μήτρας (Die stress analysis)
- Κοπές (Cutting)
- Έλαση (Rolling)

Δεν επιλέγουμε ανάλυση αντοχής μήτρας, αλλά γενικό πρόβλημα για να ορίσουμε εμείς από την αρχή το πρόβλημα σύμφωνα με τις δικές μας ανάγκες.



Σχήμα 6.1: Παράθυρο επιλογών νέου προβλήματος (DEFORM 3D)

6.2.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΤΗΣ ΒΑΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

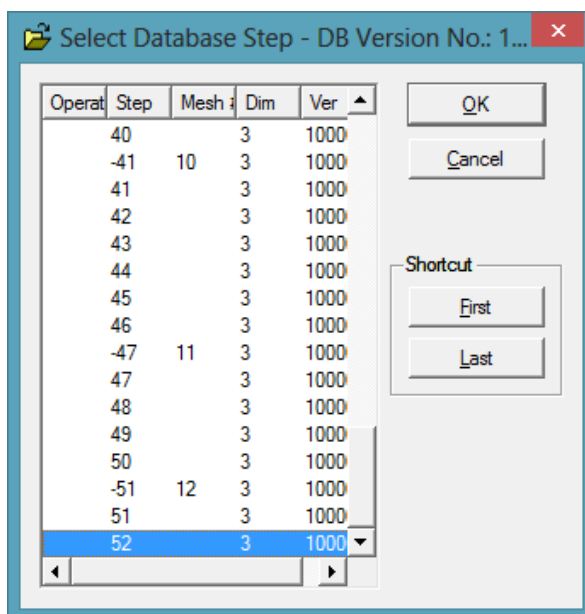
Στη συνέχεια, εισάγουμε τη βάση δεδομένων από την αντίστοιχη προσομοίωση θερμής σφυρηλάτησης που πραγματοποιήσαμε νωρίτερα χρησιμοποιώντας την ακολουθία εντολών:

File → Import Database

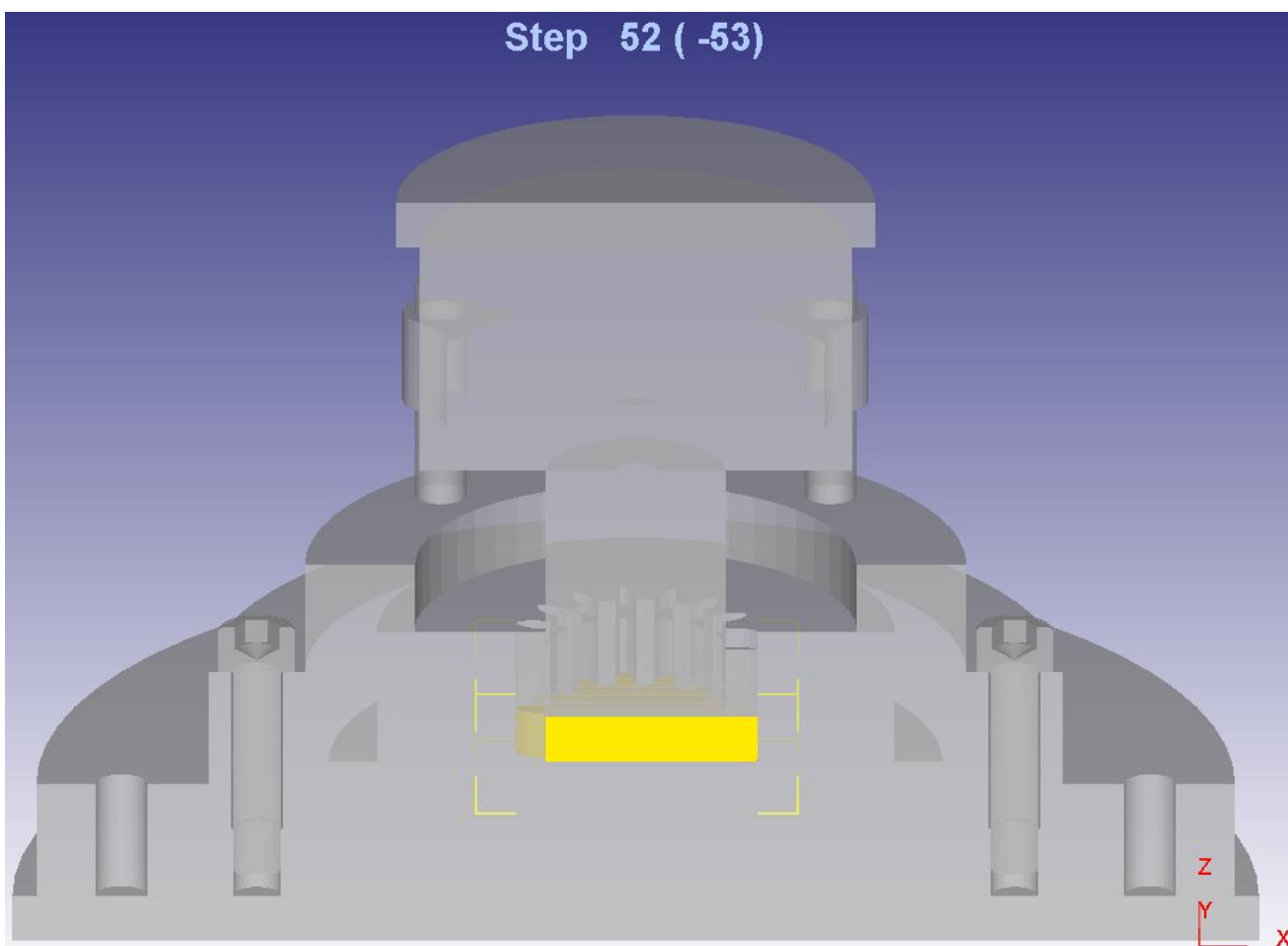
και επιλέγουμε τη βάση δεδομένων που έχουμε δημιουργήσει στη προσομοίωση. Από το παράθυρο που εμφανίζεται επιλέγουμε το τελευταίο βήμα της προσομοίωσης και εισάγουμε το μοντέλο στο πρόβλημα της μελέτης αντοχής. Παρατηρούμε ότι το μοντέλο που έχει εισαχθεί είναι στη φάση όπου το δοκίμιο έχει σφυρηλατηθεί μέχρι το τελευταίο στάδιο.

Στη συνέχεια αφαιρούμε το δοκίμιο και αφήνουμε τα υπόλοιπα μέρη της μήτρας σφυρηλάτησης τα οποία και θα ελεγχθούν για αντοχή σε στατική καταπόνηση.

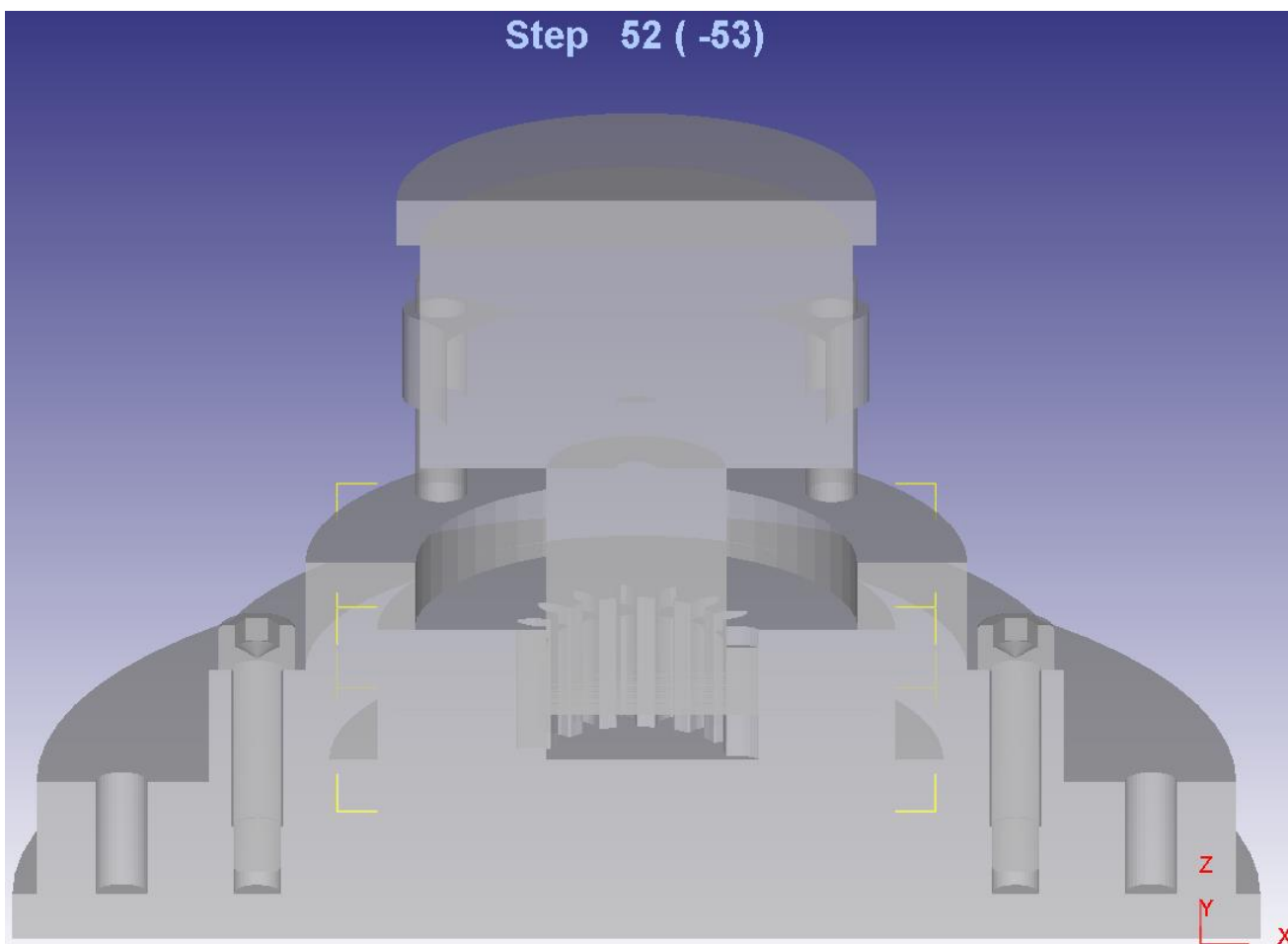
Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται τα παραπάνω βήματα που αναφέραμε.



Σχήμα 6.2: Παράθυρο επιλογής βημάτων προσομοίωσης (DEFORM 3D)



Σχήμα 6.3: Γεωμετρία τελευταίου σταδίου σφυρηλάτησης με το δοκίμιο (DEFORM 3D)



Σχήμα 6.4: Γεωμετρία τελευταίου σταδίου σφυρηλάτησης χωρίς το δοκίμιο (*DEFORM 3D*)

6.2.3 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Τα πεπερασμένα στοιχεία χρησιμοποιεί το *DEFORM 3D* είναι τετραεδρικά. Επιλέγουμε χειροκίνητη δημιουργία πλέγματος στο δοκίμιο όπου ορίζουμε ως μέγεθος ακμής του πεπερασμένου στοιχείου (*min element size*) είναι: 0,5 ή 1 mm ανάλογα με την πολυπλοκότητα της γεωμετρίας. Επίσης ορίζουμε ως αναλογία μεγέθους των πεπερασμένων στοιχείων (*size ratio*) ίσο με: 2.

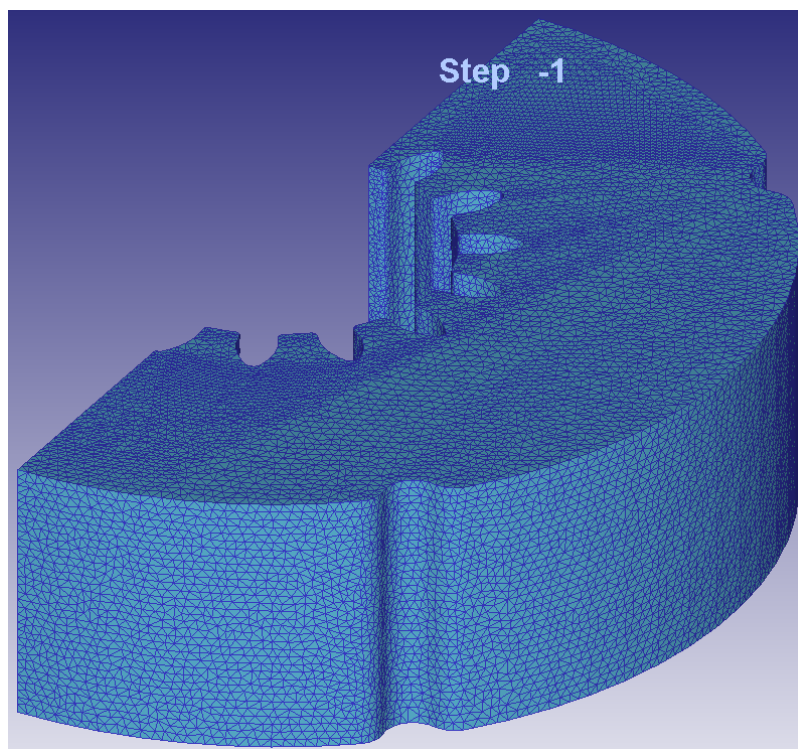
Δημιουργούμε πλέγμα πεπερασμένων σε όλα τα τμήματα της μήτρας αφού θεωρούνται όλα ως παραμορφώσιμα. Τα μοναδικά απαραμόρφωτα στοιχεία του μοντέλου μας είναι το άνω και κάτω τμήμα της πρέσας.

Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται αναλυτικά όλα τα παραμορφώσιμα τμήματα της μήτρας με το μέγεθος ακμής που έχει επιλεγεί, την αναλογία μεγέθους, τον αριθμό των πεπερασμένων στοιχείων και τον αριθμό των κόμβων.

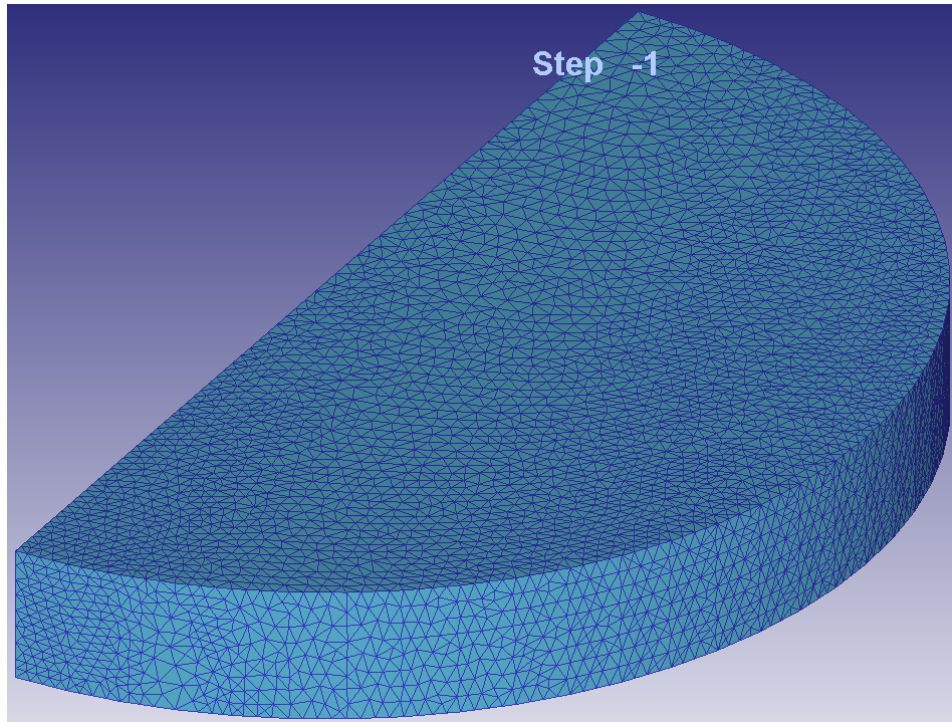
Α/Α	ΤΜΗΜΑ ΜΗΤΡΑΣ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΑΚΜΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ	ΑΝΑΛΟΓΙΑ ΜΕΓΕΘΟΥΣ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΚΟΜΒΩΝ
1	Μήτρα (Die)	0,5 mm	2	313302	66814
2	Βάση Μήτρας (Die Base)	1 mm	2	75080	16795
3	Έμβολο (Punch)	0,5 mm	2	126884	28195
4	Άνω τμήμα Εμβόλου (Upper Punch)	1 mm	2	80549	17897
5	Κέλυφος (Shell)	1 mm	2	203347	44356
6	Βάση Κελύφους (Shell Base)	1 mm	2	316765	69006
7	Κοχλίας (Screw)	0,5 mm	2	44129	9787
8	Οδηγός (Guide)	0,5 mm	2	39616	8657

Πίνακας 6.1: Ιδιότητες πλέγματος τμημάτων της μήτρας (*DEFORM 3D*)

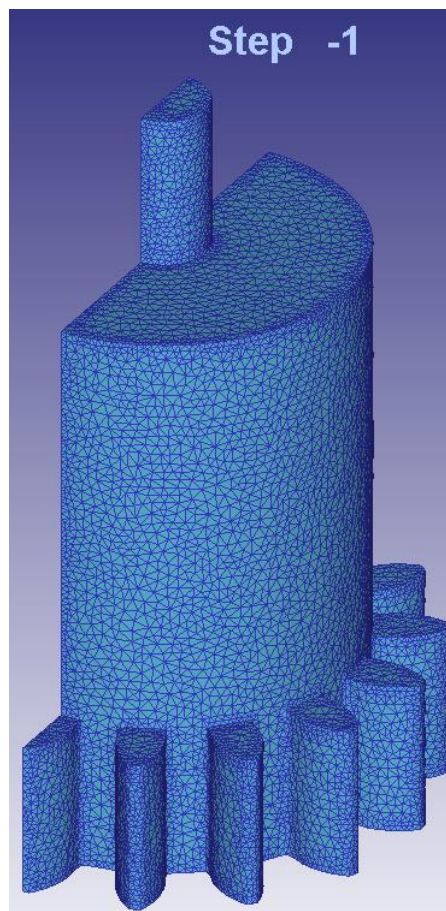
Στη συνέχεια παρατίθενται όλα τα επιμέρους πλέγματα των τμημάτων της μήτρας σφυρηλάτησης.



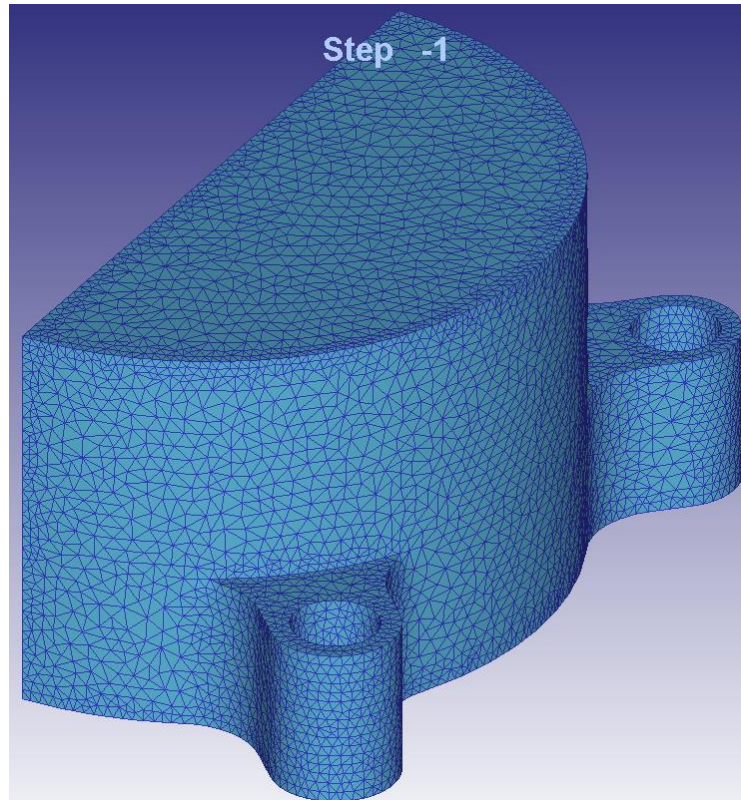
Σχήμα 6.5: Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων της μήτρας (*DEFORM 3D*)



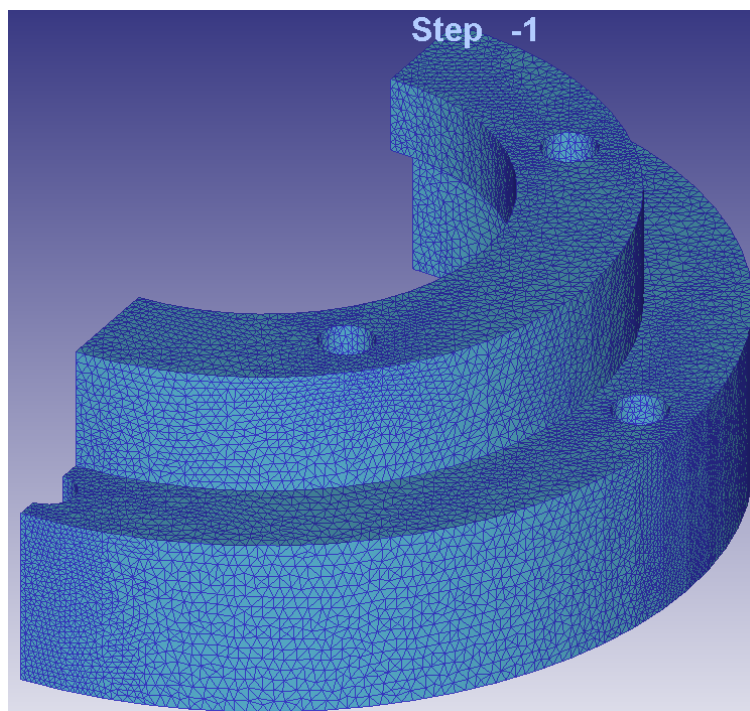
Σχήμα 6.6: Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων της βάσης μήτρας (*DEFORM 3D*)



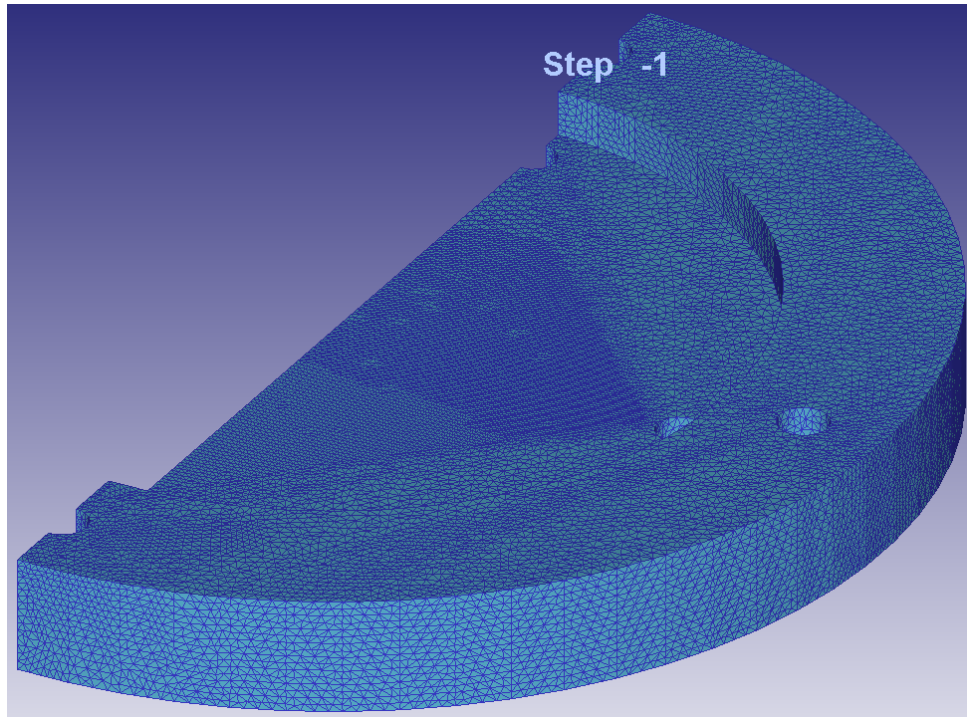
Σχήμα 6.7: Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων του εμβόλου (*DEFORM 3D*)



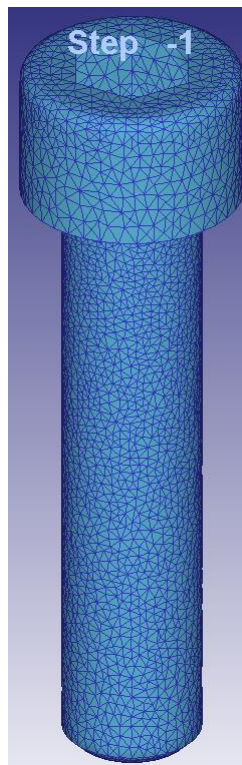
Σχήμα 6.8: Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων του άνω τμήματος του εμβόλου (*DEFORM 3D*)



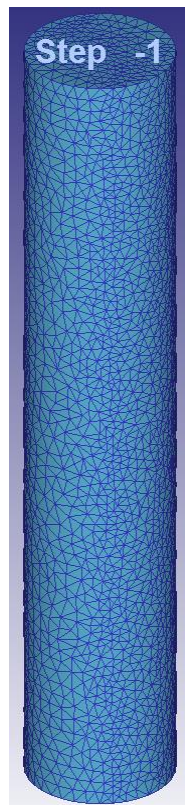
Σχήμα 6.9: Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων του κελύφους (*DEFORM 3D*)



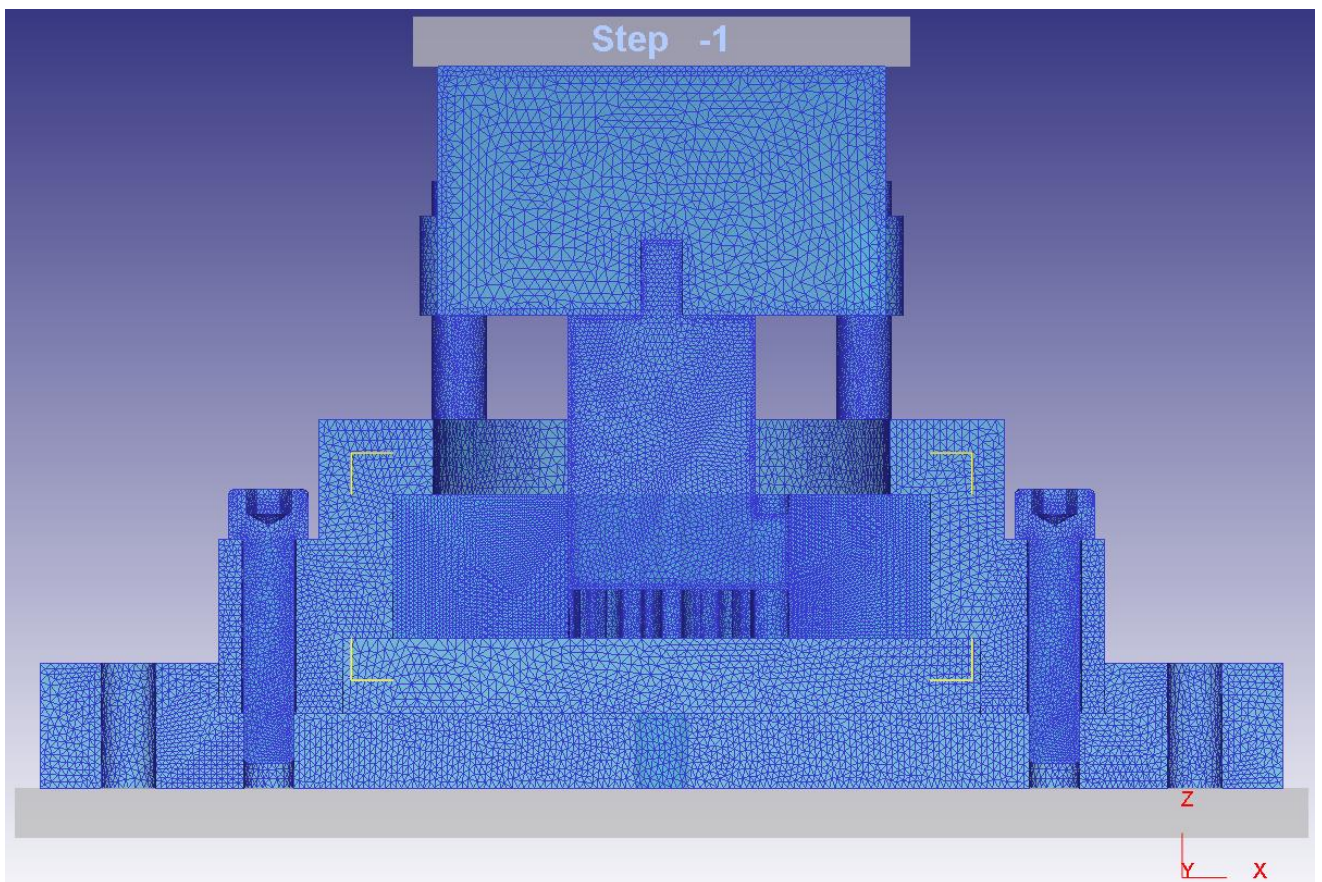
Σχήμα 6.10: Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων της βάσης κελύφους (*DEFORM 3D*)



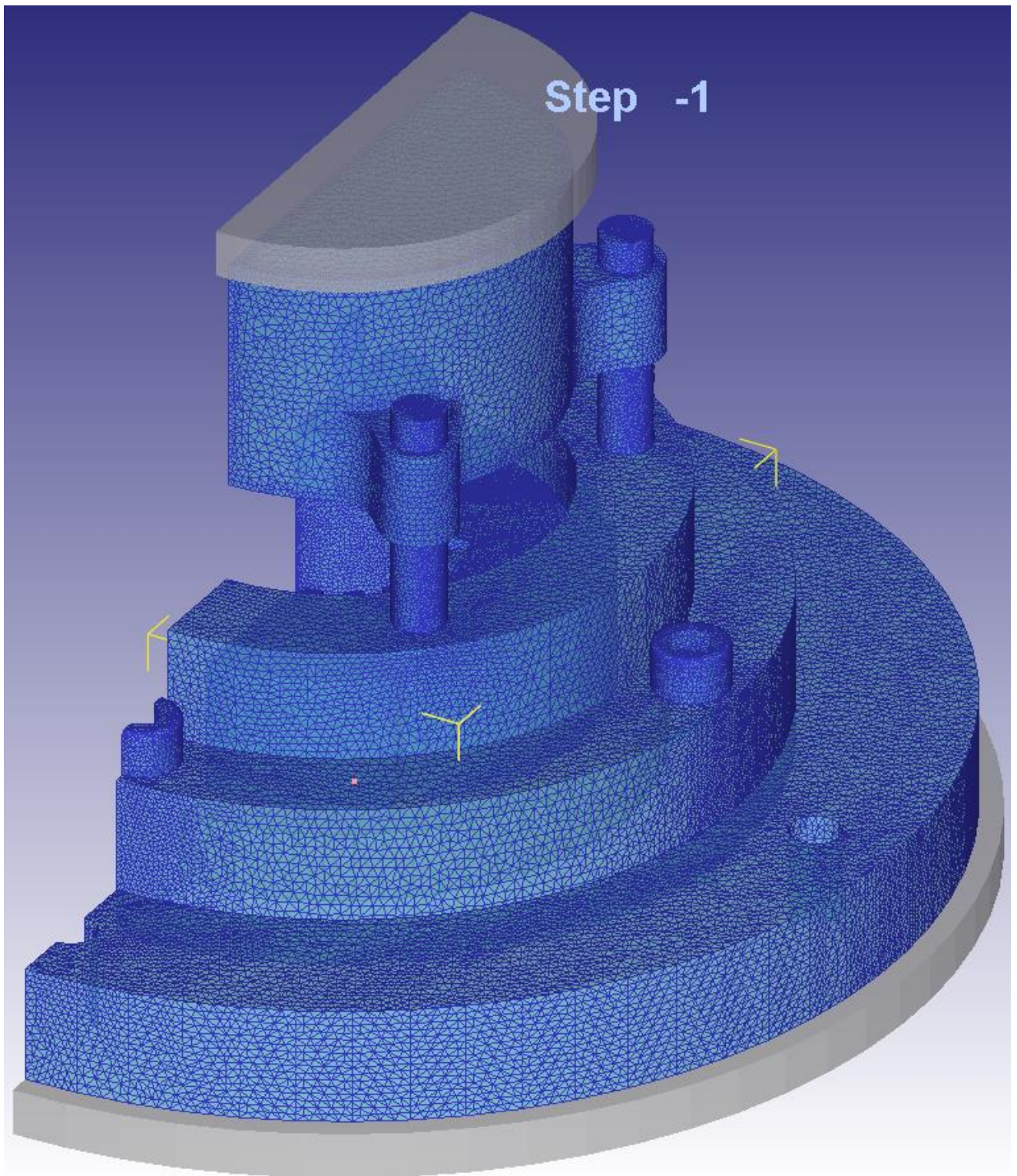
Σχήμα 6.11: Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων του κοχλία (*DEFORM 3D*)



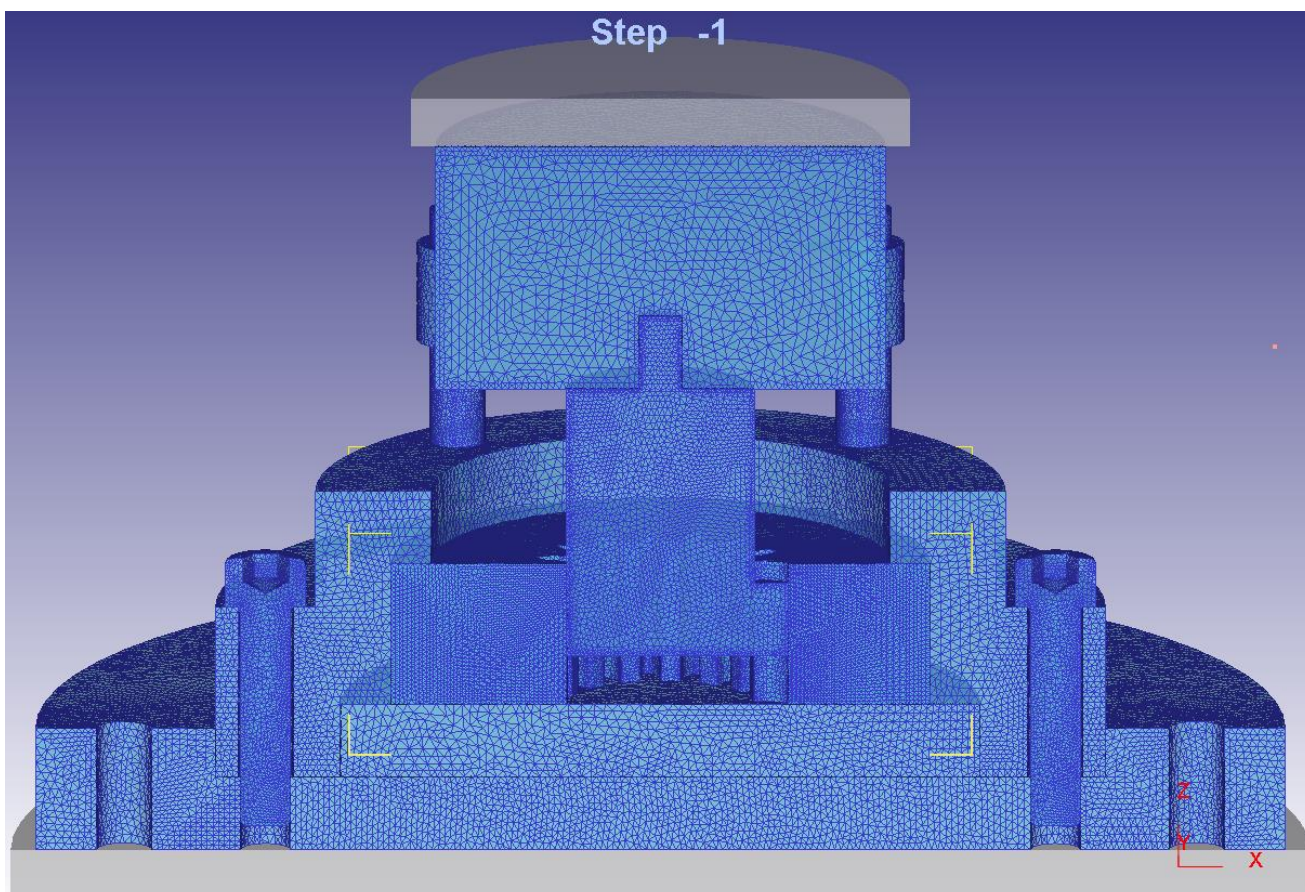
Σχήμα 6.12: Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων του οδηγού (DEFORM 3D)



Σχήμα 6.13: Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων ολόκληρης μήτρας (DEFORM 3D)



Σχήμα 6.14: Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων ολόκληρης μήτρας (*DEFORM 3D*)



Σχήμα 6.15: Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων ολόκληρης μήτρας (DEFORM 3D)

6.2.4 ΟΡΙΣΜΟΣ ΥΛΙΚΟΥ

Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε για τις προσομοιώσεις επιλέχθηκε από την ιστοσελίδα: www.matweb.com και είναι:

- Εργαλειοχάλυβας AISI H-13

Το υλικό επιλέχθηκε από τη βιβλιοθήκη υλικών του DEFORM 3D χρησιμοποιώντας τις παρακάτω παραμέτρους:

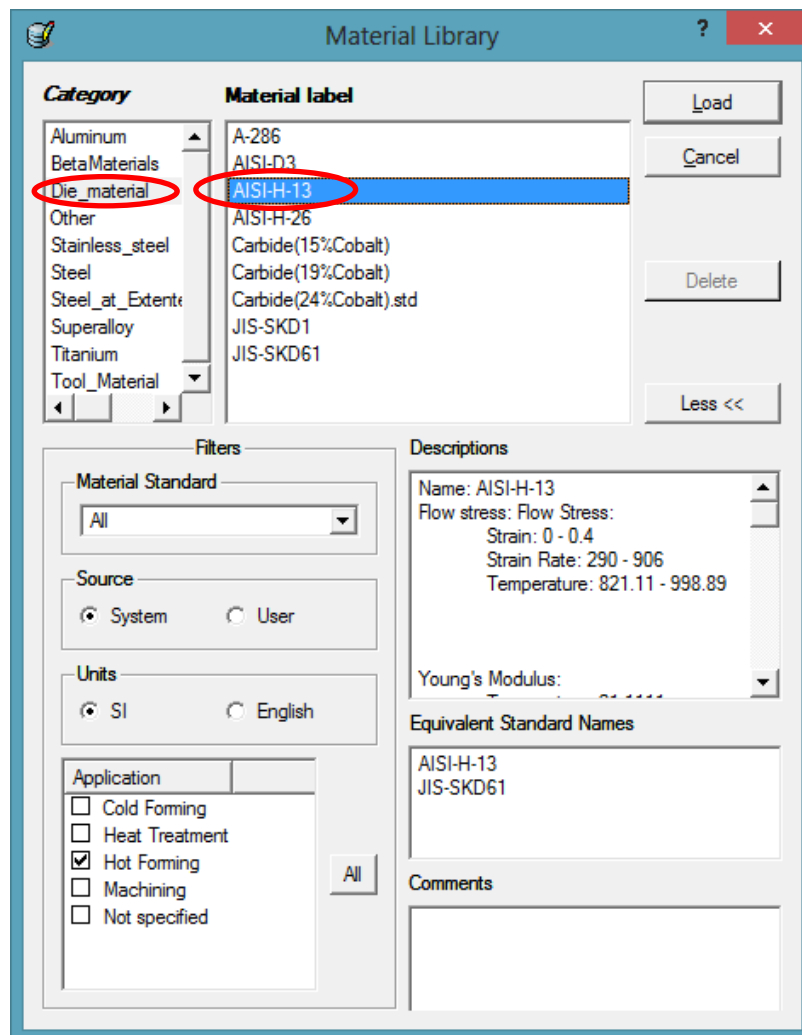
- Κατηγορία: Υλικό μητρών
- Σύστημα μονάδων: SI
- Εφαρμογή: Θερμή παραμόρφωση

Τα υλικό είναι ισότροπο με πλαστικές και ελαστικές ιδιότητες, ενώ το μέτρο ελαστικότητας και ο αριθμός Poisson, δίνεται αμέσως παρακάτω:

- Εργαλειοχάλυβας (**AISI H-13**)
Μέτρο ελαστικότητας: 210 GPa

Αριθμός Poisson: 0,30

Αμέσως παρακάτω φαίνεται ορισμός του υλικού που έγινε από τη βιβλιοθήκη του DEFORM 3D.



Σχήμα 6.16: Επιλογή του **εργαλειοχάλυβα AISI H-13** ως υλικό από τη βιβλιοθήκη υλικών (DEFORM 3D)

Τα πλήρη χαρακτηριστικά των υλικού AISI H-13 παρουσιάζονται στο «παράρτημα Α» της εργασίας.

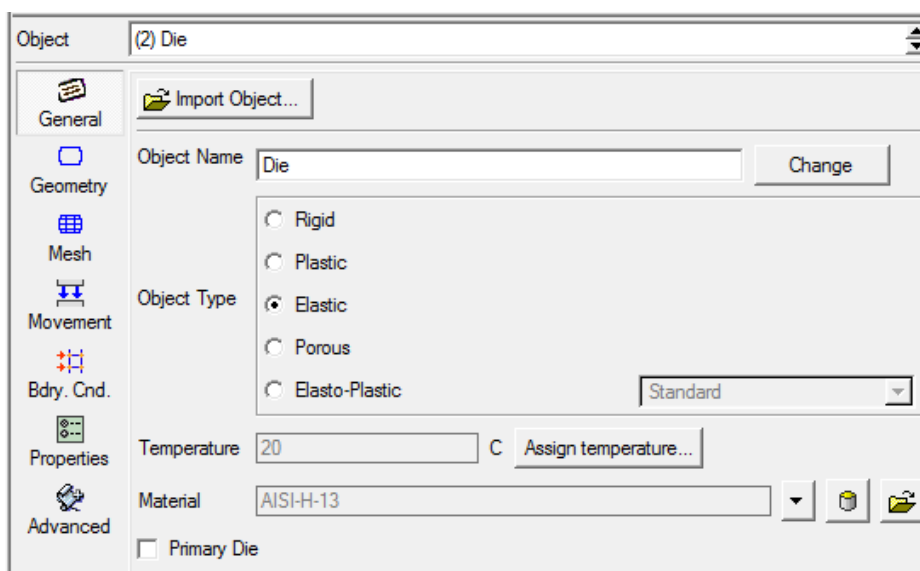
6.2.5 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Έπειτα, ορίζουμε τα διάφορα στοιχεία που απαρτίζουν το μοντέλο προσομοίωσης και τα οποία είναι:

- Το παραμορφώσιμο σώμα (Plastic)
 - Μήτρα (Die)
 - Βάση Μήτρας (Die Base)
 - Έμβολο (Punch)
 - Άνω τμήμα Εμβόλου (Upper Punch)
 - Κέλυφος (Shell)
 - Βάση Κελύφους (Shell Base)
 - Οδηγοί (Guides)
 - Κοχλίες (Screws)
- Τα απαραμόρφωτα σώματα (Rigid)
 - Άνω Πρέσα (Press Up)
 - Κάτω Πρέσα (Press Down)
- Οι επιφάνειες συμμετρίας
 - Η συμμετρία εφαρμόζεται σε όλα τα σώματα εκτός από τον ένα κοχλία και τους δύο οδηγούς που δεν τέμνονται από την επιφάνεια συμμετρίας.

Για τον ορισμό του παραμορφώσιμου σώματος ορίζουμε τις εξής παραμέτρους στο μενού επιλογών του DEFORM 3D:

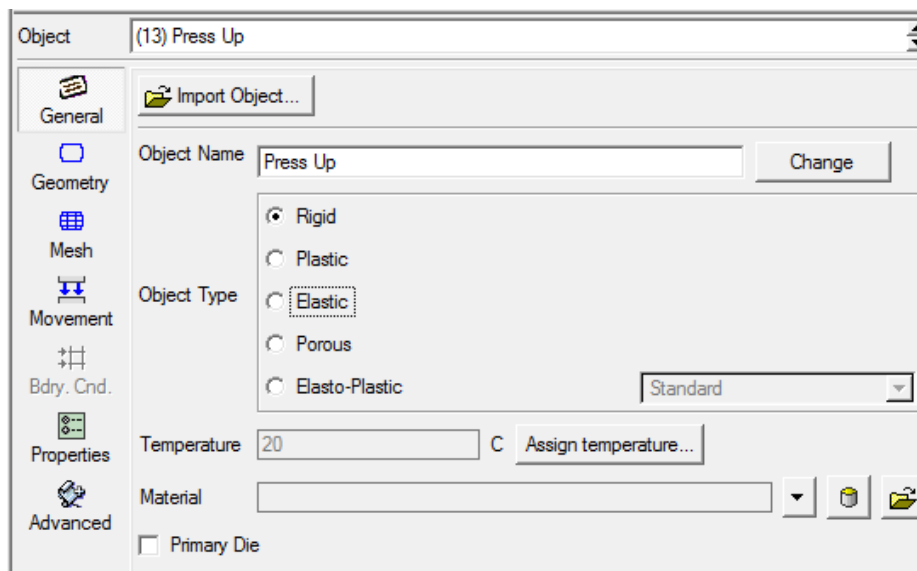
- Τύπος σώματος: Πλαστικό (Plastic)
- Θερμοκρασία: 20 °C
- Υλικό: Εργαλειοχάλυβας AISI H-13



Σχήμα 6.17: Επιλογές ενός παραμορφώσιμου σώματος (μήτρα) (DEFORM 3D)

Για τον ορισμό των απαραμόρφωτων σωμάτων ορίζουμε τις εξής παραμέτρους στο μενού επιλογών του DEFORM 3D:

- Τύπος σώματος: Απαράμορφο (Rigid)
- Θερμοκρασία: 20 °C



Σχήμα 6.18: Επιλογές ενός απαραμόρφωτου σώματος (άνω τμήμα της πρέσας) (DEFORM 3D)

6.2.6 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΠΟΥ ΔΕΧΟΝΤΑΙ ΤΑ ΤΟΙΧΩΜΑΤΑ ΤΗΣ ΜΗΤΡΑΣ ΑΠΟ ΤΟ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΜΕΝΟ ΔΟΚΙΜΙΟ

Στη συνέχεια εισάγουμε τις δυνάμεις που δέχονται τα τοιχώματα της μήτρας από το δοκίμιο στο τελευταίο στάδιο της σφυρηλάτησης. Έτσι χρησιμοποιούμε την ακολουθία εντολών:

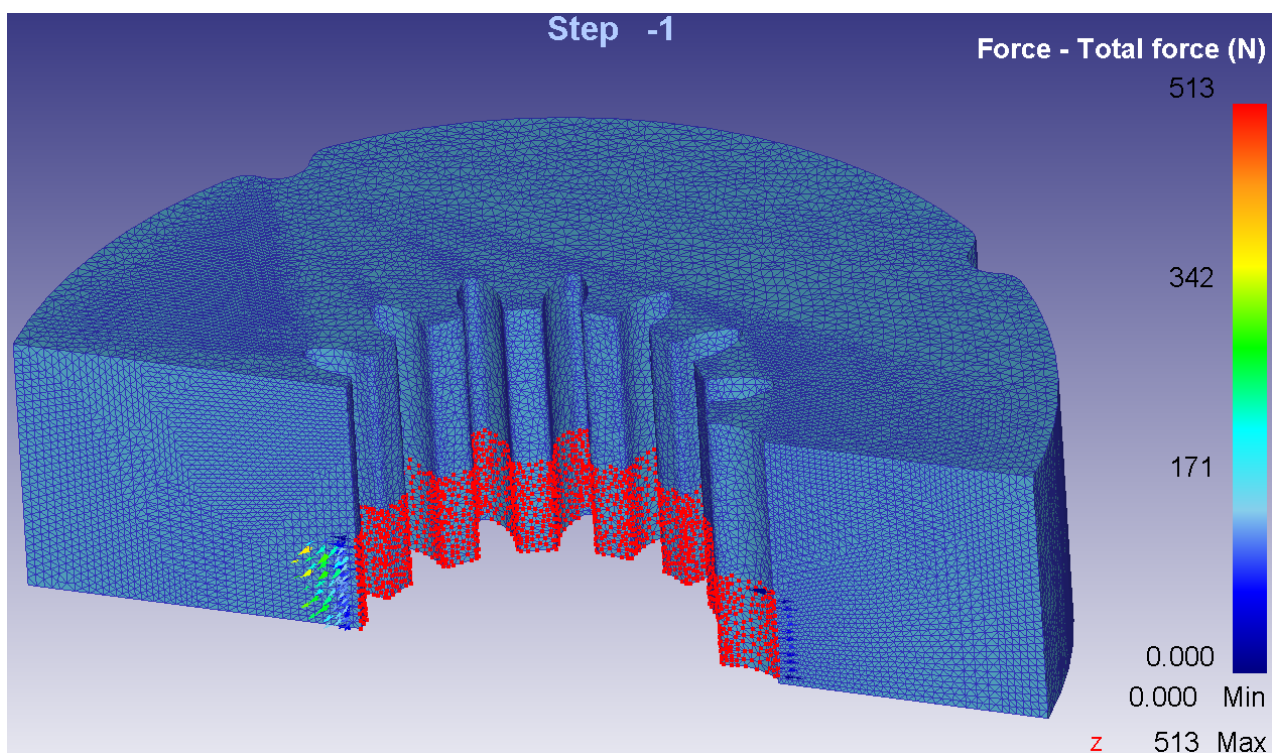
Boundary Condition → Force → Interpolate

και επιλέγουμε το τελευταίο βήμα της προσομοίωσης για το δοκίμιο (billet) από το οποίο θέλουμε να εξάγουμε τις δυνάμεις.

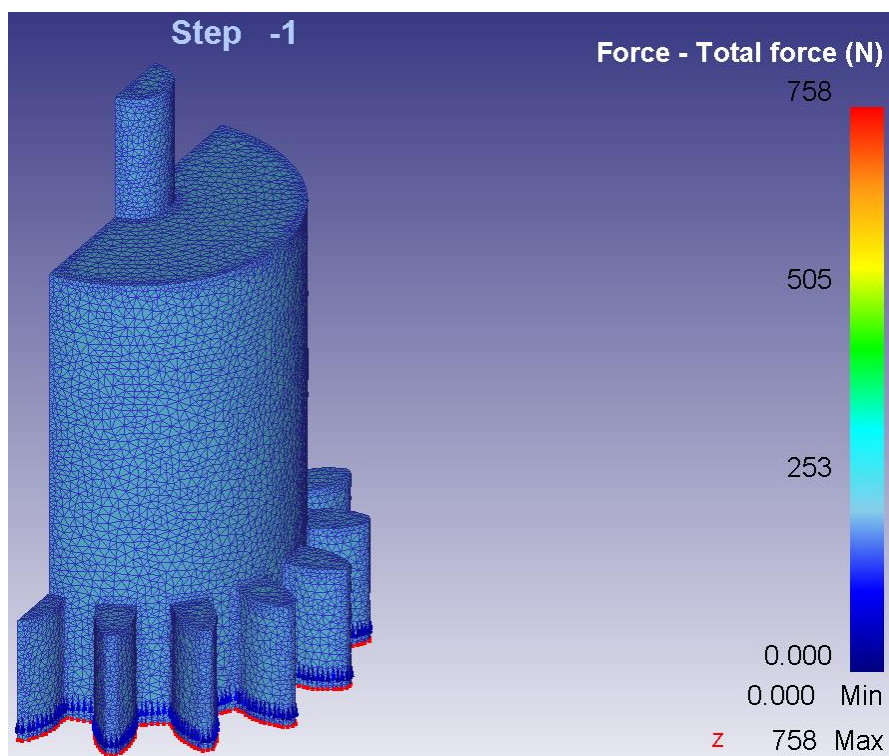
Τα τμήματα της μήτρας σφυρηλάτησης που έρχονται σε άμεση επαφή με το δοκίμιο και δέχονται άμεσα φορτία είναι:

- η μήτρα (die)
- το έμβολο (punch)
- η βάση της μήτρας (die base)

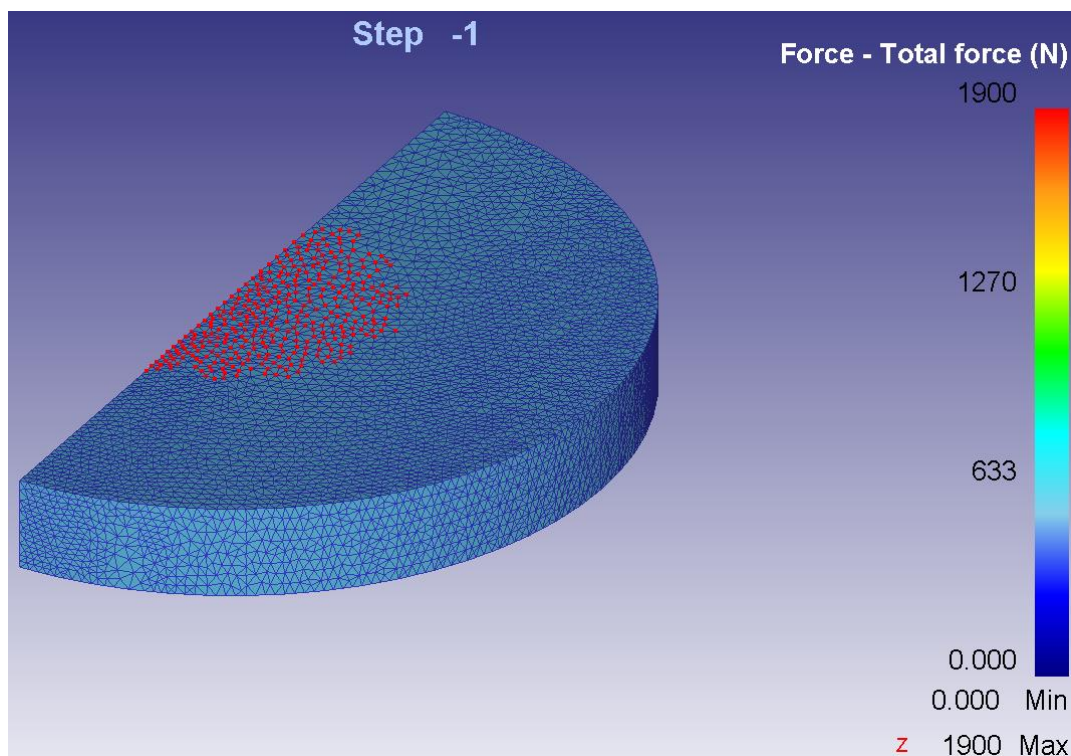
Αμέσως παρακάτω παρατίθενται οι εισαχθέντες δυνάμεις στα τρία τμήματα της μήτρας που έρχονται σε άμεση επαφή με το δοκίμιο.



Σχήμα 6.19: Εισαγωγή δυνάμεων στα τοιχώματα της μήτρας (DEFORM 3D)



Σχήμα 6.20: Εισαγωγή δυνάμεων στα τοιχώματα του εμβόλου (DEFORM 3D)



Σχήμα 6.21: Εισαγωγή δυνάμεων στα τοιχώματα της βάσης εμβόλου (*DEFORM 3D*)

6.2.7 ΟΡΙΣΜΟΣ ΕΠΑΦΗΣ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

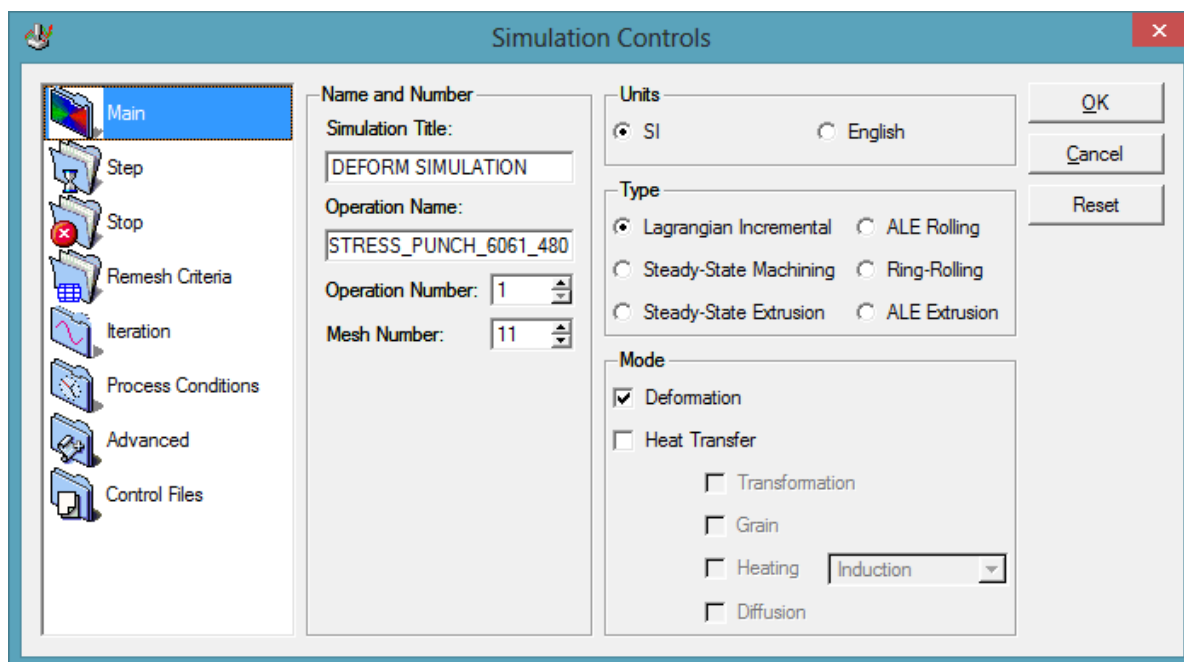
Στη συνέχεια ορίζουμε την επαφή μεταξύ των στοιχείων του μοντέλου μας. Έτσι, μεταξύ των στοιχείων ορίζουμε επαφή (Touching) με συντελεστή τριβής, ο οποίος έχει προαναφερθεί και στη συγκεκριμένη προσομοίωση παίρνει την τιμή $\mu = 0,12$ και είναι ο προτεινόμενος για χαλύβδινες μήτρες διαμόρφωσης. Τέλος, σφικτή συναρμογή ορίσαμε μεταξύ των οδηγών και του κελύφους καθώς και μεταξύ των κοχλιών σύσφιξης και του κελύφους και της βάσης του κελύφους.

6.2.8 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στη συνέχεια, θα ορίσουμε τις επιλογές ελέγχου της προσομοίωσης του μοντέλου μας, χρησιμοποιώντας την ακολουθία εντολών:

Input → Simulation Controls

Αφού δώσουμε όνομα στην προσομοίωση και στην διαδικασία παίρνουμε το ακόλουθο παράθυρο επιλογών:

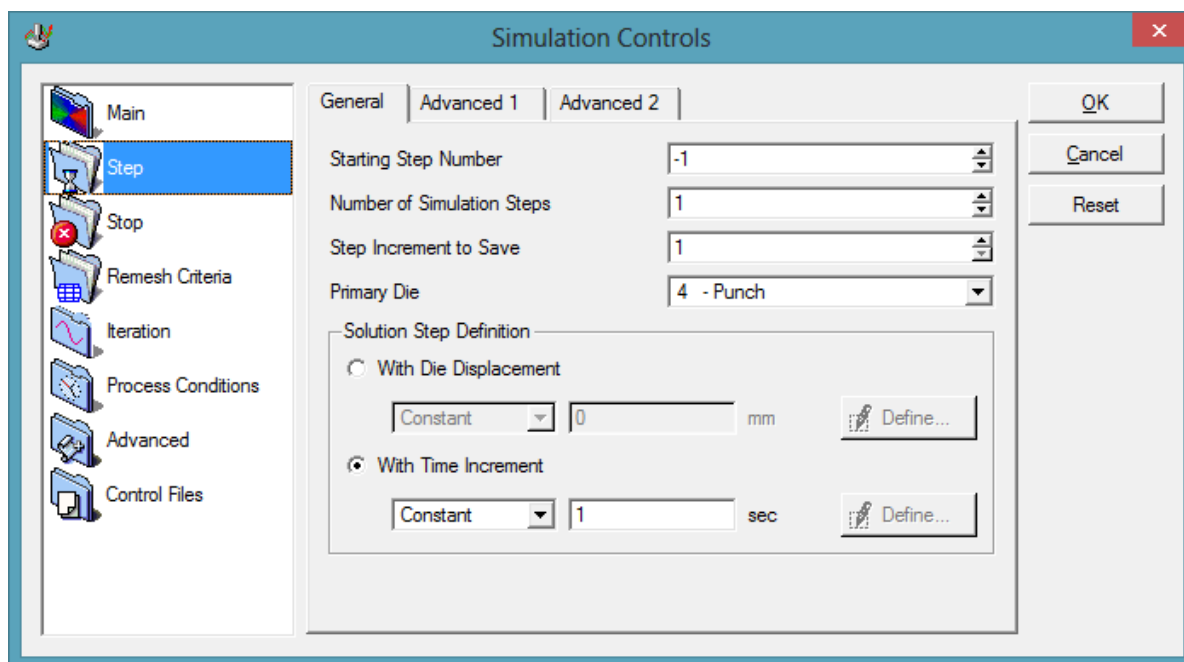


Σχήμα 6.22: Παράθυρο επιλογών της διεργασίας (DEFORM 3D)

Ορίζουμε τις εξής παραμέτρους στο μενού επιλογών του DEFORM 3D:

- Σύστημα μονάδων: SI
- Τύπος επίλυσης: Lagrangian Incremental (χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις διαμόρφωσης και θερμικών προβλημάτων)
- Τύποι προσομοίωσης
 - Παραμόρφωση

Στη συνέχεια, ορίζουμε τις επιλογές της υπόθεσης φόρτισης, όπου διακρίνουμε τον χρόνο φόρτισης, οποίος ισούται με 1 sec ο οποίος είναι αρκετός για να ελεγχθεί η αντοχή της μήτρας. Επίσης επιλέγουμε το πρόβλημα να επιλυθεί σε ένα βήμα του 1 sec. Τέλος, στις επιλογές ορίζουμε ως βασική μήτρα το έμβολο.



Σχήμα 6.23: Παράθυρο επιλογών βημάτων της διεργασίας (*DEFORM 3D*)

Αφού ολοκληρώσαμε όλες τις απαραίτητες ρυθμίσεις της ανάλυσης, δημιουργούμε το αρχείο δεδομένων της μελέτης αντοχής χρησιμοποιώντας την ακολουθία εντολών:

Input → Database Generator

6.2.9 ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΤΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ

Στη συνέχεια, αφού έχει δημιουργηθεί η βάση δεδομένων της μελέτης αντοχής προχωρούμε στην επίλυσή της χρησιμοποιώντας την ακολουθία εντολών:

Simulator → Run

Κατά τη διάρκεια της επίλυσης μπορούμε να βλέπουμε την εξέλιξη της βήμα – βήμα από το συνεχόμενα ανανεώσιμο σημειωματάριο του προγράμματος όπου μπορούμε εκτός των άλλων να ελέγχουμε τον αριθμό των επιμέρους βημάτων που χρειάστηκαν.

6.2.10 ΛΗΨΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

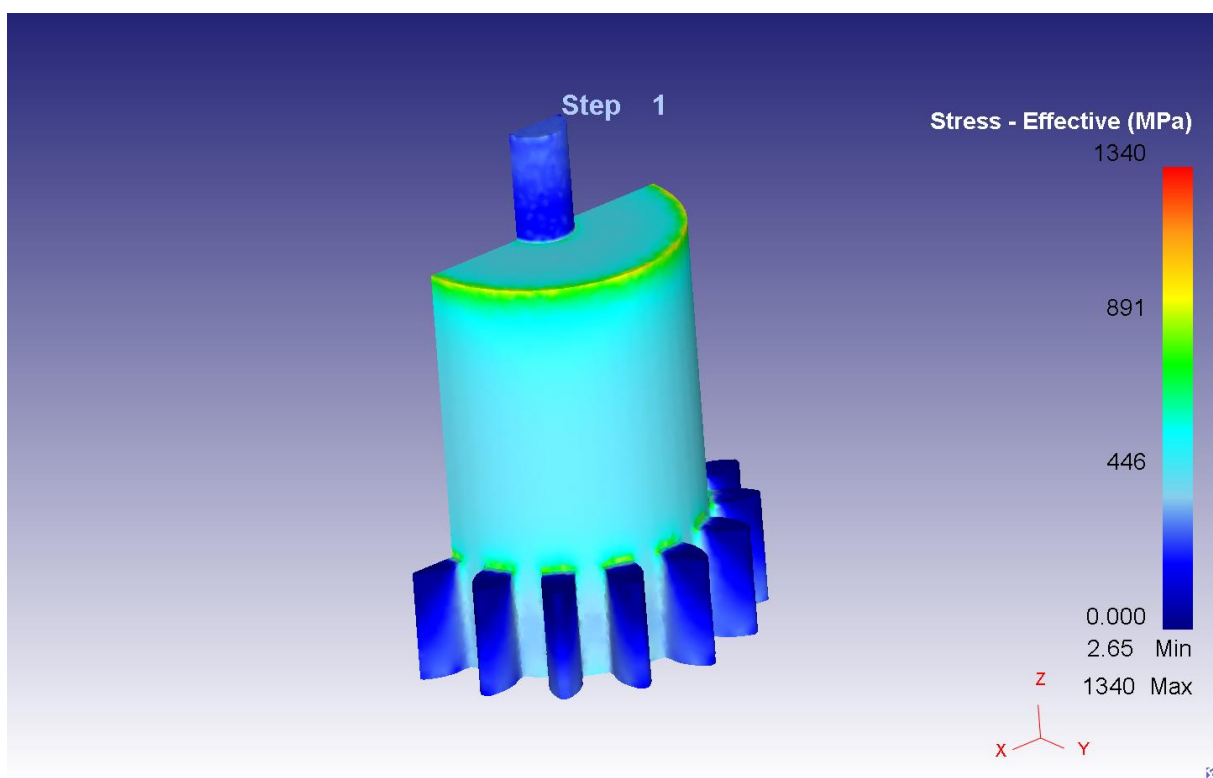
Μετά την επιτυχή επίλυση του μοντέλου, παίρνουμε τα ζητούμενα αποτελέσματα χρησιμοποιώντας την ακολουθία εντολών:

Post processor → DEFORM 3D Post

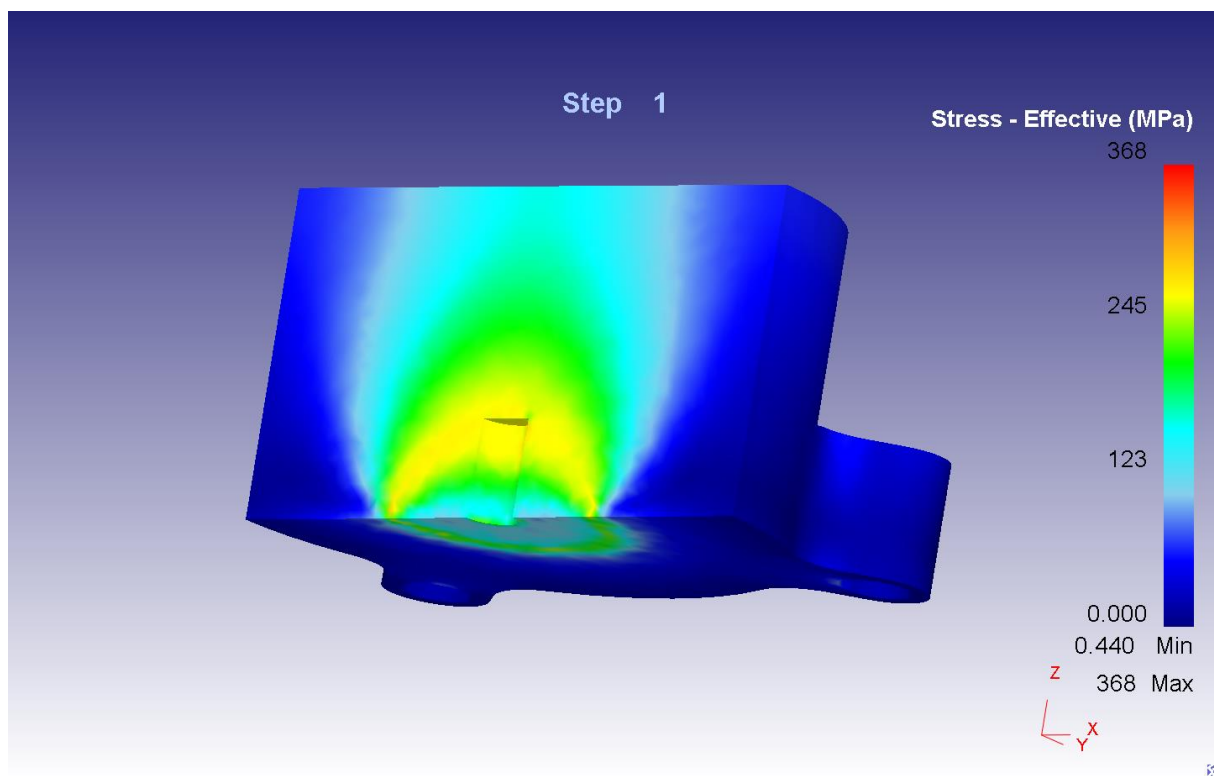
έτσι, το πρόγραμμα μας οδηγεί στο περιβάλλον εμφάνισης των αποτελεσμάτων της μελέτης αντοχής που περιλαμβάνουν:

- Ισοδύναμες τάσεις κατά Von Mises για το κάθε τμήμα της μήτρας

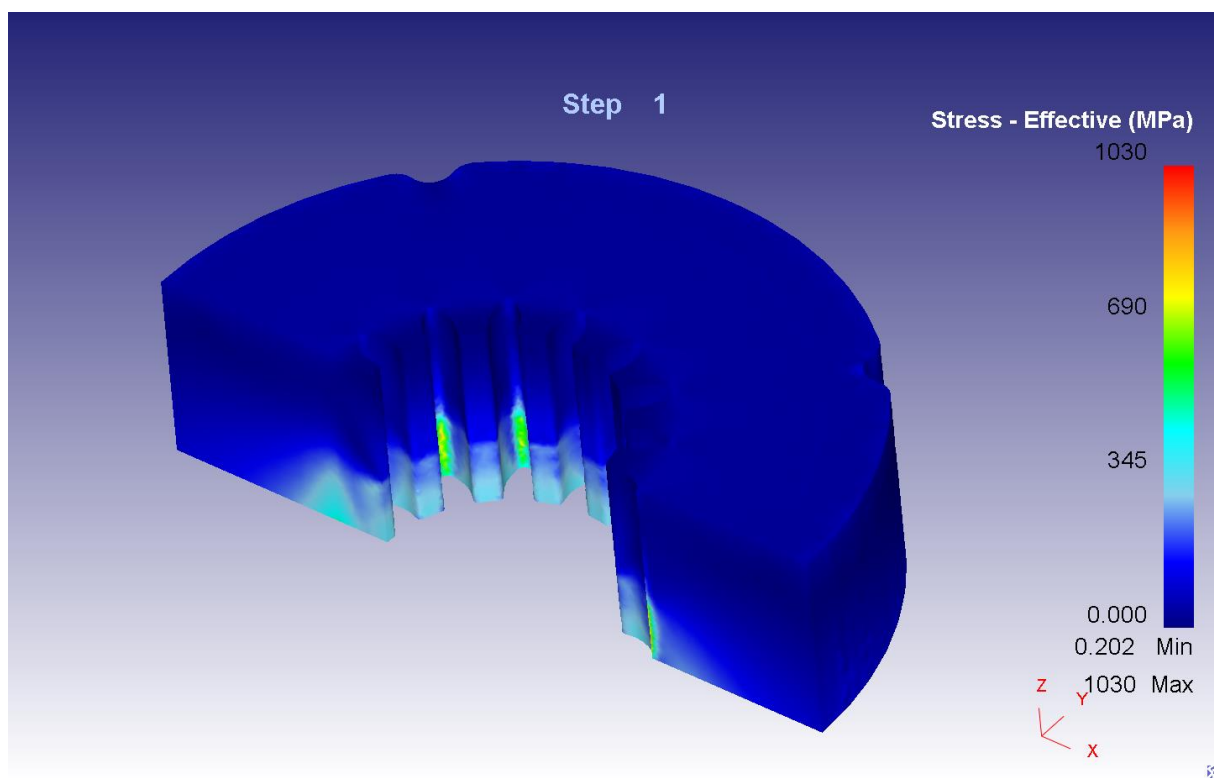
Αμέσως παρακάτω θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα των ισοδύναμων τάσεων κατά Von Mises σε N/mm^2 (MPa) για κάθε τμήμα της μήτρας εκτός των οδηγών και των κοχλιών που δεν έχουν πρόβλημα αντοχής.



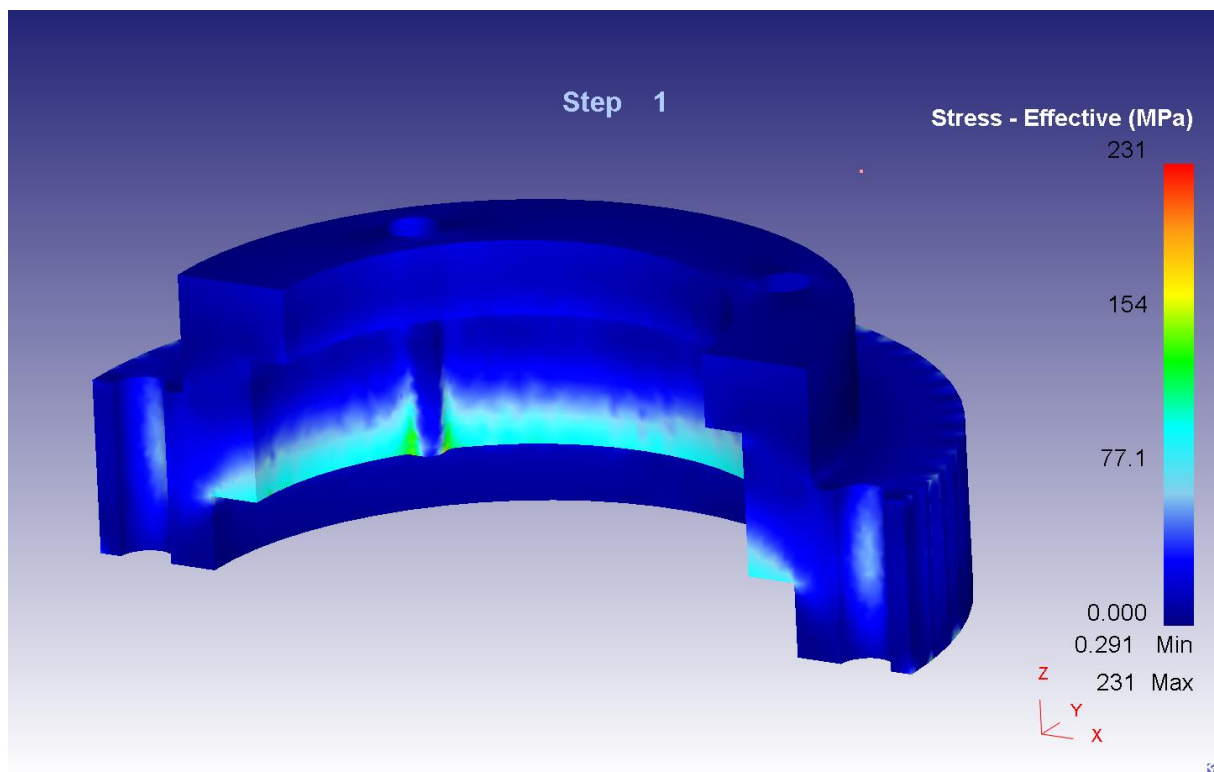
Σχήμα 6.24: Ισοδύναμες τάσεις κατά Von Mises που δέχεται το έμβολο (DEFORM 3D)



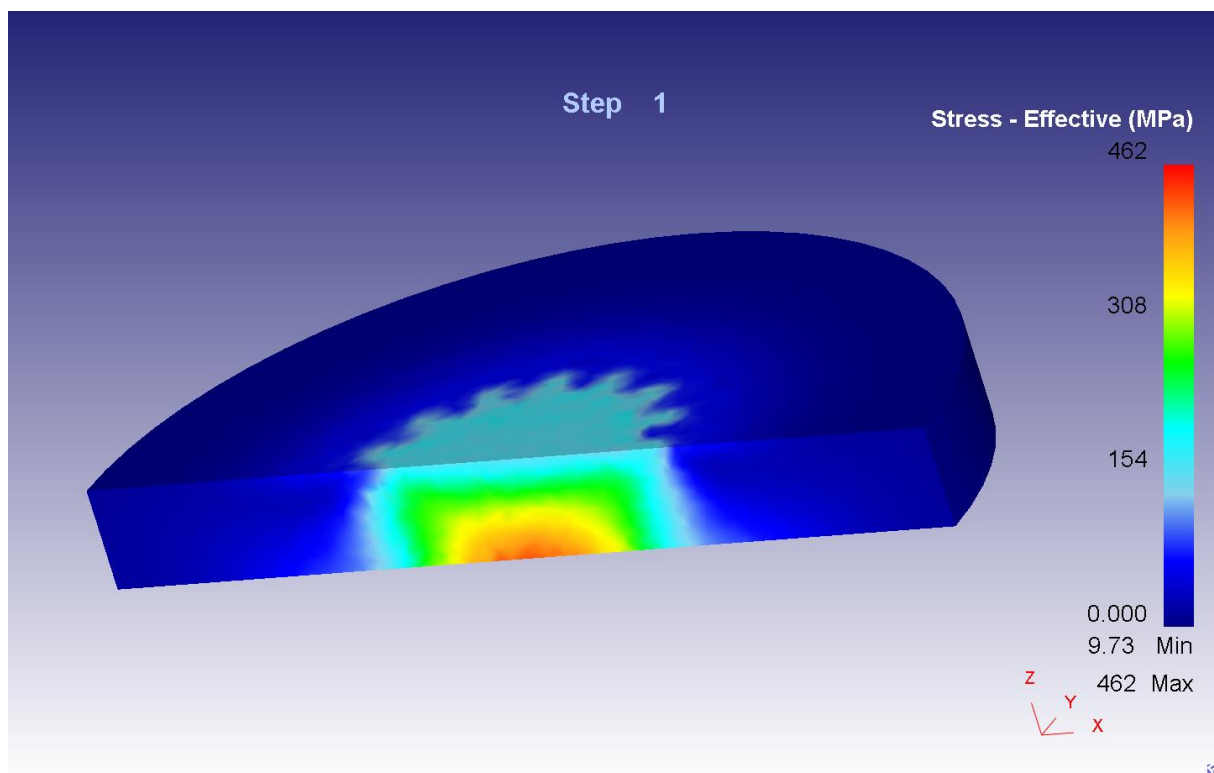
Σχήμα 6.25: Ισοδύναμες τάσεις κατά Von Mises που δέχεται το άνω τμήμα του εμβόλου (DEFORM 3D)



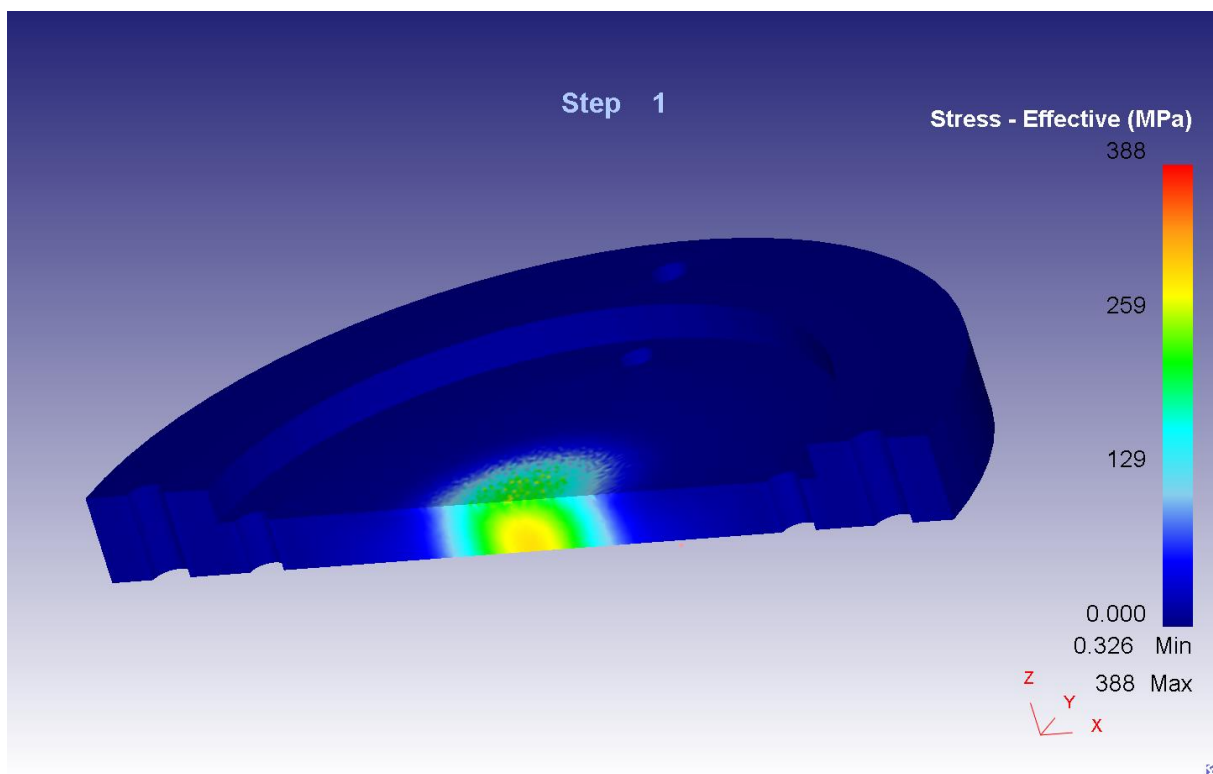
Σχήμα 6.26: Ισοδύναμες τάσεις κατά Von Mises που δέχεται η μήτρα (DEFORM 3D)



Σχήμα 6.27: Ισοδύναμες τάσεις κατά Von Mises που δέχεται το κέλυφος (DEFORM 3D)



Σχήμα 6.28: Ισοδύναμες τάσεις κατά Von Mises που δέχεται η βάση της μήτρας (DEFORM 3D)



Σχήμα 6.29: Ισοδύναμες τάσεις κατά Von Mises που δέχεται η βάση του κελύφους (DEFORM 3D)

Παρατηρούμε ότι τα τμήματα της μήτρας που καταπονούνται περισσότερο είναι το έμβολο και η μήτρα όπου εμφανίζεται τάση 1030 MPa και 1340 MPa αντίστοιχα. Δεδομένου όμως ότι το όριο διαρροής του εργαλειοχάλυβα AISI H-13 που έχουμε επιλέξει είναι 1990 MPa βλέπουμε ότι είμαστε σε επιτρεπτά όρια με τον ελάχιστο συντελεστή ασφαλείας της μήτρας σφυρηλάτησης να είναι 1,49 .

Περισσότερα συμπεράσματα και συγκρίσεις μεταξύ όλων των μελετών αντοχής θα πραγματοποιηθούν στο κεφάλαιο 7 της εργασίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**7.1 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ**

Αμέσως παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα όλων των προσομοιώσεων (8) που πραγματοποιήθηκαν και αφορούν τα στοιχεία κατά την επίλυση (χρόνος, βήματα, αριθμός remeshings), την μέγιστη ισοδύναμη τάση κατά Von Mises, τη θερμοκρασία και το φορτίο σφυρηλάτησης που εμφανίζονται στο τελευταίο βήμα της προσομοίωσης και τη δύναμη του εμβόλου καθ' όλη τη διάρκεια της κατεργασίας σε συνάρτηση με τον χρόνο.

7.1.1 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΠΙΛΥΣΗΣ

Τα βασικά στοιχεία κατά την επίλυση όλων των μοντέλων παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

A/A	ΑΡΧΙΚΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ (°C)	ΧΡΟΝΟΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ (SEC)	ΒΗΜΑΤΑ	REMESHES
1	20	8012	52	11
2	100	9018	53	12
3	200	8745	52	10
4	300	8818	53	12
5	400	8456	51	11
6	430	9745	52	10
7	480	9322	52	12
8	500	8325	52	9

Πίνακας 7.1: Βασικά στοιχεία κατά την επίλυση των προσομοιώσεων

7.1.2 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα από την επίλυση όλων των μοντέλων παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

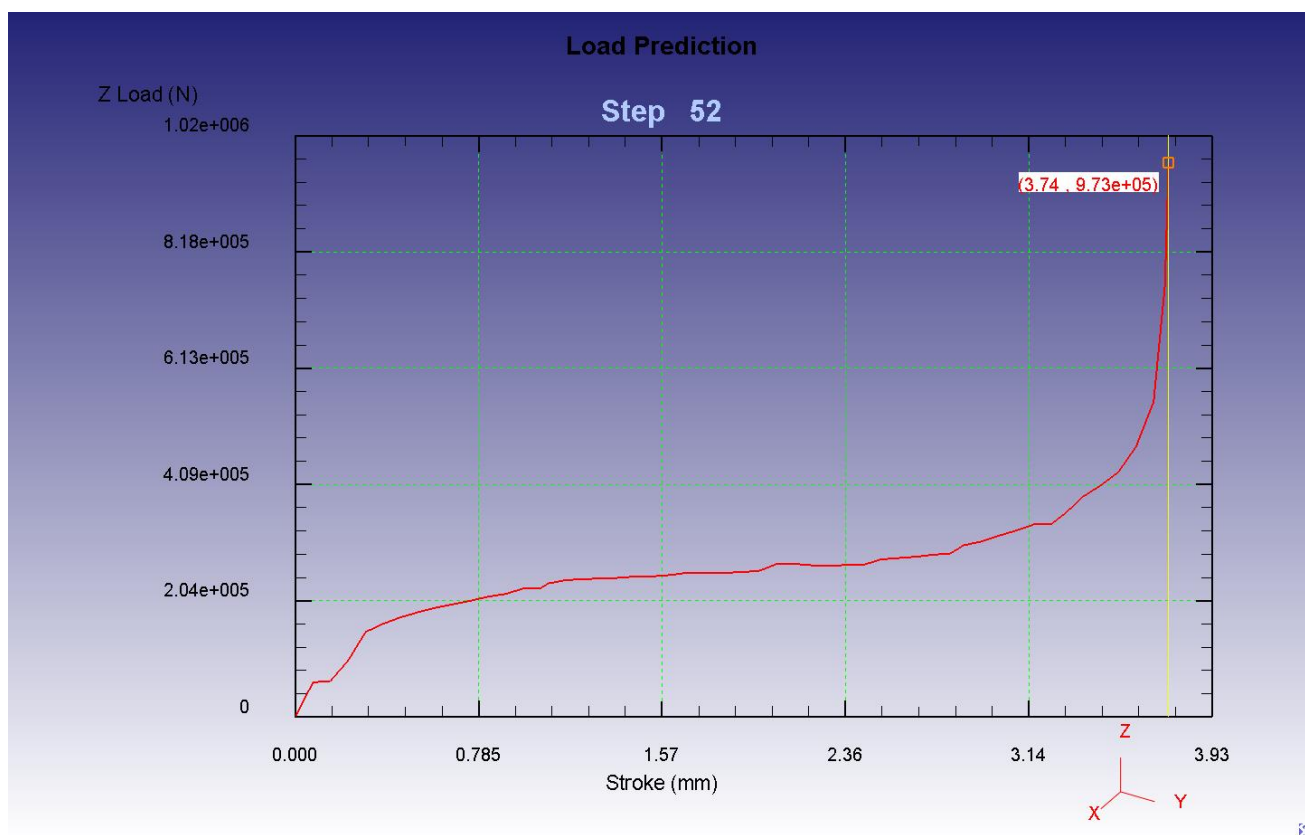
A/A	ΑΡΧΙΚΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ (°C)	ΜΕΓΙΣΤΟ ΦΟΡΤΙΟ ΚΑΤΑ VON MISES (MPa)	ΜΕΓΙΣΤΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ (°C)	ΜΕΓΙΣΤΟ ΦΟΡΤΙΟ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ (kN)
1	20	340	149	973
2	100	294	202	914
3	200	215	263	666
4	300	150	323	448
5	400	108	397	322

6	430	99,6	382	242
7	480	91,3	462	276
8	500	85,1	481	197

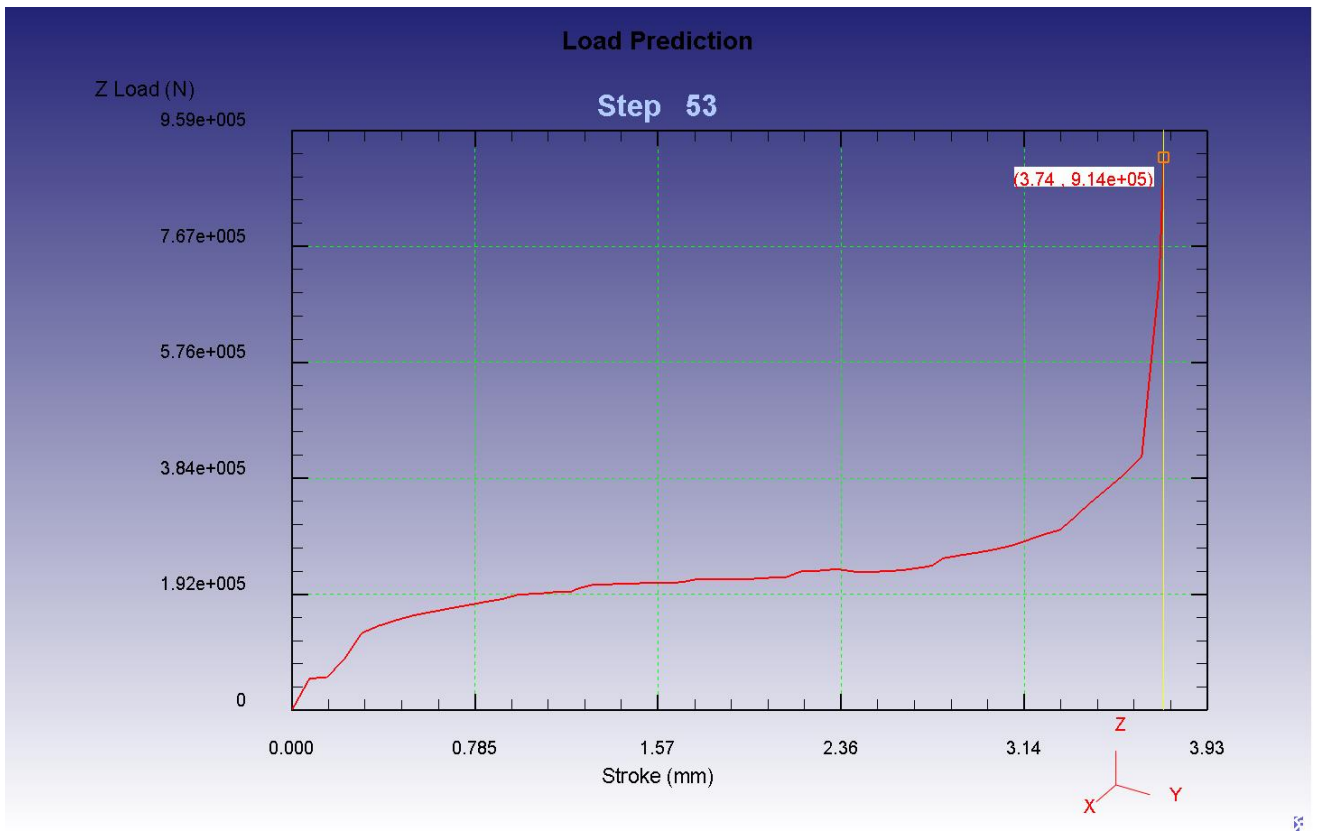
Πίνακας 7.2: Μέγιστες τάσεις, θερμοκρασίες και φορτία σφυρηλάτησης όλων των προσομοιώσεων

7.1.3 ΦΟΡΤΙΟ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ

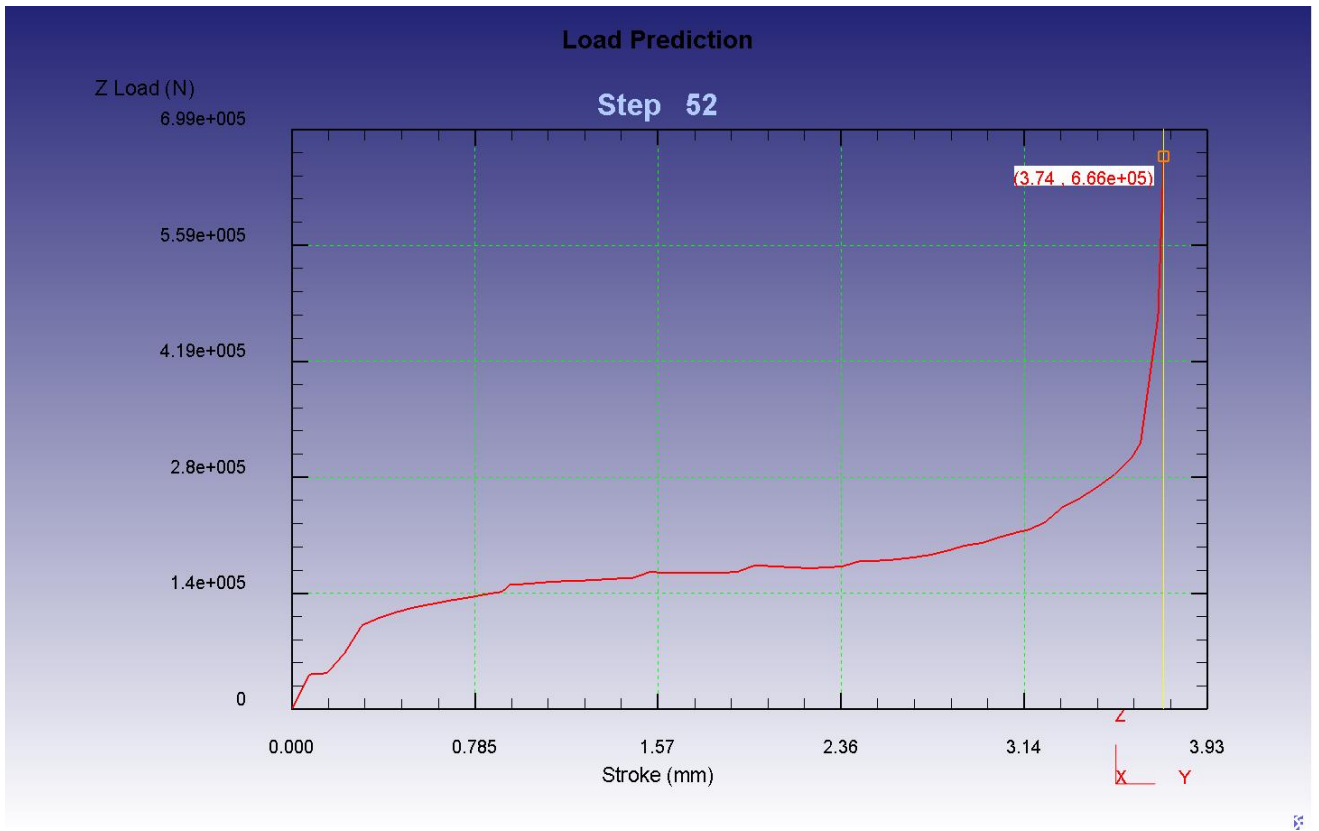
Τα διαγράμματα του φορτίου σφυρηλάτησης συναρτήσεως της μετατόπισης όλων των μοντέλων παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:



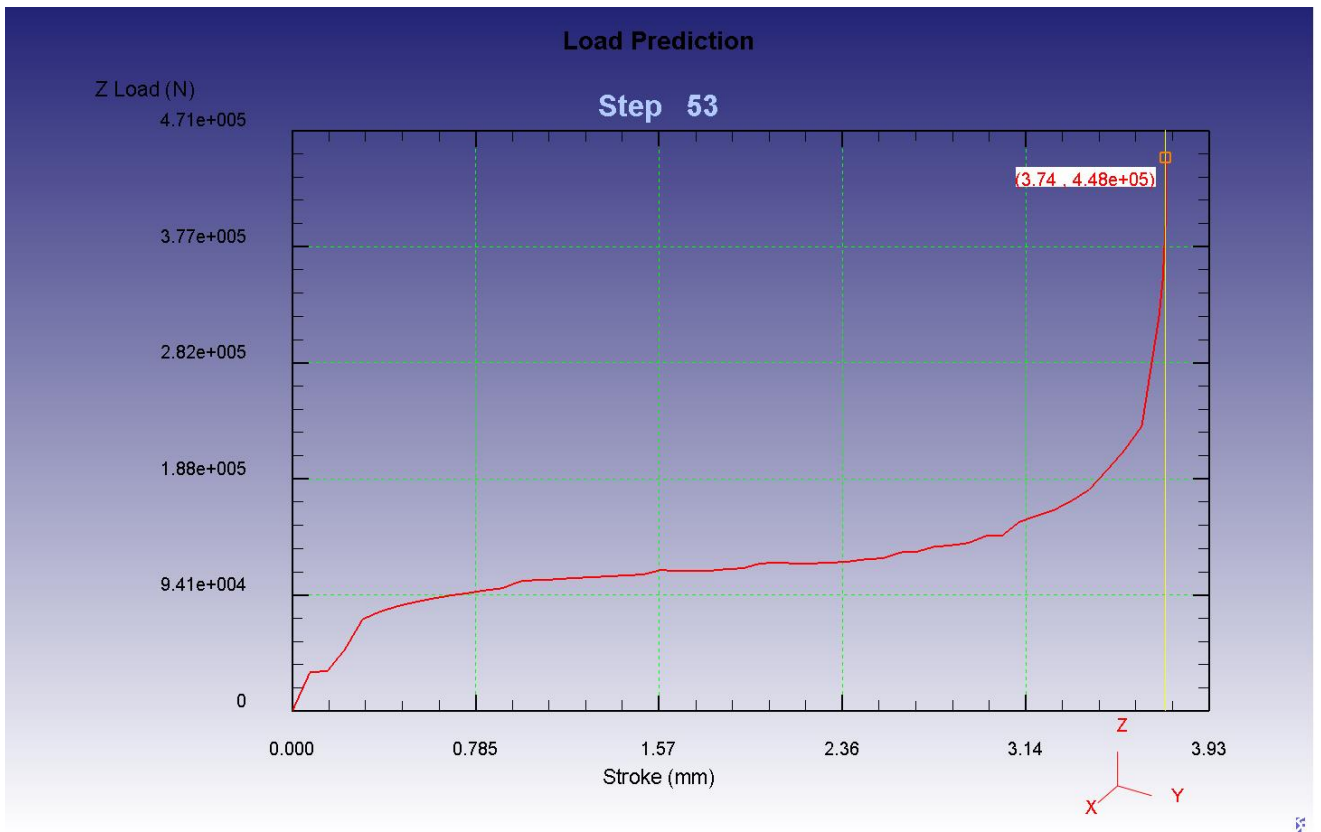
Σχήμα 7.1: Διάγραμμα της δύναμης του εμβόλου συναρτήσεως της μετατόπισης ($T_{\delta} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$)



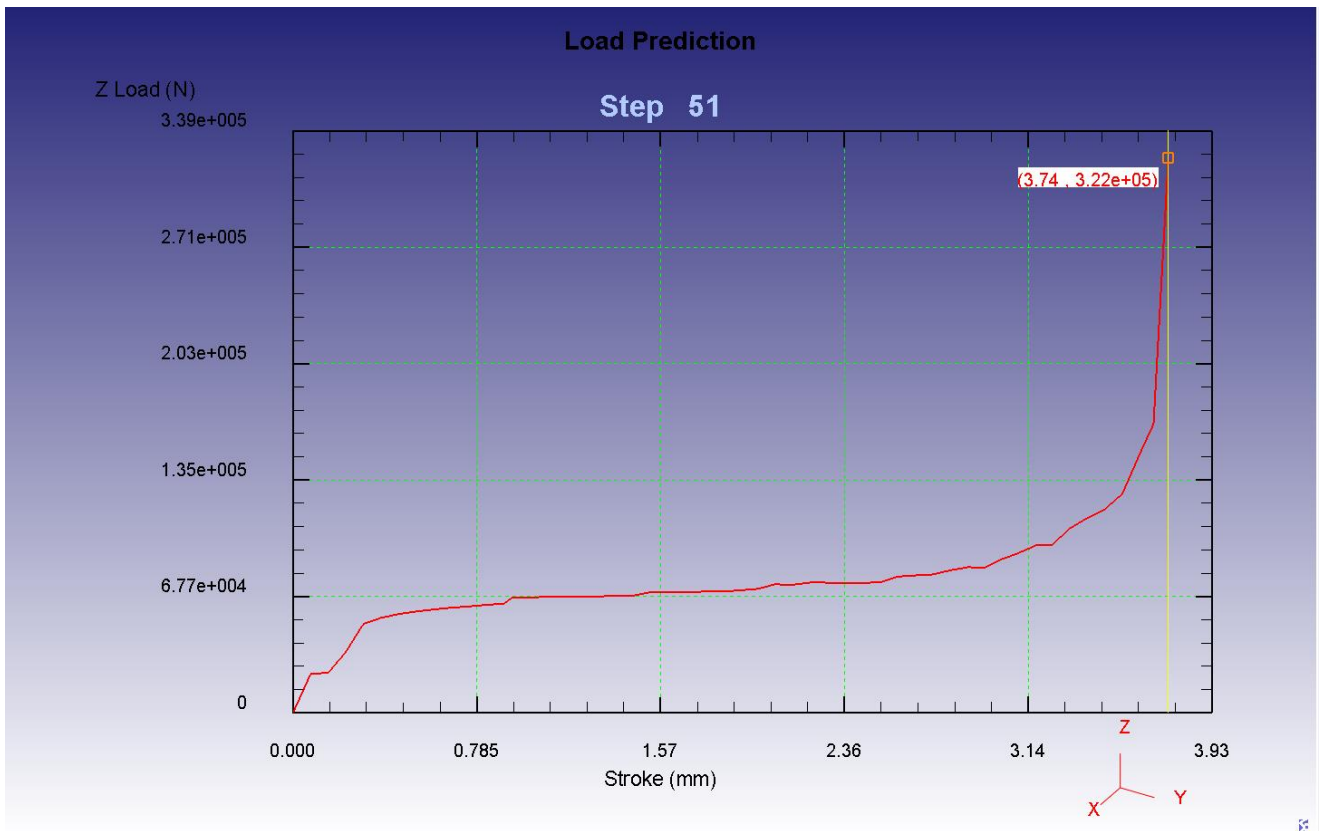
Σχήμα 7.2: Διάγραμμα της δύναμης του εμβόλου συναρτήσει της μετατόπισης ($T_{\delta} = 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$)



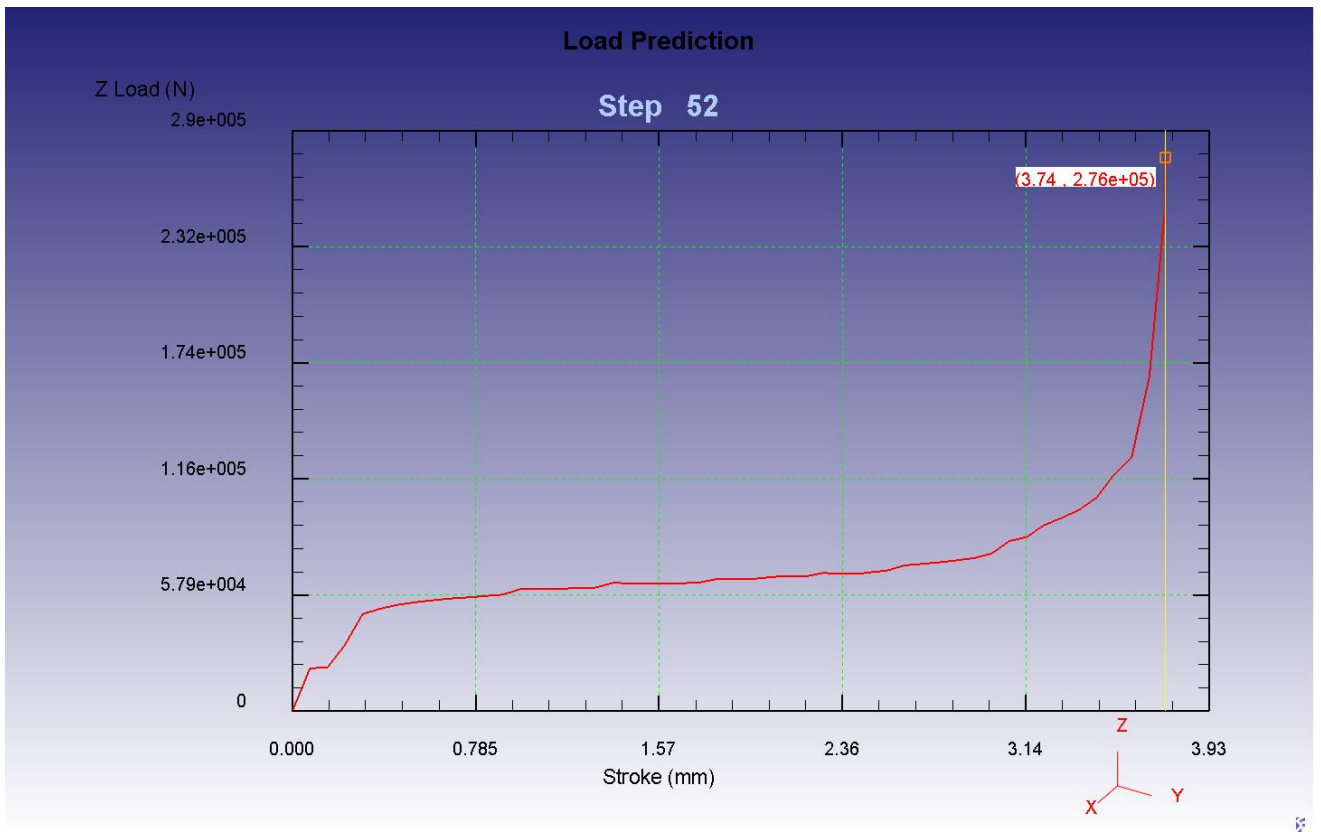
Σχήμα 7.3: Διάγραμμα της δύναμης του εμβόλου συναρτήσει της μετατόπισης ($T_{\delta} = 200 \text{ }^{\circ}\text{C}$)



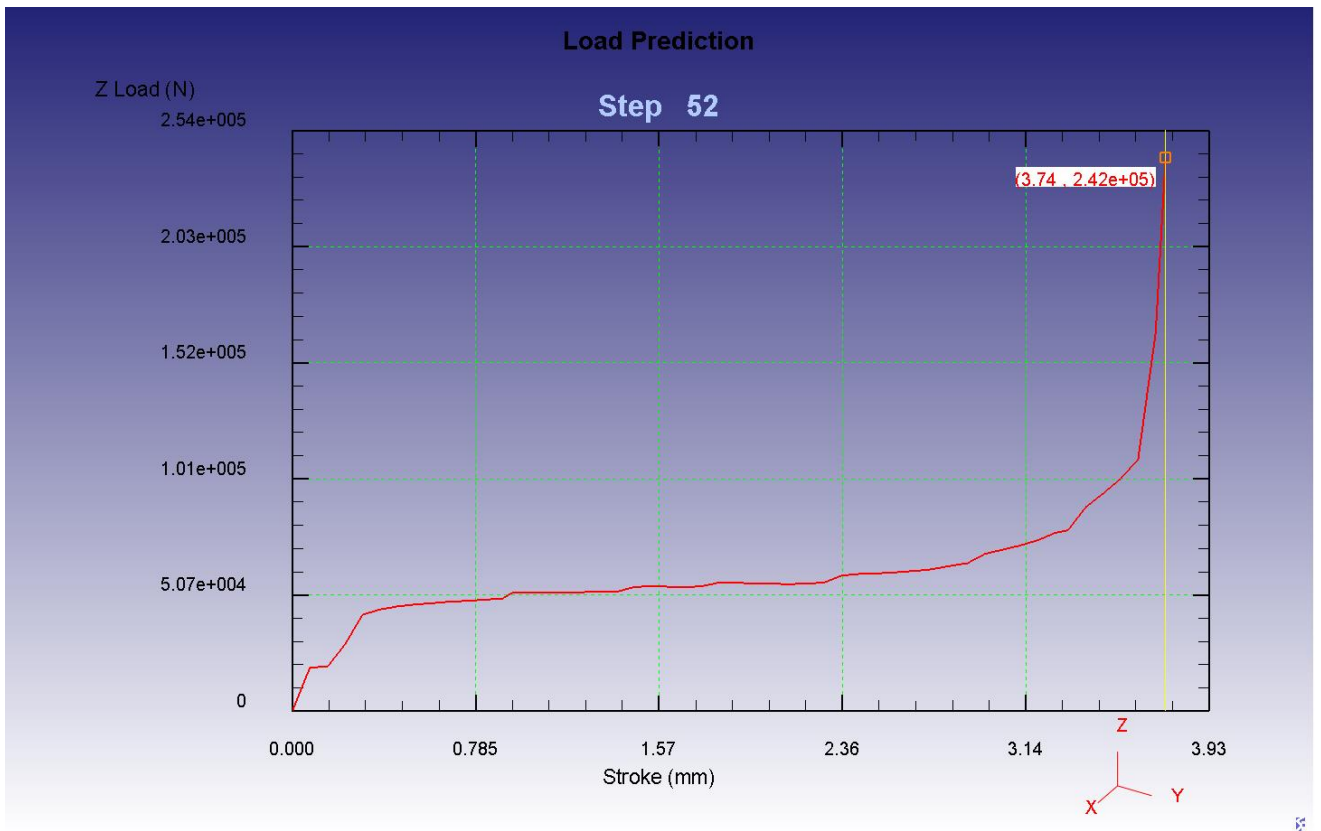
Σχήμα 7.4: Διάγραμμα της δύναμης του εμβόλου συναρτήσει της μετατόπισης ($T_{\delta} = 300 \text{ }^{\circ}\text{C}$)



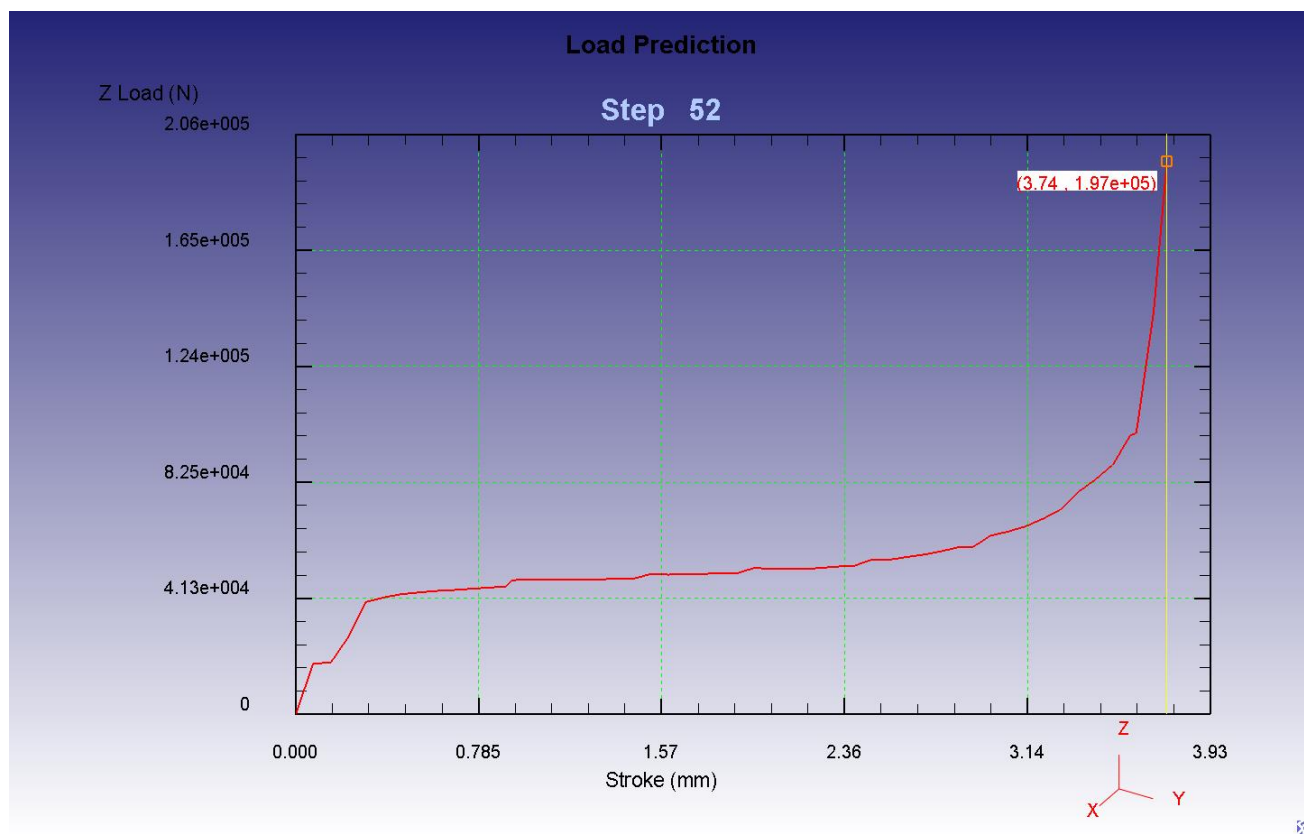
Σχήμα 7.5: Διάγραμμα της δύναμης του εμβόλου συναρτήσει της μετατόπισης ($T_{\delta} = 400 \text{ }^{\circ}\text{C}$)



Σχήμα 7.6: Διάγραμμα της δύναμης του εμβόλου συναρτήσει της μετατόπισης ($T_{\delta} = 430 \text{ }^{\circ}\text{C}$)



Σχήμα 7.7: Διάγραμμα της δύναμης του εμβόλου συναρτήσει της μετατόπισης ($T_{\delta} = 480 \text{ }^{\circ}\text{C}$)



Σχήμα 7.8: Διάγραμμα της δύναμης του εμβόλου συναρτήσει της μετατόπισης ($T_{\delta} = 500 \text{ }^{\circ}\text{C}$)

Συμπεράσματα πάνω στα συγκεντρωτικά αποτελέσματα όλων των προσομοιώσεων παρατίθενται στην παράγραφο 7.3 του παρόντος κεφαλαίου.

7.2 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΕΛΕΤΩΝ ΑΝΤΟΧΗΣ

Αμέσως παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα όλων των μελετών αντοχής (8) που πραγματοποιήθηκαν και αφορούν τα στοιχεία κατά την επίλυση (χρόνος, υποβήματα) και την μέγιστη ισοδύναμη τάση κατά Von Mises κάθε τμήματος.

7.2.1 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΠΙΛΥΣΗΣ

Τα βασικά στοιχεία κατά την επίλυση όλων των μοντέλων παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Α/Α	ΑΡΧΙΚΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ($^{\circ}\text{C}$)	ΧΡΟΝΟΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ (SEC)	ΥΠΟ ΒΗΜΑΤΑ
1	20	1578	11
2	100	1524	11
3	200	1627	11

4	300	1524	11
5	400	1543	11
6	430	1480	11
7	480	1470	11
8	500	1440	11

Πίνακας 7.3: Βασικά στοιχεία κατά την επίλυση των μελετών αντοχής

7.2.2 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα από την επίλυση όλων των μοντέλων παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

A/A	ΜΗΤΡΑ (DIE) (MPa)	ΒΑΣΗ ΜΗΤΡΑΣ (DIE BASE) (MPa)	ΕΜΒΟΛΟ (PUNCH) (MPa)	ΑΝΩ ΤΜΗΜΑ ΕΜΒΟΛΟΥ (UPPER PUNCH) (MPa)	ΚΕΛΥΦΟΣ (SHELL) (MPa)	ΒΑΣΗ ΚΕΛΥΦΟΥΣ (SHELL BASE) (MPa)
1	3960	1900	5270	1510	917	1580
2	3810	1760	4970	1390	885	1470
3	2690	1290	3690	1010	631	1080
4	1770	876	2450	681	429	730
5	1360	618	1710	502	309	521
6	1130	536	1450	427	263	449
7	1030	462	1340	368	231	388
8	808	380	1050	298	186	318

Πίνακας 7.4: Μέγιστες τάσεις των επιμέρους τμημάτων της μήτρας

Συμπεράσματα πάνω στα συγκεντρωτικά αποτελέσματα όλων των μελετών αντοχής παρατίθενται στην παράγραφο 7.3 του παρόντος κεφαλαίου.

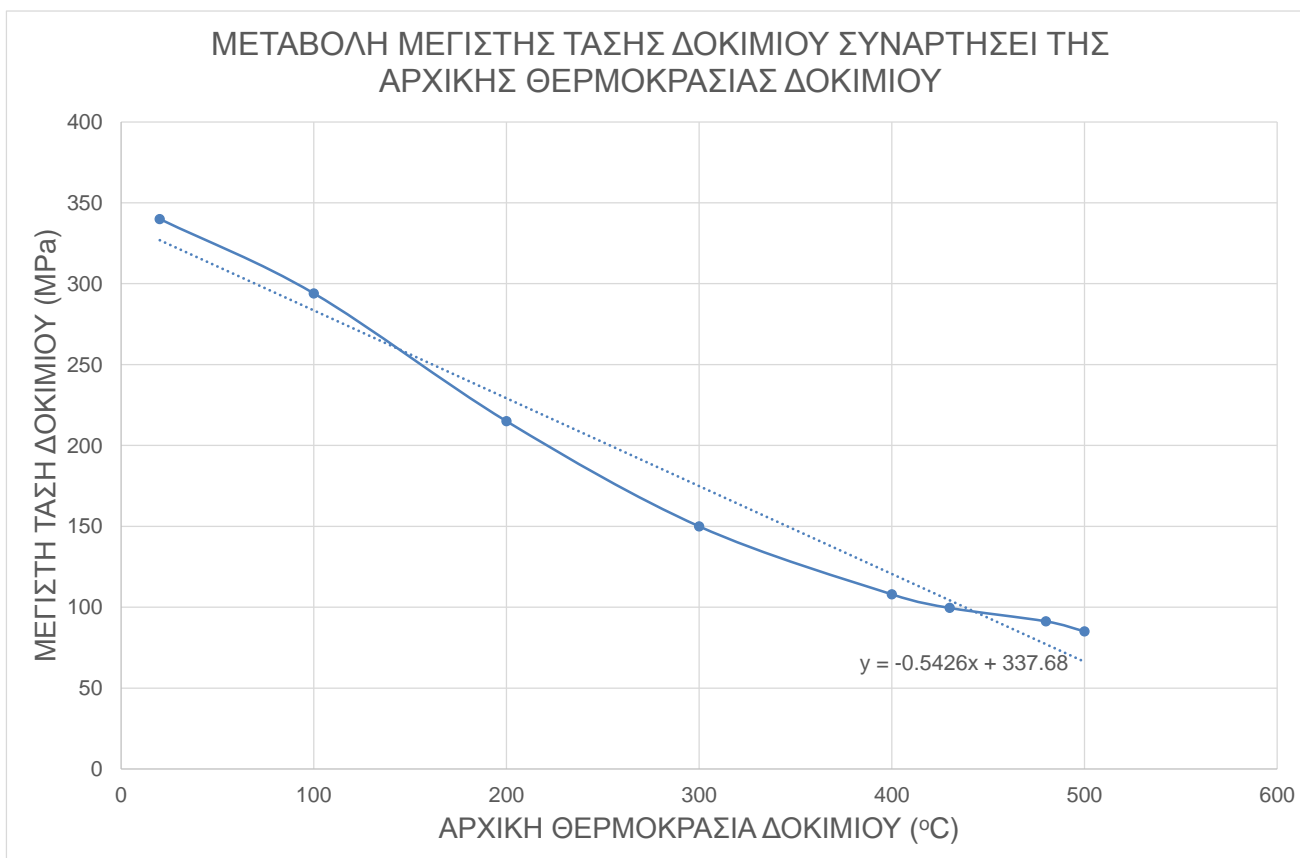
7.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αμέσως παρακάτω παρατίθενται τα συμπεράσματα που προκύπτουν μετά την ολοκλήρωση των προσομοιώσεων και των μελετών αντοχής και την συγκέντρωση των αποτελεσμάτων:

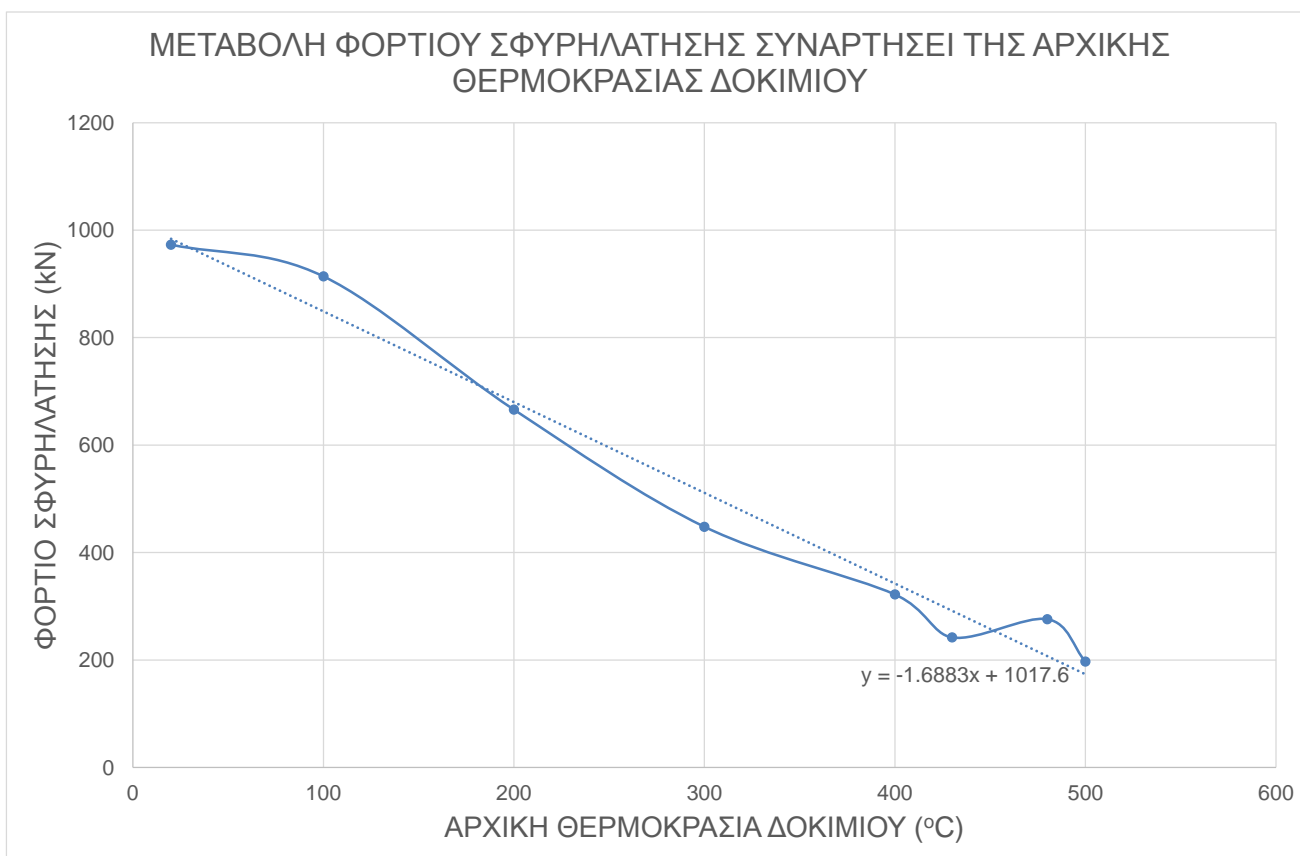
7.3.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΕΠΙ ΤΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ

Βασιζόμενοι στον πίνακα 7.1 όπου συγκεντρώθηκαν όλα τα βασικά στοιχεία των προσομοιώσεων κατά τη διάρκεια της επίλυσης τους παρατηρούμε ότι η διακύμανση των χρόνων επίλυσης των μοντέλων κυμαίνεται από 8012 sec έως 9745 sec. Τα βήματα που πραγματοποιήθηκαν για να επιλυθούν τα μοντέλα είναι 52 κατά μέσο όρο ενώ ο αριθμός των remeshings που πραγματοποιήθηκαν είναι 12.

Από τον πίνακα 7.2 όπου συγκεντρώθηκαν το μέγιστο φορτίο κατά Von Mises του δοκιμίου και το μέγιστο φορτίο σφυρηλάτησης του εμβόλου παρατηρούμε σταδιακή μείωση και των δύο όσο αυξάνεται η αρχική θερμοκρασία του δοκιμίου όπως είναι φυσικό, αφού όσο αυξάνουμε τη θερμοκρασία μειώνεται η αντίσταση του υλικού και διαμορφώνεται πιο εύκολα. Αμέσως παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα μεταβολής της μέγιστης τάσης κατά Von Mises του δοκιμίου και του μέγιστου φορτίου σφυρηλάτησης του εμβόλου της μήτρας συναρτήσει της αρχικής θερμοκρασίας του δοκιμίου.



Σχήμα 7.9: Διάγραμμα μεταβολής της μέγιστης τάσης του δοκιμίου συναρτήσει της αρχικής θερμοκρασίας δοκιμίου



Σχήμα 7.10: Διάγραμμα μεταβολής φορτίου σφυρηλάτησης συναρτήσεϊ της αρχικής θερμοκρασίας δοκιμίου

Απ' ότi παρατηρούμε από το σχήμα 7.9 μπορούμε να προσομοιώσουμε την καμπύλη μεταβολής της μέγιστης τάσης του δοκιμίου συναρτήσεϊ της αρχικής θερμοκρασίας του δοκιμίου με μια γραμμική εξίσωση: $y = -0,5426 \cdot x + 337,68$ με αρκετά καλή προσέγγιση.

Επίσης, βασιζόμενοι στο σχήμα 7.9 μπορούμε να προσομοιώσουμε την καμπύλη μεταβολής του μέγιστου φορτίου σφυρηλάτησης συναρτήσεϊ της αρχικής θερμοκρασίας του δοκιμίου με μια γραμμική εξίσωση: $y = -1,6883 \cdot x + 1017,6$ με αρκετά καλή προσέγγιση.

Τέλος, από τα διαγράμματα της δύναμης του εμβόλου συναρτήσεϊ της μετατόπισης της παραγράφου 7.1.3 παρατηρούμε την δραστική αύξηση του φορτίου σφυρηλάτησης στα τελευταία βήματα των προσομοιώσεων όπου και το υλικό καλύπτει όλη την επιφάνεια της μήτρας έρχεται σε επαφή με όλη την επιφάνεια των τοιχωμάτων της μήτρας.

7.3.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΕΠΙ ΤΩΝ ΜΕΛΕΤΩΝ ΑΝΤΟΧΗΣ

Βασιζόμενοι στον πίνακα 7.3 όπου συγκεντρώθηκαν όλα τα βασικά στοιχεία των μελετών αντοχής κατά τη διάρκεια της επίλυσης τους παρατηρούμε ότι η διακύμανση των χρόνων επίλυσης των μοντέλων κυμαίνεται από 1440 sec έως 1627 sec ενώ τα υποβήματα που πραγματοποιήθηκαν για να επιλυθούν τα μοντέλα είναι 11.

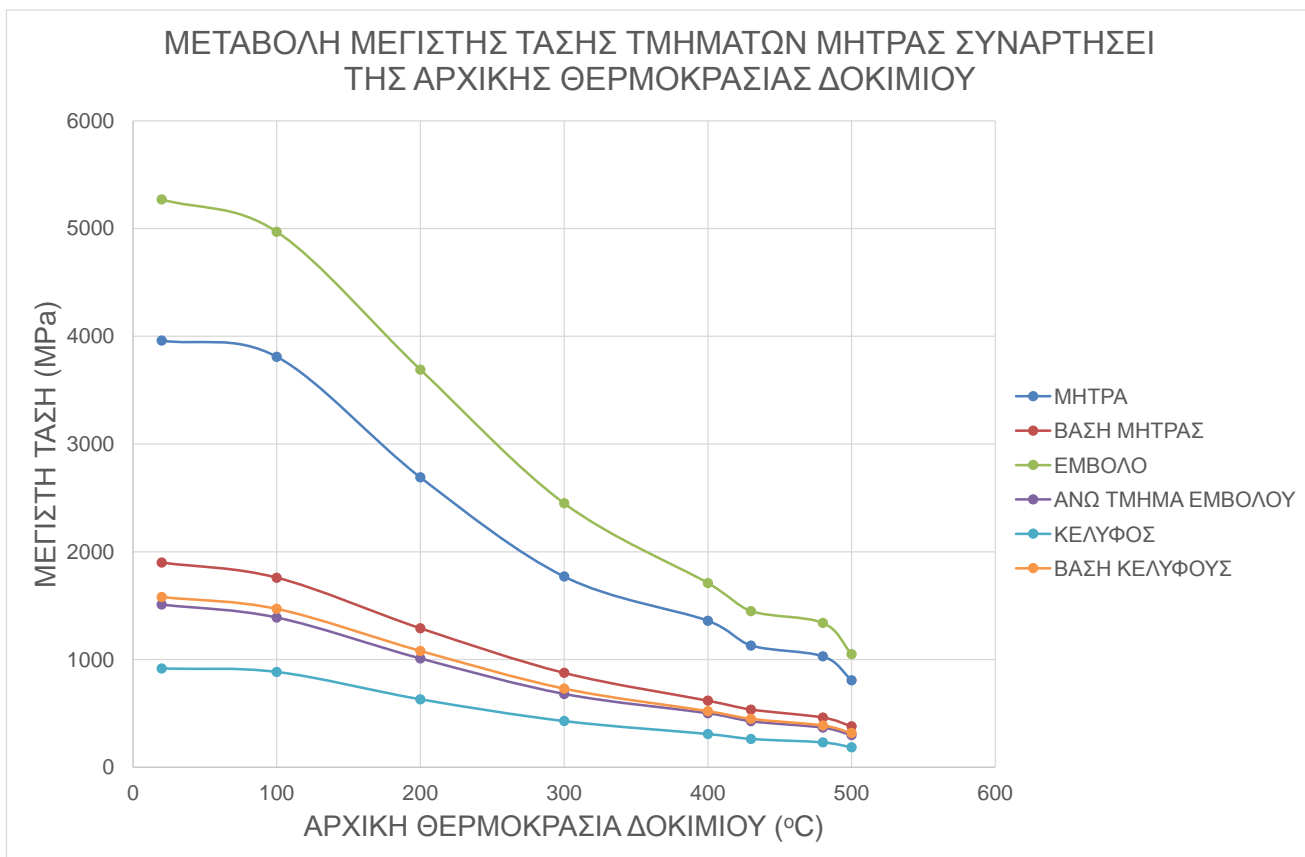
Επίσης, βασιζόμενοι στον πίνακα 7.4 κατασκευάζουμε τον παρακάτω πίνακα όπου παρουσιάζονται η μέγιστη τάση ολόκληρης της μήτρας σφυρηλάτησης, το όριο διαρροής του υλικού και ο ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας της μήτρας.

A/A	ΑΡΧΙΚΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ (°C)	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΑΣΗ ΟΛΟΚΛΗΡΗΣ ΤΗΣ ΜΗΤΡΑΣ (Mpa)	ΟΡΙΟ ΔΙΑΡΡΟΗΣ ΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ (AISI H-13) (Mpa)	ΕΛΑΧΙΣΤΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ
1	20	5270	1990	0,38
2	100	4970	1990	0,40
3	200	3690	1990	0,54
4	300	2450	1990	0,81
5	400	1710	1990	1,16
6	430	1450	1990	1,37
7	480	1340	1990	1,49
8	500	1050	1990	1,90

Πίνακας 7.5: Μέγιστη τάση ολόκληρης της μήτρας και ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας

Από τον παραπάνω πίνακα παρατηρούμε ότι σύμφωνα με το υλικό που έχουμε επιλέξει για τα τμήματα της μήτρας (AISI H-13) για να αντέξει στη θερμή σφυρηλάτηση θα πρέπει να θερμανθεί το δοκίμιο τουλάχιστον στους 400 °C. Επίσης, παρατηρούμε ότι στις προτεινόμενες θερμοκρασίες σφυρηλάτησης του υλικού του δοκιμίου (6061-T6) οι οποίες κυμαίνονται από 430 °C έως 480 °C η μήτρα σφυρηλάτησης αντέχει με συντελεστή ασφαλείας από 1,37 έως 1,49 που είναι αρκετά ικανοποιητικός.

Επίσης, από τον πίνακα 7.4 όπου συγκεντρώθηκαν το μέγιστο φορτίο κατά Von Mises όλων των τμημάτων της μήτρας παρατηρούμε σταδιακή μείωση των τιμών τους όσο αυξάνεται η αρχική θερμοκρασία του δοκιμίου όπως είναι φυσικό, αφού όσο αυξάνουμε τη θερμοκρασία μειώνονται τα φορτία που δέχονται τα τοιχώματα της μήτρας από το δοκίμιο. Αμέσως παρακάτω παρουσιάζεται το διαγράμματα μεταβολής της μέγιστης τάσης κατά Von Mises όλων των τμημάτων της μήτρας συναρτήσει της αρχικής θερμοκρασίας του δοκιμίου.



Σχήμα 7.11: Διάγραμμα μεταβολής της μέγιστης τάσης των τμημάτων της μήτρας συναρτήσει της αρχικής θερμοκρασίας δοκιμίου

7.4 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Στη συγκεκριμένη εργασία έγινε μια προσπάθεια προσομοίωσης θερμής σφυρηλάτησης ακριβείας στην κατασκευή οδοντωτών τροχών ευθείας οδόντωσης. Χρησιμοποιήθηκαν διάφορες θερμοκρασίες για το δοκίμιο οι οποίες κυμαίνονταν από 20 °C έως 500 °C. Η θερμοκρασία της μήτρας λήφθηκε σταθερή στους 20 °C ενώ η ταχύτητα του εμβόλου επιλέχθηκε στα 15 mm/min.

Τα περισσότερα στοιχεία των προσομοιώσεων, όπως οι συντελεστές τριβής, συντελεστές αγωγής θερμότητας, η ταχύτητα του εμβόλου και τα υλικά του δοκιμίου και των τμημάτων της μήτρας ελήφθησαν από επιστημονικά άρθρα, στα οποία είχαν πραγματοποιηθεί παρόμοιες μελέτες κατεργασιών διαμόρφωσης.

Τέλος, σε ήδη σχεδιασμένη μήτρα σφυρηλάτησης πραγματοποιήθηκε μελέτη αντοχής στις δυνάμεις που δέχεται από το δοκίμιο κατά την κατεργασία. Πριν την κατασκευή της μήτρας μια τέτοια μελέτη είναι απαραίτητη για την πλήρη και σωστή διαστασιολόγηση της μήτρας, έλεγχο των κοχλιών συγκράτησης και επιλογή των κατάλληλων υλικών.

Το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε τόσο για τις προσομοιώσεις όσο και για την μελέτη αντοχής είναι το DEFORM 3D που είναι κατάλληλο για κατεργασίες διαμόρφωσης.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΩΝ

ΠΑ.1 ΧΑΛΥΒΑΣ AISI H-13 (ΥΛΙΚΟ ΜΗΤΡΑΣ)

AISI Type H13 Hot Work Tool Steel

Categories: [Metal](#); [Ferrous Metal](#); [Tool Steel](#); [Hot Work Steel](#)



Material Notes: High hardenability, excellent wear resistance and hot toughness. H13 has good thermal shock resistance and will tolerate some water cooling in service. Nitriding will improve hardness, but can diminish shock resistance if hardened layer is too thick. Electroslag Remelted (ESR) H13 has greater homogeneity and an exceptionally fine structure, resulting in improved machinability, polishability and high temperature tensile strength.

Applications: hot work applications: pressure die casting tools, extrusion tools, forging dies, hot shear blades, stamping dies, plastic molds. ESR H13 is great for aluminum die-casting tools and plastic mold tools requiring a very high polish.

Weldability: Pre and Post-heating recommended, can be welded with oxy-acetylene, inert shielded gas and shielded metal arc; Filler should be similar to the base metal.

Key Words: UNS T20813, ASTM A681, FED QQ-T-570, BS 4659 BH13, BS 4659 H13, BS EN ISO 4957 :2000 X40CrMoV5-1, Werkstoff 1.2344

Vendors: No vendors are listed for this material. Please [click here](#) if you are a supplier and would like information on how to add your listing to this material.

Physical Properties	Metric	English	Comments
Density	7.80 g/cc	0.282 lb/in ³	
Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Hardness, Rockwell C	28 - 30	28 - 30	air or oil quenched and tempered at 705°C (1300°F)
	31 - 33	31 - 33	air or oil quenched and tempered at 675°C (1250°F)
	39 - 41	39 - 41	air or oil quenched and tempered at 650°C (1200°F)
	46 - 47	45 - 47	air or oil quenched and tempered at 620°C (1150°F)
	49 - 51	49 - 51	air or oil quenched and tempered at 595°C (1100°F)
	51 - 53	51 - 53	air or oil quenched and tempered at 565°C (1050°F)
	51 - 53	51 - 53	air quenched from 1025°C (1875°F) or oil quenched from 1010°C (1850°F) with no temper, or tempered for 1 hour at 315°C (600°F), 425°C (800°F), and 480°C (900°F)
	52 - 54	52 - 54	air or oil quenched and tempered at 510°C (950°F) and 540°C (1000°F)
Tensile Strength, Ultimate	1990 MPa	289000 psi	at HRC = 55 (air or oil quenched from 995-1025°C)
Tensile Strength, Yield	1650 MPa	239000 psi	at HRC = 55 (air or oil quenched from 995-1025°C)
Elongation at Break	9.0 %	9.0 %	at HRC = 55 (air or oil quenched from 995-1025°C)
Modulus of Elasticity	210 GPa	30500 ksi	
Bulk Modulus	140 GPa	20300 ksi	Typical for steel.
Poissons Ratio	0.30	0.30	Calculated
Machinability	50 %	50 %	Based on 1% carbon steel as 100% machinability
Shear Modulus	81.0 GPa	11700 ksi	Estimated from elastic modulus
Thermal Properties	Metric	English	Comments
CTE, linear 	11.0 µm/m-°C @Temperature 25.0 - 95.0 °C	6.11 µin/in-°F @Temperature 77.0 - 203 °F	
	11.5 µm/m-°C @Temperature 25.0 - 205 °C	6.39 µin/in-°F @Temperature 77.0 - 401 °F	
	12.4 µm/m-°C @Temperature 25.0 - 540 °C	6.89 µin/in-°F @Temperature 77.0 - 1000 °F	
Specific Heat Capacity	0.460 J/g-°C @Temperature 0.000 - 100 °C	0.110 BTU/lb-°F @Temperature 32.0 - 212 °F	
Thermal Conductivity 	24.3 W/m-K @Temperature 215 °C	169 BTU-in/hr-ft ² -°F @Temperature 419 °F	
	24.3 W/m-K @Temperature 475 °C	169 BTU-in/hr-ft ² -°F @Temperature 887 °F	
	24.4 W/m-K @Temperature 350 °C	169 BTU-in/hr-ft ² -°F @Temperature 662 °F	
	24.7 W/m-K @Temperature 605 °C	171 BTU-in/hr-ft ² -°F @Temperature 1120 °F	
Processing Properties	Metric	English	Comments
Processing Temperature	540 - 650 °C	1000 - 1200 °F	Tempering Temperature
	995 - 1040 °C	1820 - 1900 °F	Hardening Temperature
Annealing Temperature	845 - 900 °C	1550 - 1650 °F	

Component Elements Properties	Metric	English	Comments
Carbon, C	0.32 - 0.40 %	0.32 - 0.40 %	
Chromium, Cr	5.13 - 5.25 %	5.13 - 5.25 %	
Iron, Fe	>= 90.95 %	>= 90.95 %	as remainder
Molybdenum, Mo	1.33 - 1.4 %	1.33 - 1.4 %	
Silicon, Si	1.0 %	1.0 %	

Vanadium, V	1.0 %	1.0 %	
-------------	-------	-------	--

Descriptive Properties

Annealing Temperature	850 - 870°C for 4 hours	furnace cool 20°C per hour max.
Stress Relieving Temperature	600 - 650°C for 2 hours (approx.)	cool in still air; always stress relief before hardening.

References for this datasheet.

Some of the values displayed above may have been converted from their original units and/or rounded in order to display the information in a consistent format. Users requiring more precise data for scientific or engineering calculations can click on the property value to see the original value as well as raw conversions to equivalent units. We advise that you only use the original value or one of its raw conversions in your calculations to minimize rounding error. We also ask that you refer to MatWeb's [terms of use](#) regarding this information. [Click here](#) to view all the property values for this datasheet as they were originally entered into MatWeb.

ΠΑ.2 ΚΡΑΜΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ 6061-T6 (ΥΛΙΚΟ ΔΟΚΙΜΙΟΥ)

Aluminum 6061-T6; 6061-T651

Categories: [Metal](#); [Nonferrous Metal](#); [Aluminum Alloy](#); [6000 Series Aluminum Alloy](#)

Material Notes: General 6061 characteristics and uses: Excellent joining characteristics, good acceptance of applied coatings. Combines relatively high strength, good workability, and high resistance to corrosion; widely available. The T8 and T9 tempers offer better chipping characteristics over the T6 temper.

Applications: Aircraft fittings, camera lens mounts, couplings, marine fittings and hardware, electrical fittings and connectors, decorative or misc. hardware, hinge pins, magneto parts, brake pistons, hydraulic pistons, appliance fittings, valves and valve parts; bike frames.

Data points with the AA note have been provided by the Aluminum Association, Inc. and are NOT FOR DESIGN.



Composition Notes:



Composition information provided by the Aluminum Association and is not for design.

Key Words: a6061, UNS A96061; ISO AlMg1SiCu; Aluminium 6061-T6, AD-33 (Russia); AA6061-T6; 6061T6, UNS A96061; ISO AlMg1SiCu; Aluminium 6061-T651, AD-33 (Russia); AA6061-T651

Vendors: [Click here to view all available suppliers for this material.](#)

Please [click here](#) if you are a supplier and would like information on how to add your listing to this material.

Physical Properties	Metric	English	Comments
Density	2.70 g/cc	0.0975 lb/in ³	AA; Typical
Mechanical Properties			
	Metric	English	Comments
Hardness, Brinell	95	95	AA; Typical; 500 g load; 10 mm ball
Hardness, Knoop	120	120	Converted from Brinell Hardness Value
Hardness, Rockwell A	40	40	Converted from Brinell Hardness Value
Hardness, Rockwell B	60	60	Converted from Brinell Hardness Value
Hardness, Vickers	107	107	Converted from Brinell Hardness Value
Tensile Strength, Ultimate	310 MPa	45000 psi	AA; Typical
	24.0 MPa	3480 psi	
	@Temperature 371 °C	@Temperature 700 °F	
	32.0 MPa	4640 psi	
	@Temperature 316 °C	@Temperature 601 °F	
	51.0 MPa	7400 psi	
	@Temperature 260 °C	@Temperature 500 °F	
	131 MPa	19000 psi	
	@Temperature 204 °C	@Temperature 399 °F	
	234 MPa	33900 psi	
	@Temperature 149 °C	@Temperature 300 °F	
	290 MPa	42100 psi	
	@Temperature 100 °C	@Temperature 212 °F	
	310 MPa	45000 psi	
	@Temperature 24.0 °C	@Temperature 75.2 °F	
	324 MPa	47000 psi	
	@Temperature -26.0 °C	@Temperature -18.4 °F	
	338 MPa	49000 psi	
	@Temperature -30.0 °C	@Temperature -112 °F	
	414 MPa	60000 psi	
	@Temperature -196 °C	@Temperature -321 °F	
Tensile Strength, Yield	276 MPa	40000 psi	AA; Typical
	12.0 MPa	1740 psi	
	@Strain 0.200 %	@Strain 0.200 %	
	Temperature 371 °C	Temperature 700 °F	
	19.0 MPa	2760 psi	
	@Strain 0.200 %	@Strain 0.200 %	
	Temperature 316 °C	Temperature 601 °F	
	34.0 MPa	4930 psi	
	@Strain 0.200 %	@Strain 0.200 %	
	Temperature 260 °C	Temperature 500 °F	
	103 MPa	14900 psi	
	@Strain 0.200 %	@Strain 0.200 %	
	Temperature 204 °C	Temperature 399 °F	
	214 MPa	31000 psi	
	@Strain 0.200 %	@Strain 0.200 %	
	Temperature 149 °C	Temperature 300 °F	
	262 MPa	38000 psi	
	@Strain 0.200 %	@Strain 0.200 %	
	Temperature 100 °C	Temperature 212 °F	
	276 MPa	40000 psi	
	@Strain 0.200 %	@Strain 0.200 %	
	Temperature 24.0 °C	Temperature 75.2 °F	

	283 MPa @Strain 0.200 % Temperature -28.0 °C	41000 psi @Strain 0.200 % Temperature -18.4 °F	
	290 MPa @Strain 0.200 % Temperature -30.0 °C	42100 psi @Strain 0.200 % Temperature -112 °F	
	324 MPa @Strain 0.200 % Temperature -196 °C	47000 psi @Strain 0.200 % Temperature -321 °F	
Elongation at Break 	17 % @Temperature -28.0 °C	17 % @Temperature -18.4 °F	
	17 % @Temperature 24.0 °C	17 % @Temperature 75.2 °F	
	18 % @Temperature -30.0 °C	18 % @Temperature -112 °F	
	18 % @Temperature 100 °C	18 % @Temperature 212 °F	
	20 % @Temperature 149 °C	20 % @Temperature 300 °F	
	22 % @Temperature -196 °C	22 % @Temperature -321 °F	
	28 % @Temperature 204 °C	28 % @Temperature 399 °F	
	50 % @Temperature 250 °C	50 % @Temperature 500 °F	
	85 % @Temperature 316 °C	85 % @Temperature 601 °F	
	95 % @Temperature 371 °C	95 % @Temperature 700 °F	
	12 % @Thickness 1.59 mm	12 % @Thickness 0.0625 in	AA, Typical
	17 % @Diameter 12.7 mm	17 % @Diameter 0.500 in	AA, Typical
Modulus of Elasticity	68.9 GPa	10000 ksi	AA, Typical, Average of tension and compression. Compression modulus is about 2% greater than tensile modulus.
Notched Tensile Strength	324 MPa	47000 psi	2.5 cm width x 0.16 cm thick side-notched specimen, $K_t = 17$.
Ultimate Bearing Strength	607 MPa	88000 psi	Edge distance/pin diameter = 2.0
Bearing Yield Strength	385 MPa	55000 psi	Edge distance/pin diameter = 2.0
Poissons Ratio	0.33	0.33	Estimated from trends in similar Al alloys.
Fatigue Strength	96.5 MPa @# of Cycles 5.00e+8	14000 psi @# of Cycles 5.00e+8	completely reversed stress; RR Moore machine/specimen
Fracture Toughness	29.0 MPa-m ^{1/2}	26.4 ksi-in ^{1/2}	K_{IC} ; TL orientation.
Machinability	50 %	50 %	0-100 Scale of Aluminum Alloys
Shear Modulus	26.0 GPa	3770 ksi	Estimated from similar Al alloys.
Shear Strength	207 MPa	30000 psi	AA, Typical
Electrical Properties	Metric	English	Comments
Electrical Resistivity	0.00000399 ohm-cm @Temperature 20.0 °C	0.00000399 ohm-cm @Temperature 65.0 °F	AA, Typical
Thermal Properties	Metric	English	Comments
CTE, linear 	23.6 µm/m-°C @Temperature 20.0 - 100 °C	13.1 µin/in-°F @Temperature 65.0 - 212 °F	AA, Typical, average over range
	25.2 µm/m-°C @Temperature 20.0 - 300 °C	14.0 µin/in-°F @Temperature 63.0 - 572 °F	
Specific Heat Capacity	0.896 J/g-°C	0.214 BTU/lb-°F	
Thermal Conductivity	167 W/m-K	1150 BTU-in/hr-R ² -°F	AA, Typical at 77°F
Melting Point	582 - 651.7 °C	1080 - 1205 °F	AA, Typical range based on typical composition for wrought products 1/4 inch thickness or greater; Eutectic melting can be completely eliminated by homogenization.
Solidus	582 °C	1080 °F	AA, Typical
Liquidus	651.7 °C	1205 °F	AA, Typical
Processing Properties	Metric	English	Comments
Solution Temperature	529 °C	985 °F	
Aging Temperature	160 °C	320 °F	Rolled or drawn products; hold at temperature for 18 hr
	177 °C	350 °F	Extrusions or forgings; hold at temperature for 8 hr
Component Elements Properties	Metric	English	Comments
Aluminum, Al	95.8 - 98.6 %	95.8 - 98.6 %	As remainder
Chromium, Cr	0.040 - 0.35 %	0.040 - 0.35 %	

Copper, Cu	0.15 - 0.40 %	0.15 - 0.40 %
Iron, Fe	<= 0.70 %	<= 0.70 %
Magnesium, Mg	0.80 - 1.2 %	0.80 - 1.2 %
Manganese, Mn	<= 0.15 %	<= 0.15 %
Other, each	<= 0.050 %	<= 0.050 %
Other, total	<= 0.15 %	<= 0.15 %
Silicon, Si	0.40 - 0.80 %	0.40 - 0.80 %
Titanium, Ti	<= 0.15 %	<= 0.15 %
Zinc, Zn	<= 0.25 %	<= 0.25 %

References for this datasheet.

Some of the values displayed above may have been converted from their original units and/or rounded in order to display the information in a consistent format. Users requiring more precise data for scientific or engineering calculations can click on the property value to see the original value as well as raw conversions to equivalent units. We advise that you only use the original value or one of its raw conversions in your calculations to minimize rounding error. We also ask that you refer to MatWeb's [terms of use](#) regarding this information. [Click here](#) to view all the property values for this datasheet as they were originally entered into MatWeb.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ & ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ Η/Υ

ΠΒ.1 ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την ολοκλήρωση της εργασίας περιγράφεται αμέσως παρακάτω:

+ Συγγραφή εργασίας:
Microsoft Word 2013

+ Επεξεργασία δεδομένων:
Microsoft Excel 2013

+ Σχεδιαστικό πακέτο:
SolidWorks 2013

+ Πακέτο πεπερασμένων στοιχείων:
Deform 3D 10.2

ΠΒ.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ Η/Υ

Τα χαρακτηριστικά του ηλεκτρονικού υπολογιστή που χρησιμοποιήθηκε για να εκτελεστούν οι προσομοιώσεις είναι:

+ Επεξεργαστής:
Intel Core i3-2370M 2.40 GHz

+ Μνήμη RAM:
4 GB 1333 MHz

+ Κάρτα γραφικών:
Intel HD Graphics 4000

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**ΠΓ.1 ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

1. Δ.Μανωλάκος, Σημειώσεις του μαθήματος: Κατεργασίες Ι, «Σφυρηλάτηση (forging)»
2. Δ.Μανωλάκος, Σημειώσεις του μαθήματος: Κατεργασίες Ι, «Ελαττώματα σφυρηλάτησης (forging defects)»
3. Α.Γ.Μάμαλη, Κατεργασίες των Υλικών Ι, Έκδοση Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, Αθήνα 1998.
4. Α.Γ.Μάμαλη, Τεχνολογία των Κατεργασιών των Υλικών: Μη Συμβατικές Κατεργασίες, Αθήνα 2000.
5. Π. Πισινάρας, Μέθοδοι Μοντελοποίησης της Σφυρηλάτησης οδοντωτών τροχών, μεταπτυχιακή εργασία, Αθήνα 2007.
6. Κωστόπουλος Θ. Ν., Οδοντώσεις και Μειωτήρες Στροφών, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα, 1991.
7. Προβατίδης Χ., Αντωνιάδης Ι., Υπολογιστικές Μέθοδοι στις Κατασκευές, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 2004.
8. Δημητρίου Β., Η Μέθοδος Coops στην Κατασκευή Πλεγμάτων, Μεταπτυχιακή Εργασία, ΔΠΜΣ «Συστήματα Αυτοματισμού» (επιβλέπων καθ. Α. Κανάραχος), Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2000.
9. Δημητρίου Β., Προσαρμοστικά Πεπερασμένα Στοιχεία και Συναφή Πλέγματα, Διδακτορική Διατριβή (επιβλέπων καθ. Α. Κανάραχος), Ε.Μ.Π., Αθήνα, Αύγουστος 2004.
10. Μιλτιάδους Α., Μέθοδοι Σφυρηλάτησης οδοντωτών τροχών, Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα 2012
11. Ζηρδέλης Α., Προσομοίωση Σφυρηλάτησης Ακριβείας Οδοντωτών Τροχών Ευθείας Οδόντωσης, Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα 2012
12. Τζιρίτης Μ., Μελέτη Αντοχής Σύνθετης Μήτρας Σφυρηλάτησης Οδοντωτών Τροχών Ευθείας Οδόντωσης, Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα 2013

ΠΓ.2 ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

13. ASM HandBook - Vol 14 - Forming and Forging
14. ASM Handbook - Vol 18 - Friction, Lubrication, and Wear Technology
15. M. H. Sadeghi, Gear Forging: Mathematical Modeling and Experimental Validation, Journal of Manufacturing Science and Engineering -- November 2003 -- Volume 125, Issue 4, pp. 753-762.
16. Volker Szentmihali, Kurt Lange, Yves Tronel, Jean-Loup Chenot and Richard Ducloux, 3-D finite-element simulation of the cold forging of helical gear, Journal of Materials Processing Technology, Volume 43, Issues 2-4, June 1994, Pages 279-291.
17. R. Hill, A general method of analysis for metal-working process, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Volume 11, Issue 5, September 1963, Pages 305-326.
18. V. M. Drecun and T. A. Dean, A parametric CAD program for die sets for precision forging spur gears, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 31, Issue 2, 1991, Pages 183-191.
19. Y. C. Chang, Z. M. Hu, B. S. Kang and T. A. Dean, A study of cold ironing as a post-process for net-shape manufacture, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 42, Issue 8, June 2002, Pages 945-952.
20. J. C. Choi, Y. Choi, K. D. Hur and C. H. Kim, A study on the forging of spur gears, International Journal of Mechanical Sciences, Volume 38, Issue 12, December 1996, Pages 1333-1347.
21. J. H. Yoon and D. Y. Yang, A three-dimensional rigid-plastic finite element analysis of bevel gear forging by using a remeshing technique, International Journal of Mechanical Sciences, Volume 32, Issue 4, 1990, Pages 277-291.
22. Mark Robinson Howard A. Kuhn, A workability analysis of the cold forging of gears with integral teeth, Journal of Mechanical Working Technology, Volume 1, Issue 3, February 1978, Pages 215-230.
23. A.G. Mamalis, Advanced manufacturing engineering, Journal of Materials Processing Technology, Volume 161, Issues 1-2, 10 April 2005, Pages 1-9.
24. Steffen Reinsch, Bernd Müssig, Bernd Schmidt and Kirsten Tracht, Advanced manufacturing system for forging products, Journal of Materials Processing Technology, Volume 138, Issues 1-3, 20 July 2003, Pages 16-21.
25. E. Oñate, J. Rojek, M. Chiumenti, S.R. Idelsohn, F. Del Pin and R. Aubry, Advances in stabilized finite element and particle methods for bulk forming processes, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, In Press, Corrected Proof, Available online 25 January 2006.

26. J. Cai, T. A. Dean and Z. M. Hu, Alternative die designs in net-shape forging of gears, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 150, Issues 1-2, 1 July 2004, Pages 48-55.
27. N. A. Abdul and T. A. Dean, An analysis of the forging of spur gear forms, *International Journal of Machine Tool Design and Research*, Volume 26, Issue 2, 1986, Pages 113-123.
28. Y. C. Leung, L. C. Chan, C. Y. Tang and T. C. Lee, An effective process of strain measurement for severe and localized plastic deformation, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 44, Issues 7-8, June 2004, Pages 669-676.
29. M. S. Konstantinov and N. V. Djamdjiev, An integrated bevel gears manufacturing system, *Mechanism and Machine Theory*, Volume 14, Issue 1, 1979, Pages 11-23.
30. Markus Knoerr, Joon Lee and Taylan Altan, Application of the 2D finite element method to simulation of various forming processes, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 33, Issues 1-2, August 1992, Pages 31-55.
31. E. Doege and R. Bohnsack, Closed die technologies for hot forging, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 98, Issue 2, 29 January 2000, Pages 165-170.
32. I. Moriguchi, Cold forging of gears and other complex shapes, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 35, Issues 3-4, October 1992, Pages 439-450.
33. M. L. Alves, J. M. C. Rodrigues and P. A. F. Martins, Cold forging of gears: experimental and theoretical investigation, *Finite Elements in Analysis and Design*, Volume 37, Issues 6-7, June 2001, Pages 549-558.
34. G. Zhao, E. Wright and R. V. Grandhi, Computer aided preform design in forging using the inverse die contact tracking method, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 36, Issue 7, July 1996, Pages 755-769.
35. N.R. Chitkara and M.A. Bhutta, Computer simulation to predict stresses, working pressures and deformation modes in incremental forging of spur gear forms, *International Journal of Mechanical Sciences*, Volume 38, Issues 8-9, August-September 1996, Pages 871-889.
36. S.R. Kalidindi, C.A. Bronkhorst and L. Anand, Crystallographic texture evolution in bulk deformation processing of FCC metals, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Volume 40, Issue 3, 1992, Pages 537-569.
37. J.M.A. César de Sá, P.M.A. Areias and Cai Zhen, Damage modelling in metal forming problems using an implicit non-local gradient model, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, In Press, Corrected Proof, Available online 28 February 2006.

38. S. Mukherjee and Q. Zhang, Design sensitivities in problems involving material and geometric nonlinearities, *International Journal of Solids and Structures*, Volume 31, Issues 12-13, June-July 1994, Pages 1793-1827.
39. Yohng J. Kim and Naunit R. Chitkara, Determination of preform shape to improve dimensional accuracy of the forged crown gear form in a closed-die forging process, *International Journal of Mechanical Sciences*, Volume 43, Issue 3, December 2001, Pages 853-870.
40. D.H. Kim, B.M. Kim and C.G. Kang, Die life considering the deviation of the preheating billet temperature in hot forging process, *Finite Elements in Analysis and Design*, Volume 41, Issue 13, July 2005, Pages 1255-1269.
41. Manabu Gotoh and Yuji Shibata, Elastic-plastic FEM analysis of the heading process and the die-forging process of a gear blank, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 27, Issues 1-3, August 1991, Pages 193-211.
42. Ângelo Caporalli, Luciano Antonio Gileno and Sérgio Tonini Button, Expert system for hot forging design, *Journal of Materials Processing Technology*, Volumes 80-81, 1 August 1998, Pages 131-135.
43. Nitin V. Hattangady, Faster analysis of forming problems through use of coarse mesh models for dies, *Finite Elements in Analysis and Design*, Volume 32, Issue 1, 15 March 1999, Pages 21-35.
44. M. S. Joun, S. W. Lee and J. H. Chung, Finite element analysis of a multi-stage axisymmetric forging process having a spring-attached die for controlling metal flow lines, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 38, Issue 7, July 1998, Pages 843-854.
45. M. S. Joun, M. C. Lee and J. M. Park, Finite element analysis of prestressed die set in cold forging, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 42, Issue 11, September 2002, Pages 1213-1222.
46. J. M. C. Rodrigues and P. A. F. Martins, Finite element modelling of the initial stages of a hot forging cycle, *Finite Elements in Analysis and Design*, Volume 38, Issue 3, January 2002, Pages 295-305.
47. N. R. Chitkara and M. A. Bhutta, Forging and heading of hollow spur gear forms: an analysis and some experiments, *International Journal of Mechanical Sciences*, Volume 41, Issue 10, October 1999, Pages 1159-1189.
48. Jongung Choi, Hae-Young Cho and Chang-Yong Jo, Forging of spur gears with internal serrations and design of the dies, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 104, Issues 1-2, 18 August 2000, Pages 1-7.
49. J. H. Liou and D. Y. Jang, Forging parameter optimization considering stress distributions in products through FEM analysis and robust design methodology, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 37, Issue 6, June 1997, Pages 775-782.

50. Richard Douglas and David Kuhlmann, Guidelines for precision hot forging with applications , *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 98, Issue 2, 29 January 2000, Pages 182-188.
51. Eckart Doege, Jürgen Thalemann and Frank Weber, Hot forging of precision parts, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 35, Issues 3-4, October 1992, Pages 469-481.
52. Jens Groenbaek and Torben Birker, Innovations in cold forging die design, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 98, Issue 2, 29 January 2000, Pages 155-161.
53. John N. Majerus, Methodology for quantitative error-assessment of finite element models, *Finite Elements in Analysis and Design*, Volume 21, Issue 3, January 1996, Pages 213-223.
54. Zhenyan Gao and Ramana V. Grandhi, Microstructure optimization in design of forging processes , *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 40, Issue 5, April 2000, Pages 691-711.
55. B. I. Tomov and V. I. Gagov, Modelling and description of the near-net-shape forging of cylindrical spur gears, *Journal of Materials Processing Technology*, Volumes 92-93, 30 August 1999, Pages 444-449.
56. S. Serajzadeh, S. M. H. Mirbagheri, A. Karimi Taheri and S. M. Zebarjad, Modelling of metal flow during hot forging with regard to microstructural aspects, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 44, Issue 14, November 2004, Pages 1537-1545.
57. Naunit R. Chitkara and Yohng J. Kim, Near-net shape forging of a crown gear: some experimental results and an analysis, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 41, Issue 3, February 2001, Pages 325-346.
58. N.R. Chitkara and M.A. Bhutta, Near-net shape forging of spur gear forms: An analysis and some experiments, *International Journal of Mechanical Sciences*, Volume 38, Issues 8-9, August-September 1996, Pages 891-916.
59. W. Bochniak, A. Korbil, R. Szyndler, R. Hanarz, F. Stalony-Dobrzański, L. Błaż and P. Snarski, New forging method of bevel gears from structural steel , *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 173, Issue 1, 30 March 2006, Pages 75-83.
60. New starting points for the prediction of tool wear in hot forging, R. Turk, I. Peru and M. Terelj, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 44, Issues 12-13, October 2004, Pages 1319-1331.
61. Gyung-Ju Kang, Woo-Jin Song, Jeong Kim, Beom-Soo Kang and Hoon-Jae Park, Numerical approach to forging process of a gear with inner cam profile using FEM, *Journal of Materials Processing Technology*, Volumes 164-165, 15 May 2005, Pages 1212-1217.

62. K. Kondo and K. Ohga, Precision cold die forging of a ring gear by divided flow method, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 35, Issue 8, August 1995, Pages 1105-1113.
63. H.Ferguson. (Metal Powder Products Co, USA.), Precision cold forging of a PM preform to make a high density spur gear, *Metal Powder Report*, Volume 55, Issue 11, November 2000, Page 48.
64. J. C. Choi and Y. Choi, Precision forging of spur gears with inside relief, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 39, Issue 10, October 1999, Pages 1575-1588.
65. M. H. Sadeghi and T. A. Dean, Precision forging straight and helical spur gears, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 45, Issues 1-4, September 1994, Pages 25-30
66. Y. K. Lee, S. R. Lee, C. H. Lee and D. Y. Yang, Process modification of bevel gear forging using three-dimensional finite element analysis, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 113, Issues 1-3, 15 June 2001, Pages 59-63.
67. Guoqun Zhao, Ed Wright and Ramana V. Grandhi, Sensitivity analysis based preform die shape design for net-shape forging, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 37, Issue 9, September 1997, Pages 1251-1271.
68. P. B. Hussain, J. S. Cheon, D. Y. Kwak, S. Y. Kim and Y. T. Im, Simulation of clutch-hub forging process using CAMPform, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 123, Issue 1, 10 April 2002, Pages 120-132.
69. A. G. Mamalis, D. E. Manolakos and A. K. Baldoukas, Simulation of the precision forging of bevel gears using implicit and explicit FE techniques , *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 57, Issues 1-2, 1 February 1996, Pages 164-171.
70. D. H. Hristov B. I. Tomov and D. K. Kolev, Stresses and strains in a die for closed-die forging of cylindrical spur gears, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 23, Issue 1, October 1990, Pages 55-63.
71. M. H. Sadeghi T. A. Dean, The ejection of precision-forged straight and helical spur-gear forms, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 31, Issues 1-2, May 1992, Pages 147-160.
72. J.C. Choi, Y. Choi and S.J. Tak, The forging of helical gears (I): Experiments and upper-bound analysis, *International Journal of Mechanical Sciences*, Volume 40, Issue 4, April 1998, Pages 325-337.
73. J. C. Choi, Y. Choi and S. J. Tak, The forging of helical gears (II): comparisons of the forging processes, *International Journal of Mechanical Sciences*, Volume 41, Issue 6, June 1999, Pages 725-739.
74. T. A. Dean, The net-shape forming of gears , *Materials & Design*, Volume 21, Issue 4, 1 August 2000, Pages 271-278.

75. A. R. O. Abdel-Rahman and T. A. Dean, The quality of hot forged spur gear forms. Part I: Mechanical and metallurgical properties, *International Journal of Machine Tool Design and Research*, Volume 21, Issue 2, 1981, Pages 109-127.
76. A. R. O. Abdel-Rahman and T. A. Dean, The quality of hot forged spur gear forms. Part II: Tooth form accuracy, *International Journal of Machine Tool Design and Research*, Volume 21, Issue 2, 1981, Pages 129-141.
77. A. Forcellese and F. Gabrielli, Warm forging of aluminium alloys: a new approach for time compression of the forging sequence, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 40, Issue 9, July 2000, Pages 1285-1297.
78. W. He, Y. F. Zhang, K. S. Lee, L. Lu, S. S. Xie and Q. J. Jin, Microstructure and mechanical properties of an Al/SiCp composite cold die forged gear, *Materials & Design*, Volume 17, Issue 2, 1996, Pages 97-102.
79. Ramzy Boussetta, Thierry Coupez and Lionel Fourment, Adaptive remeshing based on a posteriori error estimation for forging simulation, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Volume 195, Issues 48-49, 1 October 2006, Pages 6626-6645.
80. F.Fereshteh-saniee, I.Pillinger, P.Hartley, Friction modelling for the physical simulation of the bulk metal forming processes, *Journal of Materials Processing Technology* 153-154 (2004) 151-156.
81. A.Erman Tekkaya, A Guide for Validation of FE-Simulation in Bulk Metal Forming, *The Arabian Journal of Science and Engineering*, Volume 30, Number IC.
82. Murat Arbak, A. Erman Tekkaya, Feridum Ozhan, Comparison of Various Performs for hot forging of bearing rings *Journal of Materials Processing Technology* 169 (2005) 72-82.
83. P.Hartley, C.E.N.Sturgess, T.A.Dean and G.W.Rowe, Forging Die Design and Flow Simulation: Their Integration in Intelligent Knowledge-Based Systems, *Journal of Mechanical Working Technology*, 15 (1987) 1-13.
84. C.A. Santos, M.T.P. Aguilar, H.B. Campos, A.E.M. Pertence and P.R. Cetlin, Failure analysis of the die in the third hot forging stage of a gear blank, *Engineering Failure Analysis*, Volume 13, Issue 6, September 2006, Pages 886-897.
85. M. Skunca, P. Skakun, Z. Keran, L. Sidjanin and M.D. Math, Relations between numerical simulation and experiment in closed die forging of a gear, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 177, Issues 1-3, 3 July 2006, Pages 256-260.
86. B.A. Behrens, E. Doege, S. Reinsch, K. Telkamp, H. Daehndel and A. Specke, Precision forging processes for high-duty automotive components, *Journal of Materials Processing Technology*, In Press, Corrected Proof, Available online 19 June 2006.

ΠΓ.3 ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΕΣ

-
87. <http://www.matweb.com>
 88. <http://www.sciencedirect.com>
 89. <http://en.wikipedia.org/wiki/Forging>
 90. <https://www.google.com/>
 91. <http://www.castings-forgings-news.com/forgings/>