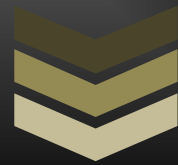
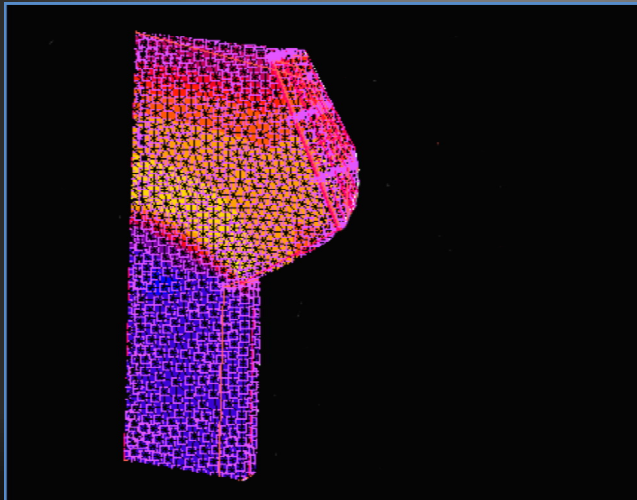




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΣΠΑΝΤΙΔΑΚΗΣ ΙΩΣΗΦ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:
ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ
ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

**ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ
ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ
ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΚΩΝΙΚΩΝ
ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ**

ΑΘΗΝΑ , ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2014

Στην Μητέρα μου.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια της απόκτησης του διπλώματος του μηχανολόγου μηχανικού στο εθνικό μετσόβιο πολυτεχνείο. Εκφράζει την προσωπική προσπάθεια αλλά και τη βοήθεια των επιβλεπόντων καθηγητών και υποψηφίων διδασκόντων κατά τη διάρκεια εκτέλεσης και συγγραφής της. Αποτελεί μία προσωπική μελέτη και δεν εκφράζει τις επίσημες θέσεις του ιδρύματος κατ' ανάγκη. Θέλω στο σημείο αυτό να ευχαριστήσω τον κ. Δημήτριο Μανωλάκο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε κατά την ανάθεση στο πρόσωπό μου της μελέτης του θέματος αυτού της διπλωματικής εργασίας. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Εμμανουήλ Γκιθώνα, υποψήφιο διδάκτορα του τομέα, για τις συμβουλές, την καθοδήγηση και την πολύτιμη συνεργασία που είχαμε κατά τη διάρκεια ολοκλήρωσης της διπλωματικής αυτής εργασίας.

Αθήνα, Απρίλιος 2014

Σπαντιδάκης Ιωσήφ, Μηχανολόγος Μηχανικός Ε.Μ.Π.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εργασία αυτή έχει σαν σκοπό την προσομοίωση της σφυρηλάτησης ακριβείας που χρησιμοποιείται για την κατασκευή κωνικών οδοντωτών τροχών, με τη βοήθεια εξειδικευμένων λογισμικών από ηλεκτρονικό υπολογιστή. Πιο συγκεκριμένα θα γίνει χρήση του προγράμματος MSC MARC. Το πρόγραμμα αυτό είναι παρόμοιο με το ANSYS, το οποίο είναι ευρέως διαδεδομένο και έχει πάρα πολλές εφαρμογές σε πολλούς τομείς της σύγχρονης τεχνολογίας. Ενδεικτικά μεγάλες ομάδες της φόρμουλα 1 σήμερα, χρησιμοποιούν τέτοια λογισμικά για την προσομοίωση των δοκιμών τους. Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα μας απασχολήσει η προσομοίωση με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Στο MARC υπάρχουν πολλές δυνατότητες, όπως η αναγέννηση πλέγματος, βασικό πλεονέκτημα στην παρούσα μελέτη της διπλωματικής εργασίας.

Στο πρώτο κεφάλαιο, γίνεται μια αναφορά στις κατεργασίες των υλικών. Πιο συγκεκριμένα, αρχικά γίνεται μία ιστορική αναδρομή από παλαιότερων μέχρι και τελευταίων χρόνων της ιστορίας των διαφόρων μεθόδων. Αναφέρονται και κάποια ιστορικά πρόσωπα που συνέβαλλαν επίσης. Ακόμη, γίνεται αναφορά στα εργαλεία και τα υλικά των κατεργασιών καθώς και στην σύγχρονη εξέλιξή τους. Παρατίθενται διαγράμματα, σχήματα και εικόνες που απεικονίζουν όλα όσα αναφέραμε. Επίσης, σε αυτό το κεφάλαιο, γίνεται και μία πιο συγκεκριμένη αλλά εν μέρει διεισδυτική περιγραφή τεχνικών στοιχείων καθώς και επιστημονικού θεωρητικού υποβάθρου για τα είδη των κατεργασιών, όπως η έλαση, η διέλαση, η σφυρηλάτηση καθώς και μερικές κατεργασίες αποβολής υλικού. Το κεφάλαιο αυτό είναι στην ουσία γενική εικόνα για τις κατεργασίες ενώ στη συνέχεια θα γίνουμε πιο συγκεκριμένοι.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, γίνεται παράθεση των μεθόδων και των ειδών σφυρηλάτησης που χρησιμοποιούνται στις μέρες μας, καθώς και των μηχανών και εργαλείων που υπάρχουν. Ακόμη υπάρχουν στο κεφάλαιο αυτό διάφορα τεχνικά και πειραματικά αποδεδειγμένα στοιχεία που επιδρούν στην πορεία της σφυρηλάτησης. Για παράδειγμα η θερμοκρασία παίζει σημαντικό ρόλο.

Στο τρίτο κεφάλαιο, αναλύονται οι οδοντωτοί τροχοί γενικά καθώς και με μεγαλύτερη εμβάθυνση. Αναφέρονται στοιχεία θεωρητικά και όχι μόνο, απαραίτητα όμως για την κατανόηση της λειτουργίας των οδοντωτών τροχών, καθώς και διάφορα άλλα βασικά στοιχεία. Το module, το z(αριθμός δοντιών) η διάμετρος αρχικού κύκλου, είναι μεγέθη πολύ σημαντικά για τα στοιχεία μηχανών αλλά και για τον μηχανολόγο μηχανικό γενικότερα. Οπότε θα γίνει μια αναλυτική παρουσίαση αυτών.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, περιγράφονται και αναλύονται τα διάφορα είδη οδοντωτών τροχών και μέθοδοι και τεχνικές παραγωγής τους με την σφυρηλάτηση ακριβείας. Αναφέρονται τα χαρακτηριστικά κάθε μεθόδου και τα αποτελέσματά τους ως προς την ακρίβεια παραγωγής του επιθυμητού αποτελέσματος(τελική μορφή δοκιμίου).

Στο πέμπτο κεφάλαιο, περιγράφεται και αναλύεται η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων. Πιο συγκεκριμένα, περιγράφονται οι γενικές αρχές της μεθόδου, όπως επίσης καταγράφονται κάποια στοιχεία για τις μεθόδους και τα πρόσωπα, τα οποία τα τελευταία χρόνια τις ανέδειξαν. Θα αναφέρουμε επίσης κάποιες τεχνικές για την δημιουργία πλέγματος, όπως και τους τύπους της πειραματικής ανάλυσης που μπορούν να γίνουν με τα πεπερασμένα στοιχεία.

Στο έκτο κεφάλαιο, γίνεται η περιγραφή του σχεδιαστικού πακέτου Solidworks το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή της γεωμετρίας. Επίσης περιγράφεται η κατασκευή της γεωμετρίας του οδοντωτού τροχού και των καλουπιών σφυρηλάτησης καθώς και παρουσιάζονται κάποια πιο αναλυτικά στοιχεία πάνω σε αυτό το θέμα.

Στο έβδομο κεφάλαιο, εισερχόμαστε στην ουσία της εργασίας καθώς γίνεται η προσομοίωση της σφυρηλάτησης μέσω του πακέτου MSC MARC. Εξάγονται οι δοκιμές από το MSC MARC, με σαφήνεια, ώστε ο αναγνώστης να βγάζει εύκολα και γρήγορα συμπεράσματα.

Στο όγδοο κεφάλαιο, έχουμε μία αναλυτική συγκέντρωση των αποτελεσμάτων των δοκιμών. Γίνεται ταξινόμηση αυτών, καθώς και σχολιασμός επί αυτών. Συνεπώς έχουμε την τελική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων και την διεξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων.

Αναφέρουμε τέλος ότι στα παραρτήματα δίνονται όλα τα στοιχεία που αφορούν τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν, τα είδη των πεπερασμένων στοιχείων των δοκιμών-προσομοιώσεων καθώς και άλλα τεχνικά στοιχεία. Ακόμη γίνεται αναφορά στον υπολογιστή όπου έγιναν οι δοκιμές. Τέλος αναφέρεται αναλυτικά η βιβλιογραφία.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	2
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	3
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ.....	5
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	16
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΔΙΑΧΡΟΝΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ.....	17
1.1 ΕΞΕΛΙΞΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ ΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ ΔΙΑΧΡΟΝΙΚΑ.....	17
1.2 ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕΤΑΛΛΟΤΕΧΝΙΑΣ ΚΑΙ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ.....	18
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗ.....	22
2.1 Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΗΣ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ-ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	22
2.2 ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ.....	24
2.2.1 ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗ ΑΝΟΙΧΤΗΣ ΜΗΤΡΑΣ (OPEN-DIE FORGING).....	25
2.2.2 ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗ ΚΛΕΙΣΤΗΣ ΜΗΤΡΑΣ(CLOSED-DIE FORING).....	29
2.2.3 ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗ ΚΛΕΙΣΤΗΣ ΜΗΤΡΑΣ ΜΕ ΠΡΟΕΞΟΧΗ.....	31
2.3 ΚΑΛΟΥΠΙΑ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ.....	32
2.4 ΜΗΧΑΝΕΣ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ.....	33

2.4.1 ΣΦΥΡΕΣ.....	33
2.4.2 ΠΡΕΣΕΣ.....	35
2.5 ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΠΑΝΩ ΣΤΟ ΣΧΕΔΙΑΜΟ ΚΑΛΟΥΠΙΩΝ ΚΑΙ ΤΕΜΑΧΙΩΝ.	36
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΟΔΟΝΤΩΤΟΙ ΤΡΟΧΟΙ.....	39
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΥΣ ΟΔΟΝΤΩΤΟΥΣ ΤΡΟΧΟΥΣ.....	39
3.2 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ.....	40
3.2.1 ΜΕΤΩΠΙΚΟΙ ΟΔΟΝΤΩΤΟΙ ΤΡΟΧΟΙ.....	42
3.2.2 ΚΩΝΙΚΟΙ ΟΔΟΝΤΩΤΟΙ ΤΡΟΧΟΙ.....	44
3.2.3 ΕΛΙΚΟΕΙΔΕΙΣ ΟΔΟΝΤΩΤΟΙ ΤΡΟΧΟΙ ΑΣΥΜΒΑΤΩΝ ΑΞΟΝΩΝ.....	45
3.2.4 ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΤΕΡΜΟΝΑ ΚΟΧΛΙΑ-ΚΟΡΩΝΑΣ.....	47
3.3 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΚΑΙ ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ.....	48
3.3.1 ΜΕΤΡΟ ΟΔΟΝΤΩΣΕΩΣ(MODULE).....	48
3.3.2 ΕΞΕΙΛΙΓΜΕΝΗ ΚΑΜΠΥΛΗ ΚΑΙ ΒΑΘΜΟΣ ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΩΣ ΜΕΤΩΠΙΚΩΝ ΤΡΟΧΩΝ.....	49
3.4 ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΣΤΟΥΣ ΟΔΟΝΤΩΤΟΥΣ ΤΡΟΧΟΥΣ.....	53
3.5 ΜΕΙΩΤΗΡΕΣ ΣΤΡΟΦΩΝ.....	54
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ.....	56
4.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	56
4.2 ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗ ΜΕΤΩΠΙΚΩΝ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ.....	57

4.3 ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗ ΚΩΝΙΚΩΝ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ.....	58
4.4 ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ.....	60
4.5 ΘΕΩΡΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΤΗΣ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ.....	63
4.5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	63
4.5.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΛΟΦΟΥ ΤΡΙΒΗΣ.....	63
4.5.3 ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΝΩ ΟΡΙΑΚΩΝ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ.....	65
4.5.4 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	65
4.6 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	66
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	67
5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	67
5.2 ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΕ ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ.....	69
5.3 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΒΟΗΘΕΙΑ ΛΟΓΙΣΜΙΚΩΝ.....	74
5.4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	77
5.4.1 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ.....	78
5.4.2 ΓΕΝΕΣΗ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ.....	82
5.4.3 ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ.....	90
5.5 ΣΥΝΟΨΗ-ΕΙΔΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	90
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ ΣΦΥΡΗ-ΛΑΤΗΣΗΣ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΚΩΝΙΚΩΝ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ.....	93

6.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ-ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΟΔΟΝΤΩΤΟΥ ΤΡΟΧΟΥ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ.....	93
6.2	ΣΧΕΔΙΑΣΤΙΚΟ ΠΑΚΕΤΟ SOLIDWORKS.....	94
6.3	ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΤΟ ΠΑΚΕΤΟ SOLIDWORKS.....	96
6.4	ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΜΗΤΡΑΣ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ.....	99
6.4.1	ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ.....	99
6.4.2	ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΣΥΝΟΛΟΥ ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ.....	102
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 : ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ ΚΩΝΙΚΟΥ		
ΟΔΟΝΤΩΤΟΥ ΤΡΟΧΟΥ.....		
		107
7.1	ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ MSC MARC.....	107
7.2	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ ΣΤΟ MARC.....	110
7.2.1	ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΒΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΡΥΘΜΙΣΕΩΝ ΣΤΟ MARC.....	110
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 : ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....		
		149
8.1	ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΗΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ..	149
8.2	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	154
8.2.1	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΠΑΝΩ ΣΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΟΥ MARC.....	154
8.2.2	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	155
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ.....		
		156
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1: ΥΛΙΚΑ.....		
		156
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2: ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....		
		163
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3: ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ(ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ) ΓΙΑ ΤΗΝ ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ ΤΟΥ ΘΕ-		
ΜΑΤΟΣ.....		
		171

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Σχήμα 1.1: Μεταλλάκτης Bessemer για την παραγωγή χάλυβα.....18

Σχήμα 1.2: Διέλαση με χρήση κωνικής μήτρας.....19

Σχήμα 1.3: Αναπαράσταση σφυρηλάτησης κλειστής μήτρας.....20

Σχήμα 1.4: Απεικόνιση συγκόλλησης με επενδεδυμένο ηλεκτρόδιο(SMAW, Shielded metal-arc Welding).....21

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Σχήμα 2.1: Έμβολα(πιστόνια) τα οποία έχουν παραχθεί με σφυρηλάτηση.....22

Σχήμα 2.2: Σύγχρονα εξαρτήματα της κατεργασίας της σφυρηλάτησης(κωνικοί και μή οδοντωτοί Τροχοί).....23

Σχήμα 2.3: Νομογραφήματα υπολογισμού της μέσης πυκνότητας φορτίου p_{av} στη σφυρηλάτηση.....24

Σχήμα 2.4: Σχηματική περιγραφή της σφυρηλάτησης ανοικτής μήτρας.....26

Σχήμα 2.5: Σφυρηλάτηση ανοικτής μήτρας κατά την δημιουργία ενός άξονα.....26

Σχήμα 2.6: Απεικόνιση της ροής του υλικού κατά τη σφυρηλάτηση ανοικτής μήτρας.....27

Σχήμα 2.7: Σφυρηλάτηση ανοικτής μήτρας χωρίς τριβή (1) Αρχική θέση (2) Ενδιάμεση συμπίεση (3) Τελική συμπίεση.....28

Σχήμα 2.8: Σφυρηλάτηση ανοικτής μήτρας με την παρουσία τριβής. (1) Αρχική θέση, (2) Ενδιάμεση συμπίεση, (3) Τελική συμπίεση.....28

Σχήμα 2.9 : Διαδικασία σφυρηλάτησης κλειστής μήτρας.....29

Σχήμα 2.10 : Απεικόνιση του συνόλου της μηχανής σφυρηλάτησης κλειστής μήτρας για παραγωγή ενός εργαλείου.....	30
Σχήμα 2.11 : Σφυρηλάτηση ακριβείας (i) Απλής μορφής, (ii) Τυπικής μορφής, (iii) Near net shape.....	31
Σχήμα 2.12 : Απεικόνιση σφυρηλάτησης κλειστής μήτρας με προεξοχή.(1) Απαραμόρφωτη θέση, (2) Θέση ενδιάμεσης παραμόρφωσης, (3) Τελική θέση σχηματισμού.....	32
Σχήμα 2.13 : Εγκάρσια τομή καλουπιών σφυρηλάτησης.....	33
Σχήμα 2.14 : Σφύρες πίπτουσας μάζας.....	34
Σχήμα 2.15 : Σφύρα πίπτουσας μάζας με πνευματικό σύστημα πεπιεσμένου αέρα.....	35
Σχήμα 2.16 : Υδραυλική πρέσα για κατεργασία ψυχρής σφυρηλάτησης.....	36

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Σχήμα 3.1 : Τοξωτοί κωνικοί οδοντωτοί τροχοί σε συνεργασία.....	40
Σχήμα 3.2 : Ζεύγος μετωπικών οδοντωτών τροχών με ευθεία οδόντωση.....	41
Σχήμα 3.3 : Ζεύγος κωνικών οδοντωτών τροχών.....	41
Σχήμα 3.4 : Σύστημα ατέρμονα κοχλία- κορώνας.....	42
Σχήμα 3.5 : Μετωπικοί οδοντωτοί τροχοί με ευθεία οδόντωση.....	43
Σχήμα 3.6 : Μετωπικοί οδοντωτοί τροχοί με ελικοειδή οδόντωση.....	43
Σχήμα 3.7 : Απεικόνιση ζεύγους κωνικών οδοντωτών τροχών ευθείας οδόντωσης σε Autodesk Inventor 2010.....	45
Σχήμα 3.8 : Υποειδής κωνικός οδοντωτός τροχός.....	45
Σχήμα 3.9 : Παρουσίαση βαθμίδα ελικοειδών τροχών ασυμβάτων αξόνων.....	47
Σχήμα 3.10 : Σύστημα ατέρμονα κοχλία-κορώνας.....	47
Σχήμα 3.11 : Αναπαράσταση συνεργαζόμενων κατατομών.....	52
Σχήμα 3.12 : Εξειλιγμένη καμπύλη.....	52
Σχήμα 3.13 : Δυνάμεις στους μετωπικούς οδοντωτούς τροχούς ευθείας οδόντωσης.....	53
Σχήμα 3.14 : Μειωτήρας στροφών οχήματος.....	55

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Σχήμα 4.1 : Προϊόντα σφυρηλάτησης ακριβείας.....	57
Σχήμα 4.2 : Μηχανή σφυρηλάτησης οδοντωτού τροχού με ελικοειδή οδόντωση.....	58
Σχήμα 4.3 : Μηχανή σφυρηλάτησης κωνικών οδοντωτών τροχών.....	59
Σχήμα 4.4 : Κωνικοί οδοντωτοί τροχοί διαφόρων γεωμετρικών χαρακτηριστικών.....	60
Σχήμα 4.5 : Σφυρήλατος οδοντωτός τροχός ακριβείας.....	61
Σχήμα 4.6 : Μηχανή φινιρίσματος Ιαπωνικής προελεύσεως.....	62
Σχήμα 4.7 : Σφυρηλάτηση κυλινδρικής μπιγέτας.....	64
Σχήμα 4.8 : Ισορροπία στοιχειώδους λωρίδας, πρόοψη.....	64
Σχήμα 4.9 : Ισορροπία στοιχειώδους λωρίδας, κάτοψη.....	64
Σχήμα 4.10 : Γραφική παράσταση λόφου-τριβής.....	65

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Σχήμα 5.1 : Μονοδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία.....	68
Σχήμα 5.2 : Τριγωνικά πεπερασμένα στοιχεία LST και QST.....	68
Σχήμα 5.3 : Κόμβοι κατά τον άξονα των x	69
Σχήμα 5.4 : Συναρτήσεις $\varphi_j(x)$	70
Σχήμα 5.5 : Τοπικό σύστημα συντεταγμένων.....	72
Σχήμα 5.6 : Συναρτήσεις του τυχαίου στοιχείου.....	72
Σχήμα 5.7 : Σύγχρονο σύστημα CAD(Computer-Aided Design).....	75
Σχήμα 5.8 : Σύγχρονο σύστημα CAE.....	77
Σχήμα 5.9 : Μονοδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία.....	80
Σχήμα 5.10 : Δισδιάστατο πεπερασμένο στοιχείο (τύπου CST).....	81
Σχήμα 5.11 : Πεπερασμένα στοιχεία τύπου Lagrange.....	81
Σχήμα 5.12 : Πεπερασμένα στοιχεία άξονο-συμμετρικού τύπου.....	81
Σχήμα 5.13 : Πεπερασμένα στοιχεία τρισδιάστατων προβλημάτων.....	82

Σχήμα 5.14 : Μέθοδος σύνδεσης κόμβων.....	83
Σχήμα 5.15 : Μέθοδος γένεσης κόμβων του Cavendish.....	84
Σχήμα 5.16 : Μέθοδος αποσύζευξης τοπολογίας.....	85
Σχήμα 5.17 : Τελεστές διαμόρφωσης τριγώνων.....	86
Σχήμα 5.18 : Μέθοδοι για την εκλέπτυνση τριγώνων.....	86
Σχήμα 5.19 : Υποδιαίρεση κυρτού τμήματος.....	87
Σχήμα 5.20 : Γένεση πλέγματος μέσω επαναληπτικής μεθόδου.....	88
Σχήμα 5.21 : Ορθογωνικό grid μεθόδου βάσει πλέγματος.....	88
Σχήμα 5.22 : Διαχωρισμός του τετραέδρου και του τριγώνου.....	90

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Σχήμα 6.1 : Οδοντωτός τροχός της προσομοίωσης.....	93
Σχήμα 6.2 : Οδοντωτός τροχός της προσομοίωσης σε κάτοψη.....	94
Σχήμα 6.3 : Απεικόνιση πολύπλοκης κατασκευής μέσω συναρμογής στο solidworks.....	95
Σχήμα 6.4 : Δυνατότητα προσομοίωσης ροής στο solidworks.....	95
Σχήμα 6.5 : Κατασκευή δοκιμίου στο solidworks.....	96
Σχήμα 6.6 : Κατασκευή κυλινδρικού δοκιμίου(προδιαμορφώματος).....	97
Σχήμα 6.7 : Κατασκευή οδοντωτού τροχού.....	97
Σχήμα 6.8 : Καλούπι σφυρηλάτησης μετά από το flow simulation.....	98
Σχήμα 6.9 : Συναρμογή καλουπιού και προδιαμορφώματος.....	99
Σχήμα 6.10 : Σχεδιασμός και τελική μορφή εξωλκέα.....	100
Σχήμα 6.11 : Σχεδιασμός και τελική μορφή εμβόλου.....	101
Σχήμα 6.12 : Σχεδιασμός άνω και κάτω εσωτερικών τμημάτων της μήτρας.....	102
Σχήμα 6.13 : Τελικό συναρμολόγημα καλουπιού με τα επιμέρους στοιχεία του.....	103

Σχήμα 6.14 : Συναρμολόγημα καλουπιού.....	104
Σχήμα 6.15 : Άνω και κάτω εσωτερικά τμήματα καλουπιού σε τομή.....	105
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7</u>	
Σχήμα 7.1 : Βασική επιφάνεια εργασίας του Marc.....	109
Σχήμα 7.2 : Δημιουργία πλέγματος τετραεδρικών πεπερασμένων στοιχείων στο Marc..	109
Σχήμα 7.3 : Τελικό αποτέλεσμα προσομοίωσης σφυρηλάτησης μίας φλάντζας.....	110
Σχήμα 7.4 : Εισαγωγή αρχείου.....	111
Σχήμα 7.5 : Επιλογή κλάσης αναλύσεως.....	111
Σχήμα 7.6 : Αφαίρεση περιττών επιφανειών.....	112
Σχήμα 7.7 : Δημιουργία πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων.....	113
Σχήμα 7.8 : Ρυθμίσεις κατά την δημιουργία πεπερασμένων στοιχείων.....	114
Σχήμα 7.9 : Διαγραφή διπλών κόμβων.....	114
Σχήμα 7.10 : Επιλογή του μολύβδου ως υλικό από την βάση δεδομένων υλικών του MARC.....	115
Σχήμα 7.11 : Επιλογή προδιαμορφώματος ως παραμορφώσιμο σώμα.....	116
Σχήμα 7.12 : Επιλογή και ορισμός επιφάνειας συμμετρίας 1.....	116
Σχήμα 7.13 : Επιλογή και ορισμός επιφάνειας συμμετρίας 2.....	116
Σχήμα 7.14 : Ορισμός εμβόλου ως απαραμόρφωτο σώμα.....	117
Σχήμα 7.15 : Ορισμός επιφανειών μήτρας ως απαραμόρφωτο σώμα.....	117
Σχήμα 7.16 : Ρύθμιση της ταχύτητας του εμβόλου.....	118
Σχήμα 7.17 : Επιλογή τύπου πεπερασμένων στοιχείων.....	119
Σχήμα 7.18 : Ρύθμιση παραμέτρων επαναδημιουργίας πλέγματος.....	120
Σχήμα 7.19 : Επιλογή του προδιαμορφώματος για επαναδημιουργία πλέγματος.....	120

Σχήμα 7.20 : Πίνακας επαφών.....	121
Σχήμα 7.21 : Ρύθμιση επαφής μεταξύ προδιαμορφώματος και εμβόλου.....	121
Σχήμα 7.22 : Ρύθμιση επαφής μεταξύ προδιαμορφώματος και μήτρας.....	122
Σχήμα 7.23 : Ρύθμιση επαφής μεταξύ του προδιαμορφώματος και της πρώτης επιφάνειας συμμετρίας.....	122
Σχήμα 7.24 : Ρύθμιση επαφής μεταξύ του προδιαμορφώματος και της δεύτερης επιφάνειας συμμετρίας.....	122
Σχήμα 7.25 : Ρύθμιση της περίπτωσης φόρτισης.....	123
Σχήμα 7.26 : Ορισμός των ιδιοτήτων της περίπτωσης φόρτισης.....	124
Σχήμα 7.27 : Ορισμός πίνακα επαφών.....	124
Σχήμα 7.28 : Ρύθμιση της επαναδημιουργίας πλέγματος.....	125
Σχήμα 7.29 : Ρύθμιση του ελέγχου επίλυσης.....	125
Σχήμα 7.30 : Ρύθμιση των κριτηρίων σύγκλισης.....	126
Σχήμα 7.31 : Ρύθμιση των αριθμητικών επιλογών.....	126
Σχήμα 7.32 : Ρύθμιση της διεργασίας.....	127
Σχήμα 7.33 : Κεντρικό παράθυρο των επιλογών της διεργασίας.....	128
Σχήμα 7.34 : Επιλογή του μοντέλου τριβής.....	128
Σχήμα 7.35 : Ορισμός αρχικών συνθηκών επαφής.....	129
Σχήμα 7.36 : Καθορισμός συνθηκών κατασκευαστικής ανάλυσης.....	129
Σχήμα 7.37 : Καθορισμός των αποτελεσμάτων της διεργασίας.....	130
Σχήμα 7.38 : Καθορισμός των παραμέτρων της διεργασίας.....	130
Σχήμα 7.39 : Μήνυμα ολοκλήρωσης της διεργασίας.....	131
Σχήμα 7.40 : Ρύθμιση γραφικών αποτελεσμάτων της διεργασίας.....	132

Σχήμα 7.41 : Αρχική γεωμετρία πρίν την σφυρηλάτηση.....	133
Σχήμα 7.42 : Προσομοίωση κατά την επανάληψη 0.....	134
Σχήμα 7.43 : Προσομοίωση κατά την επανάληψη 1.....	135
Σχήμα 7.44 : Προσομοίωση κατά την επανάληψη 60.....	136
Σχήμα 7.45 : Προσομοίωση κατά την επανάληψη 120.....	137
Σχήμα 7.46 : Προσομοίωση κατά την επανάληψη 180.....	138
Σχήμα 7.47 : Προσομοίωση κατά την επανάληψη 250.....	139
Σχήμα 7.48 : Προσομοίωση κατά την επανάληψη 310.....	140
Σχήμα 7.49 : Αρχική γεωμετρία πρίν την σφυρηλάτηση.....	141
Σχήμα 7.50 : Προσομοίωση κατά την επανάληψη 0.....	142
Σχήμα 7.51 : Προσομοίωση κατά την επανάληψη 1.....	143
Σχήμα 7.52 : Προσομοίωση κατά την επανάληψη 25.....	144
Σχήμα 7.53 : Προσομοίωση κατά την επανάληψη 50.....	145
Σχήμα 7.54 : Προσομοίωση κατά την επανάληψη 75.....	146
Σχήμα 7.55 : Προσομοίωση κατά την επανάληψη 100.....	147
Σχήμα 7.56 : Προσομοίωση κατά την επανάληψη 122.....	148

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

Σχήμα 8.1 : Απεικόνιση συνόλου διαγραμμάτων δυνάμεων επιφανειών επαφής σε συνάρτηση με τον χρόνο(κυλινδρικό προδιαμόρφωμα).....	149
Σχήμα 8.2 : Απεικόνιση συνόλου διαγραμμάτων δυνάμεων επιφανειών επαφής σε συνάρτηση με τον χρόνο(μή κυλινδρικό προδιαμόρφωμα).....	150
Σχήμα 8.3 : Διάγραμμα δύναμης εμβόλου σε συνάρτηση με τον χρόνο για το κυλινδρικό προδιαμόρφωμα.....	151

Σχήμα 8.4 : Διάγραμμα δύναμης εμβόλου σε συνάρτηση με τον χρόνο για το μή κυλινδρικό.....	151
Σχήμα 8.5 : Διάγραμμα συνολικής δύναμης εμβόλου σε συνάρτηση με τον χρόνο για το κυλινδρικό προδιαμόρφωμα.....	152
Σχήμα 8.6 : Διάγραμμα συνολικής δύναμης εμβόλου σε συνάρτηση με τον χρόνο για το μή κυλινδρικό προδιαμόρφωμα.....	153
Σχήμα 8.7 : Απεικόνιση του τελικού σταδίου της κατεργασίας.....	155

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Πίνακας 3.1 : Τυποποίηση τιμών module σε χιλιοστόμετρα για οδόντες δι' εξειλιγμένης...48

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Πίνακας 4.1 : Μεγέθη οδοντωτών τροχών που παράγονται με σχεδόν καθαρό σχήμα.....63

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Πίνακας 5.1 : Κυριότερα είδη πεπερασμένων στοιχείων.....92

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Πίνακας 6.1 : Επιμέρους στοιχεία καλουπιού σφυρηλάτησης.....103

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

Πίνακας 8.1 : Χαρακτηριστικά της επίλυσης.....153

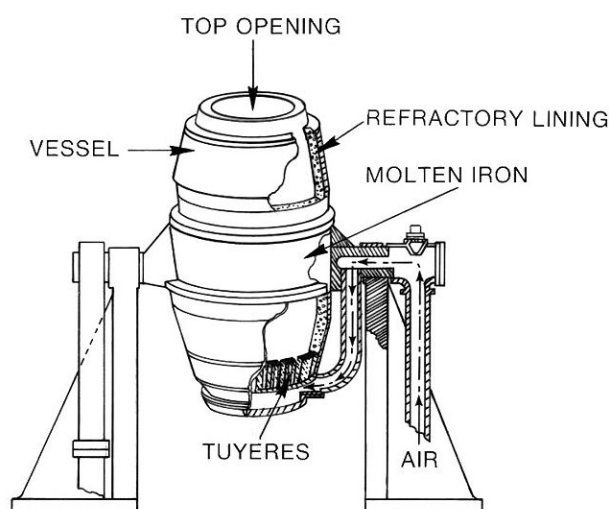
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΔΙΑΧΡΟΝΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

1.1 ΕΞΕΛΙΞΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ ΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ ΔΙΑΧΡΟΝΙΚΑ

Η πρόοδος των σιδηροδρομικών δικτύων και της ατμοπλοΐας στην Ευρώπη και την Αμερική δεν θα ήταν δυνατή χωρίς την ευχέρεια για μαζική παραγωγή σιδήρου και χάλυβα. Η εξόρυξη του ήταν μια γνωστή από πολλούς αιώνες διαδικασία και είχε τυποποιηθεί σε μεγάλο βαθμό. Κατά το 19^ο αιώνα μετατρέπεται το σιδηρομετάλλευμα μέσω μιας διεργασίας δύο βαθμίδων σε ενδιάμεσο προϊόν για την τροφοδοσία χυτηρίων. Ο σίδηρος που παραγόταν κατά την πρώτη βαθμίδα από την κάμινο τήξεως περιείχε μεγάλη ποσότητα άνθρακα, κυρίως από την καύσιμη ύλη (γαιάνθρακας, κοκ) που απαιτείται για την τήξη του μεταλλεύματος. Το παραγόμενο προϊόν (χυτοσίδηρος) είναι σκληρό αλλά εύθραυστο. Έτσι, πρέπει να απομακρυνθεί ο άνθρακας ώστε να απομείνει καθαρός αλλά μαλακός σίδηρος, πράγμα που επιτυγχάνεται με την καύση του άνθρακα με παροχή οξυγόνου και ισχυρή θέρμανση. Στη συνέχεια, στη δεύτερη βαθμίδα επεξεργασίας, πρέπει να προστεθεί συγκεκριμένη ποσότητα άνθρακα, ώστε να διαθέτει ο παραγόμενος χυτοχάλυβας την επιθυμητή σκληρότητα. Αυτή η διαδικασία ήταν πολύπλοκη και πολυδάπανη και γι' αυτό το κόστος των χαλύβδινων προϊόντων υψηλό. Το 1746 είχε αναπτύξει ο Benjamin Huntsman στο Sheffield μέθοδο παραγωγής χυτοχάλυβα, στην οποία χρησιμοποιείται ένα μίγμα σκόνης άνθρακα. Έτσι έγιναν τα χαλυβουργεία του Sheffield πρωτοπόρα στην παραγωγή φθηνού χάλυβα υψηλής μηχανικής αντοχής. Μέχρι τα μέσα του 19^{ου} αιώνα διαδόθηκε όμως αυτή η μέθοδος σε όλη την Ευρώπη και Αμερική, κυρίως μέσω βιομηχανικής κατασκοπείας, κι έτσι όλοι οι κατασκευαστές ατμομηχανών, οχημάτων, σιδηροτροχιών και εργαλειομηχανών είχαν στη διάθεσή τους χυτοχάλυβα υψηλής ποιότητας. Στα μέσα του 19^{ου} αιώνα καθιερώθηκαν οι πρώτοι τύποι χάλυβα και οι μέθοδοι ελέγχου της αντοχής τους. Αυτές οι τυποποιήσεις προκάλεσαν και σημαντικές αντιπαραθέσεις μεταξύ χαλυβουργών, κυρίως Γερμανών και Αμερικάνων, όπως συμβαίνει κατά κανόνα με όλες τις τυποποιήσεις βιομηχανικών προϊόντων. Κύριο πρόβλημα κατά την τυποποίηση του χάλυβα ήταν να αντιμετωπιστεί με χαμηλό κόστος ο αυξανόμενος αριθμός αστοχιών του υλικού, όπως εκρήξεις λεβήτων, θραύσεις αξόνων και σιδηροτροχιών και άλλα σφάλματα. Οι Γερμανοί παραγωγοί επιθυμούσαν να προσδιορίζονται οι ποιότητες χάλυβα από την αντοχή σε εφελκυσμό και τίποτα επιπλέον. Άλλα τυποποιητικά χαρακτηριστικά, όπως η περιεκτικότητα σε άνθρακα ή η καταλληλότητα για ηλεκτροσυγκολλήσεις απορρίπτονταν. Οι Αμερικάνοι, από την άλλη πλευρά ενδιαφέρονταν κυρίως να καθιερωθεί ο χαρακτηρισμός των τύπων του χάλυβα σύμφωνα με την περιεκτικότητα σε άνθρακα.

Ο Βρετανός μηχανολόγος Henry Bessemer (Μπέσεμερ, 1813-1898) αναζητούσε μια λιγότερο δαπανηρή μέθοδο για την απομάκρυνση του άνθρακα από το χυτοσίδηρο και την ανακάλυψε το έτος 1855, καταρχάς θεωρητικά, με τη διοχέτευση αέρα ή και οξυγόνο μέσα από τον ρευστό σίδηρο. Αυτός ο συνδυασμός αέρα και άνθρακα του σιδήρου, οδηγούσε σε αύξηση της θερμοκρασίας και όχι σε μείωση, όπως θα πίστευε κάποιος ανυποψίαστος. Το οξυγόνο του αέρα δεσμεύει τον άνθρακα του σιδήρου και δημιουργεί μονοξείδιο (CO), το οποίο καίγεται και διατηρεί υψηλά τη θερμοκρασία. Με έλεγχο του χρώματος του λιωμένου σιδήρου μπορούσε ο εργοδηγός να ελέγξει, τότε είχε ολοκληρωθεί η καύση του άνθρακα,

ώστε να διακόψει τη διεργασία. Έτσι, δεν χρειαζόταν να αφαιρεθεί ολοκληρωτικά ο άνθρακας και να προστεθεί στη συνέχεια η απαιτούμενη ποσότητά του με μια χρονοβόρα διαδικασία, ώστε να καταλήξει ο μεταλλουργός στην επιθυμητή ποιότητα χυτοχάλυβα: η αφαίρεση έφτανε μέχρις εκείνου του σημείου ώστε να παραμένει στο λιωμένο υλικό η επιθυμητή ποσότητα άνθρακα. Οι δύο διαδικασίες είχαν ενοποιηθεί σε μία. Καταρχάς πρέπει να σημειωθεί ότι η εμφύσηση αέρα σε λιωμένο σίδηρο δεν είναι μια απλή διαδικασία, όσο εύκολα περιγράφεται. Απαιτούνται ισχυρές δυνάμεις και υλικά με ανθεκτικότητα σε υψηλές θερμοκρασίες. Γι' αυτό το σκοπό κατασκευάζονταν στο εξής ειδικές ατμομηχανές. Πέρα από αυτό, ενώ τα πειράματα στο εργαστήριο έδιναν πολύ καλά αποτελέσματα, η εφαρμογή της μεθόδου Μπέσεμερ σε πραγματικές συνθήκες κατέληξε σε ακατάλληλο προϊόν. Το μυστικό ήταν ότι ο Μπέσεμερ είχε χρησιμοποιήσει στα πειράματά του σουηδικό σιδηρομέταλλευμα, ενώ στην παραγωγή ήταν διαθέσιμο μόνο βρετανικό μέταλλευμα, το οποίο έχει υψηλή περιεκτικότητα σε φωσφόρο που επηρέαζε αρνητικά το αποτέλεσμα. Η λύση σ' αυτό το πρόβλημα δόθηκε από τους εξαδέλφους μεταλλουργούς S. G. Thomas και P. C. Gilchrist, οι οποίοι υπέδειξαν να επενδυθούν τα δοχεία τήξης του σιδήρου με ασβεστολιθικό τοίχωμα. Αυτό οδήγησε σε άριστα αποτελέσματα και γρήγορα άρχισαν να κατασκευάζονται υψικάμινοι Bessemer σε όλες τις χαλυβουργίες.



Σχήμα 1.1: Μεταλλάκτης Bessemer για την παραγωγή χάλυβα.

1.2 ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕΤΑΛΛΟΤΕΧΝΙΑΣ ΚΑΙ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

Η χύτευση, αποτελεί ίσως την πρώτη μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε για τη μορφοποίηση μετάλλων. Το μέταλλο ή το κράμα τήκεται και κατόπιν χυτεύεται σε μία μήτρα (καλούπι). Η μήτρα μπορεί να είναι κενή ή να περιέχει μοντέλο από εύηκτο στερεό υλικό, όπως κερί ή πολυστυρένιο, το οποίο καταστρέφεται καθώς εισέρχεται στη μήτρα το τηγμένο μέταλλο. Η μήτρα μπορεί να είναι φτιαγμένη από άμμο, γύψο ή κεραμικό υλικό για μια χρήση. Για αντικείμενα μεγαλύτερα, η χύτευση μπορεί να γίνει σε καλούπια πολλαπλής χρήσης συνήθως φτιαγμένα από χυτοσίδηρο, ορείχαλκο, κ.λπ. Υπάρχουν διάφορα είδη καλούπιων.

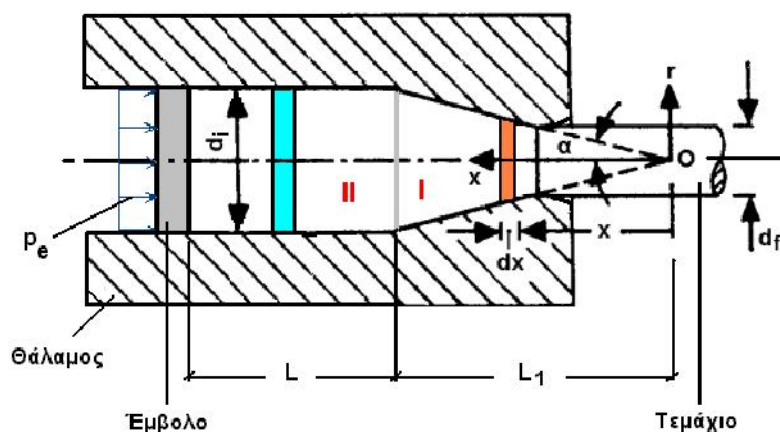
Το μεταλλικό αντικείμενο που παράγεται με χύτευση, συνήθως καθαρίζεται από ατέλειες και εξωτερικές ακαθαρσίες, λειαίνεται και διαμορφώνεται στις τελικές του διαστάσεις. Έτσι θα έχουμε την μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια.

Στην παραγωγή δηλαδή σε βιομηχανικό τομέα, υπάρχει και η συνεχής χύτευση, η οποία εφαρμόζεται για την παραγωγή πλατέων ή μακρών προϊόντων, όπως δοκοί (μπιγιέτες) και πλινθώματα χάλυβα, αλουμινίου και χαλκού. Επειδή η χύτευση συνδέεται με πολύπλοκα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας και αλλαγών φάσεων, σήμερα η χύτευση θεωρείται ξεχωριστός τομέας της μεταλλογνωσίας.

Στο σημείο αυτό, θα αναφέρουμε κάποια βασική κατηγορία, αυτή των μηχανικών διεργασιών. Οι μηχανικές διεργασίες έλαση, διέλαση και ολκή χρησιμοποιούνται για παραγωγή πλατέων ή επιμηκών προϊόντων μικρής διατομής, συνήθως σε βιομηχανική παραγωγή.

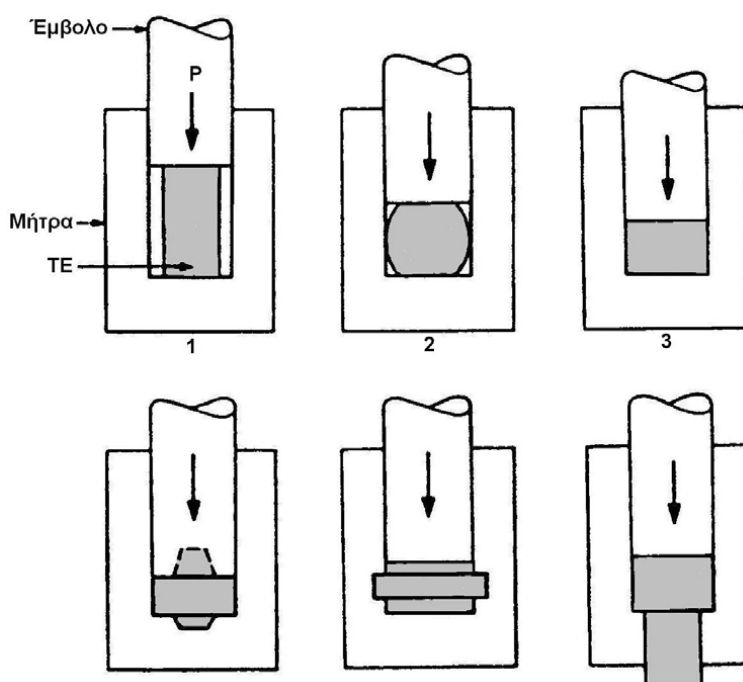
Έλαση είναι η τεχνική της επίπεδης ή κυλινδρικής μορφοποίησης μετάλλου ή κράματος με προώθηση μέσα από μία σειρά κυλίνδρων, τα γνωστά ράουλα, που το συμπιέζουν ώστε να ελαττωθεί το πάχος ή η διάμετρός του. Με αυτόν τον τρόπο προκύπτουν μεταλλικά φύλλα, μορφοσίδηρος (σιδηροτροχιές και δοκοί διαφόρων διατομών), ράβδοι οπλισμού σκυροδέματος (μπετόβεργες), κ.λπ. Η έλαση διεξάγεται σε υψηλές θερμοκρασίες (εν θερμώ) ή σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες (εν ψυχρώ).

Διέλαση είναι η τεχνική μορφοποίησης μετάλλου ή κράματος με συμπίεση με έμβολο μέσα από μήτρα μικρής διαμέτρου ή μικρού πάχους. Η διέλαση χρησιμοποιείται πολύ στην παραγωγή μορφοράβδων (προφίλ) αλουμινίου, χαλκοσωλήνων, κ.λπ. Με διέλαση χρησιμοποιώντας ως λιπαντικό τηγμένο γυαλί, παράγονται και χαλύβδινοι σωλήνες χωρίς ραφή (συσσκευή Mannesmann). Είναι μία πολύ σημαντική διεργασία.



Σχήμα 1.2 : Διέλαση με χρήση κωνικής μήτρας.

Η σφυρηλασία ή σφυρηλάτηση (forging) είναι και αυτή μια από τις πιο παλιές μεθόδους μορφοποίησης, συγκόλλησης και σκλήρυνσης (ενδοτράχυνσης) των μετάλλων. Χρησιμοποιείται ευρέως στο παραδοσιακό σιδηρουργείο, στο παραδοσιακό χαλκουργείο, στην αργυροχρυσοχοΐα, στην κοπή νομισμάτων, καθώς και στη βαριά βιομηχανία. Κατά τη σφυρηλάτηση, ένα δοκίμιο μετάλλου διαμορφώνεται και σκληραίνει με συνεχή χτυπήματα ανάμεσα στη σφύρα (το κινητό τμήμα) και τον άκμονα. Παραλλαγή της σφυρηλασίας είναι η *κοίλανση*, η οποία χρησιμοποιείται στην αυτοκινητοβιομηχανία, στην αεροναυπηγική και σε άλλους σύγχρονους φορείς της τεχνολογίας σήμερα. Στο ακόλουθο σχήμα βλέπουμε μία αναπαράσταση σφυρηλάτησης κλειστής μήτρας κατά τα στάδια της.



Σχήμα 1.3 : Αναπαράσταση σφυρηλάτησης κλειστής μήτρας.

Συγκολλήσεις

Μία διαδεδομένη συγκόλληση μετάλλων είναι η συγκόλληση με τοπική τήξη, η οποία αποκαλείται και συγκόλληση υψηλών θερμοκρασιών. Σε αυτή, γύρω από τη ζώνη της συγκόλλησης, η θερμοκρασία ξεπερνά τους 1100°C, τα μέταλλα τήκονται και έτσι συνδέονται σθεναρά μεταξύ τους. Για τη συγκόλληση υψηλών θερμοκρασιών, χρησιμοποιείται μέταλλο σύνδεσης με την ίδια σύσταση με τα μέταλλα προς συγκόλληση. Σε άλλες περιπτώσεις, δεν χρησιμοποιείται καθόλου μέταλλο σύνδεσης, οπότε πρόκειται για αυτογενή συγκόλληση. Αναλόγως με την τεχνική, οι συγκολλήσεις υψηλών θερμοκρασιών διακρίνονται σε:

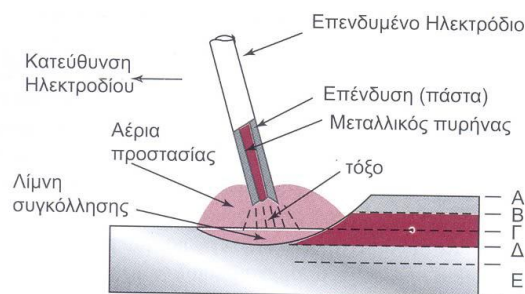
→συγκολλήσεις ηλεκτρικού τόξου ή ηλεκτροσυγκολλήσεις (arc welding), με επενδεδυμένα ηλεκτρόδια ή με προστατευτικό αέριο

→συγκολλήσεις ηλεκτρικής αντίστασης, σημειακή (spot welding) ή ραφής (seam welding)

→συγκολλήσεις δέσμης ηλεκτρονίων (electron beam welding) και άλλες.

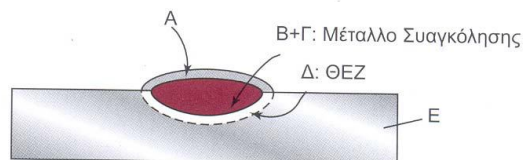
Οι συγκολλήσεις υψηλών θερμοκρασιών χρησιμοποιούνται ευρέως για τον κοινό χάλυβα, τους ανοξείδωτους χάλυβες, τα κράματα νικελίου, κ.ά.

Εκτός από τις συγκολλήσεις υψηλών θερμοκρασιών, υπάρχουν και οι συγκολλήσεις μεσαίων θερμοκρασιών (brazing) και οι συγκολλήσεις χαμηλών θερμοκρασιών (soldering). Κατά τις συγκολλήσεις μεσαίων και χαμηλών θερμοκρασιών, τα μέταλλα προς συγκόλληση δεν τήκονται αλλά συνδέονται μεταξύ τους με άλλο κράμα χαμηλού σημείου τήξεως. Συγκολλήσεις μεσαίων θερμοκρασιών (450–1100°C) ή σκληρές κολλήσεις γίνονται σε κράματα χαλκού, νικελίου, αλουμινίου, πολύτιμων μετάλλων, κ.λπ. Ως συγκολλητικό υλικό χρησιμοποιείται κράμα παρεμφερούς σύστασης, αλλά με πιο χαμηλό σημείο τήξης. Οι σκληρές κολλήσεις γίνονται συνήθως σε αδρανή ατμόσφαιρα ή σε κενό, ώστε να μην υπάρχει ενδεχόμενο να οξειδωθεί η συγκόλληση. Όσον αφορά τις συγκολλήσεις χαμηλών θερμοκρασιών (< 450°C), χρησιμοποιούνται πολύ για ηλεκτρονικές συνδέσεις, για συνδέσεις χαλκοσωλήνων, κ.ά. Ως συνδετικό υλικό χρησιμοποιείται εύτηκτο κράμα αντιμονίου–μολύβδου ή καλαί (συνήθως κράμα κασσίτερου–αντιμονίου 95/5 Sn/Sb). Τα τελευταία χρόνια, η χρήση κραμάτων μολύβδου αποφεύγεται. Η μαλακή κόλληση με καλαί (κασσιτεροκόλληση) μειονεκτεί σε αντοχή.



(α)

- A: Επιφανειακή κρούστα σκουριάς
- B: Ενίσχυση συγκόλλησης
- Γ: Διείσδυση
- B+Γ: Εναπόθεση μετάλλου (Μέταλλο Συναγκόλλησης)
- Δ: Θερμικά επηρεασμένη ζώνη (ΘΕΖ)
- E: Βασικό μέταλλο



Σχήμα 1.4 : Απεικόνιση συγκόλλησης με επενδεδυμένο ηλεκτρόδιο(SMAW, Shielded metal-arc welding).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗ

2.1 Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΗΣ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ- ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Σφυρηλάτηση ονομάζεται μία από τις κατεργασίες των μετάλλων κατά την οποία ένα στερεό αρχικό τεμάχιο ή δοκίμιο, παραμορφώνεται πλαστικά, ώστε να λάβει την τελική και επιθυμητή του μορφή η οποία είναι και η χρηστικότερη για τον σκοπό που γίνεται η όλη κατεργασία. Εώς περίπου το 1820, η σφυρηλάτηση ήταν αντικείμενο του σιδηρουργού. Αρχικά γινόταν χρήση σφύρας και αμονίου ενώ με το πέρασμα των ετών αυτά αντικαταστάθηκαν από σύγχρονα εργαλεία. Το 1825 είχε κατασκευαστεί μία αμοκίνητη σφύρα, η αντιπροσωπευτική για την εποχή δηλαδή μηχανή σφυρηλάτησης. Κατασκευάστηκε από τον Nasmyth. Στις αρχές του 20^{ου} αιώνα αναπτύχθηκε μεγάλη ποικιλία διαφόρων μηχανών σφυρηλάτησης ενώ παράλληλα έγινε αρκετή έρευνα στην ανάπτυξη των υλικών των μητρών και άλλων τμημάτων. Τα εργαλεία αυτά κατασκευάζονταν από σκληρότητα και ανθεκτικότερα υλικά και με μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Συνεπώς μπορούν να παραχθούν τεμάχια συνθετότερης διατομής και με υψηλή αντοχή καθώς επίσης και με πολύ καλύτερη ποιότητα επιφάνειας.

Η παραμόρφωση των μεταλλικών τεμαχίων γίνεται μέσω μεγάλων θλιπτικών δυνάμεων που ασκούνται σε αυτά με τη βοήθεια ενός εμβόλου και μίας μήτρας καθώς και άλλων αναγκαίων παραμέτρων. Χαρακτηρίζεται ως κατεργασία συμπαγούς υλικού. Πραγματοποιείται σε σφύρες και σε πρέσες. Για την εκτίμηση της κατεργασιμότητας ενός υλικού λαμβάνονται υπόψη η ολκιμότητα, η θερμοκρασία κατεργασίας, η αντοχή, η τριβή και κάποιοι άλλοι παράγοντες. Παραδείγματα σφυρηλάτων σύγχρονων τεμαχίων είναι οι οδοντωτοί τροχοί, έμβολα, διωστήρες, πτερυγώσεις και άλλα όχι και τόσο τυποποιημένα εξαρτήματα. Στο σχήμα 2.1 μπορούμε να δούμε μία τυπική μορφή ενός εμβόλου το οποίο έχει παραχθεί με σφυρηλάτηση :



Σχήμα 2.1 : Έμβολα (πιστόνια) τα οποία έχουν παραχθεί με σφυρηλάτηση.

⇒ Στο σημείο αυτό αναφέρουμε τα εξής:

Υπάρχει το πλεονέκτημα της αυξημένης αντοχής του τελικού μετάλλου με την κατεργασία της σφυρηλάτησης σε σχέση με άλλες, καθώς κατά την διαμόρφωσή του, το μέταλλο αυξάνει χαρακτηριστικά της αντοχής του. Τα μέταλλα μπορούν να παραχθούν και με ψυχρή και με θερμή σφυρηλάτηση, αλλά ο σίδηρος και ο χάλυβας συνήθως μορφοποιούνται με θερμή. Η θερμή σφυρηλάτηση αποτρέπει την ανάγκη της επιπλέον σκλήρυνσης, το οποίο θα προέκυπτε από μία ψυχρή διαδικασία. Αυτό θα αύξανε τη δυσκολία της δευτερογενούς επεξεργασίας του εξαρτήματος στη συνέχεια.

Οι περισσότερες διαδικασίες σφυρηλάτησης σήμερα, λόγω και της ολοένα αυξανόμενης ανάγκης που επιβάλλει η τεχνολογία στην ακρίβεια των συναρμογών, απαιτούν την όσο δυνατόν μικρότερη απόκλιση του εξαρτήματος από τον αρχικό σχεδιασμό. Αυτό επιτυγχάνεται με την ακριβέστερη κατά το δυνατότερο κατασκευή του εμβόλου της μήτρας και των άλλων συνιστωσών. Η προσεκτική συναρμολόγηση επίσης, επιδράει σημαντικά σε αυτό το σκοπό, όπως και η θερμοκρασία, τόσο για την πιστή κατασκευή της μηχανής σφυρηλάτησης όσο και για το κατεργαζόμενο τεμάχιο. Στο ακόλουθο σχήμα μπορούμε να διακρίνουμε προϊόντα σύγχρονης σφυρηλάτησης, τα οποία παράγονται με πολύ μεγάλη ακρίβεια στις μέρες μας. Τέτοια είναι και οι κωνικοί οδοντωτοί τροχοί που βλέπουμε (Σχήμα 2.2).



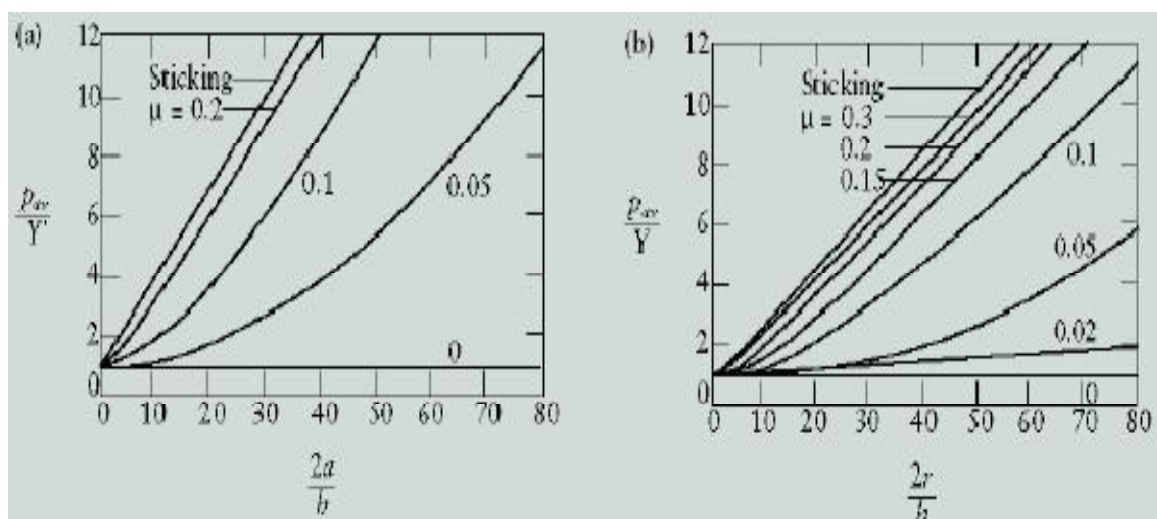
Σχήμα 2.2: Σύγχρονα εξαρτήματα της κατεργασίας της σφυρηλάτησης(κωνικοί και μή οδοντωτοί τροχοί)

Όσον αφορά γενικότερα τις κατεργασίες διαμόρφωσης του συμπαγούς υλικού στις οποίες ανήκει και η κατεργασία της σφυρηλάτησης, έχουμε τις εξής παρατηρήσεις:

Για τον υπολογισμό των τάσεων και των φορτίων στις κατεργασίες διαμόρφωσης του συμπαγούς υλικού εφαρμόζονται, μεταξύ άλλων, οι ακόλουθες μέθοδοι:

- Υπολογισμός με βάση την ομοιογενή παραμόρφωση (υποεκτιμά την πραγματικότητα).
- Εκτίμηση με βάση την ανομοιογενή παραμόρφωση (χρησιμοποιείται η λύση της ομοιογενούς παραμόρφωσης \times συντελεστή αναμοιογένειας ή άλλη προσεγγιστική λύση με βάση μια απλοποιημένη ισοροπία δυνάμεων ή ενεργειακή θεώρηση. Δυνατή είναι επίσης η χρήση νομογραφημάτων)
- Εφαρμογή της μεθόδου του λόφου τριβής (slab-method).
- Εφαρμογή μεθόδων οριακής ανάλυσης (limit analysis).
- Εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων (FEM).

Σε γενικές γραμμές, όσον αφορά την κατεργασία της σφυρηλάτησης και όσον αφορά την μέση πυκνότητα φορτίου p_{av} , μπορεί να χρησιμοποιηθεί νομογράφημα. Στο σχήμα 2.3 φαίνονται αυτά τα διαγράμματα.



Σχήμα 2.3 : Νομογραφήματα υπολογισμού της μέσης πυκνότητας φορτίου p_{av} στη σφυρηλάτηση.

2.2 ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ

Η κατεργασία της σφυρηλάτησης μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε εν θερμώ είτε εν ψυχρώ. Αυτό γίνεται για διάφορους λόγους που θα αναλυθούν στη συνέχεια της μελέτης μας, όπου θα παρουσιαστούν και άλλα επιπλέον στοιχεία. Επομένως διακρίνουμε τις ακόλουθες περιπτώσεις:

A) Ανάλογα με τη θερμοκρασία που γίνεται η κατεργασία(πιο γενικευμένη ταξινόμηση):

⇒ Ψυχρή σφυρηλάτηση: $T < 0.3 T_m$

⇒ Ημίθερμη σφυρηλάτηση: $0.3 T_m < T < 0.5 T_m$

⇒ Θερμή σφυρηλάτηση: $T > 0.5 T_m$

Στους παραπάνω τύπους, όπου T_m , είναι το σημείο τήξης του υλικού που γίνεται η εν λόγω κατεργασία.

B) Ανάλογα με την μορφή της μήτρας(πιο βασική ταξινόμηση):

⇒ **Σφυρηλάτηση ανοικτής μήτρας (Open-die forging)**

⇒ **Σφυρηλάτηση κλειστής μήτρας (Closed-die forging)**

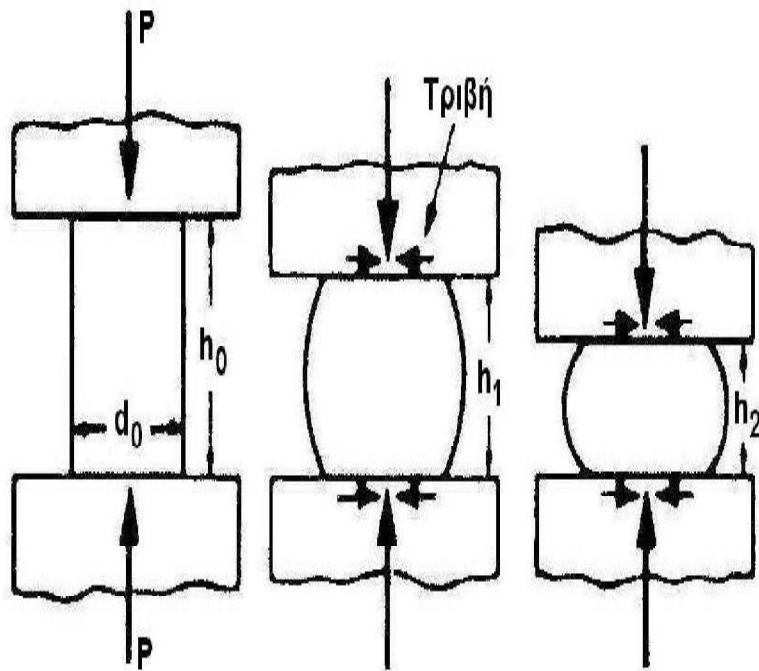
⇒ **Σφυρηλάτηση κλειστής μήτρας με προεξοχή (Impression-die forging)**

Στη συνέχεια αναλύουμε πιο διεξοδικά τις τρεις παραπάνω περιπτώσεις σφυρηλάτησης.

2.2.1 ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗ ΑΝΟΙΚΤΗΣ ΜΗΤΡΑΣ(OPEN-DIE FORGING)

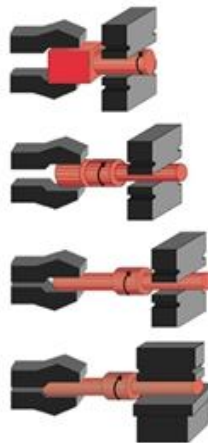
Στην περίπτωση αυτή οι αναγκαίες δυνάμεις παραμόρφωσης δημιουργούνται είτε από διάφορα εργαλεία χειρός, είτε από διάφορων ειδών μηχανικές σφύρες, οι οποίες είναι και περισσότερο αποτελεσματικές από την πρώτη περίπτωση. Είναι προφανές ότι δεν υπάρχει πλευρικός γεωμετρικός περιορισμός στο τεμάχιο δηλαδή στη ροή του μετάλλου, ενώ όταν σε λίγες περιπτώσεις υφίσταται, τότε είναι μικρής έκτασης. Για να προσδώσουμε στο τεμάχιο την τελική του μορφή, είτε το περιστρέφουμε, είτε το αλλάζουμε διαδοχικά θέσεις ανάμεσα στα εναλλασσόμενα κτυπήματα του εργαλείου ή της σφύρας.

Στο ακόλουθο σχήμα, βλέπουμε μία απλή σχηματική απεικόνιση της εν λόγω σφυρηλάτησης(ανοικτής μήτρας), όπου διακρίνονται τα φορτία, οι αρχικές και οι τελικές γεωμετρικές διαστάσεις καθώς και η τριβή. Το σχήμα αυτό (Σχήμα 2.4), δίνει στον κάθε αναγνώστη την δυνατότητα να κατανοήσει με μεγάλη ευκολία τη διαδικασία.



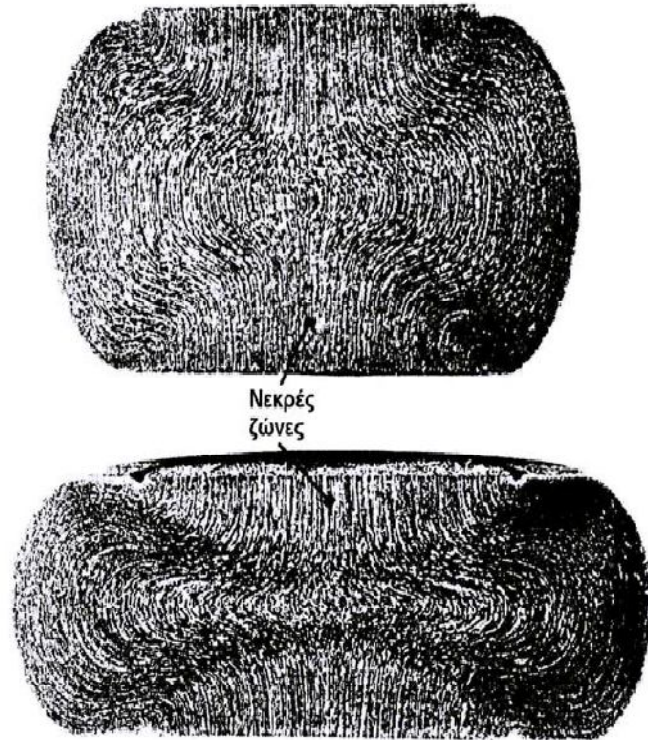
Σχήμα 2.4: Σχηματική περιγραφή της σφυρηλάτησης ανοικτής μήτρας.

Μία τυπική περίπτωση κατεργασίας σφυρηλάτησης ανοικτής μήτρας, αποτελεί η κατασκευή αξόνων. Σε αυτήν την περίπτωση, το αρχικό δοκίμιο συγκρατείται κατάλληλα με έναν βραχίονα και έπειτα υφίσταται τα διαδοχικά χτυπήματα. Ακολουθεί η σφυρηλάτηση ανοικτής μήτρας και στο τέλος γίνεται η εισαγωγή σε τόρνο. Εκεί το τεμάχιο στρέφεται μέχρι την τελική επιθυμητή του μορφή. Ακολουθεί το σχήμα 2.5 όπου φαίνονται τα παραπάνω.



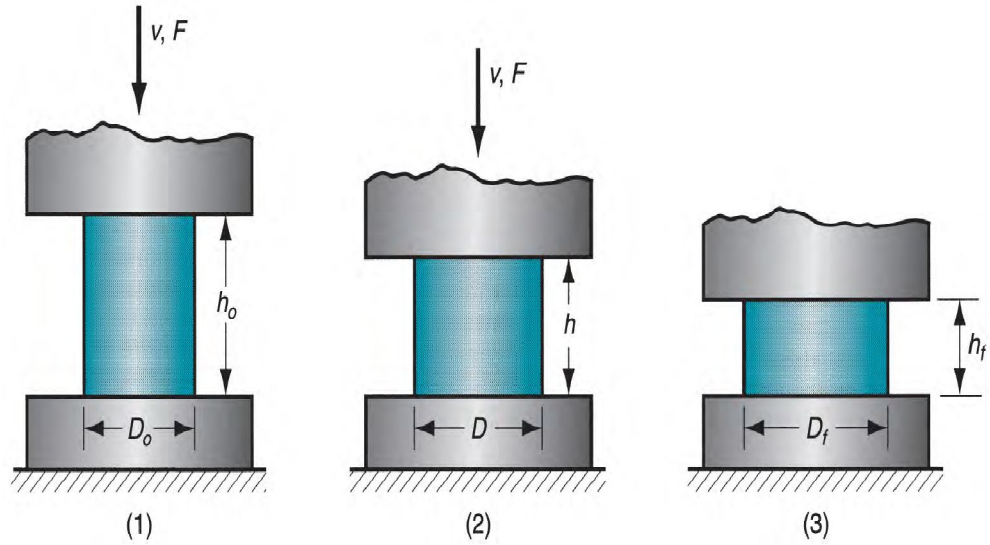
Σχήμα 2.5: Σφυρηλάτηση ανοικτής μήτρας κατά την δημιουργία ενός άξονα.

Στο σχήμα που ακολουθεί βλέπουμε την πορεία της ροής του υλικού κατά την σφυρηλάτηση χαρακτηριστικού τεμαχίου ανοικτής μήτρας. Είναι εύκολο να διακρίνουμε και τις νεκρές ζώνες, δηλαδή τις περιοχές πέριξ των οποίων το υλικό υφίσταται συμμετρική παραμόρφωση και προς τις δύο κατευθύνσεις.



Σχήμα 2.6 : Απεικόνιση της ροής του υλικού κατά τη σφυρηλάτηση ανοικτής μήτρας.

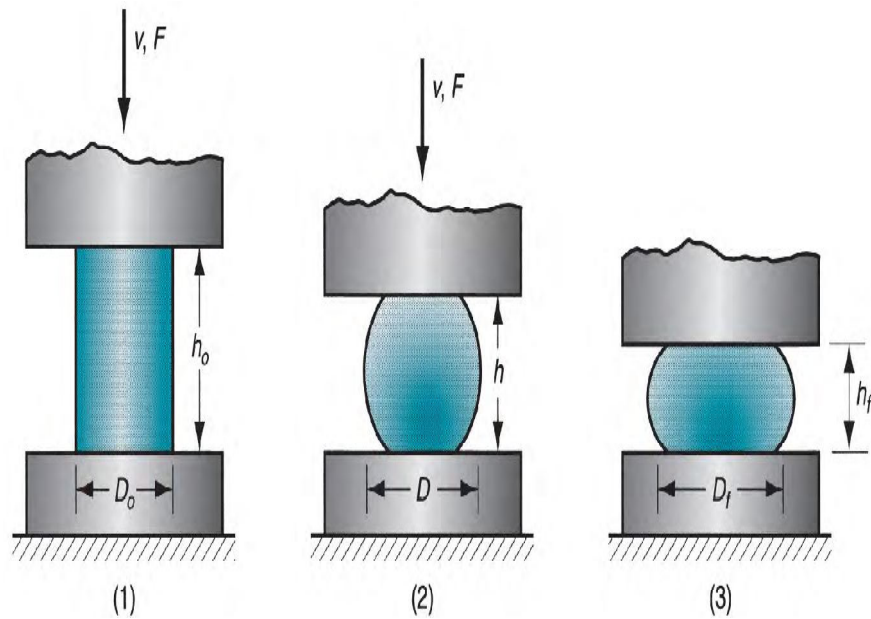
Χρήσιμο θα ήταν σε αυτό το σημείο να κάνουμε έναν διαχωρισμό μίας απλής περίπτωσης σφυρηλάτησης ενός κυλινδρικού δοκιμίου σε δύο κατηγορίες ως προς τη μελέτη της επίδρασης της τριβής. Στην πρώτη περίπτωση βλέπουμε το αρχικό, το ενδιάμεσο και το τελικό αποτέλεσμα (Σχήμα 2.7) , δηλαδή χωρίς την παρουσία τριβής.



Σχῆμα 2.7: Σφρηλάτηση ανοικτής μήτρας χωρίς τριβή. (1) Αρχική θέση, (2) Ενδιάμεση συμπίεση, (3) Τελική συμπίεση.

Το ϵ μπορεί να δοθεί από την σχέση: $\epsilon = \ln(h_o/h)$.

Στο σχήμα 2.8 βλέπουμε την ίδια περίπτωση αλλά με την παρουσία τριβής.



Σχῆμα 2.8: Σφρηλάτηση ανοικτής μήτρας με την παρουσία τριβής. (1) Αρχική θέση, (2) Ενδιάμεση συμπίεση, (3) Τελική συμπίεση.

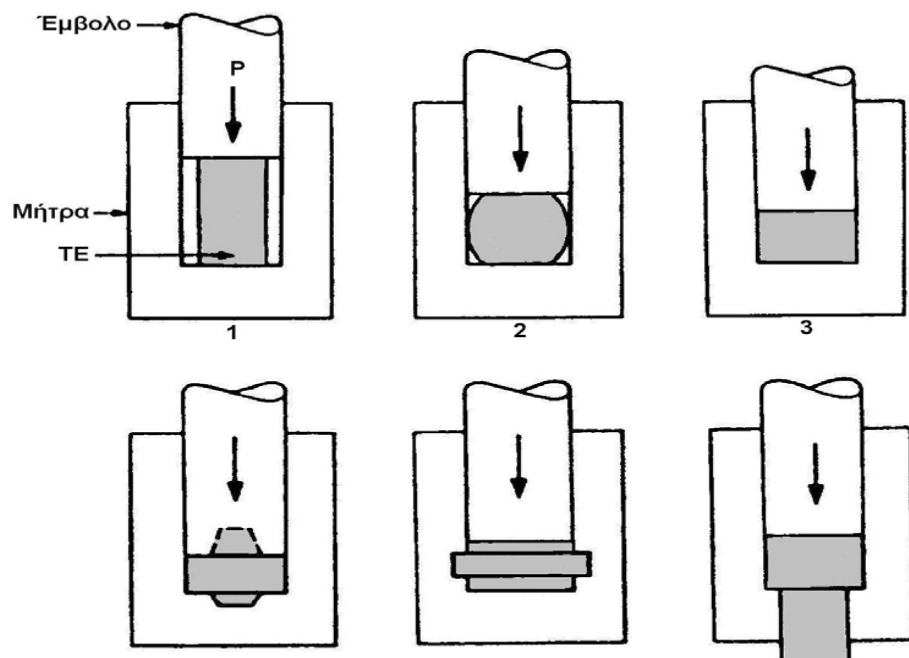
Όπως διακρίνουμε, στις δύο αυτές περιπτώσεις υπάρχει διαφοροποίηση στο τελικό τεμάχιο, λόγω παρουσίας ή όχι των τάσεων που προκαλεί η άνω και κάτω επιφάνεια συμπίεσης(της μηχανής) κατά την κατεργασία.

2.2.2 ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗ ΚΛΕΙΣΤΗΣ ΜΗΤΡΑΣ(CLOSED-DIE FORGING)

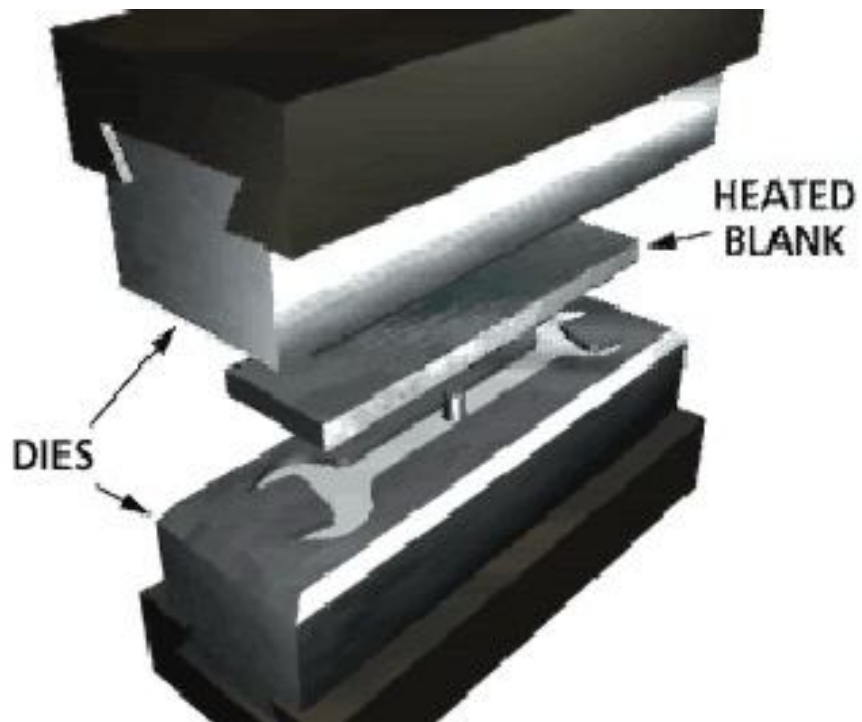
Σε αυτήν την περίπτωση έχουμε την ύπαρξη ενός, συγκεκριμένης γεωμετρίας, καλουπιού(μήτρας) όπου το τεμάχιο θα έχει στο τέλος της κατεργασίας τις διαστάσεις αυτού του καλουπιού. Υφίσταται πλαστική παραμόρφωση όπως και στις περισσότερες κατεργασίες. Τα θλιπτικά φορτία που παράγονται, από τις σφύρες ή τις πρέσες ασκούνται σε ολόκληρη την θερμαινόμενη επιφάνεια του μετάλλου.

Τα οφέλη από αυτήν την μέθοδο είναι πρώτον ότι προκύπτουν καλύτερες ιδιότητες από την προηγούμενη μέθοδο, πολύ καλή προσέγγιση των διαστάσεων του τεμαχίου και καλή εκμετάλλευση του υλικού. Ακόμη, μεγάλα πλεονεκτήματα είναι ο γρήγορος ρυθμός παραγωγής και η πολύ καλή παραγωγικότητα, παράγοντες που έχουν μεγάλη σημασία στην βιομηχανική παραγωγή.

Μειονεκτήματα είναι το υψηλό κόστος των εργαλείων όταν πρόκειται για μικρή παραγωγή προϊόντων, καθώς και η πιθανότητα ανάγκης επιπλέον κατεργασίας του τελικού τεμαχίου. Στο σχήμα 2.9 που ακολουθεί, φαίνεται η διαδικασία σφυρηλάτησης κλειστής μήτρας.

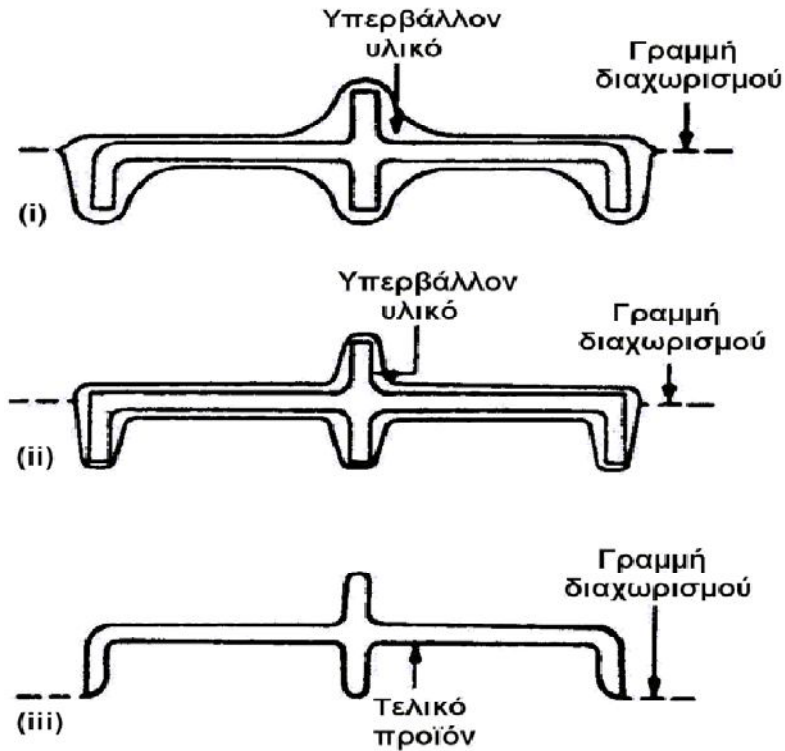


Σχήμα 2.9 : Διαδικασία σφυρηλάτησης κλειστής μήτρας.



Σχήμα 2.10 : Απεικόνιση του συνόλου της μηχανής σφυρηλάτησης κλειστής μήτρας για παραγωγή ενός εργαλείου.

Τέλος στο σχήμα 2.11, έχουμε κάποια παραδείγματα σφυρηλάτησης ακριβείας διαφόρων τύπων.



Σχήμα 2.11 : Σφυρηλάτηση ακριβείας (i) Απλής μορφής, (ii) Τυπικής μορφής, (iii) Near net shape.

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

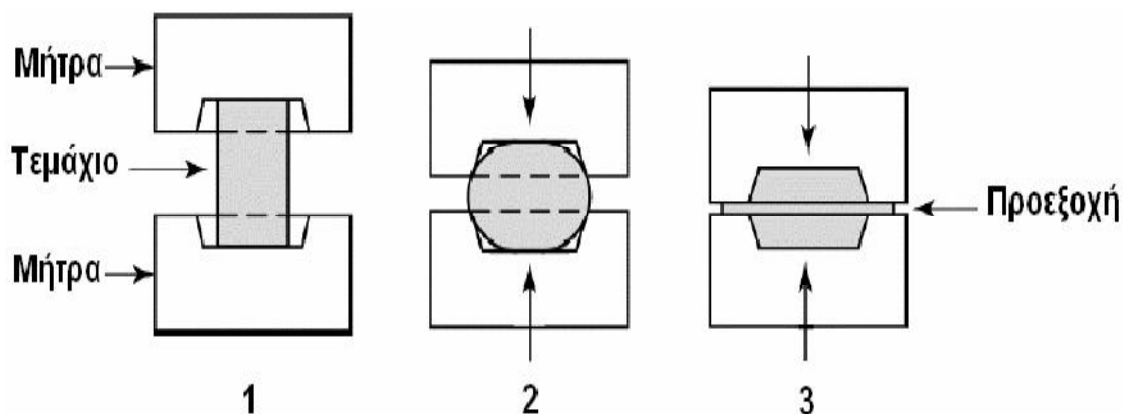
Η σφυρηλάτηση κλειστής μήτρας με προεξοχή πρόκειται για μία παραλλαγή της σφυρηλάτησης κλειστής μήτρας. Η ποσότητα ύλης του μετάλλου είναι μεγαλύτερη από όση μπορεί να δεχτεί το καλούπι- μήτρα, με αποτέλεσμα να υπάρχει πλεόνασμα. Το πλεόνασμα αυτό θα εξέλθει προς την αρχή της κατεργασίας, από ειδική δίοδο του καλουπιού. Αυτό το τμήμα του υλικού ονομάζεται προεξοχή ή προέκταμα (flash) και είναι το τμήμα με την μεγαλύτερη παραμόρφωση κατά την κατεργασία.

Κατά την ψυχρή σφυρηλάτηση, λόγω του μεγάλου λόγου μήκος προς πάχος στην περιοχή της προεξοχής, διαμορφώνονται υψηλές κάθετες τάσεις με αποτέλεσμα να έχουμε μεγάλη αντίσταση τριβής κατά την ροή του υλικού προς τα έξω. Το επιπλέον υλικό μέσα στην περιοχή του καλουπιού, λόγω του ότι παρεμποδίζεται να κινηθεί προς τα έξω, εν τέλει αναγκάζεται να κινηθεί προς άλλες κατευθύνσεις, με αποτέλεσμα την ασφαλή και σίγουρη πλήρωση της κοιλότητας ή του καλουπιού.

Κατά την θερμή σφυρηλάτηση, λόγω του μεγάλου λόγου επιφάνεια προς πάχος στην περιοχή της προεξοχής, αυτή λειτουργεί ως πτερύγιο. Η περιοχή αυτή, σύμφωνα με τις αρχές μετάδοσης θερμότητας αποψύχεται ταχύτερα από το υπόλοιπο υλικό. Αυτό έχει σαν

αποτέλεσμα την αύξηση της αντίστασης του υλικού προς περαιτέρω παραμόρφωση στην περιοχή της προεξοχής, άρα υπάρχει δυναμική της ροής του υπόλοιπου υλικού να κινηθεί μέσα στην κοιλότητα του καλουπιού.

Στο σχήμα 2.12 παρουσιάζεται μια απλή περίπτωση σφυρηλάτησης κλειστής μήτρας με προεξοχή.



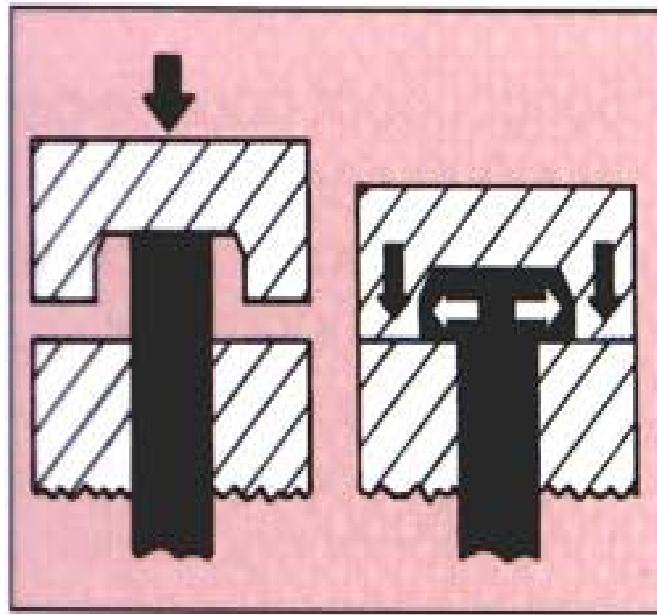
Σχήμα 2.12 : Απεικόνιση σφυρηλάτησης κλειστής μήτρας με προεξοχή.(1) Απαραμόρφωτη θέση, (2) Θέση ενδιάμεσης παραμόρφωσης, (3) Τελική θέση σχηματισμού.

Αναφέρουμε επίσης συνοπτικά ότι υπάρχει και η λεγόμενη περιστροφική σφυρηλάτηση, κατά την οποία έχουμε ορισμένα καλύτερα και βελτιωμένα τελικά χαρακτηριστικά προϊόντος σε συγκεκριμένη κατηγορία όμως. Εδώ, το τεμάχιο προσαρμόζεται πάνω σε μία επίπεδη επιφάνεια- πλάκα και από την άνω μεριά υπάρχει μία ταλαντευόμενη μήτρα με κωνική επιφάνεια .Η κατεργασία είναι μία επαλληλία περιστροφής και συμπίεσης με αποτέλεσμα το επιθυμητό.

2.3 ΚΑΛΟΥΠΙΑ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ

Τα διάφορα καλούπια σφυρηλάτησης φτιάχνονται ως διμερή. Αυτή είναι και η βασική αρχή για την κατασκευή τους. Η αναμενόμενη μορφή – γεωμετρία του τεμαχίου σε κάθε φάση της κατεργασίας συνεπάγεται και τον κατάλληλο και ειδικό σχεδιασμό του εκάστοτε καλουπιού. Οι αρχές κατασκευής τους έχουν ως κύριο στόχο : 1) Την ευκολία της ροής του υλικού μέσα στο καλούπι και 2) Την ευκολία της απομάκρυνσης του τεμαχίου από το καλούπι.

Στο σχήμα 2.13 που φαίνεται αμέσως μετά, βλέπουμε την άνω και κάτω μήτρα-καλούπι σε εγκάρσια τομή, μίας περίπτωσης σφυρηλάτησης.



Σχήμα 2.13 : Εγκάρσια τομή καλουπιών σφυρηλάτησης.

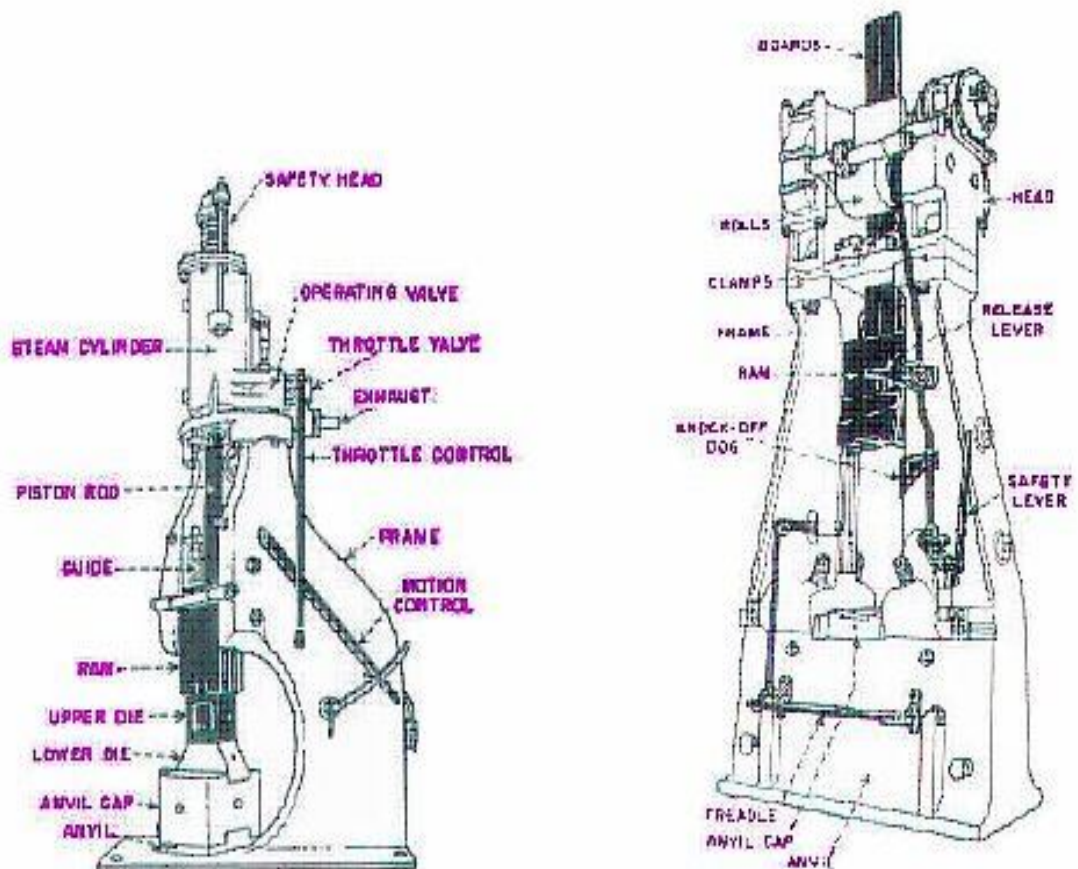
Τέλος, όπως ήδη έχουμε αναφέρει, υπάρχουν πολλές παράμετροι για την επιλογή της γεωμετρίας του καλουπιού, όπως η κωνικότητα κάποιας ή κάποιων πλευρών του τελικού τεμαχίου καθώς και η καμπυλότητα, η οποία παίζει σπουδαίο ρόλο επίσης.

2.4 ΜΗΧΑΝΕΣ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ

2.4.1 ΣΦΥΡΕΣ

Οι σφύρες είναι εργαλειομηχανές σφυρηλάτησης που παράγουν ακαριαία κρουστικό φορτίο το οποίο και προκαλεί την πλαστική παραμόρφωση του αντικειμένου προς κατεργασία. Οι σφύρες διακρίνονται στις ακόλουθες κατηγορίες: 1) Σφύρες πίπτουσας μάζας, 2) Σφύρες αέρα, 3) Σφύρες ατμού. Στην πρώτη περίπτωση, η μάζα προσεγγίζει το επιθυμητό ύψος, συνήθως μηχανικά. Στην δεύτερη περίπτωση, η μάζα επιταχύνεται μέσω πεπιεσμένου αέρα και φτάνει την επιθυμητή ταχύτητα, η οποία και θα προκαλέσει και την παραμόρφωση του υλικού. Τέλος στις σφύρες ατμού, η διαδικασία γίνεται με ατμό αντί για αέρα.

Στο σχήμα 2.14 διακρίνουμε σφύρες πίπτουσας μάζας όπου φαίνονται και τα βασικότερα μέρη από τα οποία αποτελούνται.



Σχήμα 2.14 : Σφύρες πίπτουσας μάζας.

Η σφυρηλάτηση πίπτουσας μάζας μπορεί και παράγει μία μεγάλη ποικιλία σχημάτων και μεγεθών των προϊόντων και με αρκετά απλή διαδικασία. Αναφέρουμε πάντως ότι μειονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι το γεγονός ότι συχνότατα απαιτείται τελική διαδικασία επεξεργασίας του τεμαχίου, καθώς δεν προκύπτουν ακριβείς ανοχές στις διαστάσεις με αυτήν την μέθοδο. Στο Σχήμα 2.15 διακρίνουμε τη φωτογραφία μίας σφύρας πίπτουσας μάζας, που λειτουργεί με πνευματικό σύστημα πεπιεσμένου αέρα για την ανύψωση της μάζας στο άνω σημείο. Υπάρχουν αρκετών τύπων τέτοιες σφύρες στην εποχή μας καθώς ολοένα και μεγαλύτερη ποικιλία προϊόντων ανακύπτει από τις ανάγκες του μάρκετινγκ και της μορφής της παγκοσμιοποιημένης οικονομίας.



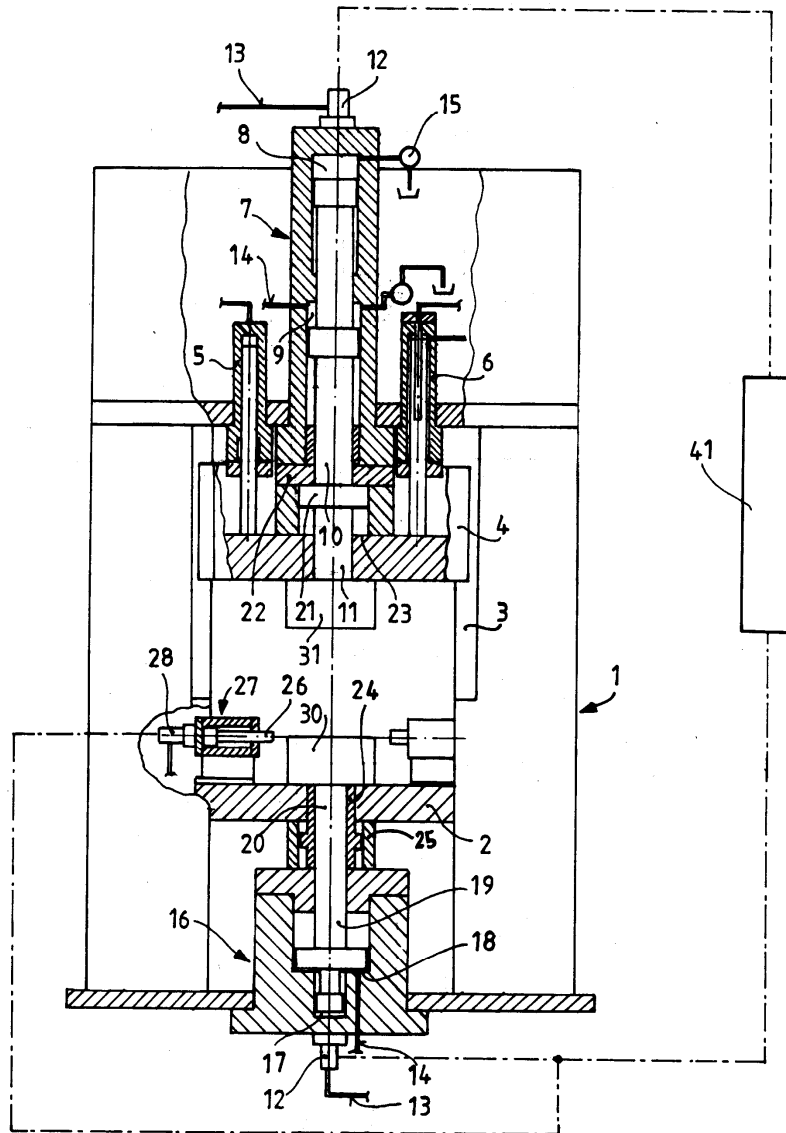
Σχήμα 2.15 : Σφύρα πίπτουσας μάζας με πνευματικό σύστημα πεπιεσμένου αέρα.

2.4.2 ΠΡΕΣΕΣ

Οι πρέσες είναι μηχανές σφυρηλάτησης όπως και οι σφύρες. Όμως οι πρέσες, πλεονεκτούν σε σχέση με τις σφύρες λόγω του ότι τα τεμάχια παρουσιάζουν μεγαλύτερη ομοιομορφία παραμορφώσεων, καθώς και σε ότι μειώνεται το ενδεχόμενο να εμφανιστούν αστοχίες. Τέλος, άλλο πλεονέκτημά τους είναι ότι μπορούν να παραχθούν πιο πολύπλοκης γεωμετρίας τεμάχια. Διαχωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες, τις μηχανικές πρέσες και τις υδραυλικές πρέσες. Αυτός ο διαχωρισμός γίνεται όχι μόνο βάση της κατασκευής τους, αλλά κυρίως για τον τρόπο που λαμβάνει την δύναμή του το έμβολο ώστε να διατελέσει την πλαστική παραμόρφωση του τεμαχίου.

Οι υδραυλικές πρέσες σταματούν με την εφαρμογή του οριακού φορτίου της κατεργασίας. Από την άλλη μεριά, οι μηχανικές πρέσες σταματούν με το τέλος της διαδρομής και εμφανίζουν μία πολύ μεγάλη δύναμη στο τέλος αυτής (stroke –bound system). Τέλος αναφέρουμε και τις περιπτώσεις σφυρηλάτησης με κυλινδρικά ράουλα (roll-forging machines). Στο επόμενο σχήμα απεικονίζεται μία υδραυλική πρέσα με όλα τα κύρια μέρη από τα οποία αποτελείται. Η συγκεκριμένη πρέσα, είναι πρέσα ψυχρής σφυρηλάτησης. Οι πρέσες, όπως ήδη αναφέραμε, χαρακτηρίζονται από μεγάλη ακρίβεια κατεργασίας, γεγονός που μπορεί να περιορίσει αρκετά την κατεργασία εξάλειψης μικροαστοχιών και λείανσης του τεμαχίου. Άρα χρειάζεται ιδιαίτερα μεγάλη προσοχή κατά την συντήρηση και επισκευή τους, ώστε να αποφευχθούν τυχόν σφάλματα στην κατεργασία μετέπειτα που θα οφείλονται ίσως και στην όχι και τόσο καλή συναρμολόγηση μετά την συντήρηση.

Fig.1



Σχήμα 2.16 : Υδραυλική πρέσα για κατεργασία ψυχρής σφυρηλάτησης.

2.5 ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΠΑΝΩ ΣΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΚΑΛΟΥΠΙΩΝ ΚΑΙ ΤΕΜΑΧΙΩΝ

Κωνικότητα

Η κωνικότητα έχει δύο βασικούς στόχους. Πρώτον την εύκολη απομάκρυνση του προϊόντος από την μήτρα και δεύτερον την ομαλοποίηση και διευκόλυνση της ροής του υλικού. Η κωνικότητα μπορεί να κατηγοριοποιηθεί στα εξής:

A) Εξωτερική, B) Εσωτερική, Γ) Τυπική κωνικότητα , Δ) Κωνικότητα προσαρμογής

Τιμές της γωνίας κωνικότητας είναι 3° - 10° . Οι μεγαλύτερες τιμές παρουσιάζονται για τις εσωτερικές κωνικότητες. Άρα έχουμε ενδεικτικά:

Γωνίες εσωτερικής κωνικότητας: 7° - 10° .

Γωνίες εξωτερικής κωνικότητας: 3° - 5° .

Γραμμή διαχωρισμού

Η γραμμή διαχωρισμού είναι η πιο σημαντική παράμετρος κατά τον σχεδιασμό σφυρήλατων προϊόντων. Οι συνιστώσες της γραμμής διαχωρισμού που επηρεάζουν άμεσα και σημαντικά στο σχεδιασμό είναι η μορφή και η θέση της. Στη γραμμή διαχωρισμού εφάπτονται- συναντώνται τα δύο μέρη του καλουπιού. Για την συμφέρουσα θέση της έχουμε αρκετούς λόγους για την επιλογή της, όπως ο βαθμός χρησιμοποίησης του κατεργάσιμου υλικού, η διαδικασία αποκοπής του προεκτάματος, η ροή του υλικού, η μελέτη και το κόστος κατασκευής του καλουπιού και ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται κατά την κατεργασία. Υπάρχουν και άλλοι παράγοντες βέβαια τεχνικής και οικονομικής φύσεως που επιδρούν.

Η μορφή της μπορεί να είναι ευθεία ή τεθλασμένη στο χώρο. Στην πρώτη περίπτωση όταν έχουμε συμμετρικές μορφές αντικειμένων και στη δεύτερη όταν έχουμε πολυπλοκότερες μορφές. Βασικά και σημαντικά είναι τα εξής στοιχεία για τη γραμμή διαχωρισμού: Πρώτον πρέπει να βρίσκεται σε ένα επίπεδο, δεύτερον να διευκολύνει τη ροή του υλικού στη μήτρα, και τέλος να παρέχει αρκετά καλό προέκταμα.

Νεύρα

Νεύρα είναι τα μέρη εκείνα του τεμαχίου –προϊόντος τα οποία κείνται σε επίπεδο κάθετο προς εκείνο της γραμμής διαχωρισμού. Κοινή γραμμή πλεύσης είναι ότι δεν θα πρέπει να κατασκευάζονται υπερμεγέθη νεύρα, ώστε να μην έχουμε υπερβολική αύξηση του βάρους. Υπάρχουν όμως και κάποιοι παράγοντες όπως οι συνθήκες κατεργασίας και η γεωμετρία, που περιορίζουν τα παραπάνω. Υπάρχουν τέσσερα τυποποιημένα είδη νεύρων στα πιο διαδεδομένα σφυρήλατα αντικείμενα:

- 1) Νεύρο σε κεντρικό τμήμα του τεμαχίου.
- 2) Νεύρο στο άκρο του τεμαχίου και με γραμμή διαχωρισμού στην κορυφή.
- 3) Νεύρο στο άκρο του τεμαχίου και με γραμμή διαχωρισμού στη βάση.
- 4) Νεύρο στο άκρο του τεμαχίου και με γραμμή διαχωρισμού στο μέσο του.

Καμπυλότητα- εμβυθίσεις- κορμοί

Η καμπυλότητα των νεύρων και των κορμών θα πρέπει να παρέχει την μεγαλύτερη δυνατή διάρκεια ζωής του καλουπιού, φροντίζοντας παράλληλα να διασφαλίζονται και οι δύο σημαντικές παράμετροι που ανεφέραμε, δηλαδή η ευκολία της ροής του υλικού μέσα στο καλούπι και η ευκολία απομάκρυνσης του τεμαχίου από αυτό. Οι εμβυθίσεις προκύπτουν στα αρχικά και ενδιάμεσα στάδια κατεργασίας. Για να γίνει αυτό, γίνεται χρήση επιπλέον στοιχείων μέσα στο καλούπι, τα οποία δρουν σαν κάποιο είδος εμβόλου σε τοπική κλίμακα. Οι εμβυθίσεις στη συνέχεια είναι αυτές που σχηματίζουν τους κορμούς και τα νεύρα.

Προέκταμα

Τυπικές τιμές για τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του είναι οι εξής:

- ⇒ Τελικό πάχος προεκτάματος: Περίπου 3% του μέγιστου πάχους του σφυρήλατου τεμαχίου.
- ⇒ Μήκος εξόδου προεκτάματος: Περίπου πενταπλάσιο του τελικού πάχους προεκτάματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΟΔΟΝΤΩΤΟΙ ΤΡΟΧΟΙ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΥΣ ΟΔΟΝΤΩΤΟΥΣ ΤΡΟΧΟΥΣ.

Οι οδοντωτοί τροχοί είναι τα στοιχεία εκείνα των μηχανών τα οποία έχουν εφαρμογή στην μετάδοση κίνησης καθώς και ισχύος μέσω κατάλληλης αλληλουχίας συνεργαζόμενων τέτοιων στοιχείων σε κατάλληλη διάταξη. Οι οδόντες είναι εσοχές και προεξοχές στην έξω επιφάνεια των οδοντωτών τροχών τέτοιες ώστε η εμπλοκή τους να εξασφαλίζει την μετάδοση κίνησης και ισχύος.

Η μεταφορά ισχύος σε μια βιομηχανική εγκατάσταση αποτελεί αλληλουχία πολλών μετατροπών. Αυτές οι μετατροπές διαμορφώνουν έναν τελικό συντελεστή ισχύος του εκάστοτε μηχανισμού μετάδοσης κίνησης. Το πρώτο στάδιο μιας τυπικής διαδικασίας μετάδοσης ισχύος είναι η μείωση (ή σπανιότερα η αύξηση) των στροφών του κινητήρα που συχνά συνδυάζεται με την αλλαγή του άξονα περιστροφής της μεταδιδόμενης κίνησης. Η μετατροπή της κίνησης που παράγεται από την ενέργεια που μεταδίδει ένας κινητήρας στον άξονά του γίνεται από τους μειωτήρες στροφών, οι οποίοι, συχνά, αποτελούνται από οδοντωτούς τροχούς. Οι οδοντωτοί τροχοί, σαν μηχανισμοί αλλαγής του αριθμού των στροφών εξασφαλίζουν ασφάλεια λειτουργίας, ακριβή σχέση μετάδοσης, δυνατότητα υπερφόρτισης, μεγάλη διάρκεια ζωής και τέλος μεγάλο βαθμό απόδοσης. Ο άξονας περιστροφής της κίνησης που μεταδίδει ο μειωτήρας μπορεί να είναι παράλληλος, τεμνόμενος ή ασύμβατος με τον άξονα του κινητήρα. Οι οδοντωτοί τροχοί που είναι τοποθετημένοι στο κέλυφος ενός μειωτήρα μπορούν να είναι διαφόρων τύπων, όπως μετωπικοί, κωνικοί, κοχλιωτοί ή το λεγόμενο σύστημα ατέρμονα κοχλία – οδοντωτού τροχού.

Εν κατακλείδι, οδοντωτός τροχός ή γρανάζι ονομάζεται κάθε μεταλλικός δίσκος που στην περιφέρειά του φέρει εσοχές και εξοχές, δηλαδή δόντια, σε κανονικά διαστήματα. Είναι κατασκευασμένος από μέταλλο ή οποιοδήποτε άλλο ανθεκτικό υλικό, σπανιότερα βέβαια. Όλα τα δόντια ενός τροχού πρέπει να έχουν την ίδια μορφή, δηλαδή ίδιο ύψος, πάχος και μεταξύ τους απόσταση. Συνήθως, στους οδοντωτούς τροχούς διακρίνονται η πλήμνη, ο κορμός και η οδοντωτή στεφάνη ή οδόντωση. Σε μερικές κατασκευές η πλήμνη δεν ξεχωρίζει από τον κορμό. Η εμπλοκή δύο οδοντωτών τροχών γίνεται με την είσοδο των δοντιών του ενός στα αυλάκια του άλλου, οπότε όταν ο ένας τροχός τεθεί σε κίνηση, τίθεται και ο άλλος.

Στο σχήμα που έπεται (Σχήμα 3.1) βλέπουμε ένα ζεύγος τοξωτών κωνικών οδοντωτών τροχών. Χαρακτηριστικό αυτού του είδους οδοντωτών τροχών είναι ότι οι οδόντες είναι καμπυλωμένοι και ευρίσκονται υπό κλίση ως προς την ακτίνα, στην μέση διάμετρο.



Σχήμα 3.1 : Τοξωτοί κωνικοί οδοντωτοί τροχοί σε συνεργασία.

Οι άξονες γύρω από τους οποίους περιστρέφονται δύο οδοντωτοί τροχοί σε συνεργασία μπορεί να είναι είτε παράλληλοι σε κάποια απόσταση χ , είτε τεμνόμενοι υπό γωνία γ , είτε τέλος, ασύμβατοι σε κάποια απόσταση και υπό κάποια γωνία.

Οι οδοντωτοί τροχοί, τους τρεις τελευταίους αιώνες έχουν ευρεία εφαρμογή στις περισσότερες μηχανολογικές κατασκευές από την βιομηχανία, στην ναυτιλία και ναυπηγική και από την αεροναυπηγική στην διαστημική τεχνολογία. Συνηθέστερη δε εφαρμογή τους είναι στα συστήματα μετάδοσης κίνησης των τροχοφόρων οχημάτων από τα συμβατικά αυτοκίνητα έως την τεχνολογία αιχμής των αγωνιστικών αυτοκινήτων στα διάφορα παγκόσμια κλίμακας πρωταθλήματα. Παλαιότερες ιστορικά αναφορές στους οδοντωτούς τροχούς προέρχονται από την Ελλάδα και τους μηχανικούς της κατά τον 3^ο π.Χ αιώνα κατά την περίοδο της σχολής της Αλεξάνδρειας. Ο Αρχιμήδης επίσης συνέβαλε στο να αναπτύξει κάποιες εφαρμογές τους. Τρανό παράδειγμα των τότε αιώνων είναι ο περίφημος μηχανισμός των Αντικυθήρων, ο οποίος σύμφωνα με επιστήμονες χρησιμοποιούνταν για αστρονομικούς υπολογισμούς.

3.2 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ

Όπως ήδη αναφέραμε, υπάρχουν διάφορα είδη οδοντωτών τροχών και υπάρχουν επίσης κάποιοι παράγοντες που καθορίζουν το είδος τους για την κάθε τεχνολογική λύση που προκύπτει στις μηχανολογικές κατασκευές. Όπως καταλαβαίνει κανείς, στις μηχανολογικές κατασκευές υπάρχουν οικονομικοί, χρονικοί και γεωμετρικοί περιορισμοί οι οποίοι κάνουν μεγαλύτερη την ανάγκη της διαφοροποίησης των ειδών των οδοντωτών τροχών που θα χρησιμοποιούνται στην κάθε περίπτωση.

Στην προηγούμενη παράγραφο αναφέραμε για τις σχετικές θέσεις των αξόνων των τροχών και στο σημείο αυτό θα αναφέρουμε ότι αυτή η θέση είναι που καθορίζει την διαφοροποίηση των οδοντωτών τροχών σε είδη, που θα χρησιμοποιηθούν σε κάθε διαφορετική περίπτωση. Οπότε διακρίνουμε τα εξής είδη οδοντωτών τροχών:

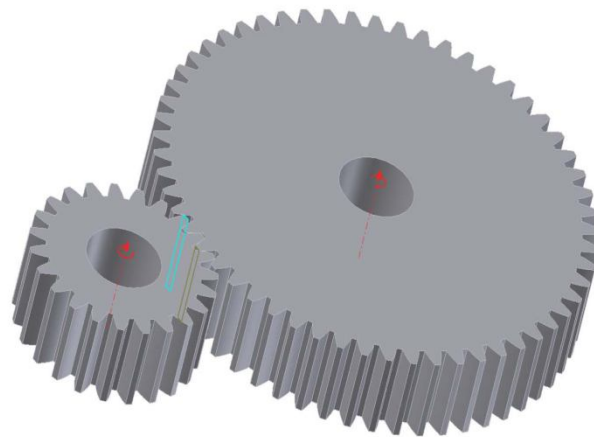
A) Μετωπικοί (με ευθεία ή ελικοειδή οδόντωση) ή κυλινδρικοί.

B) Κωνικοί

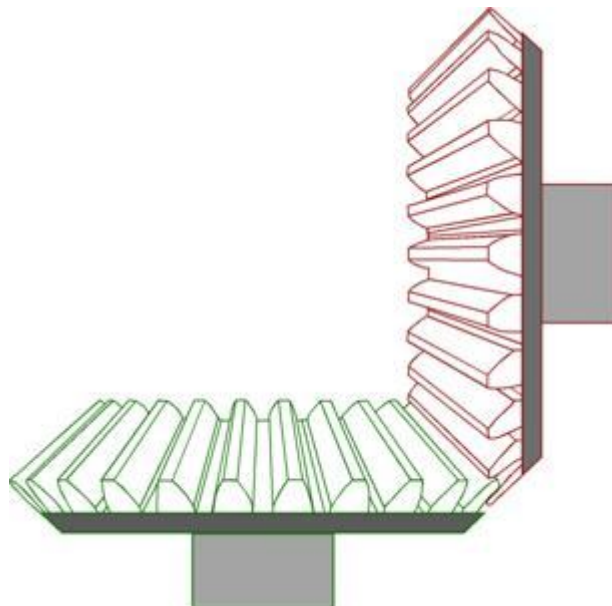
Γ) Ελικοειδείς ασυμβάτων αξόνων

Δ) Σύστημα ατέρμονα κοχλία-κορώννας.

Στα παρακάτω σχήματα, 3.2 έως 3.4, βλέπουμε την μορφή που έχει κάθε κατηγορία οδοντωτών τροχών που αναφέραμε.



Σχήμα 3.2 : Ζεύγος μετωπικών οδοντωτών τροχών με ευθεία οδόντωση.



Σχήμα 3.3 : Ζεύγος κωνικών οδοντωτών τροχών.

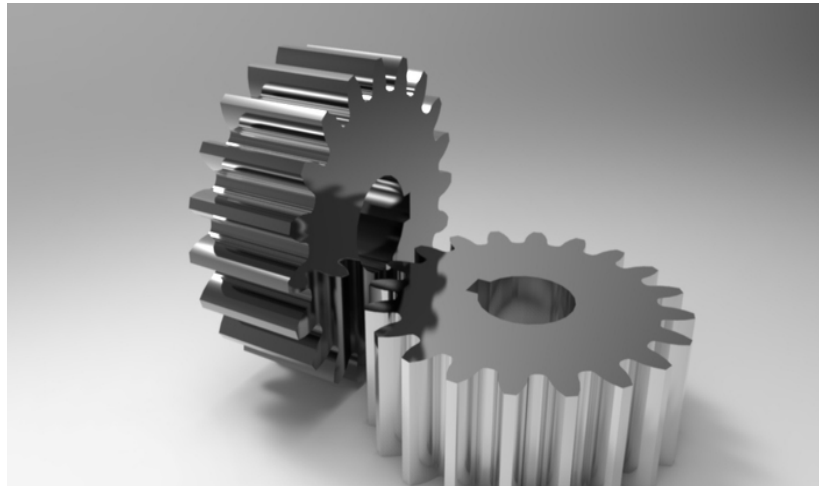


Σχήμα 3.4 : Σύστημα ατέρμονα κοχλία- κορώνας.

3.2.1 ΜΕΤΩΠΙΚΟΙ ΟΔΟΝΤΩΤΟΙ ΤΡΟΧΟΙ

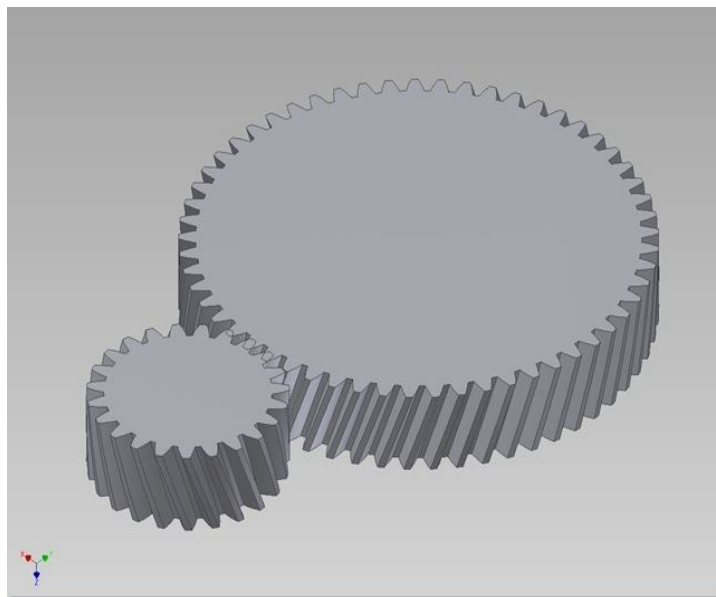
Οι μετωπικοί οδοντωτοί τροχοί, μεταδίδουν την κίνηση μεταξύ παραλλήλων αξόνων. Η αρχική μεταλλική επιφάνεια από την κατασκευή της οποίας προκύπτουν έχει κυλινδρική μορφή. Τα δόντια τους μπορεί να είναι παράλληλα, κεκλιμένα προς τον άξονα τους, ή να σχηματίζουν γωνία μεταξύ τους. Τα παράλληλα τοποθετημένα γρανάζια μπορούν να είναι σε επαφή είτε εξωτερικά είτε εσωτερικά. Τα γρανάζια στα οποία έχουμε κεκλιμένη οδόντωση, η κεκλιμένη οδόντωση μπορεί να είναι είτε απλή είτε διπλή. Τα γρανάζια με κεκλιμένα ή ελικοειδή δόντια πλεονεκτούν των γραναζιών με ευθεία δόντια, επειδή έχουν μεγαλύτερη αντοχή. Επίσης προκαλούν λιγότερο θόρυβο κατά τη λειτουργία τους, γεγονός πολύ σημαντικό στις σύγχρονες μηχανολογικές κατασκευές του 21^{ου} αιώνα.

Οι μετωπικοί τροχοί με ευθεία οδόντωση επειδή έχουν την τάση να προκαλούν θόρυβο, δεν συνηθίζεται να χρησιμοποιούνται για περιπτώσεις όπου έχουμε μεταφορά μεγάλων ισχύων. Αυτό γιατί δημιουργούν μεγάλα δυναμικά φορτία. Ο βαθμός επικάλυψής τους είναι από ένα μέχρι δύο. Στους μετωπικούς τροχούς ελικοειδούς οδόντωσης, ο βαθμός επικάλυψης είναι μεγαλύτερος, αλλά προκύπτουν άλλα μειονεκτήματα. Αυτά έχουν να κάνουν με το γεγονός ότι η γωνία της έλικας βο, προκαλεί αξονικό φορτίο το οποίο μετεφέρεται στις σταθερές εδράσεις των ατράκτων. Συνεπώς τίθεται θέμα αντοχής και αξιοπιστίας. Στο επόμενο σχήμα βλέπουμε ένα ζεύγος μετωπικών οδοντωτών τροχών με ευθεία οδόντωση τα οποία έχουν σχεδιαστεί με τη βοήθεια προγράμματος cad απο ηλεκτρονικό υπολογιστή(Σχήμα 3.5).



Σχήμα 3.5: Μετωπικοί οδοντωτοί τροχοί με ευθεία οδόντωση.

Στο σχήμα 3.6 απεικονίζεται ζεύγος μετωπικών οδοντωτών τροχών με ελικοειδή οδόντωση σε συνεργασία, με τη βοήθεια του προγράμματος Autodesk Inventor 2010.



Σχήμα 3.6: Μετωπικοί οδοντωτοί τροχοί με ελικοειδή οδόντωση.

Οι μετωπικοί οδοντωτοί τροχοί παίζουν σπουδαίο ρόλο στην μεταφορά ισχύος στις σύγχρονες μηχανολογικές κατασκευές. Τα συστήματα μειωτήρων στροφών απαντώνται σχεδόν παντού, από μικρούς ηλεκτροκινητήρες(πλαστικοί συνήθως οδοντωτοί τροχοί) μέχρι

σε μειωτήρες στα κιβώτια ταχυτήτων αυτοκινήτων και σε μεγαλύτερους μειωτήρες στα συστήματα μετατροπής κίνησης πλοίων.

3.2.2 ΚΩΝΙΚΟΙ ΟΔΟΝΤΩΤΟΙ ΤΡΟΧΟΙ

Οι κωνικοί οδοντωτοί τροχοί έχουν το χαρακτηριστικό ότι μεταφέρουν ισχύ από ατράκτους με τέμνουσα διεύθυνση και όχι με παράλληλη όπως οι μετωπικοί. Συνηθέστερα χρησιμοποιούνται αυτοί οι οποίοι προέρχονται από άξονες τεμνόμενους υπό γωνία 90 μοιρών. Οι διαφορετικές γωνίες αξόνων (γωνιακές μεταδόσεις) χρησιμοποιούνται σπάνια καθώς το κέλυφος του μηχανισμού τους θα είναι αρκετά πολύπλοκο και συνεπώς θα υπάρχει δυσκολία κατασκευής. Μία εφαρμογή των κωνικών οδοντωτών τροχών είναι και η αρχή λειτουργίας των διαφορικών των περισσοτέρων οχημάτων. Εφαρμογή των κωνικών τροχών βρίσκεται και σε μεγάλο αριθμό άλλων μηχανολογικών κατασκευών και σε αρκετούς μειωτήρες, όπου κάποιες από τις βαθμίδες μπορεί να φέρουν τέτοιους οδοντωτούς τροχούς.

Οι κωνικοί οδοντωτοί τροχοί χωρίζονται στις εξής κατηγορίες:

1) Κωνικοί τροχοί με ευθείς οδόντες.

Είναι ο πιο απλός τύπος τέτοιων οδοντωτών τροχών. Χρησιμοποιούνται για μικρές ταχύτητες αρχικού κώνου(έως 4 m/sec) και σε περιπτώσεις όπου η ομοιομορφία μετάδοσης της κίνησης και φορτίων καθώς και ο χαμηλός θόρυβος δεν είναι από τα βασικά ζητούμενα στην κατασκευή.

2) Κωνικοί τροχοί ZEROL.

Μοιάζουν αρκετά με τους πρώτους, αλλά διαφέρουν στο ότι οι οδόντες τους είναι καμπυλωμένοι. Επίσης η κλίση των οδόντων ως προς την ακτίνα, στη μέση διάμετρο, είναι μηδέν.

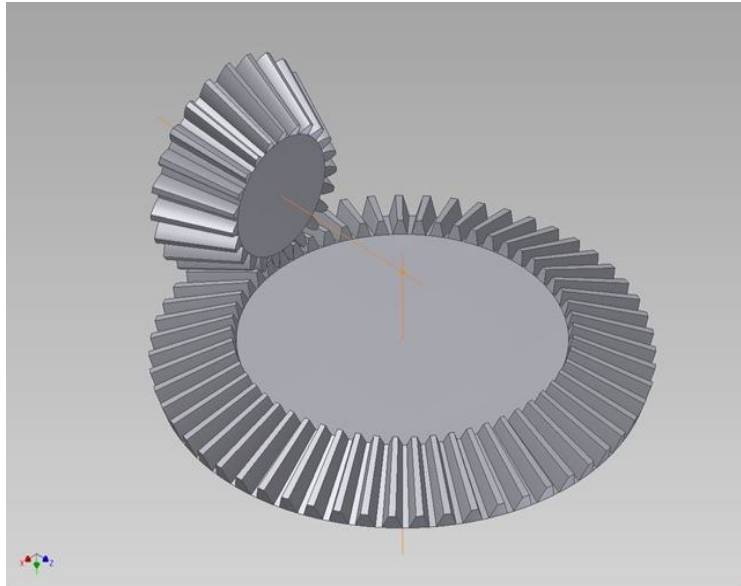
3) Τοξωτοί κωνικοί τροχοί.

Σε αυτό το είδος, οι οδόντες είναι καμπυλωμένοι και έχουν κλίση ως προς την ακτίνα στην μέση διάμετρο. Με αυτόν τον τρόπο επιτρέπεται η ομάλη συνεργασία σε όλη τη διάρκεια του τμήματος επαφών. Χρησιμοποιούνται και είναι κατάλληλοι για περιπτώσεις όπου υπάρχουν υψηλές ταχύτητες περιστροφής και όταν υπάρχει ανάγκη μείωσης θορύβου και ταλαντώσεων.

4) Υποειδείς τροχοί.

Οι άξονές τους είναι ασύμβατοι και σε μικρή απόσταση(μετάθεση). Έχουν κοινά χαρακτηριστικά με τους τοξωτούς τροχούς, αλλά με τη διαφορά ότι οι αρχικές τους επιφάνειες είναι υπερβολοειδείς και όχι κωνικές. Είναι χρήσιμοι σε περιπτώσεις όπου απαιτείται μικρός θόρυβος και μεγάλη ομοιομορφία κίνησης. Η πιο κοινή χρήση τους είναι στα διαφορικά των αυτοκινήτων.

Στο επόμενο σχήμα(Σχήμα 3.7), φαίνονται κωνικοί οδοντωτοί τροχοί με ευθείς οδόντες, σε Autodesk Inventor 2010 μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή.



Σχήμα 3.7: Απεικόνιση ζεύγους κωνικών οδοντωτών τροχών ευθείας οδόντωσης σε Autodesk Inventor 2010.

Ακολουθεί το σχήμα 3.8 όπου βλέπουμε έναν κωνικό οδοντωτό τροχό υποειδούς τύπου σε κοντινό πλάνο, με τη βοήθεια του οποίου μπορούμε να διακρίνουμε και τις λεπτομέρειες τις κατασκευαστικές αλλά και τις μορφολογικές που περιγράψαμε αμέσως πιο πριν στην ανάλυσή μας.



Σχήμα 3.8: Υποειδής κωνικός οδοντωτός τροχός.

3.2.3 ΕΛΙΚΟΕΙΔΕΙΣ ΟΔΟΝΤΩΤΟΙ ΤΡΟΧΟΙ ΑΣΥΜΒΑΤΩΝ ΑΞΟΝΩΝ

Οι ελικοειδείς οδοντωτοί τροχοί, έχουν κυλινδρική μορφή και έχουν επίσης ασύμβατους άξονες σε απόσταση a . Ακόμη, η γωνία που σχηματίζουν μεταξύ τους οι άξονες είναι δ . Για την γωνία αυτή ισχύει: $\delta = \beta_{01} + \beta_{02}$, όπου β_{01} και β_{02} είναι οι κλίσεις των οδόντων τους ως προς τους άξονες των τροχών. Σε γενικές γραμμές ισχύει: $\beta_{01} = \beta_{02}$. Όμως όταν οι άξονες των τροχών είναι παράλληλοι, τότε προκύπτει ότι $\delta = 0$. Σε αυτήν την περίπτωση οι τροχοί μεταπίπτουν σε μετωπικούς με ελικοειδή οδόντωση, οπότε θα ισχύει η σχέση $\beta_{02} = -\beta_{01}$ και θα έχουμε έναν τροχό με δεξιόστροφη και έναν με αριστερόστροφη οδόντωση.

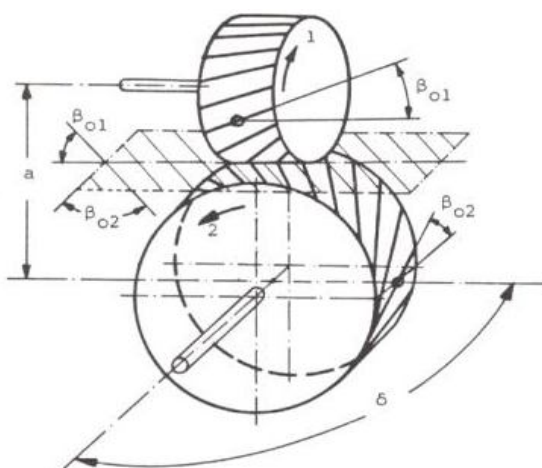
Οι οδόντες των εν συνεργασία ελικοειδών τροχών ασυμβάτων αξόνων έχουν σημειακή επαφή και στη συνέχεια μεταπίπτει σε γραμμική μετά την αύξηση της φθοράς των κατατομών. Οι δυνάμεις και τα φορτία που μπορούν να μεταφέρουν είναι μικρά και αυτός είναι και ο λόγος που αυτοί οι οδοντωτοί τροχοί έχουν εφαρμογή στην μεταφορά κίνησης και όχι στην μεταφορά ισχύος. Ο τρόπος κατασκευής τους είναι ο ίδιος με αυτόν των συνήθων μετωπικών ελικοειδών τροχών. Οι διαφορές επί αυτού βρίσκονται στον τρόπο συναρμολόγησής τους και συνεργασίας τους σε μία βαθμίδα.

Όταν γίνεται μελέτη των ελικοειδών τροχών ασυμβάτων αξόνων, μή λαμβάνοντας υπόψιν τις τριβές, τότε η ελάχιστη ταχύτητα ολισθήσεως συμβαίνει όταν οι κλίσεις των δοντιών των τροχών είναι ίσες. Στην περίπτωση που οι κλίσεις των δοντιών των τροχών είναι άνισες, τότε την μεγαλύτερη κλίση πρέπει να έχει ο κινητήριος τροχός.

Ακόμη, σε αυτού του είδους τους τροχούς, δεν υφίσταται ιδιαίτερη τυποποίηση. Διάφοροι κατάλληλοι συνδυασμοί τροχών μπορούν να δώσουν πολύ καλά αποτελέσματα μεταδόσεως κινήσεως. Εξαιτίας της σημειακής επαφής των δοντιών, θα πρέπει ο βαθμός επικαλύψεως να είναι μεγαλύτερος του δύο. Το αποτέλεσμα αυτό είναι δυνατόν να γίνει μέσω μικρής γωνίας εξελιγμένης και με οδόντες μεγάλου ύψους.

Δύο ελικοειδείς τροχοί ασυμβάτων αξόνων μπορούν να συνεργαστούν όταν έχουν στις κάθετες τομές των οδόντων τους ίδια module m_n και ίδιες γωνίες α_{0n} . Από την γνωστή θεωρία από τους μετωπικούς ελικοειδείς τροχούς, υφίσταται η μετωπική και η κάθετη τομή. Με αρχή την γνώση μας για τον αριθμό των οδόντων του πινιόν και του συνεργαζόμενου τροχού, προκύπτουν σχέσεις υπολογισμού των αρχικών διαμέτρων, των σχέσεων μετάδοσης, της απόστασης των αξόνων και των φανταστικών αριθμών οδόντων. Γνωρίζοντας ακόμα ότι το πινιόν γρανάζι μίας βαθμίδας μεταφέρει μία τιμή στεπτικής ροπής, μπορούμε να υπολογίσουμε την αναπτυσσόμενη περιφερειακή δύναμη του πινιόν. Αυτό βοηθάει στο να γίνει μία πιο εξειδικευμένη ανάλυση και υπολογισμός δυνάμεων χωρίς αλλά και με την περίπτωση επίδρασης τριβών.

Στο σχήμα 3.9 που ακολουθεί βλέπουμε μία βαθμίδα ελικοειδών τροχών ασυμβάτων αξόνων, όπως και κάποια από τα μεγέθη που αναλύσαμε στην αρχή της υποπαραγράφου.

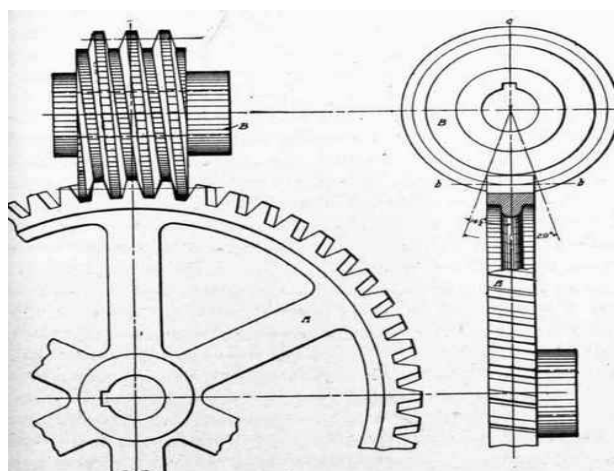


Σχήμα 3.9 : Παρουσίαση βαθμίδας ελικοειδών τροχών ασυμβάτων αξόνων.

3.2.4 ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΤΕΡΜΟΝΑ ΚΟΧΛΙΑ – ΚΟΡΩΝΑΣ

Το σύστημα του ατέρμονα κοχλία και κορώνας, αποτελείται από ένα ατέρμονα κοχλία, που είναι στην ουσία ένας κοχλίας κινήσεως κατάλληλου σπειρώματος μίας ή περισσότερων αρχών, ο οποίος συνεργάζεται με έναν οδοντωτό τροχό. Αυτή η συνεργασία γίνεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε η συνεργασία τους να μοιάζει με τον τρόπο εμπλοκής των επιφανειών τριβής ενός κοχλία με το περικόχλιό του. Οι άξονές τους είναι συνήθως κάθετοι, αν και είναι δυνατόν να σχηματίζουν και άλλη γωνία.

Το σύστημα αυτό είναι κατάλληλο για μεταφορά μεγάλων φορτίων και για μεγάλες σχέσεις μετάδοσης, έως και 200:1, με μία βαθμίδα. Ο ατέρμονας κοχλίας είναι ο κινητήριος τροχός όταν το σύστημα χρησιμοποιείται σαν μειωτήρας στροφών. Όταν μερικές φορές το σύστημα χρησιμοποιείται για αύξηση στροφών, τότε η κορώνα είναι ο κινητήριος τροχός. Αναλόγως του συντελεστή τριβής και της γωνίας ελικώσεως των δοντιών, το σύστημα μπορεί να παραμένει σταθερό, δηλαδή η κορώνα να μην μπορεί να νικήσει τον ατέρμονα κοχλία. Στο σχήμα 3.10 βλέπουμε ένα τέτοιο σύστημα.



Σχήμα 3.10 : Σύστημα ατέρμονα κοχλία-κορώνας.

3.3 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΚΑΙ ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ

3.3.1 ΜΕΤΡΟ ΟΔΟΝΤΩΣΕΩΣ(MODULE)

Όταν έχουμε οδοντωτό τροχό δεδομένης ακτίνας αρχικού κύκλου r_0 και δεδομένου βήματος t_0 , θα ισχύει η σχέση:

$$\pi d_0 = Z t_0$$

όπου d_0 είναι η διάμετρος αρχικού κύκλου και είναι αυτονόητο ότι είναι διπλάσια από την ακτίνα αρχικού κύκλου.

Συνεπώς, μέτρο οδοντώσεως ή module ονομάζεται ο λόγος του βήματος t_0 προς τον αριθμό π , δηλαδή ισχύει η σχέση:

$$m = \frac{t_0}{\pi} = \frac{d_0}{Z}$$

Εναλλακτικά, όπως βλέπουμε και από την προηγούμενη σχέση, το μέτρο οδοντώσεως ταυτίζεται και με τον λόγο της αρχικής διαμέτρου του οδοντωτού τροχού προς τον αριθμό των δοντιών του Z . Το βήμα οδοντώσεως είναι ένα από τα χαρακτηριστικότερα και βασικότερα μεγέθη των οδοντωτών τροχών και τυποποιείται σύμφωνα με τον ακόλουθο πίνακα. Οι τιμές του είναι σε χιλιοστά (mm). Το module έχει άλλον έναν βασικό λόγο για τον οποίο θεωρείται τόσο σημαντικό, καθώς αποτελεί ένα κριτήριο για την δυνατότητα συνεργασίας δύο οδοντωτών τροχών. Ακολουθεί αυτός ο πίνακας (πίνακας 3.1).

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 3.1 : Τυποποίηση τιμών module σε χιλιοστά για οδόντες δι' εξειλιγμένης.

Στο σημείο αυτό σκόπιμο είναι να αναφέρουμε συνοπτικά κάποια στοιχεία συμπληρωματικά με το μέτρο οδοντώσεως. Σε όλες τις τυποποιημένες οδοντώσεις το ύψος της κεφαλής είναι ίσο με 1 m ενώ το ύψος ποδός θεωρείται ίσο με 1.25 έως 1.30 m. Είναι βασικό για το σύγχρονο μηχανολόγο μηχανικό να γνωρίζει σε μεγάλο βαθμό τα παραπάνω

μεγέθη, ώστε να αποφεύγεται το χάσιμο χρόνου καθώς και λάθη συστηματικά πάνω σε μία μελέτη με οδοντώσεις.

Για να υπάρξει συνεργασία, χωρίς προβλήματα, οδοντωτών τροχών θα πρέπει να εφαρμοστεί ύπαρξη χάρης των κατατομών S_e στον αρχικό κύκλο, αλλά και ακτινική χάρη. Η χάρη S_e των κατατομών στον αρχικό κύκλο δημιουργείται με την ελάττωση του πάχους των οδόντων και την αύξηση του διακένου τους. Με αυτόν τον τρόπο, το άθροισμά τους είναι το βήμα t_0 . Συνεπώς σε κάθε περίπτωση, είναι γνωστό το πάχος του οδόντος στον αρχικό κύκλο και με δεδομένο αυτό το πάχος υπολογίζεται το πάχος του οδόντος σε οποιαδήποτε άλλη ακτίνα. Αυτά είναι αρκετά σημαντικά στοιχεία στους υπολογισμούς καθώς από εδώ ξεκινάνε πολλά από τα δεδομένα που θα καταλήξουν στα πιο σημαντικά γεωμετρικά μεγέθη όπως το module ή μέτρο οδοντώσεως.

3.3.2 ΕΞΕΙΛΙΓΜΕΝΗ ΚΑΜΠΥΛΗ ΚΑΙ ΒΑΘΜΟΣ ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΩΣ ΜΕΤΩΠΙΚΩΝ ΤΡΟΧΩΝ

Γενικά περί εξειλιγμένης οδοντωτών τροχών.

Εξειλιγμένη καμπύλη ονομάζεται η τροχιά που διαγράφει ένα σημείο ευθείας γραμμής κυλιομένης χωρίς ολίσθηση επί της περιφέρειας κύκλου. Προκύπτει ότι η τροχιά επαφών των κατατομών δι' εξειλιγμένης δύο συνεργαζομένων οδοντωτών τροχών(η οποία είναι ευθεία γραμμή) εφάπτεται εσωτερικά των βασικών κύκλων των δύο τροχών.

Συνάρτηση της εξειλιγμένης.

Έστω βασικός κύκλος(O, r_g), με ακτίνα r_g και κέντρο O . Αν G, N σημεία της περιφέρειας του βασικού κύκλου, τότε θα ισχύει η ακόλουθη σχέση:

$$\widehat{GN} = (\varphi + \alpha) r_g$$

όπου φ, α είναι σε ακτίνια(rad).

Η γωνία φ λέγεται συνάρτηση της εξειλιγμένης(involute), ορίζεται μονοσήμαντα από την α ενώ συμβολίζεται με $inv\alpha$ ή ena ως ακολούθως:

$$inv\alpha = ena = \varphi = e\varphi\alpha - \alpha$$

Βαθμός επικάλυψης μετωπικών τροχών

Μήκος επαφών είναι το μήκος τόξου του αρχικού κύκλου το οποίο διανύει η εργαζόμενη πλευρά του οδόντος ενός οδοντωτού τροχού. Ορίζεται από το πρώτο μέχρι και το τελευταίο σημείο επαφής της πλευράς του οδόντος με την πλευρά του άλλου οδόντος κατά την συνεργασία.

Παρατίθεται αμέσως πιο κάτω σχετική θεωρητική ανάλυση περί του βαθμού επικαλύψεως. Για την κάλυψη και κατανόηση των συμβολισμών της παρακάτω ανάλυσης θα παραθέσουμε και το σχετικό σχήμα (σχήμα 3.13), όπου φαίνεται με λεπτομέρεια κάθε παράμετρος αυτών που αναλύουμε.

Βλέπουμε λοιπόν τις διάφορες θέσεις της κατατομής M1 του οδόντος του τροχού 1 όπως συνεργάζεται με την κατατομή N2 του οδόντος του τροχού 2. Η συνεργασία γίνεται κατά μήκος του τμήματος επαφών AB. Όταν η κατατομή M1 διέρχεται από το αρχικό σημείο κυλίσεως C, δημιουργείται η ακτίνα καμπυλότητας MM' που τέμνει τον αρχικό κύκλο του τροχού 1 στο σημείο F. Από την άλλη πλευρά, όταν η κατατομή N2 διέρχεται από το σημείο C, φτιάχνεται η ακτίνα καμπυλότητας της εξειλιγμένης στο σημείο N που είναι εφαπτομένη του βασικού κύκλου. Όταν ο τροχός 1 στραφεί κατά γωνία θ_1 , τότε το σημείο F θα συμπίσει με το σημείο C και άρα το σημείο 1' θα συμπίσει με το σημείο 1 και το σημείο 1 θα συμπίσει με το 1". Θα έχουμε δηλαδή την εξής σχέση:

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

Από τις ιδιότητες της εξειλιγμένης λαμβάνουμε:

$$\overline{FM} = \widehat{1'1} = r_{g1}\theta_1 = r_{o1}\sigma\nu\alpha_0\theta_1$$

Όμως ισχύει επίσης:

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

Άρα θα έχουμε:

$$\overline{FM} = \widehat{FC} \sigma\nu\alpha_0$$

Όταν το σημείο M πάρει την θέση B τότε η ακτίνα καμπυλότητας MM' θα συμπίσει με την τροχιά επαφών και θα λάβει την θέση BK. Άρα αφού το F θα συμπίσει με το C και η κατατομή 1M θα βρεθεί στην θέση 1"B, από την ισότητα των τετραπλεύρων MM'O₁1 και BK O₁1" και από όσα συμπεράναμε για τις θέσεις της κατατομής M1 προκύπτει ότι το σημείο B' είναι το συμμετρικό του σημείου B ως προς το σημείο C. Συνεπώς ισχύει:

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

Αυτό γιατί είναι τμήματα της ακτίνας καμπυλότητας τα οποία περιλαμβάνονται μεταξύ του κύκλου κεφαλής και του αρχικού κύκλου. Άρα ισχύει:

$$\overline{BC} = \widehat{CF'} \sigma \nu \alpha_0$$

Με παρόμοιο τρόπο, φαίνεται και αποδεικνύεται ότι το σημείο A' είναι συμμετρικό του A ως προς το σημείο C. Αποδεικνύεται με τον ίδιο λογισμό ότι:

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

Με πρόσθεση κατά μέλη των δύο προηγούμενων σχέσεων, προκύπτουν τα εξής:

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

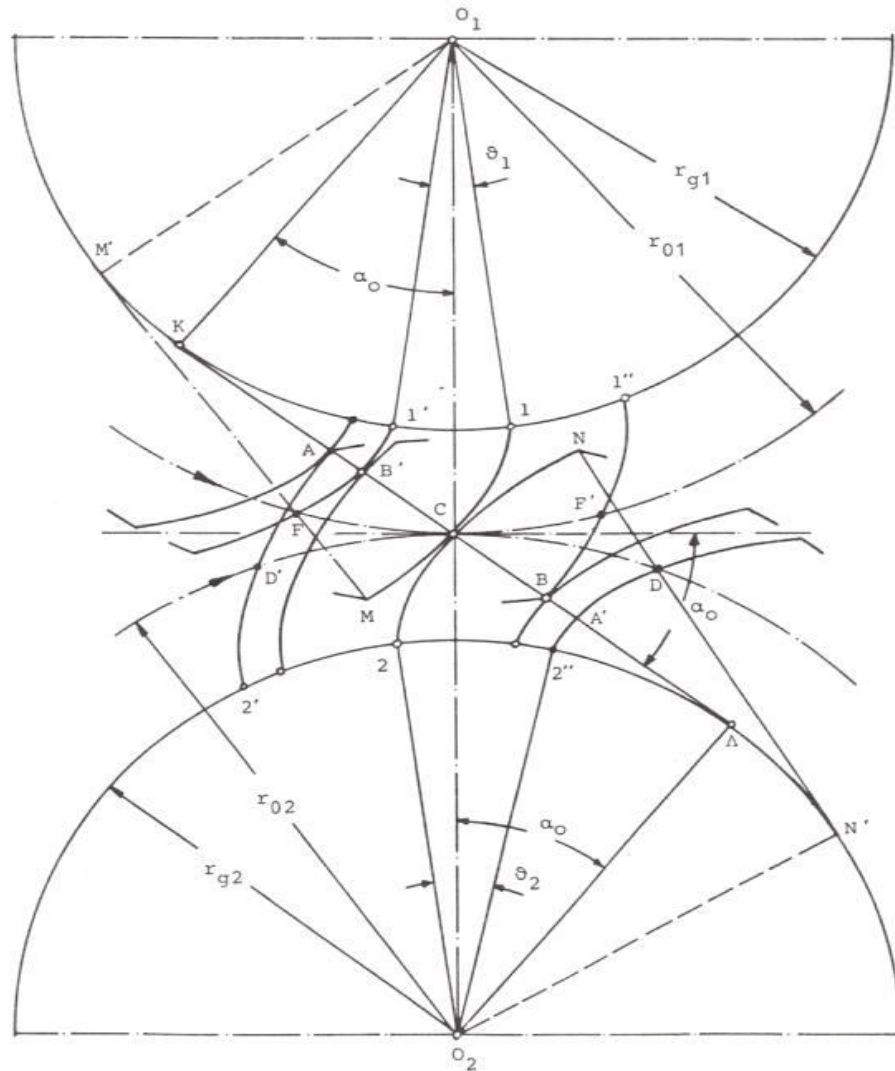
Άρα

$$AB = e_0 \sigma \nu \alpha_0$$

Βαθμός επικάλυψης ή διάρκεια επαφής ε ονομάζεται ο λόγος του μήκους επαφών e_0 ως προς το βήμα του αρχικού κύκλου t_0 , δηλαδή δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

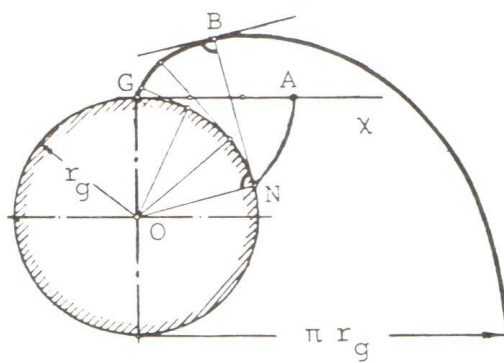
$$\varepsilon = e_0 / t_0$$

Όλα τα παραπάνω γίνονται κατανοητά όπως και προαναφέραμε, μέσω του σχήματος 3.13 που ακολουθεί:



Σχήμα 3.11 : Αναπαράσταση συνεργαζόμενων κατατομών.

Στο σχήμα 3.14 βλέπουμε την εξειλιγμένη καμπύλη που ήδη έχουμε αναλύσει παραπάνω.

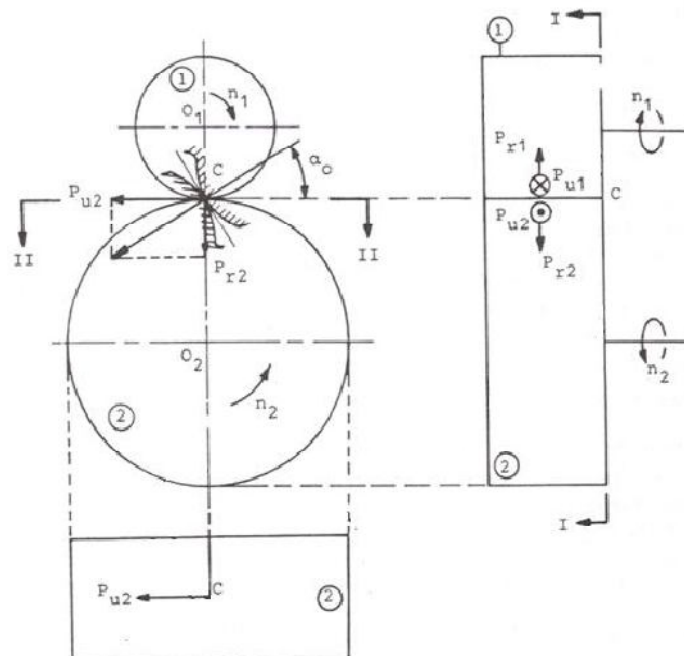


Σχήμα 3.12 : Εξειλιγμένη καμπύλη.

3.4 ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΣΤΟΥΣ ΟΔΟΝΤΩΤΟΥΣ ΤΡΟΧΟΥΣ

Στους οδοντωτούς τροχούς, υπάρχει η γενική πεποίθηση ότι πρέπει να υπολογιστούν με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια οι δυνάμεις που επενεργούν πάνω τους. Αυτό διότι πέρα από λόγους αντοχής, οι οποίοι είναι και προφανείς, είναι σύνηθες φαινόμενο κατά τον σχεδιασμό ενός μειωτήρα στροφών να χρειάζεται και υπολογισμός άλλων σημαντικών παραμέτρων όπως για παράδειγμα ο υπολογισμός των κατάλληλων εδράνων κυλίσεως ή ρουλεμάν. Αυτή η διαδικασία πρέπει να αναχθεί στην γνώση των ειδών και μεγεθών των δυνάμεων που ασκούνται πάνω στους οδοντωτούς τροχούς.

Όπως βλέπουμε και στο σχήμα 3.15, η ολική δύναμη P που ασκείται στον οδόντα του τροχού 2, αναλύεται σε δύο συνιστώσες: την ακτινική, P_{r2} και την περιφερειακή, P_{u2} . Οι δυνάμεις αυτές εφαρμόζονται στο σημείο C (σημείο κυλίσεως).



Σχήμα 3.13 : Δυνάμεις στους μετωπικούς οδοντωτούς τροχούς ευθείας οδόντωσης.

Εάν η ισχύς που μεταφέρεται είναι N και n_1 οι στροφές του πινιόν, τότε η στρεπτική ροπή στο πινιόν θα είναι:

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

Στην παραπάνω σχέση, όπου $\omega_1 = 2 \pi n_1$, που είναι η γωνιακή ταχύτητα του πινιόν. Για τον υπολογισμό της στρεπτικής ροπής ισχύει:

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

Όπου :

M_d = η στρεπτική ροπή του τροχού ($Kp \cdot cm$)

N = η ισχύς που μεταφέρεται από την βαθμίδα (PS) και

n = ο αριθμός στροφών του οδοντωτού τροχού (rpm)

Η περιφερειακή δύναμη της βαθμίδας δίνεται από την σχέση:

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

Όπου:

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

Όσον αφορά την ακτινική δύναμη, δίνεται από τον τύπο:

$$P_r = P_u \tan(a_0)$$

Επομένως, η συνολική δύναμη P που ασκείται στον οδοντωτό τροχό δίνεται από την σχέση:

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

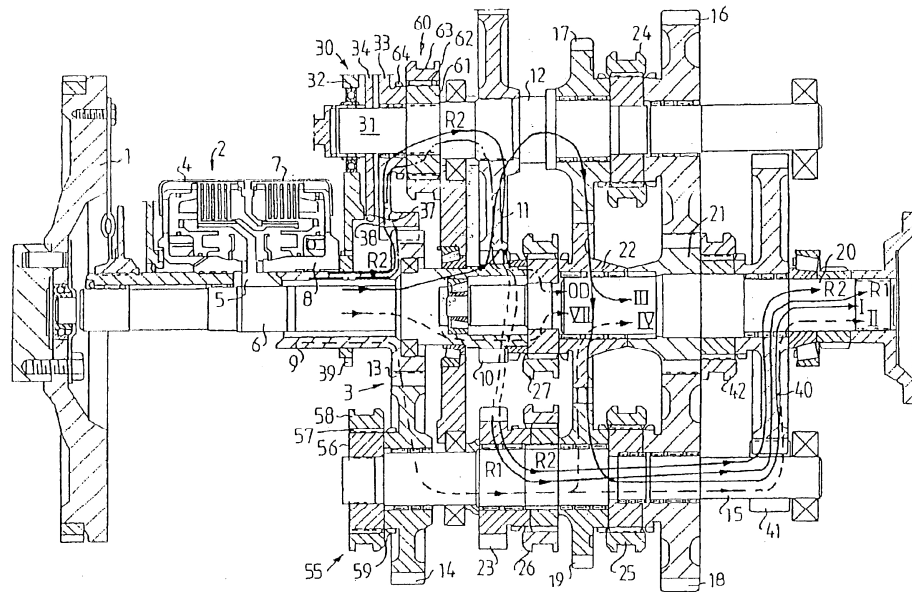
Άρα εν κατακλείδι, στην προηγούμενη σχέση, αν αντικαταστήσουμε τις ισότητες των P_u και P_r , θα καταλήξουμε στην ακόλουθη σχέση:

$$P = \sqrt{\left(2 \frac{M_{d1}}{d_{o1}}\right)^2 + \left(2 \frac{M_{d1}}{d_{o1}} \tan a_0\right)^2} = \sqrt{\left(2 \frac{M_{d2}}{d_{o2}}\right)^2 + \left(2 \frac{M_{d2}}{d_{o2}} \tan a_0\right)^2}$$

3.5 ΜΕΙΩΤΗΡΕΣ ΣΤΡΟΦΩΝ

Οι μειωτήρες στροφών είναι κατάλληλες διατάξεις οδοντωτών τροχών οι οποίες επιτυγχάνουν τη μετάδοση κίνησης μεταξύ ατράκτων. Επίσης επιτυγχάνουν τη μείωση των στροφών από την είσοδο στην έξοδό τους. Οι διάφοροι τύποι μειωτήρων σχεδιάζονται με γνώμονα την εκάστοτε μετατροπή της κίνησης και αξιοποιούν διάφορους τύπους γραναζιών ώστε να επιτύχουν τη ζητούμενη σχέση μετάδοσης. Άρα, σε έναν ευθύγραμμο μειωτήρα που είναι μειωτήρας παράλληλων αξόνων χρησιμοποιούνται μετωπικά γρανάζια, ενώ αντίθετα στους γωνιακούς μειωτήρες χρησιμοποιούνται κωνικά γρανάζια ή ζεύγη ατέρμονα κοχλία –

κορώνας. Στο ακόλουθο σχήμα, σχήμα 3.16, φαίνεται μία λεπτομερής σχηματική απεικόνιση ενός μειωτήρα (κιβωτίου ταχυτήτων) ενός οχήματος.



Σχήμα 3.14 : Μειωτήρας στροφών οχήματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ

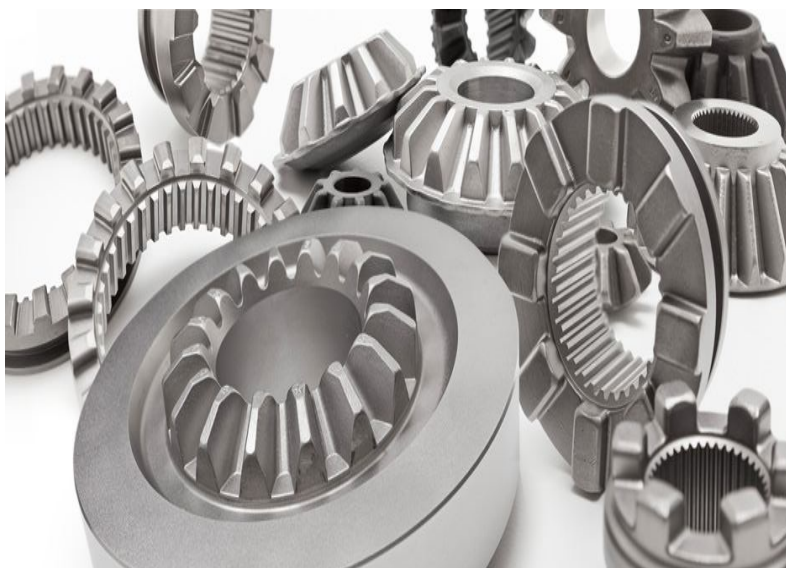
4.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Για την τελική παραγωγή και διαμόρφωση οδοντωτών τροχών, εφαρμόζονται διάφορες μέθοδοι όπως φρεζάρισμα, στίλβωση, λείανση(κατεργασίες αποβολής υλικού), διαδικασίες χύτευσης, σφυρηλάτηση, διέλαση, κονιομεταλλουργία και άλλες. Κατά την χύτευση μπορούν να παραχθούν τόσο τα κενά των οδοντωτών τροχών, όσο και ολόκληρο το σχήμα τους με κάποια προσέγγιση.

Όλες οι παραπάνω διαδικασίες αφορούν περιπτώσεις όπου δεν υπάρχει μεγάλη φθορά στους οδοντωτούς τροχούς και όπου απαιτούνται μικρές σχέσεις μετάδοσης και χαμηλές απαιτήσεις μεταφοράς ισχύος. Όταν απεναντίας έχουμε μεγαλύτερες απαιτήσεις σε αυτούς τους τρεις παράγοντες που προαναφέραμε, τότε γίνεται χρήση σφυρηλάτησης συνήθως. Κατά την σφυρηλάτηση παράγονται όλα τα τελικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά(πέρα από αυτά που αναφέρονται στη θεωρία των στοιχείων μηχανών), τα οποία και χαρακτηρίζονται στο τέλος αποδεκτά ή μη.

Παράλληλα όμως, η τεχνογνωσία στις μεθόδους σφυρηλάτησης σήμερα, επιτρέπει την κατασκευή οδοντωτών τροχών και εξαρτημάτων τους με διάφορες μεθόδους σφυρηλάτησης ακριβείας. Η σφυρηλάτηση αυτού του είδους έχει πολλά καλά σημεία σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους διαμόρφωσης των οδοντωτών τροχών, διότι επιτρέπει την κατασκευή τους χωρίς την ανάγκη προεξοχής και άρα χωρίς την ανάγκη για επιπλέον κατεργασίες. Επομένως, η εφαρμογή αυτής της μεθόδου παρέχει σημαντικά οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη εξαιτίας της εξοικονόμησης υλικού. Επίσης και λόγω και της υψηλότερης παραγωγικότητας που συντελείται. Ακόμη, οι οδοντωτοί τροχοί που παράγονται με σφυρηλάτηση ακριβείας έχουν καλύτερες μηχανικές ιδιότητες σε σχέση με εκείνους των συμβατικών μεθόδων. Αυτό διότι η μικροδομή των τροχών με σφυρηλάτηση ακριβείας παραμένει σταθερή εξαιτίας της απουσίας εκτεταμένων κατεργασιών διαμόρφωσης.

Στο επόμενο σχήμα, το σχήμα 4.1, παρουσιάζονται προϊόντα σφυρηλάτησης ακριβείας, τα οποία παράγονται τα τελευταία χρόνια. Όπως διαπιστώνουμε και από την εικόνα, εντύπωση προκαλεί η ιδιαίτερα υψηλή ακρίβεια με την οποία παράγονται τεμάχια με αυτού του είδους τις μεθόδους. Επιπλέον, με την διαδικασία της σφυρηλάτησης ακριβείας εισέρχεται και ένας παράγοντας που λέγεται ακρίβεια σφυρηλάτησης και στην ουσία αποτελεί ένα δείκτη με τον οποίο καθορίζεται εάν απαιτούνται επιπλέον κατεργασίες ή φινίρισμα των επιφανειών σφυρηλάτησης.



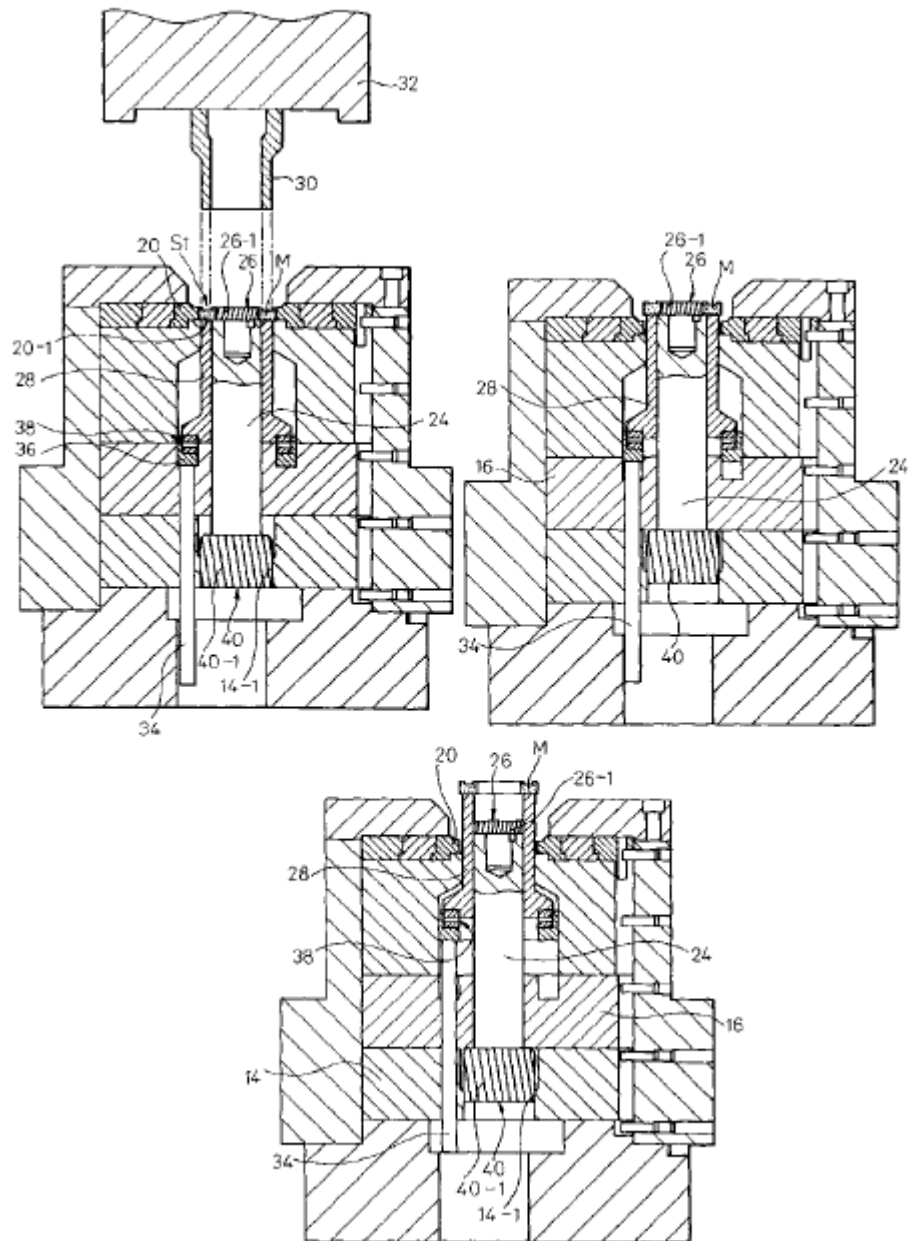
Σχήμα 4.1: Προϊόντα σφυρηλάτησης ακριβείας.

4.2 ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗ ΜΕΤΩΠΙΚΩΝ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ

Όπως ήδη έχουμε αναλύσει σε προηγούμενο κεφάλαιο, το αρχικό δοκίμιο τοποθετείται στην μήτρα και με την άσκηση πίεσης από το έμβολο που είναι συνδεδεμένο με την πρέσα, αρχίζει να παραμορφώνεται πλαστικά μέχρι να γίνει ολοκληρωτική πλήρωση της μήτρας. Με την βοήθεια της δύναμης του εμβόλου, η μήτρα οδηγείται προς τα κάτω καθοδηγούμενη από τον εξωλκέα. Λόγω του γεγονότος ότι η μήτρα είναι κλειστή, δεν παρουσιάζεται προεξοχή. Επίσης σε περιπτώσεις όπου η θέρμανση του τεμαχίου είναι υψηλότερη από κάποια επίπεδα, τότε ο οδοντωτός τροχός δεν παίρνει εντελώς πιστά την τελική του μορφή. Υπάρχουν κάποιες μικρές συνήθως ατέλειες στην περιοχή της οδόντωσης.

Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται μία μηχανή σφυρηλάτησης μετωπικών οδοντωτών τροχών με ελικοειδή οδόντωση. Πιο συγκεκριμένα, για την παραγωγή ενός οδοντωτού δακτυλιοειδούς οδοντωτού τροχού με εσωτερική και εξωτερική οδόντωση. Σε γενικές γραμμές οι μετωπικοί οδοντωτοί τροχοί είναι πιο εύκολο να σφυρηλατηθούν λόγω γεωμετρίας. Από την άλλη πλευρά, αυτοί οι οδοντωτοί τροχοί, με ελικοειδή οδόντωση μπορούν να παραχθούν με την μέθοδο της σφυρηλάτησης εφόσον υπάρχουν οι κατάλληλες διαμορφώσεις που τους επιτρέπουν την απομάκρυνση-εξώθηση από την μήτρα.

Ακόμη, είναι εύλογο να αναφέρουμε ότι οι μετωπικοί οδοντωτοί τροχοί αλλά και γενικότερα οι οδοντωτοί τροχοί που παράγονται με τη μέθοδο της σφυρηλάτησης, κατασκευάζονται από κράματα αλουμινίου, κράματα χάλυβα, και από χαλκό. Ακόμη μπορεί να χρησιμοποιηθεί τιτάνιο καθώς και άλλα κράματα τα οποία είναι ανθεκτικά στη θερμοκρασία. Ακολουθεί το σχήμα που προαναφέραμε.

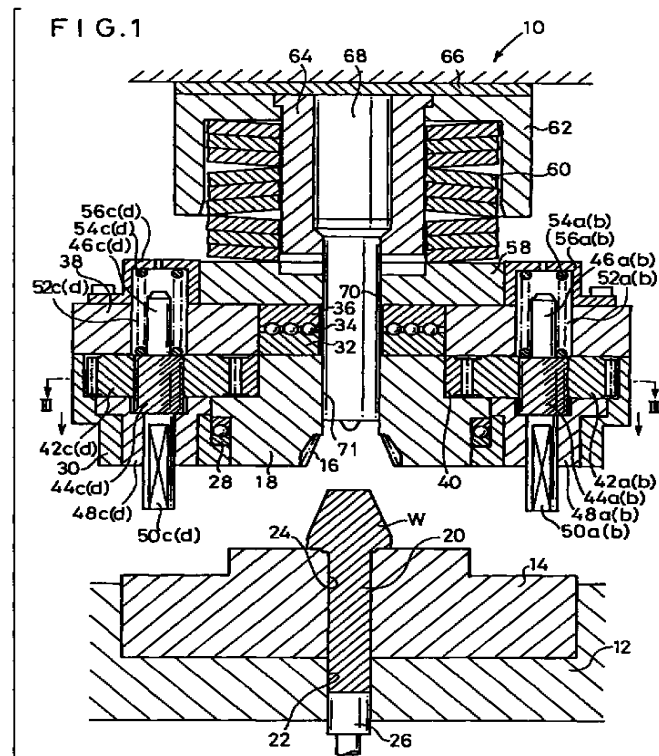


Σχήμα 4.2: Μηχανή σφυρηλάτησης οδοντωτού τροχού με ελικοειδή οδόντωση.

4.3 ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗ ΚΩΝΙΚΩΝ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ

Το αρχικό δοκίμιο εισέρχεται στην μηχανή σφυρηλάτησης και μετά το πέρας της κατεργασίας λαμβάνεται το τελικό τεμάχιο το οποίο έχει και την λεγόμενη προεξοχή. Η προεξοχή, είναι παρούσα σχεδόν πάντα. Σε περιπτώσεις όμως όπου η μήτρα σφυρηλάτησης είναι τελείως κλειστή, τότε μπορούν να παραχθούν οδοντωτοί τροχοί χωρίς προεξοχή. Η προεξοχή, μπορεί παρόλα αυτά, σε περίπτωση ύπαρξής της να απομακρυνθεί με την κατεργασία της τόννευσης, αλλά και με άλλες κατεργασίες. Ακόμη, εφόσον η σύγχρονη τεχνολογία και συνεπώς η ακρίβεια στην παραγωγή ακριβέστατων και αξιόπιστων μηχανών κατεργασιών υφίστανται σήμερα, είναι εφικτό να αποφευχθεί η απομάκρυνση του ελαττωματικού υλικού στο πέρας της διαδικασίας. Για την παραγωγή με μεγαλύτερη ακρίβεια

προτιμάται η διαδικασία της ψυχρής σφυρηλάτησης. Αυτό διότι όταν υπάρχει ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιακών πεδίων ώστε να ρέει καλύτερα το υλικό κατά την παραμόρφωση, τότε είναι πλιό ευάλωτο στην ακανόνιστη παραμόρφωση σε τμήματά του όπου αναπτύσσονται μεγάλες τάσεις. Στο σχήμα που φαίνεται ακολούθως, το σχήμα 4.3, βλέπουμε μία μηχανή θερμής σφυρηλάτησης κωνικών οδοντωτών τροχών, όπου διακρίνονται τα διάφορα μέρη από τα οποία αποτελείται καθώς και η μήτρα.

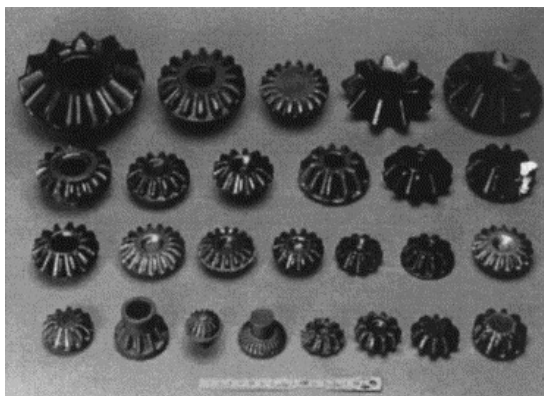


Σχήμα 4.3 : Μηχανή σφυρηλάτησης κωνικών οδοντωτών τροχών.

Αξίζει να αναφέρουμε ότι υπάρχει και το ενδεχόμενο να σφυρηλατηθούν οδοντωτοί τροχοί, χωρίς να έχουν την τελική τους μορφή, δηλαδή πλήρως διαμορφωμένες τις οδοντώσεις τους. Αυτό συμβαίνει σε αρκετές περιπτώσεις όπου χρησιμοποιούνται οδοντωτοί τροχοί για μεταφορά ισχύος, όπως στα κιβώτια ταχυτήτων οχημάτων. Ειδικότερα σε πλιό σύνθετης μορφής οδοντώσεις όπως αυτές με ελικοειδή οδόντωση, αποφεύγεται να σφυρηλατηθούν μέχρι την τελική τους μορφή λόγω προφανών δυσκολιών. Αντί αυτού προτιμάται πολλές φορές να διαμορφωθούν μέσω θερμής σφυρηλάτησης κλειστής μήτρας. Παράλληλα αφήνεται ακατέργαστη η περιοχή όπου θα βρίσκεται η οδόντωση με σκοπό να προκύψει με μετέπειτα κατεργασία η οδόντωση αυτή.

Στην σύγχρονη εργοστασιακή παραγωγή οδοντωτών τροχών μεταφοράς ισχύος και για κάποιους λόγους που αναλύσαμε στην προηγούμενη παράγραφο, είναι καίριας σημασίας να υπάρχει οικονομία χρόνου και χρήματος. Άρα είναι πλιό ιδανικό να παράγονται οδοντωτοί τροχοί χωρίς οδόντες. Η διαδικασία φινιρίσματος είναι σε αρκετές περιπτώσεις ακριβή

διαδικασία οπότε αποφεύγεται και η σφυρηλάτηση, με σκοπό το οικονομικό κέρδος. Ακολουθεί το σχήμα 4.4 όπου εικονίζονται κωνικοί οδοντωτοί τροχοί διαφόρων γεωμετρικών χαρακτηριστικών.



Σχήμα 4.4 : Κωνικοί οδοντωτοί τροχοί διαφόρων γεωμετρικών χαρακτηριστικών.

4.4 ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει αλλά και βάσει κοινής λογικής, προκύπτει το συμπέρασμα ότι οι διάφορες κατεργασίες για την διαμόρφωση υλικού προς παραγωγή οδοντωτών τροχών έχουν μειονεκτήματα αλλά και πλεονεκτήματα, τα οποία άλλοτε επικαλύπτονται και άλλοτε όχι μεταξύ τους. Για παράδειγμα η χύτευση έχει το πλεονέκτημα της μεγάλης ποσότητας υλικού σε συνδυασμό με το γεγονός ότι μπορούν να παραχθούν αρκετά σύνθετα υλικά από αυτή την κατεργασία. Όμως οι οδοντωτοί τροχοί συνήθως σφυρηλατούνται και στη συνέχεια ολοκληρώνονται με φινιρίσμα.

Η σφυρηλάτηση ακριβείας αποτελεί την διαδικασία για την παραγωγή μίας αμιγούς καθαρής μορφής τεμαχίου κατά τις συνθήκες που επικρατούν κατά την σφυρηλάτηση. Ένα καθαρό σχήμα ή μορφή τεμαχίου, σηματοδοτεί την μη ύπαρξη της ανάγκης επιπλέον διαδικασιών κατεργασιών ή φινιρίσματος της επιφάνειας σφυρηλάτησης. Άρα συμπεραίνουμε ότι κατά την ακριβή σφυρηλάτηση, δεν απαιτούνται δευτερεύουσες κατεργασίες για την ολοκλήρωση του προϊόντος. Μπορεί να απαιτηθούν όμως, σε περιπτώσεις όπου καθίσταται αναγκαία η ύπαρξη ειδικών διαμορφώσεων όπως για παράδειγμα η ύπαρξη οπών. Στην περίπτωση όπου υπάρχει η ανάγκη για την επιπλέον κατεργασία, το ανώτερο μίας από τις επιφάνειες σφυρηλάτησης, τότε κάνουμε λόγο για τον όρο σφυρηλάτηση σχεδόν καθαρού σχήματος. Είναι δηλαδή προφανές ότι στην περίπτωση που δεν είναι ολοκληρωμένες στην πλειοψηφία τους οι πλευρές του τεμαχίου, τότε δεν μπορούμε και να μιλάμε για σφυρηλάτηση καθαρού σχήματος.

Ένας άλλος όρος που μας παραπέμπει στην σφυρηλάτηση ακριβείας είναι και ο όρος σφυρηλάτηση κλειστής ανοχής. Αυτή η ονοματολογία προέχεται από το γεγονός ότι πρέπει να είναι δυνατή η επίτευξη των σωστών ανοχών και επομένως διαστάσεων του τεμαχίου. Επιτυγχάνεται μέσω θερμής σφυρηλάτησης.

Στο επόμενο σχήμα, το σχήμα 4.5, βλέπουμε την εικόνα ενός κωνικού οδοντωτού τροχού που παρασκευάστηκε με την μέθοδο της σφυρηλάτησης ακριβείας. Διακρίνουμε με λεπτομέρεια την ακριβή και λεία μορφή των επιφανειών καθώς και της οδόντωσης.



Σχήμα 4.5: Σφυρήλατος οδοντωτός τροχός ακριβείας.

Περιγραφή διαδικασίας

Στη σύγχρονη εποχή, όπου ακμάζουν οι τεχνολογίες ηλεκτρονικών υπολογιστών, έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι διαμόρφωσης CAD οι οποίες και εφαρμόζονται στις διάφορες κατεργασίες. Οι υπολογιστικές αυτές μέθοδοι εφαρμόζονται στη θερμή σφυρηλάτηση ακριβείας των μετωπικών, των σπειροειδών κωνικών και των ελικοειδών οδοντωτών τροχών στις συμβατικές πρέσες. Αυτό είναι και που επιτρέπει στο σχεδιαστή-αναλυτή της μήτρας να εξετάζει λεπτομερώς τις διάφορες λειτουργικές παραμέτρους όπως τα φορτία, τις τάσεις και τα θερμοκρασιακά πεδία στο σχεδιασμό της μήτρας. Οι ακριβείς οδοντωτοί τροχοί με τη διαδικασία της θερμής σφυρηλάτησης έχουν τα ίδια πλεονεκτήματα με τους οδοντωτούς τροχούς κοπής και τους χυτούς οδοντωτούς τροχούς. Και στην περίπτωση αυτή υφίσταται λίγη ή σχεδόν καθόλου απώλεια υλικού, γεγονός πολύ σημαντικό από αρκετές οπτικές γωνίες.

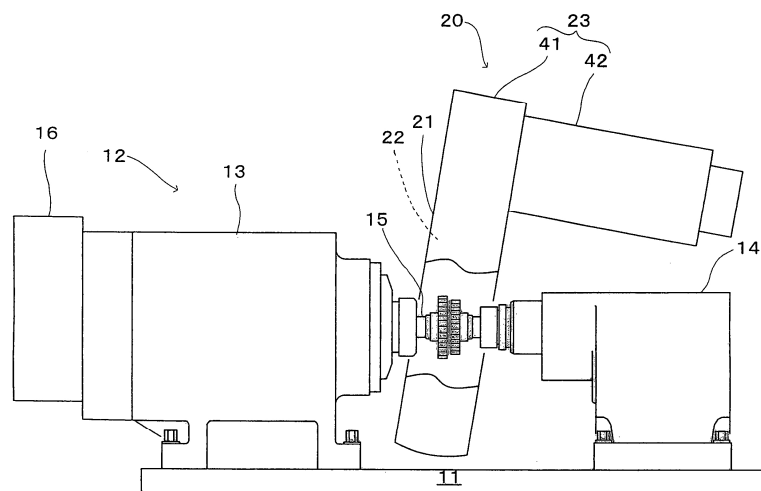
Όπως ήδη αναφέραμε και σε προηγούμενο σημείο μέσα στο κεφάλαιο που εξετάζουμε, η εξοικονόμηση υλικού συνεπάγεται και εξοικονόμηση κόστους. Αυτή η εξοικονόμηση, θα είναι από τη μία του υλικού και από την άλλη της κατεργασίας(εργατοώρες, ηλεκτρικό ρεύμα και άλλα). Ακόμη οι σφυρήλατοι οδοντωτοί τροχοί ακριβείας έχουν το σημαντικό πλεονέκτημα του αυξανόμενου φορτίου. Η επιπλέον αυτή δύναμη στο σχηματισμό της αυξανόμενης κόπωσης οφείλεται στη διαφορετική ροή κόκκων. Από τη μια πλευρά των τροχών κοπής και από την άλλη των σφυρήλατων.

Στην πλειοψηφία οι σφυρήλατοι τροχοί που παράγονται στις μέρες μας είναι σχεδόν καθαρού σχήματος. Οι οδόντες των οδοντωτών τροχών, σφυρηλατούνται με απομάκρυνση του υλικού πέριξ του προφίλ του οδόντα. Οι διάφορες κατεργασίες διαμορφώσεως αρχίζουν με ράβδους χάλυβα που συνήθως περιστρέφονται ενώ γυαλίζονται προκειμένου να βελτιωθεί η επιφάνειά τους. Έπειτα κόβονται στο επιθυμητό και ακριβές βάρος. Το ιδανικό-ακριβές βάρος είναι μείζον, επειδή η ποσότητα του χάλυβα πρέπει να γεμίζει πλήρως τη μήτρα για να παράγεται πλήρως το προφίλ του τροχού. Πριν από τη σφυρηλάτηση οι ράβδοι

προθερμαίνονται από τους 1200 K έως τους 1500 K περίπου, σε ηλεκτρικούς φούρνους κατάλληλα.

Εκτός από την αρχική διαδικασία που περιγράψαμε αμέσως πιο πάνω αναφέρουμε ότι οι μηχανικές πρέσες μπορούν με ένα κτύπημα να δημιουργήσουν σχεδόν καθαρού σχήματος οδοντωτούς τροχούς με πλήρη αξιοποίηση των διαθέσιμων αποθεμάτων. Στόχος της αρχικής κατεργασίας είναι να διαμορφώσει τη ράβδο και να διαστασιολογηθεί έτσι η εξωτερική διάμετρος ακριβώς πάνω στην διάμετρο της μήτρας. Έπειτα, οι ράβδοι τοποθετούνται στη μήτρα όπου γίνεται το φινίρισμα. Έπειτα από τη σφυρηλάτηση, ένα υδραυλικό σύστημα εξώθησης εξάγει τον οδοντωτό τροχό από τη μήτρα φινιρίσματος όπου βρισκόταν. Μετά από την εξαγωγή του ακατέργαστου οδοντωτού τροχού από τη μήτρα ακολουθεί η τοποθέτησή του σε μια μήτρα κοπής όπου ανοίγεται η οπή. Ακολουθεί η ψύξη σε ατμοσφαιρική θερμοκρασία για περίπου μία ημέρα. Μετά την ψύξη ο οδοντωτός τροχός είναι έτοιμος για φινίρισμα.

Στο σχήμα 4.6 φαίνεται ένας μηχανισμός για φινίρισμα, όπου διακρίνονται τα στοιχεία από τα οποία απαρτίζεται.



Σχήμα 4.6 : Μηχανή φινιρίσματος Ιαπωνικής προελεύσεως.

Αναφέρουμε κάποια στοιχεία ανοχών των βασικών ειδών των οδοντωτών τροχών που μπορούν να παραχθούν με αυτήν την μέθοδο. Όπως καταλαβαίνουμε, η ακρίβεια και οι διαφοροποιήσεις μεταξύ των διαφόρων ειδών των οδοντωτών τροχών είναι φανερές και συνοψίζονται στον ακόλουθο πίνακα:

ΕΙΔΗ ΤΡΟΧΩΝ	ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ	ΔΙΑΜΕΤΡΟΙ ΤΡΟΧΩΝ	ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ	ΒΑΡΗ ΤΡΟΧΩΝ	ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ
Επίπεδοι κωνικοί		>425 mm		>55 kg	
Σπειροειδείς κωνικοί		>425 mm		>50 kg	
Ελικοειδείς		>250 mm		>40 kg	
Μετωπικοί με ανοχές 1mm		>400 mm		>130 kg	
Μετωπικοί με ανοχές έως 0.3mm		>250 mm		-	

Πίνακας 4.1 : Μεγέθη οδοντωτών τροχών που παράγονται με σχεδόν καθαρό σχήμα.

4.5 ΘΕΩΡΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΤΗΣ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ

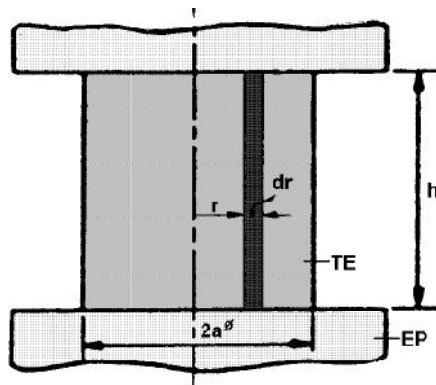
4.5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ανάπτυξη της τεχνολογίας στις κατεργασίες αλλά και στον σχεδιασμό των εργαλείων και των μητρών σφυρηλάτησης, επιτρέπει την ακριβή παραγωγή σφυρηλάτων οδοντωτών τροχών. Οι κωνικοί οδοντωτοί τροχοί μπορούν να προκύψουν με ένα σχεδόν καθαρό σχήμα, όπως και στην περίπτωση που θα παράγονταν ως μηχανικά κατεργασμένοι. Επίσης, η σφυρηλάτηση ανοικτής αλλά και κλειστής μήτρας είναι δύο κατεργασίες οι οποίες παράγουν σήμερα οδοντωτούς τροχούς σχεδόν καθαρού σχήματος.

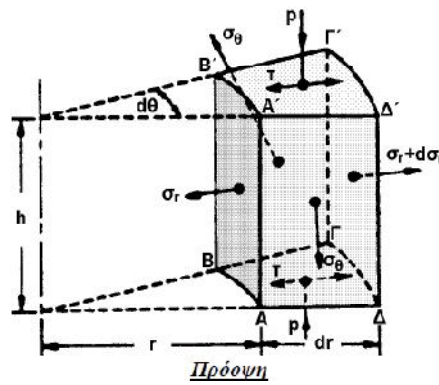
Τα τελευταία είκοσι χρόνια περίπου, γίνεται προσπάθεια για την ανάπτυξη της τεχνολογίας της σφυρηλάτησης ακριβείας, κυρίως λόγω της αύξησης της παραγωγής σε προϊόντα σφυρηλάτησης καθώς και της αυτοματοποίησης της παραγωγής. Αυτή η αύξηση σηματοδοτεί την ανάγκη για παραγωγή τεμαχίων υψηλής ακρίβειας αλλά και χαμηλού κόστους. Συνεπώς η σφυρηλάτηση ακριβείας ενδείκνυται για περιπτώσεις όπου απαιτούνται υψηλοί ρυθμοί παραγωγής καθώς και αρκετά υψηλή αντοχή του σφυρηλάτου οδοντωτού τροχού. Όπως θα δούμε στην συνέχεια, η εκτίμηση και ανάλυση των παραγόμενων τάσεων γίνεται με τις εξής μεθόδους: Πρώτον με την μέθοδο του λόφου-τριβής, δεύτερον με την μέθοδο των άνω οριακών φορτίσεων και τέλος με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

4.5.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΛΟΦΟΥ-ΤΡΙΒΗΣ

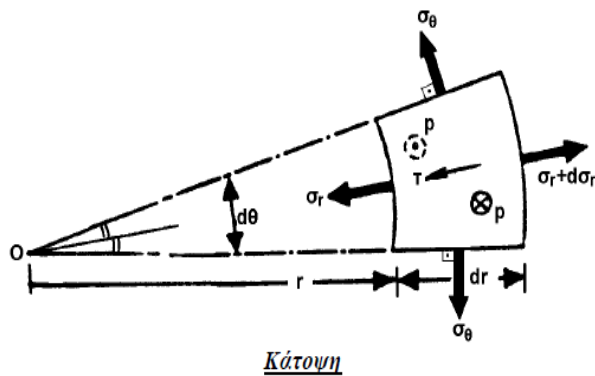
Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται συνήθως για την επίλυση και ανάλυση προβλημάτων όπου έχουμε πλαστική ροή. Η βασική της αρχή είναι ότι επιλέγεται μία πλάκα στοιχειώδους μεγέθους από το υλικό αρχικά και στην συνέχεια με βάση τις ορθές και διατμητικές τάσεις που ασκούνται στο επίπεδό της, γίνεται ισοζύγιο δυνάμεων. Μετέπειτα οι διαφορικές εξισώσεις που προκύπτουν επιλύονται σε συδυασμό με ένα κριτήριο το οποίο επιλέγεται με βάση τις υπάρχουσες συνοριακές συνθήκες. Στο σχήμα 4.7 που φαίνεται στην συνέχεια, βλέπουμε την σφυρηλάτηση κυλινδρικής μπιγέτας ενώ στην συνέχεια, στα σχήματα 4.8 και 4.9 διακρίνουμε την στοιχειώδη λωρίδα και την ισοροπία της.



Σχήμα 4.7: Σφυρηλάτηση κυλινδρικής μπιγέτας.

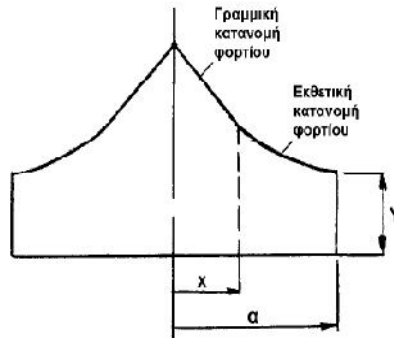


Σχήμα 4.8: Ισορροπία στοιχειώδους λωρίδας, πρόοψη.



Σχήμα 4.9: Ισορροπία στοιχειώδους λωρίδας, κάτοψη.

Για μικτές συνθήκες τριβής και μετά από επίλυση των διαφορικών εξισώσεων καταλήγουμε στο ακόλουθο σχήμα του <<λόφου τριβής>> :



Σχήμα 4.10 : Γραφική παράσταση λόφου-τριβής.

Όπως βλέπουμε, υπάρχουν δύο περιοχές κατανομής της πίεσης:

I) Περιοχή $[0,x]$ και

II) Περιοχή $[x,\alpha]$.

Μετά την ανάλυση των διαφορικών εξισώσεων, προκύπτουν οι ακόλουθες σχέσεις για την κατανομή της πίεσης στις δύο περιοχές που αναφέραμε:

$$\dagger \text{ Περιοχή } [0,x] : p_1 = 2 \frac{k}{h} (a-r) - \frac{k}{\mu} \left[\ln \left(\frac{k}{\mu Y} \right) - 1 \right]$$

$$\dagger \text{ Περιοχή } [x,\alpha] : p_2 = Y e^{2\mu(a-r)/h}$$

4.5.3 ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΝΩ ΟΡΙΑΚΩΝ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ

Είναι μία αριθμητική μέθοδος η οποία αναπτύχθηκε βάσει της θεωρητικής προσέγγισης των άνω οριακών φορτίσεων. Αναπτύχθηκε τα τελευταία δεκαπέντε χρόνια και είναι συνεπώς μία νέα προσέγγιση. Με την μέθοδο αυτή γίνεται προσομοίωση της σφυρηλάτησης μετωπικών οδοντωτών τροχών με την χρήση κυλινδρικών ή σφαιρικών δοκιμίων και πάνω σε επίπεδες πρέσες ή πρέσες εμβόλου. Η εξειλιγμένη καμπύλη χρησιμοποιήθηκε για να αναπαρασταθούν οι πλευρές των οδόντων των τροχών. Το προφίλ του οδόντα θεωρείται σαν τόξο και συνεπώς μπορεί να γίνει ανάλυση σε κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων.

4.5.4 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μια αριθμητική μέθοδος για τον υπολογισμό προσεγγιστικών λύσεων μερικών διαφορικών εξισώσεων. Η αναλυτική λύση των εξισώσεων με τις οποίες περιγράφονται τα διάφορα τεχνικά προβλήματα είναι δυνατή μόνο σε ειδικές περιπτώσεις, στις οποίες οι καταπονήσεις και η γεωμετρία είναι πάρα πολύ απλές. Επειδή όμως υπήρχε η ανάγκη να λυθούν και πιο σύνθετα προβλήματα, γι' αυτόν τον λόγο αναπτύχθηκαν διάφορες προσεγγιστικές μέθοδοι.

Μία τέτοια μέθοδος είναι και η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων. Αυτή η μέθοδος είναι μεν προσεγγιστική, αλλά μπορεί δε να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα και έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα τα προβλήματα. Το μειονέκτημά της είναι οι αυξημένες απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ, κυρίως όταν εφαρμόζεται σε σύνθετα μοντέλα. Αυτό όμως το μειονέκτημα ξεπεράστηκε τα τελευταία χρόνια χάρη στη ραγδαία ανάπτυξη των υπολογιστικών συστημάτων.

4.6 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Λόγω της ραγδαίας ανάπτυξης της τεχνολογίας αλλά και του τεράστιου εύρους εφαρμογών της, γίνεται ολοένα και μεγαλύτερη η ανάγκη για πολυπληθέστερο και ακριβέστερο γεωμετρικά αριθμό οδοντωτών τροχών που παράγονται. Από την αυτοκινητοβιομηχανία μέχρι την αεροναυπηγική και την ναυπηγική, βρίσκουν σήμερα εφαρμογή οι οδοντώσεις και οι μειωτήρες στροφών. Είναι εύλογο λοιπόν λόγω και της διαρκούς μεγαλύτερης ανάγκης για ασφάλεια και αξιοπιστία των κατασκευών, να απαιτείται παραγωγή οδοντωτών τροχών χωρίς τελικές ατέλειες οι οποίες και θα δημιουργήσουν επικίνδυνες τάσεις. Οι τάσεις αυτές μπορούν να υπάρξουν καταστροφικές. Επομένως επιβάλλεται και η διαδικασία του φινιρίσματος όπως και άλλες κατεργασίες περάτωσης πριν την χρήση των οδοντωτών τροχών.

Με τα σημερινά δεδομένα, κωνικοί οδοντωτοί τροχοί είναι δυνατόν να σφυρηλατηθούν μέχρι την τελική τους μορφή. Οδοντωτοί τροχοί με ελικοειδή αλλά και ευθεία οδόντωση μπορούν να προκύψουν με ψυχρή μέθοδο σφυρηλάτησης με αρκετά μεγάλη ακρίβεια. Κλείνοντας αναφέρουμε πως κάθε μέθοδος παραγωγής έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, τα οποία και εκμεταλλεύονται οι κατασκευαστές αναλόγως με το τί είδους και για τί είδους χρήση οδοντωτούς τροχούς θα πρέπει να παράγουν. Η ακριβέστερη και σύγχρονη όμως προσέγγιση στο σχεδιασμό και ανάλυση μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή επιτρέπει να μειώνονται, όσο είναι δυνατόν φυσικά, τα μειονεκτήματα των μεθόδων σφυρηλάτησης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

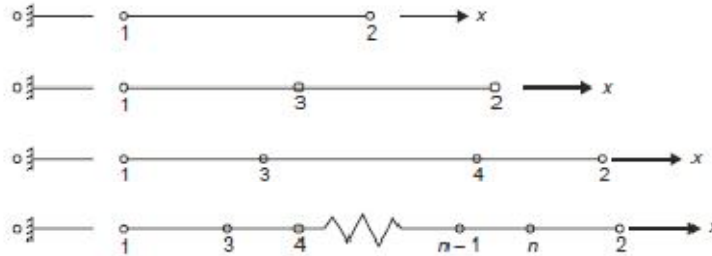
Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μια αριθμητική μέθοδος που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό προσεγγιστικών λύσεων μερικών διαφορικών εξισώσεων. Τέτοιες εξισώσεις είναι κοινώς χρησιμοποιούμενες στους μηχανικούς και γενικότερα στις θετικές και τεχνολογικές επιστήμες. Η αναλυτική λύση των εξισώσεων με τις οποίες προσεγγίζονται τα περισσότερα τεχνικά προβλήματα είναι δυνατή μόνο σε ειδικές περιπτώσεις, όπου οι καταπονήσεις και τα γεωμετρικά σχήματα είναι αρκετά ή πάρα πολύ απλά. Επειδή όμως υπήρχε η ανάγκη να επιλυθούν και πιο σύνθετα προβλήματα, εισήλθε και η ανάγκη να αναπτυχθούν διάφορες προσεγγιστικές μέθοδοι.

Μία από αυτές τις μεθόδους είναι και η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων. Αυτή η μέθοδος είναι από τη μία προσεγγιστική, αλλά μπορεί από την άλλη να δώσει αξιόπιστα και ακριβή αποτελέσματα. Επίσης μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα τα προβλήματα. Το μειονέκτημά της είναι οι αυξημένες απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ, κυρίως όταν εφαρμόζεται σε σύνθετα μοντέλα. Το συγκεκριμένο μειονέκτημα ξεπεράστηκε κατά τα τελευταία 20 χρόνια λόγω της ραγδαίας ανάπτυξης των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Η επιτυχία αυτής της μεθόδου ήταν τόσο μεγάλη, που ακόμα και σήμερα χρησιμοποιείται στην έρευνα και στην βιομηχανία για τον υπολογισμό και τη μελέτη διάφορων κατασκευών. Ευρέως χρησιμοποιείται και στα πανεπιστήμια ανά τον κόσμο.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων, στην ουσία είναι μία εξέλιξη των μητρωϊκών μεθόδων αριθμητικής επίλυσης διαφορικών εξισώσεων. Έγινε προσπάθεια εξέλιξης από διάφορους διακεκριμένους επιστήμονες όπως τον Clough, τον Ritz και άλλους. Πιο συγκεκριμένα αναφέρουμε ότι ο Γερμανός μαθηματικός W.Ritz καθώς και ο Ρώσος B.G. Galerkin κατέχουν την θεωρητική πρωτοπορία και βάση της μεθόδου. Η μέθοδος Galerkin-Ritz είναι μία μέθοδος προσέγγισης της λύσης διαφορικών εξισώσεων και χρησιμοποιείται και σε άλλους τομείς όπως για παράδειγμα στην αριθμητική ανάλυση. Η ακρίβεια και η εγκυρότητα των μεθόδων που στηρίζονται πάνω στα ενεργειακά θεωρήματα είναι μεγάλη και υπάρχει συνεπώς η δυναμική της εύρεσης λύσεων σε περιοχές όπου οι άλλες μέθοδοι δεν μπορούν. Κύριο στοιχείο των προσεγγιστικών μεθόδων είναι η ανάγκη για τον προσδιορισμό ενός αποδεκτού πεδίου, μέσω συναρτήσεων. Οι συναρτήσεις αυτές ορίζονται σε ολόκληρο το σώμα και ικανοποιούν κάποιες συνθήκες στα σύνορά του. Συνεπώς το αρχικό πρόβλημα της εύρεσης του πεδίου των μετατοπίσεων πάνω σε όλα τα σημεία του σώματος μεταπίπτει στο πρόβλημα εύρεσης ενός αριθμού συντελεστών. Έτσι, έχουμε έναν πεπερασμένο βαθμό ελευθερίας. Η εύρεση των συναρτήσεων που ικανοποιούν τις συνθήκες στα σύνορα είναι πιο εύκολη διαδικασία όταν το σύνορο είναι σχετικά απλό. Όταν όμως το όριο - σύνορο του σώματος έχει πιο πολύπλοκη μορφή, τότε είναι και αντίστοιχα δύσκολη η επαλήθευση των οριακών συνθηκών. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων, δημιουργήθηκε για την αντιμετώπιση και αυτού του προβλήματος επιπλέον.

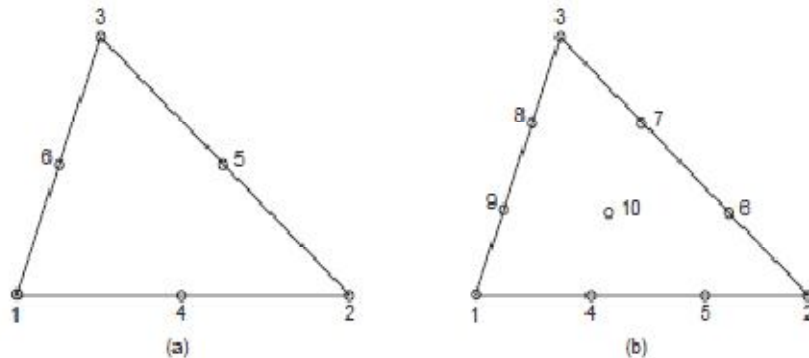
Κατά την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, το σώμα υποδιαιρείται σε ένα συγκεκριμένο αριθμό τμημάτων τα οποία και ονομάζονται στοιχεία. Με την χρήση κατάλληλου και υψηλού αριθμού τέτοιων στοιχείων γίνεται μία ακριβής, σε μεγάλο βαθμό, προσέγγιση της

πραγματικότητας. Στο σχήμα 5.1 που βλέπουμε στην συνέχεια, απεικονίζονται μονοδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία.



Σχήμα 5.1 : Μονοδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία.

Για την επίλυση προβλημάτων διδιάστατων, χρησιμοποιούνται και αντίστοιχα διδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία. Συχνά χρησιμοποιούμενο τέτοιο στοιχείο είναι το τριγωνικό, που αποτελείται από τρεις κόμβους. Ένα τέτοιο στοιχείο βλέπουμε και στο επόμενο σχήμα. Αυτά είναι γνωστά σαν τρίγωνα συνεχούς τάσεως(constant strain triangles, CST). Υπάρχουν και άλλα είδη για διδιάστατα προβλήματα, όπως τα τρίγωνα γραμμικής τάσεως(LST, linear strain triangle) και τα τρίγωνα τετραγωνικής τάσεως(QST, Quadratic strain triangle).



Σχήμα 5.2 : Τριγωνικά πεπερασμένα στοιχεία LST και QST.

Ένα πολύ σημαντικό σημείο για την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων είναι η λεγόμενη γένεση πλέγματος στο γεωμετρικό μας μοντέλο. Στα προηγμένα προγράμματα FEA(finite element analysis) υπάρχει η δυνατότητα της αυτόματης γένεσης πλέγματος. Η διαδικασία της γένεσης πλέγματος έχει σαν προαπαιτούμενο την δημιουργία κομβικών συντεταγμένων και στοιχείων. Βασικό πλεονέκτημα των σημερινών λογισμικών είναι το γεγονός ότι μπορούν να δημιουργήσουν αυτόματα πλέγμα αλλά και να επιλέξουν οι χρήστες το μέγεθος του πλέγματος που θα χρησιμοποιηθεί. Συμπερασματικά, η σημερινή τεχνολογία με την εξέλιξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών και συνεπώς των λογισμικών, επιτρέπει την αναπαράσταση της δυναμικής, στατικής, θερμικής, ηλεκτρομαγνητικής συμπεριφοράς μίας κατασκευής και την εξοικονόμηση πολύτιμου χρόνου αλλά και κόπης. Αυτό είναι πολύ

σημαντικό όφελος στις μέρες μας λόγω και της απόλυτης ανάπτυξης του ρυθμού της παραγωγής προϊόντων σε όλα τα επίπεδα και σε όλα τα μήκη και πλάτη της Γης.

5.2 ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΕ ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

Στην παράγραφο αυτή θα ασχοληθούμε με την μέθοδο Galerkin στα μονοδιάστατα προβλήματα. Η επιλογή των συναρτήσεων βάσης για την εφαρμογή της μεθόδου αυτής δεν είναι τόσο απλή και σε γενικές γραμμές είναι μία ιδιαίτερα δύσκολη διαδικασία. Σε κάποιες περιπτώσεις η επιλογή των συναρτήσεων αυτών μπορεί να βοηθήσει όταν ξέρουμε κάποια στοιχεία για την ζητούμενη λύση. Αυτό όμως δεν είναι πάντα εφικτό. Τα πεπερασμένα στοιχεία αποτελούν μία εξέλιξη της μεθόδου Galerkin και βασίζονται στο γεγονός ότι μπορούμε να επιτύχουμε μία πολύ καλή προσέγγιση της λύσης όταν επιλέγουμε πολλές συναρτήσεις, απλής μορφής, με έναν συστηματικό τρόπο. Το τίμημα είναι πως προκύπτουν πολλές πράξεις (μαθηματικοί υπολογισμοί). Η συστηματικότητα όμως της μεθόδου επιτρέπει την χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή.

Συναρτήσεις για την μέθοδο Galerkin

Για προβλήματα τρισδιάστατων πεδίων το πεδίο υποδιαιρείται σε τριγωνικά, στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, στοιχεία. Εάν $F(x,y,z)$ είναι η άγνωστη συνάρτηση, τότε οι πιο συνήθεις περιπτώσεις επιλογής των πολυωνύμων είναι οι ακόλουθες:

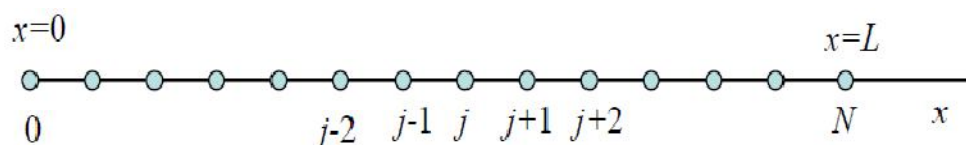
- 1) Τέσσερις άγνωστοι βαθμοί ελευθερίας με γραμμική παρεμβολή.

$$\text{Ισχύει: } F = \alpha_0 + \alpha_1 x + \alpha_2 y + \alpha_3 z$$

- 2) Δέκα άγνωστοι βαθμοί ελευθερίας με παρεμβολή δεύτερου βαθμού.

$$\text{Ισχύει: } F = \alpha_0 + \alpha_1 x + \alpha_2 y + \alpha_3 z + \alpha_4 x^2 + \alpha_5 y^2 + \alpha_6 z^2 + \alpha_7 x y + \alpha_8 y z + \alpha_9 z x$$

Στα μονοδιάστατα προβλήματα έχουμε άλλη προσέγγιση, την οποία και αναλύουμε άμεσα στην παρούσα παράγραφο. Αρχικά χωρίζεται το χωρίο σε N τμήματα με $N+1$ πλήθος κόμβων. Ο κόμβος (0) αντιστοιχεί στο $x=0$ και ο κόμβος N στο $x=L$. Στο επόμενο σχήμα βλέπουμε σχηματικά τα παραπάνω (Σχήμα 5.3).

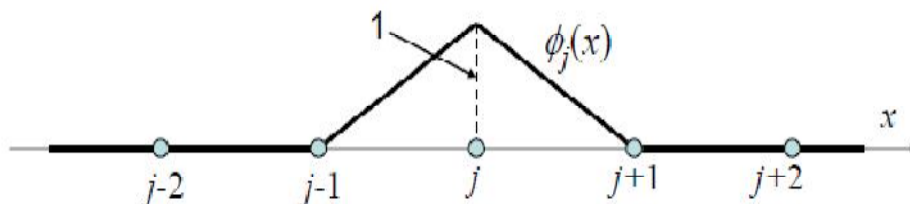


Σχήμα 5.3: Κόμβοι κατά τον άξονα των x .

Στη συνέχεια ορίζονται οι συναρτήσεις $\varphi_j(x)$:

$$\varphi_j(x) = \begin{cases} \frac{x - x_{j-1}}{x_j - x_{j-1}}, & x_{j-1} \leq x \leq x_j \\ \frac{x - x_{j+1}}{x_j - x_{j+1}}, & x_{j-1} \leq x \leq x_j \\ 0, & x \leq x_{j-1} \\ 0, & x \geq x_{j+1} \end{cases}$$

Η κάθε συνάρτηση έχει τη μορφή "στέγης". Επίσης είναι ομαλή συνάρτηση, μη μηδενική και συνεχής σε ένα τμήμα γύρω από τον κόμβο j . Τις συναρτήσεις αυτές τις βλέπουμε στο σχήμα 5.4:



Σχήμα 5.4 : Συναρτήσεις $\varphi_j(x)$.

Επίσης ισχύουν οι εξής σχέσεις:

$$\varphi_i(x_j) = \delta_{ij} \begin{cases} 1, i = j \\ 0, i \neq j \end{cases}$$

Με τον τρόπο αυτό, συμπεραίνουμε επίσης τα ακόλουθα:

$$u(x) = \sum \alpha_i \varphi_i(x)$$

Για τους κόμβους ισχύει:

$$u(x_j) = \sum \alpha_i \varphi_i(x_j) = \sum \alpha_i \delta_{ij} = \alpha_j$$

Μητρώο [K] και βασικές ιδιότητες

- Υπάρχει συμμετρία, δηλαδή ισχύει: $K_{ij} = K_{ji}$

- Περιέχει αρκετά μηδενικά στοιχεία. Αυτό συμβαίνει διότι οι $\varphi_j(x)$ είναι μη μηδενικές σε ένα μικρό διάστημα επομένως και το $[K]$ θα έχει κάποια μηδενικά στοιχεία.

- Υφίσταται η ιδιότητα της αθροιστικότητας, σύμφωνα με την οποία τα ολοκληρώματα μπορούν να διασπαστούν στα επιμέρους διαστήματα $[x_j, x_{j+1}]$ οπότε και να υπολογιστούν τα K_{ij} σε κάθε διάστημα $[x_j, x_{j+1}]$ και να γίνει άθροιση. Τα διαστήματα $[x_j, x_{j+1}]$ ονομάζονται στοιχεία ή πιο συγκεκριμένα πεπερασμένα στοιχεία.

$$\int_0^L EA\varphi_i'\varphi_j'dx = \int_0^{x_1} EA\varphi_i'\varphi_j'dx + \int_{x_1}^{x_2} EA\varphi_i'\varphi_j'dx + \int_{x_1}^{x_2} EA\varphi_i'\varphi_j'dx + \int_{x_2}^L EA\varphi_i'\varphi_j'dx$$

- Το $[K]$ είναι θετικά ορισμένο οπότε και θα ισχύουν:

Για κάθε u διάνυσμα μή μηδενικό, τότε $u^T [K] u > 0$

Παράλληλα ισχύει η ισοδυναμία: $u^T [K] u = 0 \Leftrightarrow u=0$

Βασικά στοιχεία για το τοπικό σύστημα συντεταγμένων

Θεωρούμε ένα στοιχείο e με κόμβους A-B.

$$x_A = x_j \text{ και } x_B = x_{j+1}$$

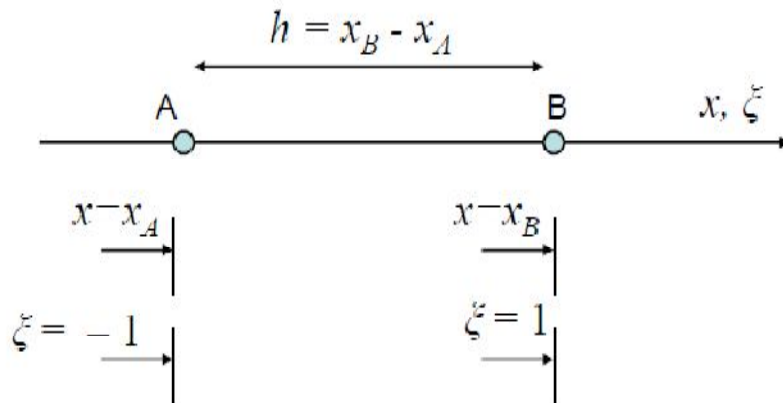
Ορίζουμε ένα τοπικό σύστημα συντεταγμένων ξ , με $\xi_A = -1$ και $\xi_B = 1$ με βάση τον ακόλουθο μετασχηματισμό:

$$x(\xi) = x_A + \frac{h}{2}(1+\xi)$$

και

$$\xi(x) = \frac{x - x_A}{h/2} - 1$$

Στο επόμενο σχήμα βλέπουμε την απεικόνιση του τοπικού συστήματος συντεταγμένων με τις λεπτομέρειες και όσων αναφέραμε παραπάνω(Σχήμα 5.5).

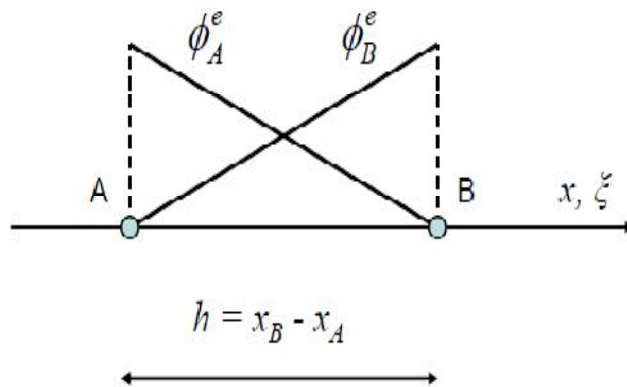


Σχήμα 5.5: Τοπικό σύστημα συντεταγμένων.

Μπορεί να γραφούν οι συναρτήσεις στο τοπικό σύστημα του στοιχείου. Έχουμε συνεπώς:

$$\varphi_A^e(\xi) = \varphi_j(x) = \frac{1}{2}(1 - \xi)$$

$$\varphi_B^e(\xi) = \varphi_{j+1}(x) = \frac{1}{2}(1 + \xi)$$



Σχήμα 5.6: Συναρτήσεις του τυχαίου στοιχείου.

Στο παραπάνω σχήμα(Σχήμα 5.6), βλέπουμε την απεικόνιση των συναρτήσεων "σχήματος" του τυχαίου στοιχείου.

Είναι αρκετά εύκολο να καταλάβει κανείς πως ισχύουν:

$$\varphi_A^e(0) = 1$$

$$\varphi_A^e(1) = 0$$

Και

$$\varphi_B^e(0) = 0$$

$$\varphi_B^e(1) = 1$$

Τα παραπάνω προκύπτουν από το σχήμα 5.6.

Αν διαφοριστεί η σχέση που γράψαμε παραπάνω για το $x(\xi)$, δηλαδή για τον μετασχηματισμό, θα προκύψει ότι:

$$dx = \frac{h}{2} d\xi$$

Τελικά από την προηγούμενη σχέση παίρνουμε:

$$\frac{dx}{d\xi} = \frac{h}{2}$$

Η προηγούμενη παράγωγος ονομάζεται και Ιακωβιανή του μετασχηματισμού.

Συνοψίζοντας τα όσα αναλύσαμε, αναφέρουμε ότι η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μία μέθοδος πύο συστηματική και η οποία αποτελεί ειδική περίπτωση της μεθόδου Galerkin ή της μεθόδου Rayleigh - Ritz. Θεωρούμε διακριτοποίηση η οποία έχει την μορφή:

$$u(x) = \sum_{i=1}^N a_i \varphi_i(x)$$

Οπότε τα $\varphi_i(x)$, έχουν τις επόμενες σημαντικές ιδιότητες:

$$\implies \varphi_i(x_j) = \delta_{ij}$$

\implies Σε κάθε σημείο c που ανήκει στο διάστημα $[0, L]$, υπάρχουν το μέγιστο Z συναρτήσεις, οι οποίες είναι μή μηδενικές.

\implies Σε κάθε σημείο x , ισχύει :

$$\sum_{i=1}^N \varphi_i(x) = 1$$

Τελικά, χρησιμοποιώντας συναρτήσεις $\varphi(x)$, τμηματικώς δηλαδή γραμμικές, καταλήγουμε στο σύστημα:

$$[K] \mathbf{u} = \mathbf{F}$$

Δεν είναι καθόλου απίθανο να καταλήξουμε και σε συναρτήσεις μεγαλύτερου βαθμού(μή γραμμικές).

5.3 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΒΟΗΘΕΙΑ ΛΟΓΙΣΜΙΚΩΝ

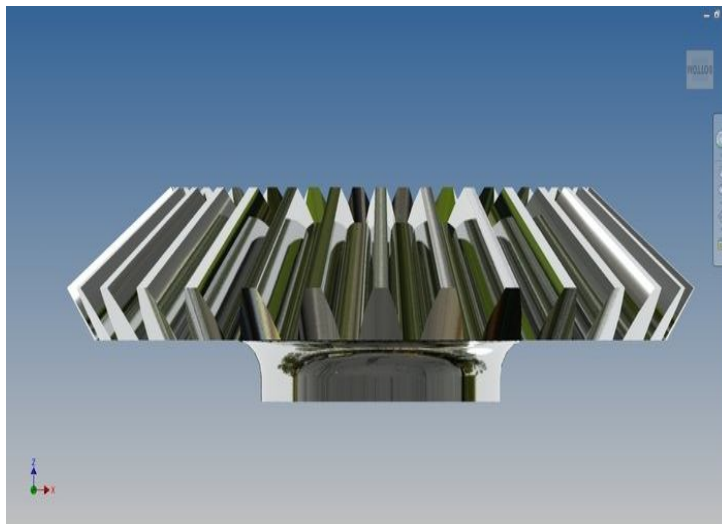
Η μελέτη με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή εφαρμόζεται με τη χρήση της τεχνολογίας των υπολογιστών σε όλα τα στάδια ανάπτυξης ενός προϊόντος και ιδιαίτερα στην δημιουργία, τροποποίηση, ανάλυση και βελτιστοποίηση της μορφής του προϊόντος. Περιλαμβάνει την τεχνολογία των γραφικών, των βάσεων δεδομένων, της μαθηματικής μοντελοποίησης και λογικής, της προσομοίωσης και του ελέγχου δεδομένων με τελικό σκοπό τη δημιουργία του ψηφιακού μοντέλου του προϊόντος. Κύριες εφαρμογές της είναι οι εξής: Η παραγωγή ενός προϊόντος σε μηχανές ψηφιακής καθοδήγησης (CAD/CAM), όπου έχουμε αναπαράσταση στην οθόνη του υπολογιστή της κίνησης του κοπτικού εργαλείου της εργαλειομηχανής, που σχηματίζει την μορφή του πριν από την κανονική του κατεργασία. Επίσης εφαρμόζεται σε ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία για έλεγχο αντοχής, συμπεριφορά σε ροή, κατεργασιμότητα και συνεπώς παρουσίαση των αποτελεσμάτων στην οθόνη, για αξιολόγηση και βελτιστοποίηση. Ακόμη, η μελέτη με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή και τα συστήματα CAD/CAM, εφαρμόζεται για την ανάλυση της λειτουργικότητας του πρωτοτύπου με τη χρήση μεθόδων εικονικής πραγματικότητας(virtual prototype) με στόχο την μείωση του αριθμού των πρωτοτύπων. Επίσης η μέθοδος βοηθάει στην ταχεία παραγωγή του πρωτοτύπου από το μοντέλο με τη βοήθεια κατάλληλων μηχανών, γεγονός πολύ σημαντικό στην εποχή μας.

Με την βοήθεια της μελέτης και παραγωγής με εξειδικευμένα λογισμικά, αλλάζει η συμβατική διαδικασία παραγωγής προϊόντων, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις με καμπύλες επιφάνειες. Στην συμβατική παραγωγή στο στάδιο της αρχικής ιδέας του προϊόντος δημιουργείται ένα φυσικό πρωτότυπο από εύπλαστο υλικό. Το πρωτότυπο αυτό χρησιμοποιείται για παρουσίαση της μορφής του, δοκιμές λειτουργικής ανάλυσης και σε αυτό γίνονται οι απαραίτητες αλλαγές μέχρι να επιτευχθεί ένα ικανοποιητικό πρωτότυπο. Έπειτα παράγεται η μορφή του στο σχέδιο, με συντεταγμένες, συνήθως με τη μέθοδο της αντιγραφής (ψηφιοποίηση του αντικειμένου). Χρησιμοποιώντας αυτές τις μετρήσεις οι σχεδιαστές παράγουν τα απαραίτητα σχέδια για την παραγωγή των λειτουργικών πρωτοτύπων. Τα σχέδια αυτά χρησιμοποιούνται για την παραγωγή των μοντέλων αντιγραφής που δημιουργούνται από ξύλο ή άλλο εύκαμπτο υλικό. Τα μοντέλα αντιγραφής είναι η βάση για την παραγωγή των καλουπιών και για αυτό πρέπει να έχουν στις περισσότερες περιπτώσεις πολύ καλή τελική επιφάνεια. Το μοντέλο αντιγραφής μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε φρέζα ή άλλη εργαλειομηχανή για την παραγωγή της κοιλότητας του καλουπιού.

Σύστημα CAD

Τα συστήματα-εργαλεία CAD έχουν εύρος εφαρμογής από γεωμετρικά εργαλεία επεξεργασίας σχημάτων, μέχρι εξειδικευμένα προγράμματα εφαρμογών, όπως ανάλυση και βελτιστοποίηση. Μεταξύ αυτού του εύρους εμπεριέχονται τυπικά εργαλεία που είναι συνήθη στην εποχή μας και περιλαμβάνουν υπολογισμούς ανοχών, συναρμογών, υπολογισμούς ιδιοτήτων μάζας (κέντρα βάρους) καθώς και διάφορες σημαντικές επίσης εφαρμογές. Ακόμη περιλαμβάνεται η μοντελοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία (finite element method) και μέθοδοι οπτικής απεικόνισης των αποτελεσμάτων της ανάλυσης. Περιλαμβάνονται και άλλα εργαλεία τα οποία δεν είναι σκόπιμο σε αυτό το σημείο να αναλύσουμε περισσότερο. Ο σημαντικότερος ρόλος του CAD είναι ο καθορισμός της γεωμετρίας του υπό σχεδιασμού προϊόντος. Αυτό το γεγονός είναι πολύ σημαντικό για όλες τις επόμενες διαδικασίες του κύκλου. Μετέπειτα η γεωμετρία χρησιμοποιείται από το CAE για ανάλυση.

Στο σχήμα που φαίνεται αμέσως μετά, βλέπουμε ένα σύγχρονο σύστημα CAD, στο οποίο έχει σχεδιαστεί ένας οδοντωτός τροχός.



Σχήμα 5.7: Σύγχρονο σύστημα CAD(Computer-Aided Design).

Σύστημα CAE

Όσον αφορά τα συστήματα CAE, αναφέρουμε ότι η ανάλυση με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή (Computer-Aided Engineering) δηλαδή CAE, είναι μια εφαρμοσμένη μέθοδος-τεχνογνωσία, η οποία εφαρμόζει την χρήση υπολογιστικών συστημάτων για την ανάλυση γεωμετρίας CAD. Με τον τρόπο αυτό επιτρέπεται στον σχεδιαστή να προσομοιώσει και να μελετήσει τον τρόπο με τον οποίο θα συμπεριφερθεί το προϊόν σε διάφορες χρονικές περιόδους. Επομένως ο σχεδιασμός θα δύναται να επιδέχεται εύκολα αποπεράτωση και βελτιστοποίηση. Τα διάφορα εργαλεία της τεχνολογίας αυτής, εφαρμόζονται σε ευρεία κλίμακα αναλύσεων. Μερικές από τις εφαρμογές περιλαμβάνουν

προγράμματα κινηματικής ανάλυσης. Έτσι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάλυση και ακριβή γνώση της λειτουργίας μηχανών. Επίσης λογισμικά δυναμικής ανάλυσης μεγάλων μετατοπίσεων μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην προσομοίωση σύνθετων συναρμολογημένων δομών-κατασκευών, όπως για παράδειγμα για επίγεια ή εναέρια μεταφορικά μέσα(αυτοκίνητα, αεροσκάφη).

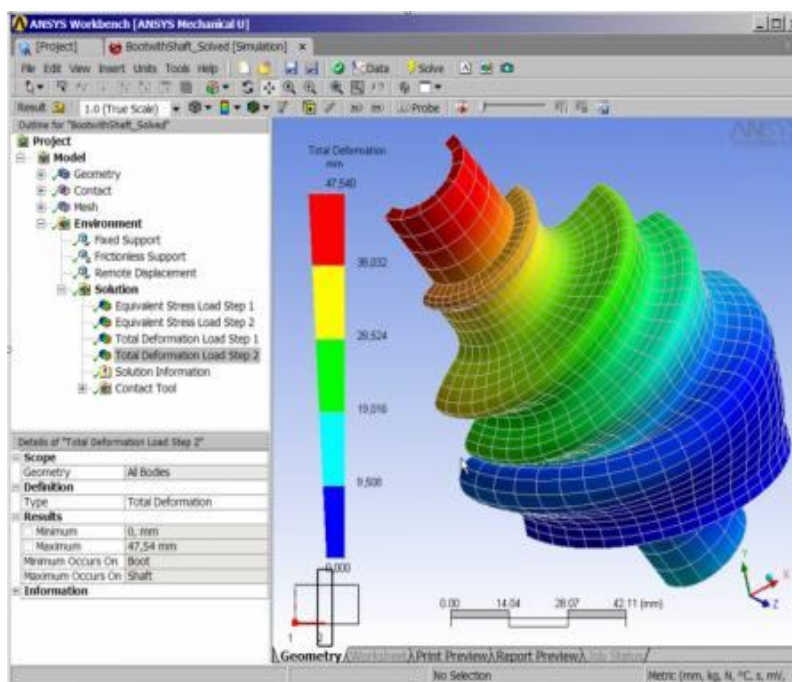
Ανάμεσα στις πιο σύγχρονες, γνωστές αλλά και αξιόπιστες μεθόδους ανάλυσης(CAE), είναι η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Analysis, FEA). Η συγκεκριμένη μέθοδος επιτρέπει τη στατική και δυναμική ανάλυση τάσεων και μετατοπίσεων όπως επίσης και θερμική ανάλυση, ρευστομηχανική, ηχητική ανάλυση. Ακόμη μπορεί να μελετηθεί η κατανομή μαγνητικού πεδίου ή και άλλων διαφόρων πεδίων. Για να εφαρμοστεί η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα απλουστευμένο αφαιρετικό μοντέλο που πρέπει να δημιουργηθεί είτε μέσω του χρήστη ή αυτόματα. Το λογισμικό το οποίο ευθύνεται για την κατασκευή του αφαιρετικού μοντέλου και συνεπώς τη γένεση των πεπερασμένων στοιχείων είναι οι λεγόμενοι προ-επεξεργαστές (pre-processors).

Ο προ-επεξεργαστής(pre-processor), αρχίζει από τη γεωμετρία του αντικειμένου. Τα κλασικά συστήματα FEA(Finite element analysis), περιείχαν μόνο τις βασικές λειτουργίες μοντελοποίησης. Στις μέρες του αιώνα που διανύουμε όμως, προσφέρουν εξελιγμένες δυνατότητες και συνήθως έχουν σχέση και με σύγχρονα συστήματα σχεδίασης με ηλεκτρονικό υπολογιστή (CAD). Τα συστήματα που στηρίζονται στην γεωμετρική μοντελοποίηση μπορούν να συνεργαστούν κατευθείαν με το μοντέλο CAD αλλιώς μεταφράζουν και εισάγουν έτσι την γεωμετρία. Η απευθείας συνεργασία με CAD, τείνει να επικρατήσει καθώς με αυτόν τον τρόπο, γίνεται εξοικονόμηση χρόνου, ενώ περιορίζεται η πιθανή απώλεια δεδομένων κατά την μετάφραση και όχι μόνο. Για τα λογισμικά FEA σήμερα, γίνεται προσπάθεια να βελτιωθεί η δυνατότητα εισαγωγής γεωμετρίας. Για την εισαγωγή της γεωμετρίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν τυποποιήσεις (IGES) είτε να γίνει απευθείας εισαγωγή από ορισμένα συστήματα CAD. Ακόμη, είναι συχνό φαινόμενο να μην μπορεί να αντιληφθεί ο σχεδιαστής τις όποιες μικρές ατέλειες έχει το μοντέλο και οι οποίες αποκαλύπτονται την στιγμή της γένεσης του πλέγματος στο σύστημα FEA. Ορισμένα σύγχρονα συστήματα έχουν την δυνατότητα να απομονώσουν ορισμένα χαρακτηριστικά ή γεωμετρικές του εισαγόμενου μοντέλου. Συνεπώς, ανάλογα με το τί θέλουμε να αναλύσουμε, ανάλογα και απομονώνουμε διάφορα χαρακτηριστικά του μοντέλου.

Στη συνέχεια δημιουργείται το πλέγμα και γίνεται η κατανομή των κόμβων. Όταν στο πλέγμα αποδίδονται κόμβοι γίνεται η μετατροπή του σε πεπερασμένο στοιχείο. Η γένεση του πλέγματος είναι η δυσκολότερη διαδικασία της μοντελοποίησης των πεπερασμένων στοιχείων. Όπως και ήδη αναφέραμε, το κενό-δυσκολία αυτή, αναπληρώνουν τα σύγχρονα λογισμικά τα οποία δημιουργούν αυτόματα το πλέγμα. Η συνηθισμένη λογική είναι να γίνεται αυτόματο πλέγμα τετραεδρικών στοιχείων για στερεή γεωμετρία. Από την άλλη, όταν πρόκειται για τρισδιάστατη επιφάνεια, τότε χρησιμοποιούνται τετραπλευρικά ή τριγωνικά στοιχεία. Αρκετά σύγχρονα λογισμικά παρέχουν την δυνατότητα στους χρήστες να παρέμβουν στη διαδικασία αυτόματης γένεσης πλέγματος και να τροποποιήσουν στοιχεία όπως η πυκνότητα του πλέγματος και άλλα. Αυτή η παρέμβαση είναι χρήσιμη όταν θέλει κάποιος χρήστης να παρέμβει σε συγκεκριμένο και ιδιαίτερο σημείο της γεωμετρίας που μελετάται. Τα συστήματα CAE, αποτελούν αναμφισβήτητα ένα σύνολο, από τα σπουδαιότερα εργαλεία της σύγχρονης τεχνολογίας και ιδίως των τεχνολογικών επιστημών όπου και

εφαρμόζονται στην εποχή μας αδιάλειπτα. Συνεπώς, η εξέλιξη τους είναι ραγδαία και εξαρτάται από την ραγδαία επίσης ανάπτυξη των υπολογιστικών συστημάτων σε όλα τα επίπεδα.

Στο σχήμα 5.8 βλέπουμε ένα σύγχρονο σύστημα CAE, το οποίο είναι και το πιο διαδεδομένο σε ολόκληρο τον κόσμο καθώς προσφέρει πληθώρα εφαρμογών και ευκολιών.



Σχήμα 5.8 : Σύγχρονο σύστημα CAE.

5.4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Στην εποχή του εικοστού πρώτου αιώνα, ο σύγχρονος και πολυάσχολος πλέον τεχνολογικός επιστήμονας και μέσα στα πλαίσια της μελέτης μηχανολογικών εξαρτημάτων και κατασκευών, κάνει ανακαία την κατάλληλη επιλογή πεπερασμένων στοιχείων. Αυτή η επιλογή τείνει να είναι αυτοματοποιημένη και τυποποιημένη την τελευταία δεκαετία. Επίσης εκτός των άλλων, σε δισδιάστατα μοντέλα, η χρήση τριγωνικών στοιχείων τριών κόμβων και τετραπλευρικών στοιχείων τεσσάρων κόμβων δεν είναι η μόνη επιλογή του μηχανικού. Υπάρχουν εναλλακτικές δυνατότητες ανάλογα με το διαθέσιμο λογισμικό. Συμπερασματικά, υπάρχουν πολλές εναλλακτικές επιλογές, που εξαρτώνται από αρκετούς παράγοντες.

Από τις σημαντικότερες αποφάσεις, είναι η επιλογή των κατάλληλων στοιχείων με τον κατάλληλο αριθμό κόμβων από την διαθέσιμη βάση δεδομένων των στοιχείων. Είναι γενικά παραδεκτό το γεγονός ότι το πλήθος των στοιχείων που πρέπει να χρησιμοποιηθούν για την επίλυση ενός συγκεκριμένου προβλήματος είναι αποτέλεσμα της κρίσης του μηχανικού, ο οποίος και κρίνει με βάση την εμπειρία και άλλες παραμέτρους. Όσο μεγαλώνει το πλήθος των κόμβων και των στοιχείων, τόσο μεγαλύτερη ακρίβεια στην λύση προκύπτει, με παράλληλη αύξηση όμως του κόστους και του χρόνου. Επίσης αποτελεί αρκετά μεγάλο πρόβλημα και η γένεση πλέγματος του υπό ανάλυση εξαρτήματος, ειδικά όταν έχει περίπλοκη γεωμετρική μορφή. Η δημιουργία τρισδιάστατων πλεγμάτων είναι μια διαδικασία που απαιτεί πολλές ώρες επίπονης εργασίας και είναι πιθανή σε σφάλματα. Γίνονται πολλές προσπάθειες για την αυτόματη γένεση πλεγμάτων. Έτσι, είναι εφικτή η εξάρτηση με συστήματα μοντελοποίησης όγκου τα οποία και διαδίδονται συνεχώς.

Στα πεπερασμένα στοιχεία τύπου h , γίνεται χρήση πολυωνύμων ορισμένου βαθμού. Επομένως, για να αυξηθεί η ακρίβεια θα πρέπει να μειωθεί η μέση διάσταση των στοιχείων. Το παραπάνω είναι ταυτόσημο με την αύξηση του αριθμού των στοιχείων δηλαδή την πύκνωση του πλέγματος. Στα πεπερασμένα στοιχεία τύπου p , γίνεται χρήση ενός σταθερού πλέγματος αλλά είναι δυνατή η αύξηση του πολυωνυμικού βαθμού της συνάρτησης μορφής. Επίσης, σε αυτόν τον τύπο οι συντελεστές του υψηλόβαθμου πολυωνύμου είναι και σε αυτήν την περίπτωση άγνωστοι. Έτσι ο υπολογισμός γίνεται κατά την διάρκεια της επίλυσης.

5.4.1 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ

Μοντελοποίηση πεπερασμένων στοιχείων (finite element modeling), ονομάζονται όλες οι συνιστώσες και διαδικασίες που είναι απαραίτητες για την ολοκλήρωση ενός μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων. Αυτές οι διαδικασίες περιλαμβάνουν την εισαγωγή της γεωμετρίας, την γένεση του πλέγματος και την επιβολή στηρίξεων και φόρτισης.

Όπως ήδη περιγράψαμε πιο συνοπτικά και σε προηγούμενη παράγραφο, ο προεπεξεργαστής ξεκινάει από την γεωμετρία του αντικειμένου. Λογισμικά που στηρίζονται σε γεωμετρική μοντελοποίηση συστημάτων CAD μπορούν να εργάζονται απευθείας με το μοντέλο CAD είτε να μεταφράζουν και να εισάγουν τη γεωμετρία. Η σύνδεση με CAD διαδίδεται συνεχώς περισσότερο διότι προσπερνάει τα βήματα μετάφρασης, την απώλεια δεδομένων και μικραίνει τον κύκλο σχεδιασμού. Επίσης, η χρήση συστήματος CAD διευκολύνει τη μοντελοποίηση και παρέχει πιο ισχυρές λειτουργίες δημιουργίας και αλλαγής σύνθετης γεωμετρίας. Στη σύγχρονη εποχή τα περισσότερα συστήματα μοντελοποίησης μπορούν να δημιουργήσουν οποιαδήποτε γεωμετρία απαιτείται για ανάλυση από τον εκάστοτε μηχανικό. Τα περισσότερα συστήματα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων δίνουν επίσης σημασία στη δυνατότητα που έχουν να εισάγουν τη γεωμετρία. Γίνεται είτε μέσω τυποποιήσεων όπως το IGES είτε απευθείας από ορισμένα συστήματα CAD. Όμως η απευθείας χρήση δεν είναι πάντα λειτουργική.

Διόρθωση εισαγόμενης γεωμετρίας.

Ένα γεωμετρικό μοντέλο πολλές φορές μπορεί να έχει μία ιδιαίτερα πολύπλοκη γεωμετρία και μπορεί έτσι να φαίνεται στην όψη ότι είναι τέλειο αλλά στην πραγματικότητα να

έχει σφάλματα. Αυτά μπορούν να φανερωθούν στο σύστημα-λογισμικό ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων. Συνήθως η αποκάλυψη γίνεται κατά την διαδικασία γένεσης πλέγματος. Μερικά συστήματα προσφέρουν λειτουργίες που μπορούν να διορθώσουν την εισαγόμενη γεωμετρία του μοντέλου. Ακόμη και αν η γεωμετρία CAD είναι απαλλαγμένη από σφάλματα και η ανάλυση δεν απαιτεί όλες τις λεπτομέρειές της, τότε κάποιες από αυτές θα μπορούσαν να απαλειφθούν. Κάποια συστήματα-λογισμικά διαθέτουν τέτοιες αυτόματες δυνατότητες απενεργοποίησης γεωμετρικών σχηματισμών. Είναι πολύ ιδιαίτερη και σημαντική επιλογή την τελευταία δεκαετία καθώς η υπέρμετρη αύξηση της παραγωγικότητας απαιτεί την οικονομία χρόνου σε όλες τις παραγωγικές διαδικασίες.

Στη συνέχεια γίνεται το πλέγμα και η κατανομή των κόμβων. Όταν σε κάθε πλέγμα προσδίδονται κόμβοι τότε αυτό μετατρέπεται σε πεπερασμένο στοιχείο. Η διαδικασία της γένεσης πλέγματος είναι το πιο σημαντικό και ταυτόχρονα δύσκολο στάδιο της μοντελοποίησης των πεπερασμένων στοιχείων. Για τη διευκόλυνση αυτού του γεγονότος στην εποχή μας, όλα τα συστήματα προσφέρουν δυνατότητες αυτόματης γένεσης πλέγματος. Η συνήθης μεθοδολογία είναι να δημιουργούν αυτόματο πλέγμα τετραεδρικών στοιχείων για στερεή γεωμετρία. Από την άλλη, τετραπλευρικά ή τριγωνικά στοιχεία βρίσκουν εφαρμογή για τρισδιάστατη επιφάνεια. Είναι γεγονός ότι αρκετά λογισμικά επιτρέπουν στους χρήστες να επέμβουν στις παραμέτρους αυτόματης γένεσης πλέγματος. Αυτές είναι η πυκνότητα πλέγματος και άλλες παράμετροι. Επίσης, επιτρέπουν τοπική επέμβαση σε κρίσιμες περιοχές. Τέλος, πολλά λογισμικά επιτρέπουν τη διασύνδεση πλέγματος με τη γεωμετρία. Με τον τρόπο αυτό, κάθε αλλαγή της αντικατοπτρίζεται αυτόματα στο πλέγμα, κάτι το οποίο είναι θετικότατο.

Τύποι πεπερασμένων στοιχείων.

Σε ένα λογισμικό-σύστημα πεπερασμένων στοιχείων, υπάρχει μια βάση δεδομένων η οποία ονομάζεται βιβλιοθήκη στοιχείων. Όσα περισσότερα είδη στοιχείων υπάρχουν, τόσο μεγαλύτερο είναι το εύρος των προβλημάτων που μπορούν να επιλυθούν. Μια εναλλακτική λύση στο θέμα του πλέγματος είναι η χρήση της p (p -version) μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων. Αυτή στηρίζεται σε ένα απλούστερο, αυτόματα γεννημένο πλέγμα, αλλά στη συνέχεια μεταβάλλει αυτόματα τον πολυωνυμικό βαθμό των συναρτήσεων μορφής. Αν και στην εποχή μας έχουν δημιουργηθεί πολλά τέτοια προγράμματα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων, ξεχωρίζουν δύο προγράμματα που σχεδιάστηκαν ειδικά για ανάλυση τύπου p -version. Είναι τα Pro/MECHANICA και PolyFEM. Πλεονεκτήματα είναι το κατανοητό και εύκολο πλέγμα. Επίσης πλεονεκτήματα είναι η ικανότητα να καθορίσουν όρια ακρίβειας και πλησιέστερης προσέγγισης της γεωμετρίας του μοντέλου CAD. Χρησιμοποιώντας χαμηλότερο επίπεδο ακρίβειας, ο σχεδιαστής και ο μηχανικός μπορεί να λάβει άμεσα αποτελέσματα ανάλυσης στο προκαταρκτικό επίπεδο σχεδιασμού. Όπως καταλαβαίνουμε, χάρη στην σημερινή τεχνολογία των ηλεκτρονικών υπολογιστών μπορεί ο μελετητής να έχει μεγάλη ευελιξία στις όποιες επιλογές του από κάθε οπτική γωνία. Αρχικά επιλέγεται η διάταξη των στοιχείων και μετά προσδιορίζεται ο τύπος της ανάλυσης όπως για παράδειγμα στατική ή δυναμική, κ.λπ. Οι άγνωστες παράμετροι ή αλλιώς οι βαθμοί ελευθερίας συσχετίζονται με τους κόμβους. Οι άγνωστοι περιέχουν μετατοπίσεις, περιστροφές, θερμοκρασία, ροή θερμότητας και διάφορα άλλα πεδία. Έπειτα προσδιορίζονται οι οριακές συνθήκες. Οι οριακές συνθήκες όπως μετατοπίσεις, δυνάμεις, κ.λπ. συνήθως είναι γνωστές για το συνεχές τμήμα του συνόρου του αντικειμένου. Έτσι αυτές οι οριακές συνθήκες είναι απαραίτητο να

εκφραστούν σαν ένα σύνολο τιμών μετατοπίσεων, δυνάμεων, ή θερμοκρασιών σε συγκεκριμένους κόμβους των πεπερασμένων στοιχείων. Σε κάποιες περιπτώσεις τα πεπερασμένα στοιχεία πρέπει να δημιουργηθούν χωρίς να έχουν οριακές συνθήκες.

Τα πεπερασμένα στοιχεία μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση το σχήμα τους στις εξής κατηγορίες:

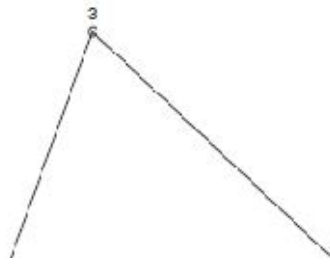
- Μονοδιάστατα στοιχεία.
- Δισδιάστατα στοιχεία.
- Αξονο-συμμετρικά στοιχεία.
- Τρισδιάστατα στοιχεία.

Τα μονοδιάστατα στοιχεία είναι κατάλληλα για την ανάλυση μονοδιάστατων προβλημάτων. Στο επόμενο σχήμα φαίνονται μονοδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία.



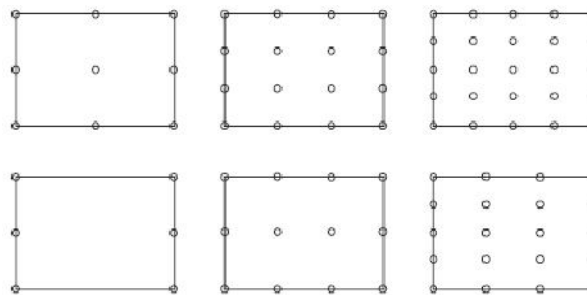
Σχήμα 5.9 : Μονοδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία.

Για την επίλυση δισδιάστατων προβλημάτων είναι απόλυτα λογικό να χρειάζονται και δισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία. Ένα δισδιάστατο πεπερασμένο στοιχείο το οποίο χρησιμοποιείται συχνά είναι το τριγωνικό με τρεις κόμβους. Είναι το πιο συνηθισμένο και κοινό στην χρήση στοιχείο, για τέτοιου είδους προβλήματα. Αυτό το είδος στοιχείων είναι γνωστό σαν CST(Constant Strain Triangles). Στο σχήμα 5.10 που έπεται, απεικονίζεται ένα τριγωνικό πεπερασμένο στοιχείο τέτοιου τύπου.



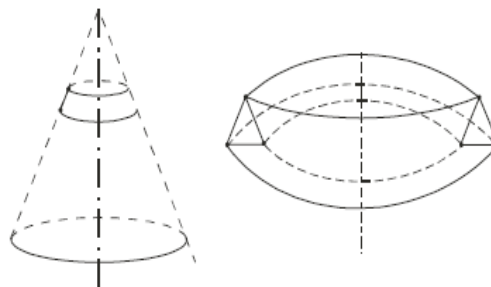
Σχήμα 5.10 : Δισδιάστατο πεπερασμένο στοιχείο (τύπου CST).

Στα δισδιάστατα προβλήματα, επίσης, χρησιμοποιούνται τριγωνικά πεπερασμένα στοιχεία με έξι κόμβους και δέκα κόμβους (Linear Strain Triangle και Quadratic Strain Triangle αντίστοιχα). Επίσης είναι πιθανό να συναντήσει κανείς και πεπερασμένα στοιχεία τύπου Lagrange. Αυτά τα πεπερασμένα στοιχεία φαίνονται στο αμέσως επόμενο σχήμα.



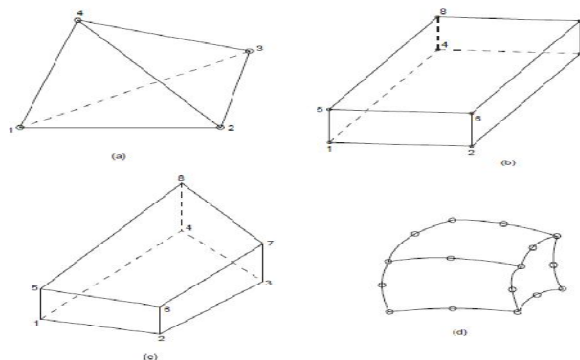
Σχήμα 5.11 : Πεπερασμένα στοιχεία τύπου Lagrange.

Τα άξονο-συμμετρικά πεπερασμένα στοιχεία είναι χρήσιμα όταν ο αναλυτής πρόκειται να εξετάσει άξονο-συμμετρικά προβλήματα όπως για παράδειγμα η ανάλυση κυλινδρικών δεξαμενών αποθήκευσης. Επίσης, τέτοιου είδους πρόβλημα είναι και η ανάλυση διαφόρων αξόνων, που γίνεται σε ευρεία κλίμακα πλέον από τους μηχανικούς. Στο σχήμα 5.12, βλέπουμε κάποια πεπερασμένα στοιχεία τα οποία είναι άξονο-συμμετρικά.



Σχήμα 5.12 : Πεπερασμένα στοιχεία άξονο-συμμετρικού τύπου.

Τα τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία χρησιμοποιούνται για την επίλυση προβλημάτων τριών διαστάσεων, γεγονός απόλυτα λογικό. Το τετραεδρικό στοιχείο είναι το βασικότερο πεπερασμένο στοιχείο που χρησιμοποιείται σε τέτοιου είδους προβλήματα. Στο Σχήμα 5.13 βλέπουμε διάφορα είδη πεπερασμένων στοιχείων που βρίσκουν εφαρμογή σε τρισδιάστατα προβλήματα. Υπάρχει πληθώρα προβλημάτων στον χώρο, που απαιτούν την πιο σύνθετη και επίπονη διαδικασία για την επίλυσή τους. Η διαδικασία επίλυσης, η ακρίβεια αλλά και ο χρόνος της ολοκλήρωσης είναι συνάρτηση της τεχνολογίας των ηλεκτρονικών υπολογιστών κάθε εποχής. Είναι πασιφανές ότι η τεχνολογία των ηλεκτρονικών υπολογιστών βελτιώνεται με ρυθμό εκθετικό, όπως επίσης και η ταχύτητά τους. Επομένως προβλήματα ανάλυσης τριών διαστάσεων ολοένα και απλοποιούνται, διευκολύνοντας έτσι το έργο των αναλυτών, σχεδιαστών και μηχανικών παγκοσμίως. Λογισμικά με χρήση πεπερασμένων στοιχείων για ανάλυση μοντέλων στον χώρο, έχουν βελτιστοποιηθεί και καταλαμβάνουν θέση στους υπολογιστές χιλιάδων εταιρειών αλλά και εκπαιδευτικών ιδρυμάτων. Ακολουθεί το σχήμα που απεικονίζει, όπως και αναφέραμε, τρισδιάστατα στοιχεία.



Σχήμα 5.13 : Πεπερασμένα στοιχεία τρισδιάστατων προβλημάτων.

5.4.2 ΓΕΝΕΣΗ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ

Για την γένεση πλέγματος απαιτείται δημιουργία κομβικών συντεταγμένων και στοιχείων. Κατά την διαδικασία αυτή διεξάγεται και αυτόματη αρίθμηση των κόμβων καθώς και των στοιχείων. Στην αυτόματη γένεση πλέγματος, απαιτείται μόνο το γεωμετρικό μοντέλο του αντικειμένου. Επίσης απαιτούνται και κάποιες άλλες παράμετροι όπως ο τύπος του στοιχείου και η πυκνότητα του πλέγματος. Ακόμη, οι οριακές συνθήκες εισάγονται και επομένως σαν είσοδος θεωρούνται οι συνθήκες της φόρτισης. Αυτά ισχύουν για την αυτόματη γένεση πλέγματος. Για τις άλλες μεθόδους (όχι αυτόματης γένεσης πλέγματος), χρειάζεται και να εισάγουμε επιπλέον την τμηματοποίηση του αντικειμένου σε μικρότερες περιοχές. Ακολουθεί μία ταξινόμηση των μεθόδων γένεσης πλέγματος. Έχουμε τις ακόλουθες μεθόδους:

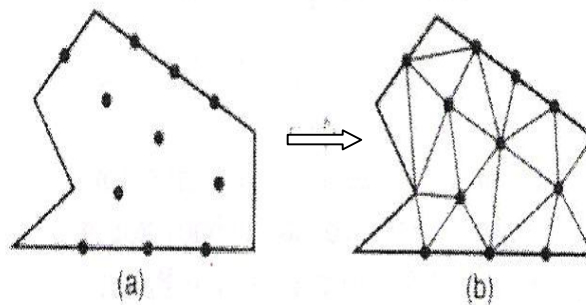
- Μέθοδος σύνδεσης κόμβων.
- Μέθοδος αποσύζευξης τοπολογίας.

- Μέθοδος αποσύζευξης γεωμετρίας.
- Μέθοδος βάσει πλέγματος.
- Μέθοδος απεικόνισης.

Στο σημείο αυτό, θα αναλύσουμε κάθε μία από τις παραπάνω μεθόδους. Η ανάλυση θα γίνει με σχετικά σύντομη περιεκτικότητα σε λεπτομέρειες, καθώς δεν κρίνεται σκόπιμο επί του παρόντος να εισέλθουμε- εμβαθύνουμε σε αυτού του είδους τις λεπτομέρειες.

Μέθοδος σύνδεσης κόμβων.

Η μέθοδος σύνδεσης κόμβων είναι πολύ διαδεδομένη και γνωστή διότι είναι πάρα πολύ απλή στην ιδέα δημιουργίας της. Στην μέθοδο αυτή έχουμε δύο στάδια τα οποία και αναλύονται σχηματικά στο σχήμα 5.14. Στο σχήμα 5.14 (a) φαίνεται η γένεση των κόμβων ενώ στο (b) απεικονίζεται η γένεση των στοιχείων.

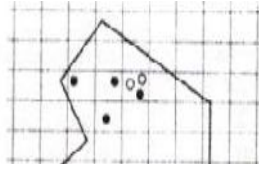


Σχήμα 5.14 : Μέθοδος σύνδεσης κόμβων.

Όσον αφορά την γένεση των κόμβων, αναφέρουμε κάποια ερευνητικά έργα τα οποία είναι τα ακόλουθα :

Μέθοδος του Cavendish

Στην μέθοδο την παρούσα, εισάγονται αρχικά κόμβοι στο όριο του αντικειμένου με τη βοήθεια του χεριού του χρήστη. Έπειτα οι εσωτερικοί κόμβοι παράγονται αυτόματα έτσι ώστε να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις πυκνότητας πλέγματος. Στο σχήμα 5.15 φαίνεται αυτή η μέθοδος.



Σχήμα 5.15: Μέθοδος γένεσης κόμβων του Cavendish.

Μέθοδος του Shimada

Στην περίπτωση αυτή, γεμίζεται το εσωτερικό του αντικείμενου με «φουσαλίδες». Στο σχήμα 5.15 φαίνεται αυτό το γεγονός. Έπειτα θεωρούνται τα κέντρα τους σαν κόμβοι. Το πόσο μεγάλη θα προκύψει η κάθε φουσαλίδα εξαρτάται από παραμέτρους όπως η κατανομή θερμοκρασίας που αντιστοιχεί στην επιθυμητή πυκνότητα του πλέγματος. Έπειτα, οι θέσεις των φουσαλίδων προσδιορίζονται ως εξής: Πρέπει να ικανοποιείται η συνθήκη της ισορροπίας των εσωτερικών δυνάμεων μεταξύ τους.

Όσον αφορά τη γένεση των στοιχείων, αναφέρουμε ότι οι κόμβοι οι οποίοι έχουν ήδη δημιουργηθεί, συνδέονται έπειτα μεταξύ τους με σκοπό να δημιουργήσουν στοιχεία. Τα στοιχεία αυτά δεν θα πρέπει να ταυτίζονται το ένα με το άλλο αλλά επίσης θα πρέπει να καλύπτουν και ολόκληρη την γεωμετρία.

Μέθοδος Lee

Κατά την μέθοδο την παρούσα, πάνω στο αντικείμενο υπερτίθεται ένα τετραγωνικό πλέγμα του οποίου το βήμα είναι ίσο προς το επιθυμητό μέγεθος στοιχείων. Έπειτα, οι κόμβοι που δημιουργήθηκαν στο προηγούμενο βήμα, συσχετίζονται με τα κελιά του πλέγματος υποβάθρου. Έτσι, κελιά και οι αντίστοιχοι κόμβοι επισκέπτονται στήλη προς στήλη από αριστερά προς τα δεξιά. Μέσα στην ίδια στήλη συμβαίνει από τα κάτω προς τα πάνω. Επιπλέον, μέσα σε ένα κελί, οι κόμβοι διατάσσονται έτσι ώστε να υπάρχει σειρά αύξουσας τετμημένης x . Επίσης οι κόμβοι με την ίδια τετμημένη x , τακτοποιούνται κατά σειρά αύξουσας τεταγμένης y . Οι κόμβοι επισκέπτονται κατά σειρά και επιπρόσθετα για κάθε κόμβο, οι γειτονικοί κόμβοι βρίσκονται με σκοπό να διαμορφώσουν τους κόμβους ενός καλοσηματισμένου τετραπλεύρου. Στο ενδεχόμενο αδυναμίας σχηματισμού ενός ικανοποιητικά ορισμένου τετραπλεύρου, δημιουργείται αντίστοιχο τριγωνικό στοιχείο.

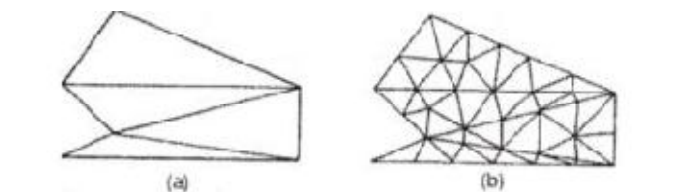
Μέθοδος τριγωνοποίησης Delaunay

Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι η πιο ευρέως διαδεδομένη μέθοδος. Είναι στην ουσία μία μέθοδος γένεσης τριγώνων η οποία συνδέει συγκεκριμένους κόμβους. Με αυτόν τον τρόπο μεγιστοποιείται το άθροισμα των μικρότερων γωνιών σε όλα τα τρίγωνα που δημιουργούνται. Με τον τρόπο αυτό, αποφεύγονται τα λεπτά τρίγωνα. Η συνήθης τριγωνοποίηση Delaunay αρχίζει από ένα διάγραμμα Voronoi. Ένα διάγραμμα Voronoi αποτελείται από N σημεία και έχει επίσης N πολύγωνα. Κάθε τέτοιο πολύγωνο έχει κέντρο το αντίστοιχο σημείο. Κάθε πολύγωνο Voronoi έχει έναν κόμβο ο οποίος συνδέεται με αυτό.

Μετά τη γένεση του διαγράμματος Voronoi, είμαστε σε θέση να δημιουργήσουμε τριγωνικά, τριών διατάσεων, στοιχεία συνδέοντας τα σημεία που σχετίζονται με γειτονικά πολύγωνα Voronoi. Όσον αφορά την τριγωνοποίηση Delaunay, αυτή μπορεί να γεννηθεί απευθείας από το υπάρχον σύνολο σημείων, χωρίς να είναι αναγκαίο να έχει γίνει αρχικά το διάγραμμα Voronoi. Αυτό πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο του Watson για τη δισδιάστατη τριγωνοποίηση. Με τον αλγόριθμο αυτόν, ένα τρίγωνο διαμορφώνεται από τρία μη-συνευθειακά σημεία όταν ένας κύκλος που περνάει από αυτά, που ονομάζεται περιγεγραμμένος του τριγώνου, δεν περιλαμβάνει άλλα σημεία.

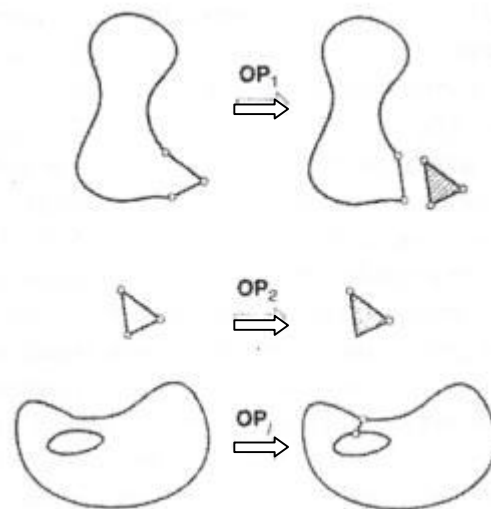
Μέθοδος Αποσύζευξης Τοπολογίας.

Η μέθοδος αποσύζευξης τοπολογίας είναι μία δισδιάστατη μέθοδος που αναπτύχθηκε από τον Wordenweber (1984). Σύμφωνα με αυτήν την μέθοδο, το αντικείμενο προσεγγίζεται από ένα πολύγωνο και το πολύγωνο κατακερματίζεται σε ένα σύνολο μεγάλων στοιχείων συνδέοντας τις κορυφές των προς διαμόρφωση τριγώνων. Αυτό φαίνεται στο Σχήμα 5.16 (a). Στη συνέχεια αυτά τα μεγάλα στοιχεία εκλεπτύνονται έτσι ώστε να ικανοποιήσουν την απαιτούμενη πυκνότητα κατανομής πλέγματος. Αυτό το βλέπουμε στο Σχήμα 5.16 (b). Το μέγεθος των στοιχείων και το σχήμα τους δεν είναι δυνατόν να ελεγχθούν εξωτερικά, επειδή τα μεγάλα στοιχεία προσδιορίζονται μόνο τους μέσω της αρχικής τοπολογίας του αντικείμενου, κυρίως από την κατανομή των κορυφών. Επομένως, οι κορυφές που ανήκουν στο ίδιο μεγάλο στοιχείο μπορούν να προσδιορισθούν από τη μέθοδο τριγωνοποίησης Delaunay.



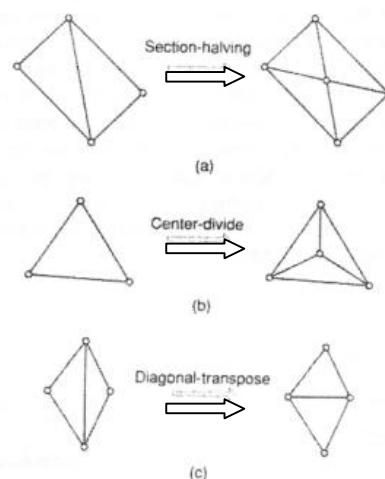
Σχήμα 5.16 : Μέθοδος αποσύζευξης τοπολογίας.

Στην διάρκεια της διαδικασίας γένεσης ενός συνόλου τριγώνων από τις κορυφές, ο Wordenweber εισήγαγε και εφάρμοσε τους λεγόμενους τελεστές Euler κατά τον τρόπο που αυτοί χρησιμοποιούνται για την μοντελοποίηση όγκων. Όπως βλέπουμε στο Σχήμα 5.17, πρώτος εφαρμόζεται ο τελεστής Wordenweber OP_j ώστε να απαλείψει τις τρύπες στο αντικείμενο. Έπειτα, διαμορφώνονται τα τρίγωνα από τις κορυφές και αποχωρίζονται από το αντικείμενο εφαρμόζοντας επαναληπτικά τον τελεστή OP₁. Αυτό γίνεται μέχρι να απομείνουν μόνο 3 κορυφές. Τέλος, εφαρμόζεται ο τελεστής OP₂ για να διαμορφώσει το τελευταίο τρίγωνο. Όταν το αντικείμενο μετατραπεί σε ένα σύνολο μεγάλων τριγώνων τότε κάθε τρίγωνο εκλεπτύνεται με σκοπό να συνάδει με την απαιτούμενη πυκνότητα του πλέγματος.



Σχήμα 5.17 : Τελεστές διαμόρφωσης τριγώνων.

Όπως ήδη αναφέραμε, για την εκλέπτυνση μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι ακόλουθες τρεις μέθοδοι οι οποίες και φαίνονται στο Σχήμα 5.18. Το Σχήμα 5.18 (a) δείχνει μια μέθοδο που εφαρμόζεται όταν δύο λεπτά τρίγωνα συναντώνται κατά μήκος της μακρύτερης πλευράς τους. Πιό συγκεκριμένα προστίθεται ένας κόμβος στην κοινή ακμή οπότε τα γειτονικά στοιχεία υποδιαιρούνται συνδέοντας έτσι τους κόμβους τους με τον νέο κόμβο. Στο σχήμα 5.18 (b), ένα μεγάλο τριγωνικό στοιχείο υποδιαιρείται προσθέτοντας ένα νέο κόμβο στο κέντρο βάρους του. Όταν το υποδιαιρέσουμε με κάποιον από τους τρόπους που ήδη αναφέραμε, τότε ίσως συναντήσουμε λεπτά τρίγωνα. Στο Σχήμα 5.18 (c) φαίνονται τα τρίγωνα αυτά.



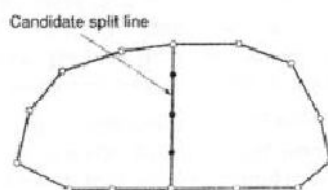
Σχήμα 5.18 : Μέθοδοι για την εκλέπτυνση τριγώνων.

Η μέθοδος της αποσύζευξης της τοπολογίας μπορεί να επεκταθεί και στην τρισδιάστατη γένεση πλέγματος. Το αντικείμενο προσεγγίζεται από ένα πολύεδρο. Έπειτα το πολύεδρο κατατέμενεται σε τετραεδρικά στοιχεία, συνδέοντας τις κορυφές τους. Στην συνέχεια, τα τετραεδρικά στοιχεία εκλεπτύνονται με υποδιαίρεση. Οι Woo και Thomasma πρότειναν

τελεστές παραπλήσιους με αυτούς που πρότεινε ο Wordenweber. Έτσι καθίσταται πίο εύκολος ο σχηματισμός των τετραεδρικών στοιχείων.

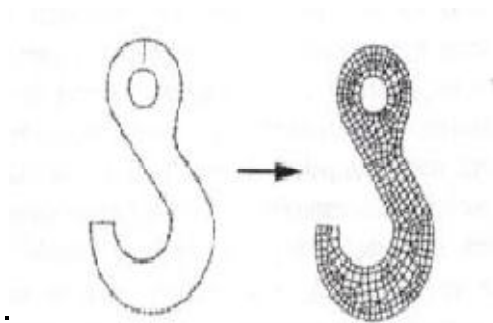
Μέθοδος Αποσύζευξης Γεωμετρίας.

Όσον αφορά τις μεθόδους αποσύζευξης γεωμετρίας, αυτές χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη αφορά αυτές που βασίζονται σε αναδρομές και η δεύτερη αυτές που βασίζονται σε επαναλήψεις. Η μέθοδος αναδρομικής αποσύζευξης δημιουργεί τριγωνικά και τετρακομβικά στοιχεία στις δύο διαστάσεις με τον εξής τρόπο: Αρχικά, το πρώτο αντικείμενο διαιρείται σε κυρτά μέρη είτε με το χέρι είτε αυτόματα. Επομένως για κάθε κυρτό τμήμα εισάγονται κόμβοι στο σύνορό του. Αυτό γίνεται με σκοπό να ικανοποιηθεί η επιθυμητή πυκνότητα πλέγματος. Έπειτα το κάθε κυρτό τμήμα υποδιαιρείται προσεγγιστικά στο μέσον του μεγαλύτερου άξονα. Το σχήμα 5.19 δείχνει αυτό που περιγράψαμε μόλις. Στην συνέχεια εισάγονται περισσότεροι κόμβοι κατά μήκος της διαχωριστικής γραμμής σύμφωνα με τις απαιτήσεις της πυκνότητας πλέγματος και τα δύο μισά υποδιαιρούνται. Αυτό συμβαίνει επαναληπτικά μέχρι να γίνουν τρίγωνα ή τετράπλευρα.



Σχήμα 5.19 : Υποδιαίρεση κυρτού τμήματος.

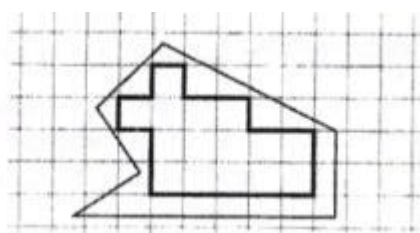
Κάποιες μέθοδοι επαναλαμβάνουν την υποδιαίρεση μέχρι να καταλήξει σε εξάγωνα ή οκτάγωνα και παράγουν τριγωνικά και τετραπλευρικά στοιχεία από αυτά, σύμφωνα με κάποια πρότυπα της βάσης δεδομένων. Έτσι, είναι δυνατόν να πάρουμε περισσότερα τριγωνικά ή τετραπλευρικά στοιχεία. Το σχήμα αμέσως μετά, δείχνει ένα παράδειγμα γένεσης πλέγματος με χρήση μιας επαναληπτικής μεθόδου. Η μέθοδος που αναλύσαμε παραπάνω μπορεί να επεκταθεί και στη γένεση τρισδιάστατου πλέγματος. Σε αυτήν την ανάλυση, το αντικείμενο υποδιαιρείται σε δύο μικρότερους όγκους μέσω ενός διαχωριστικού επιπέδου. Έτσι όλοι οι όγκοι περιορίζονται σε τετράεδρα. Σε αντίθεση με τη δισδιάστατη περίπτωση στην οποία μπορούν να παραχθούν τετράπλευρα, εδώ δεν είναι δυνατόν να γεννηθούν τετράεδρα με άμεσο τρόπο.



Σχήμα 5.20 : Γένεση πλέγματος μέσω επαναληπτικής μεθόδου.

Μέθοδος βάσει πλέγματος.

Η συγκεκριμένη μέθοδος (grid-based approach, G.B.A) πηγάζει από το γεγονός ότι ένα grid μοιάζει με ένα πλέγμα. Επίσης, αυτό μπορεί να μετασχηματισθεί σε πλέγμα υπό την προϋπόθεση ότι τα κελιά του grid κατά μήκος του συνόρου του αντικειμένου μπορούν να μετασχηματιστούν σε στοιχεία. Η μέθοδος του Thacker είναι πιθανώς η πρώτη ολοκληρωμένη δημοσίευση που έκανε χρήση της μεθόδου βάσει grid. Σύμφωνα με αυτήν τη μέθοδο, ένα αντικείμενο επικαλύπτεται από ένα τριγωνικό grid και τα σημεία του grid που προκύπτουν εκτός αντικειμένου εξαλείφονται. Με τον τρόπο αυτό αφήνουν ένα σύνορο μορφής ζιγκ-ζαγκ. Επομένως τα σημεία του grid που βρίσκονται πάνω στο σύνορο μετακινούνται προς το σύνορο του αντικειμένου με σκοπό να αποτελέσουν το τελικό το πλέγμα. Μία άλλη πρόταση είναι του Kikuchi, που επέκτεινε τη μέθοδο έτσι ώστε εκτός από κυρίως τετράπλευρα να περιέχει ακόμη και μερικά τρίγωνα. Σε αυτήν την περίπτωση χρησιμοποιείται ορθογωνικό grid. Αυτό φαίνεται στο σχήμα 5.21 που έπεται. Ένα μειονέκτημα των μεθόδων αυτών είναι ότι υπάρχει απώλεια δεδομένων σε ότι αφορά μικρά γεωμετρικά χαρακτηριστικά, που χάνονται στην περίπτωση που είναι μικρότερα από το βήμα του grid.

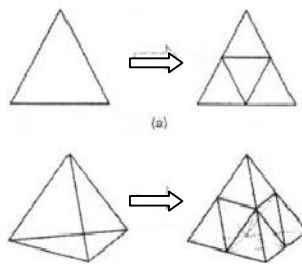


Σχήμα 5.21 : Ορθογωνικό grid μεθόδου βάσει πλέγματος.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η μέθοδος των Yerry και Shephard (1983) που χρησιμοποίησαν μια δενδρική αναπαράσταση του αντικειμένου για την δημιουργία-γένεση των πλεγμάτων. Ένα quadtree (δενδρικό) είναι το δισδιάστατο ανάλογο του octree. Αναπαριστά ένα δισδιάστατο αντικείμενο σαν ένα σύνολο τετραγώνων με καθένα να έχει διαφορετικό μέγεθος, με επαναληπτική υποδιαίρεση της rootsquare που περικλείει το αντικείμενο. Τα πλέγματα γεννώνται ως ακολούθως:

- Δημιουργείται ένα rootsquare το οποίο περικλείει το αντικείμενο και υπο-διαίρεται σε
- ⇒ τέσσερα τέταρτα, μειώνοντας στο μισό τις πλευρές του. Έπειτα κάθε ένα τέταρτο, ταξινομείται ανάλογα με τη σχετική θέση του ως προς το αντικείμενο. Εφόσον το τέταρτο δεν είναι ούτε ολοκληρωτικά εντός αλλά ούτε και ολοκληρωτικά εκτός του αντικειμένου, τότε αυτό διαιρείται ξανά. Αυτή η διαδικασία υποδιαίρεσης επαναλαμβάνεται μέχρι να ικανοποιηθεί η κατανομή πυκνότητας πλέγματος και τα τέταρτα να βρεθούν είτε ολοκληρωτικά εντός του αντικειμένου ή να επικαλύπτονται.
 - ⇒ Έπειτα, κάθε ένα τροποποιημένο επικαλυπτόμενο τέταρτο, διαιρείται μέσα στα τριγωνικά στοιχεία χρησιμοποιώντας το αποθηκευμένο πρότυπο που βασίζεται στο σχήμα του τετάρτου. Στην συνέχεια, το ολοκληρωτικά εντός τέταρτο, επίσης υποδιαίρεται ώστε να ικανοποιήσει την προσαρμογή του πλέγματος με τα γειτονικά πλέγματα. Δυο γειτονικά στοιχεία ονομάζονται συμβατά εφόσον μοιράζονται μία ολόκληρη ακμή.
 - ⇒ Σε αυτό το βήμα, οι κόμβοι των στοιχείων μετακινούνται ελαφρώς με σκοπό να βελτιώσουν τα σχήματα των πλεγμάτων. Αυτή η μέθοδος έχει επεκταθεί και στις τρεις διαστάσεις χρησιμοποιώντας κωδικοποίηση octree. Στις τρεις διαστάσεις, τα επικαλυπτόμενα όγδοα τα οποία ονομάζονται octants, τροποποιούνται έτσι ώστε να καταλαμβάνουν μόνον τον εσωτερικό χώρο του αντικειμένου. Έπειτα διασπάται σε τετράεδρα. Το τροποποιημένο επικαλυπτόμενο όγδοο θα είναι αναγκαίο να διασπασθεί σε τετράεδρα που ικανοποιούν την συμβιβαστικότητα του πλέγματος με τα γειτονικά όγδοα. Θεωρώντας όλες τις ειδικές περιπτώσεις, αυτό απαιτεί έναν αρκετά περίπλοκο αλγόριθμο.

Όσον αφορά και τα τελευταία χρόνια, οι Jung και Lee (1993), πρότειναν μια νέα μέθοδο. Η αρχή γινόταν από την τριγωνική ρίζα δηλαδή τετράεδρη ρίζα στις τρεις διαστάσεις αντί της τετραγωνικής ρίζας. Με αυτήν τη μέθοδο, η παράσταση quadree ενός δισδιάστατου αντικειμένου είναι ουσιαστικά η προσέγγιση του αντικειμένου σαν ένα σύνολο τριγώνων. Με τον ίδιο τρόπο, η αναπαράσταση octree ενός τρισδιάστατου αντικειμένου θα ήταν ένα σύνολο τετραέδρων. Με τον τρόπο αυτό μπορούμε να λάβουμε τα πλέγματα συλλέγοντας τα ολοκληρωτικά εντός και επικαλυπτόμενα τρίγωνα. Αυτό θα γίνει μετά από μετακίνηση των κορυφών των επικαλυπτόμενων τριγώνων στο αρχικό σύνορο του αντικειμένου. Στο ακόλουθο σχήμα, το σχήμα 5.22 φαίνεται το πώς μία τριγωνική ρίζα διαχωρίζεται σε τέσσερα τρίγωνα και επίσης το πώς μία τετραεδρική ρίζα διασπάται σε οκτώ τετράεδρα.



Σχήμα 5.22 : Διαχωρισμός του τετραέδρου και του τριγώνου.

Μέθοδος απεικόνισης.

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται κατά πλειοψηφία στις γεννήτριες πλέγματος του εμπορίου ανά τον κόσμο. Εδώ απαιτείται η υποδιαίρεση του αντικειμένου σε περιοχές ειδικής τοπολογίας. Στις δύο διαστάσεις αυτές οι περιοχές έχουν τέσσερις πλευρές ενώ στις τρεις διαστάσεις έχουν μορφή κουτιού. Εντός κάθε περιοχής, το πλέγμα παράγεται αυτόματα με απεικόνιση της περιοχής προς ένα κανονικοποιημένο χωρίο αναφοράς. Έτσι δημιουργείται διακριτοποίηση στο κανονικοποιημένο χωρίο με βάση την επιθυμητή πυκνότητα πλέγματος όπως και επαναπαικόνιση του διακριτοποιημένου χωρίου προς την αρχική περιοχή του πραγματικού αντικειμένου. Στην συνέχεια, το τελικό πλέγμα προκύπτει από την ενοποίηση των περιοχών που διακριτοποιήθηκαν ανεξάρτητα όλες μεταξύ τους. Οι κοινές πλευρές που μοιράζονται σε γειτονικές, πάντα, περιοχές πρέπει να έχουν τον ίδιο αριθμό κόμβων. Επομένως θα ικανοποιείται το συμβιβαστό του πλέγματος.

5.4.3 ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ

Στην σύγχρονη εποχή, υπάρχει η ανάγκη για ακρίβεια και ταχύτητα στις προσομοιώσεις των κατασκευών. Μερικές μέθοδοι γένεσης πλέγματος δεν είναι ικανές να δημιουργήσουν πλέγμα που θα έχει ικανοποιητική επάρκεια για μετέπειτα ανάλυση. Έπεται μία ακολουθία με το τί πρέπει να εφαρμοστεί για να υπάρξει βελτίωση πλέγματος:

- Υποδιαίρεση των στοιχείων τα οποία και δεν είναι ικανοποιητικά σε στοιχεία τύπου που είναι βολικός.
- Εφόσον δεν υπάρχει η κατάλληλη πυκνότητα πλέγματος, τότε αυτό εκλεπτύνεται. Αυτό συμβαίνει εάν κάποια από τα στοιχεία υποδιαιρεθούν σε μικρότερα, ενώ κάποια άλλα μείνουν ανέπαφα.
- Εφόσον δεν υπάρχουν στοιχεία που είναι καλά σχηματισμένα εφαρμόζουμε τεχνικές εξομάλυνσης, όπως για παράδειγμα την Laplace.

5.5 ΣΥΝΟΨΗ-ΕΙΔΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Για την ανάλυση μίας μηχανολογικής κατασκευής με πεπερασμένα στοιχεία ακολουθούνται τα εξής βήματα:

- Κατασκευή της γεωμετρίας του αντικειμένου.
- Επιλογή είδους των πεπερασμένων στοιχείων και έπειτα διακριτοποίηση της γεωμετρίας σε πεπερασμένα στοιχεία.
- Ορισμός των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών και επιβολή των οριακών συνθηκών.
- Επιλογή του τρόπου επίλυσης.
- Επίλυση.
- Λήψη των αποτελεσμάτων.

Είδη πεπερασμένων στοιχείων:

Τα κυριότερα πεπερασμένα στοιχεία είναι :

Ράβδος (2 κόμβοι)
Δοκός (2 κόμβοι)
Σύρμα – σχοινί
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)

Μεμβράνη
Κέλυφος
Ορθοτροπικό – πολυστρωματικό υλικό
Τετράεδρο (3 κόμβοι)

Πίνακας 5.1 : Κυριότερα είδη πεπερασμένων στοιχείων.

Κλείνοντας αυτό το κεφάλαιο αναφέρουμε ότι υπάρχουν αρκετά είδη προβλημάτων τα οποία και απαιτούν και ειδική και συγκεκριμένη αντιμετώπιση από τον κάθε μελετητή σήμερα. Το όποια κενά του παρελθόντος όμως, μπορεί να τα καλύψει η μεγαλύτερη και καλύτερη ακμή των σύγχρονων λογισμικών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΚΩΝΙΚΩΝ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ

6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΟΔΟΝΤΩΤΟΥ ΤΡΟΧΟΥ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

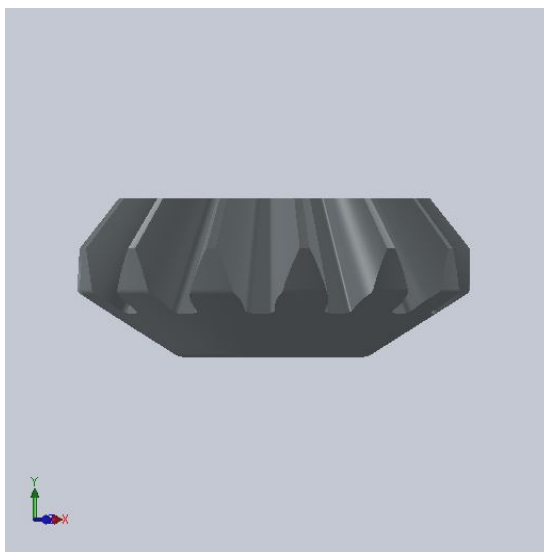
Τα χαρακτηριστικά του οδοντωτού τροχού του οποίου θα προσομοιώσουμε την σφυρηλάτηση παρουσιάζονται σε αυτό το σημείο. Επίσης παρουσιάζονται και τα χαρακτηριστικά του αρχικού τεμαχίου που θα σφυρηλατηθεί.

Κωνικός οδοντωτός τροχός

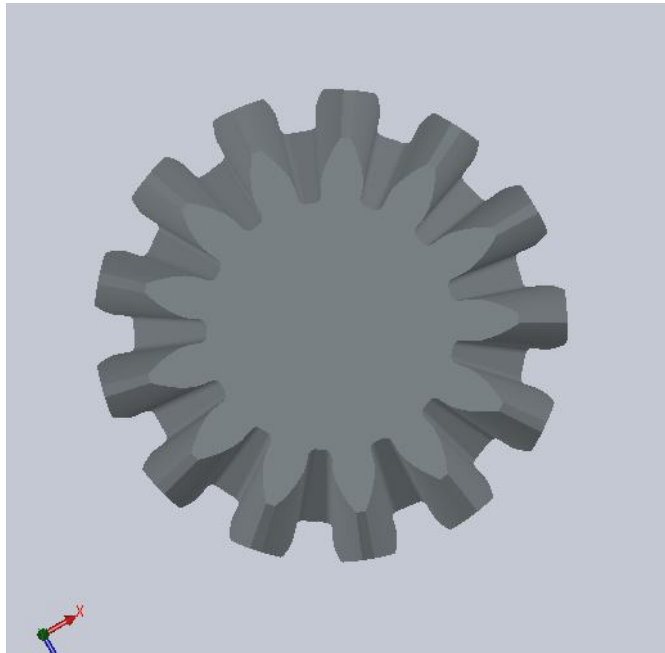
- **Module: 4.95 mm**
- **Pressure angle: 24°**
- **Αριθμός οδόντων Z=13**
- **Ύψος οδοντωτού τροχού: 27 mm**

Η συμμετρία της προσομοίωσης θα είναι ίση με $1/26 = 13.84615385^\circ$

Ο όγκος του κωνικού οδοντωτού τροχού είναι ίσος με **54634.606 mm³** και επομένως και ο όγκος του αρχικού προδιαμορφώματος θα είναι επίσης ίσος με **54634.606 mm³**. Αυτό πρέπει να ισχύει σαν συνθήκη ώστε να έχουμε πλαστική παραμόρφωση, αλλά όχι συμπίεση του υλικού κατά την σφυρηλάτηση. Στα επόμενα σχήματα βλέπουμε τον οδοντωτό τροχό από δύο διαφορετικές οπτικές γωνίες.



Σχήμα 6.1 : Οδοντωτός τροχός της προσομοίωσης.



Σχήμα 6.2 : Οδοντωτός τροχός της προσομοίωσης σε κάτοψη.

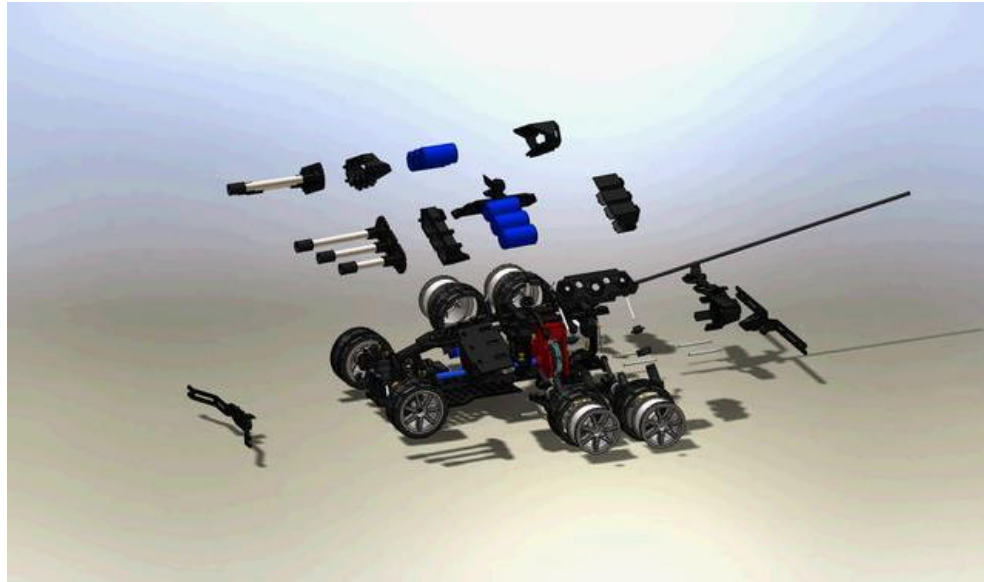
6.2 ΣΧΕΔΙΑΣΤΙΚΟ ΠΑΚΕΤΟ SOLIDWORKS

Η σύγχρονη εξέλιξη της τεχνολογίας και η παγκόσμια τάση να γίνονται όλες οι εργασίες μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή, έχουν σαν επακόλουθο να έχουν αντικατασταθεί οι σχεδιαστικοί πίνακες από σύγχρονα λογισμικά όπως το autocad το rhino και το solidworks.

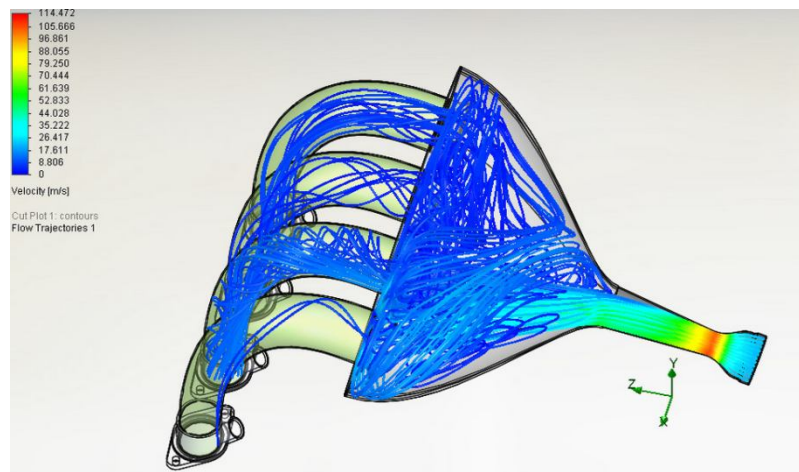
Πλεονέκτημα του πακέτου solidworks είναι ότι αποτελεί ένα πακέτο CAD καθώς και CAE , CAM. Ενδείκνυται για σχεδιασμό σε ένα επίπεδο(2D) αλλά κυρίως για σχεδιασμό σε τρισδιάστατο περιβάλλον(3D). Οι δυνατότητές του λογισμικού περιλαμβάνουν:

- Εύκολη και εύχρηστη δημιουργία εξαρτημάτων.
- Δυνατότητα συναρμογών – assembly
- Δυνατότητα προσομοίωσης ροής
- Δυνατότητα προσομοίωσης (solidworks simulation) όπου μπορούν να γίνουν διάφορες αναλύσεις όπως στατικές, δυναμικές καθώς και θερμικές.
- Προσομοίωση με πεπερασμένα στοιχεία.
- Προσομοίωση κίνησης μεταξύ συναρμολογημάτων.

Ακόμη προσφέρει και άλλες πολλές δυνατότητες μεταξύ των οποίων και επιλογή από βάση δεδομένων τυποποιημένων εξαρτημάτων όπως κοχλίες , οδοντωτούς τροχούς έδρανα κυλίσεως και άλλα. Τέλος προφέρει την δυνατότητα σχεδιασμού μεταλλικών κατασκευών όπως επιφανειών καθώς και καλουπιών, δυνατότητα πολύ σημαντική για τον σύγχρονο κατασκευαστή μηχανολόγο μηχανικό. Στα επόμενα σχήματα παρουσιάζονται ορισμένες από τις δυνατότητες του DS Solidworks.



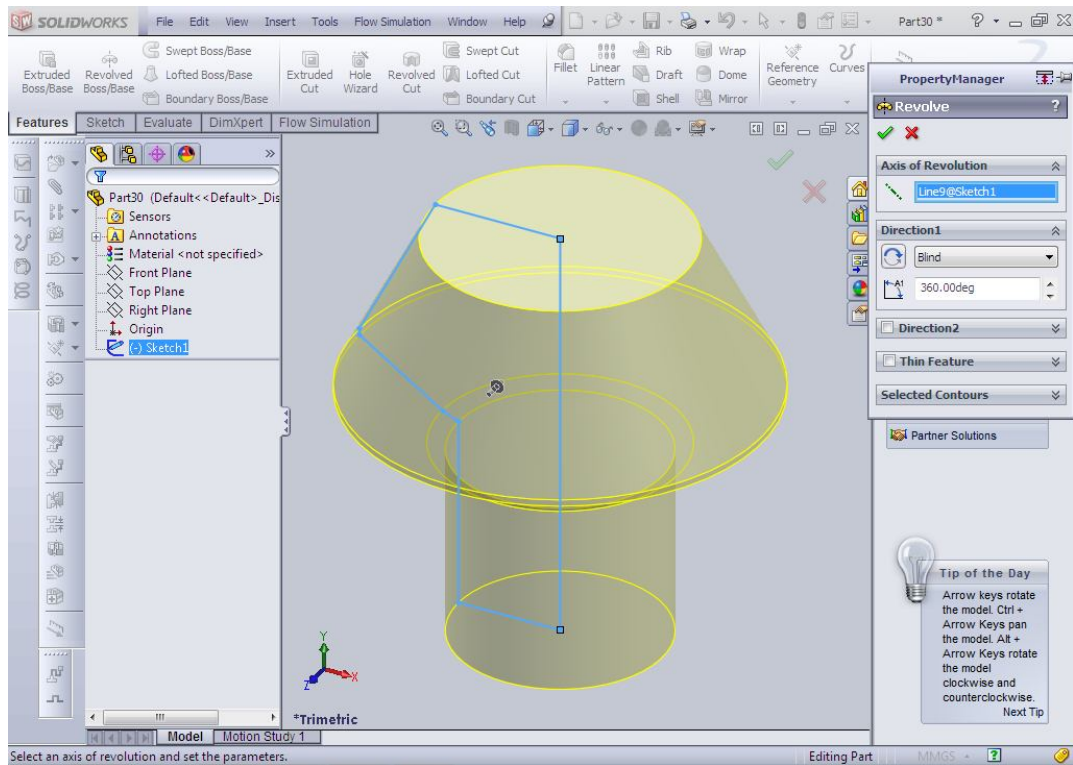
Σχήμα 6.3 : Απεικόνιση πολύπλοκης κατασκευής μέσω συναρμογής στο solidworks.



Σχήμα 6.4 : Δυνατότητα προσομοίωσης ροής στο solidworks.

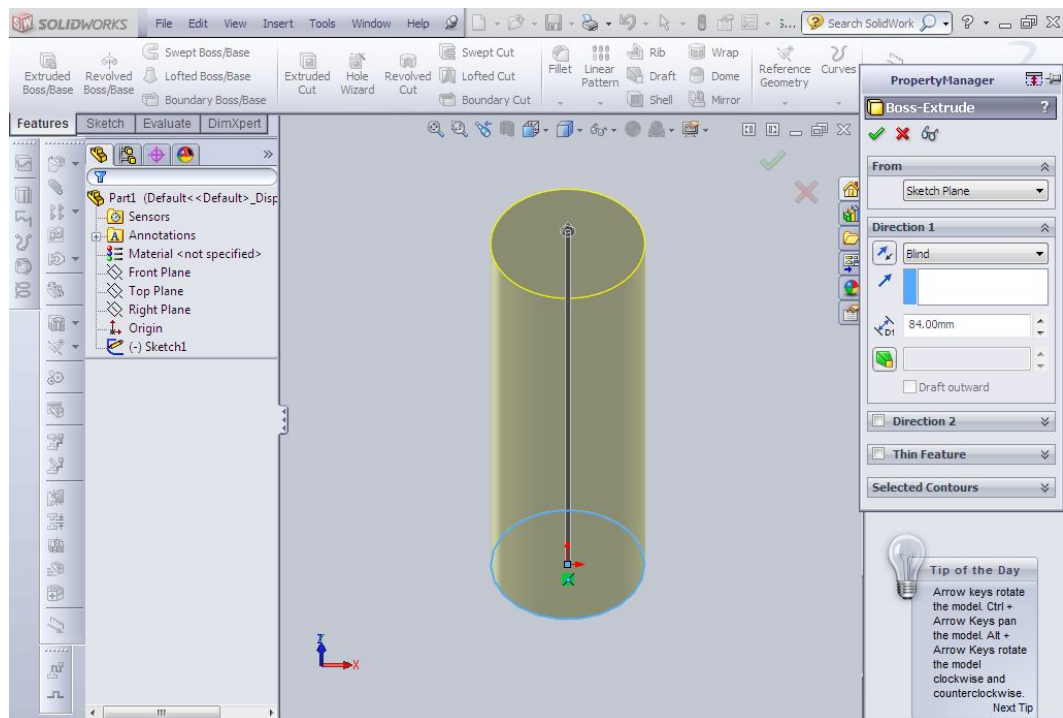
6.3 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΤΟ ΠΑΚΕΤΟ SOLIDWORKS

Αρχικά, με την εντολή **sketch**, επιλέγουμε να δημιουργήσουμε ένα σχέδιο στο επίπεδο front plane, το οποίο στη συνέχεια θα επεκτείνουμε στον 3D χώρο χρησιμοποιώντας την εντολή **revolved boss/ base**. Έτσι, λαμβάνουμε το αρχικό δοκίμιο στις διαστάσεις που πρέπει.



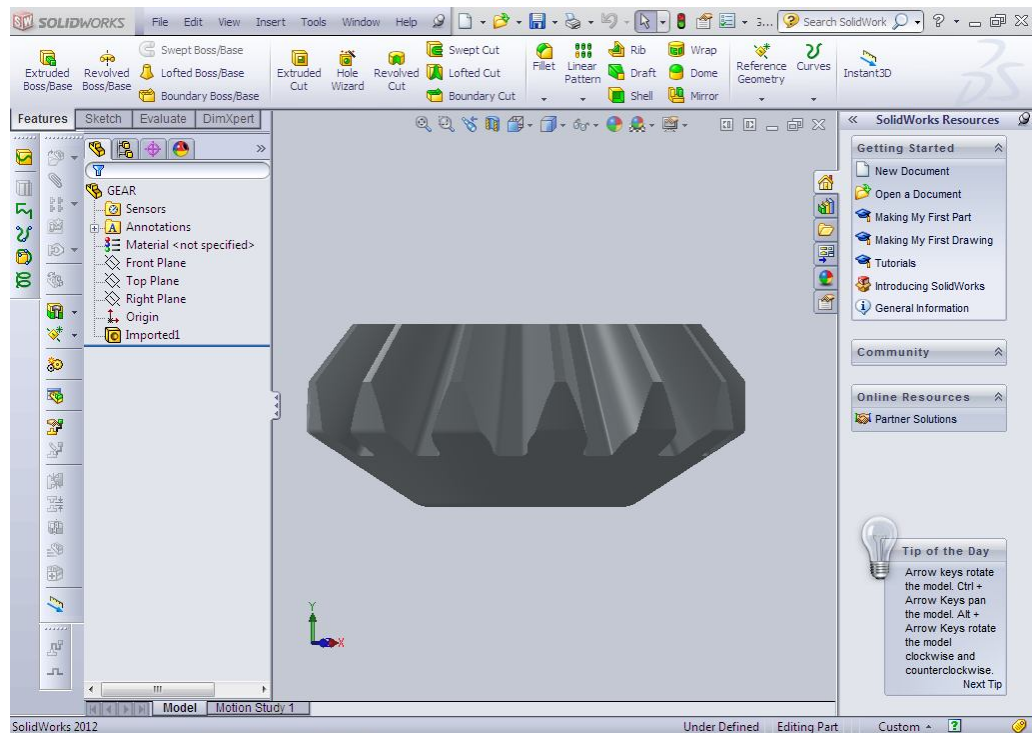
Σχήμα 6.5 : Κατασκευή δοκιμίου στο solidworks.

Με παρόμοιο τρόπο, αφού όμως κατασκευάσουμε σαν αρχικό σχέδιο ένα κύκλο, με την χρήση της εντολής **extruded boss/base** θα επεκτείνουμε στο χώρο, λαμβάνοντας έτσι και ένα κυλινδρικό αρχικό δοκίμιο το οποίο φαίνεται στο επόμενο σχήμα.



Σχήμα 6.6 : Κατασκευή κυλινδρικού δοκιμίου(προδιαμορφώματος).

Στην συνέχεια κατασκευάζεται ο κωνικός οδοντωτός τροχός, ο οποίος απεικονίζεται στο επόμενο σχήμα.

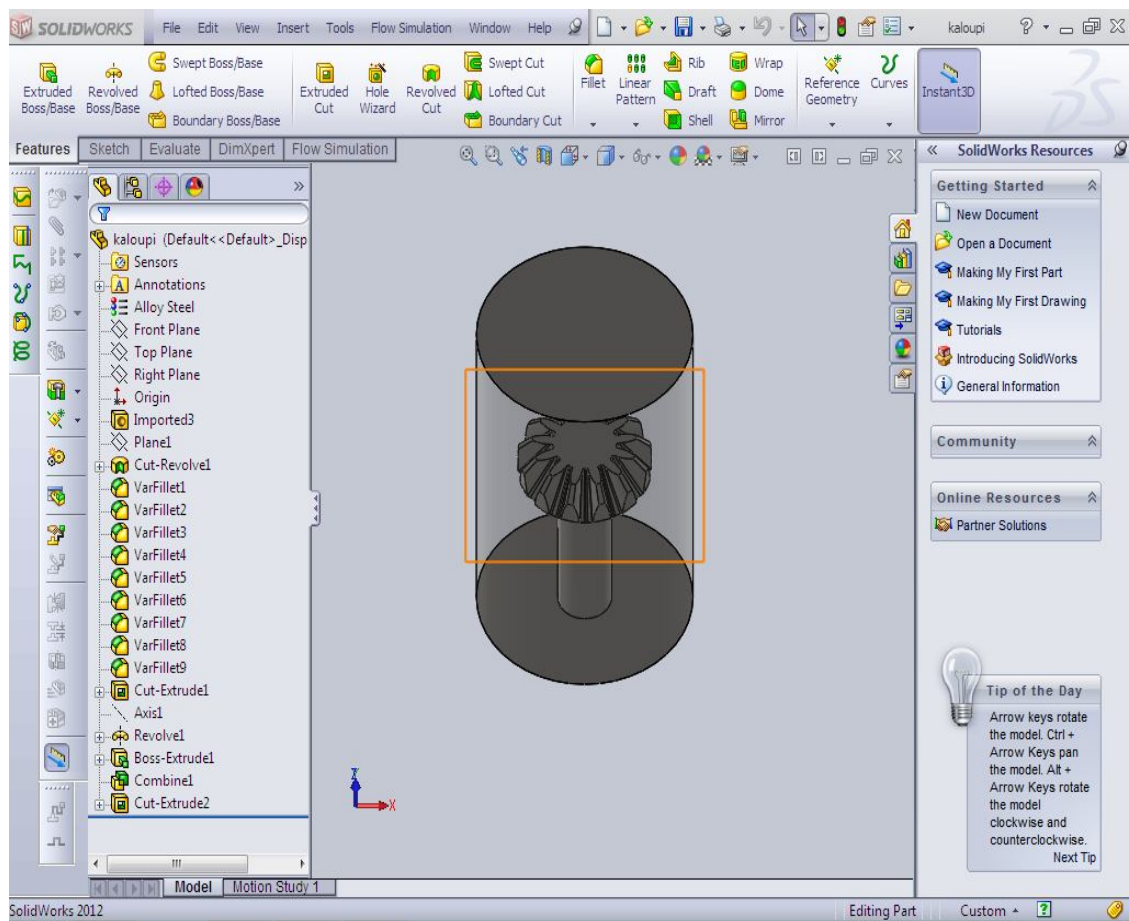


Σχήμα 6.7 : Κατασκευή οδοντωτού τροχού.

Στην συνέχεια από το κεντρικό μενού του solidworks, επιλέγουμε:

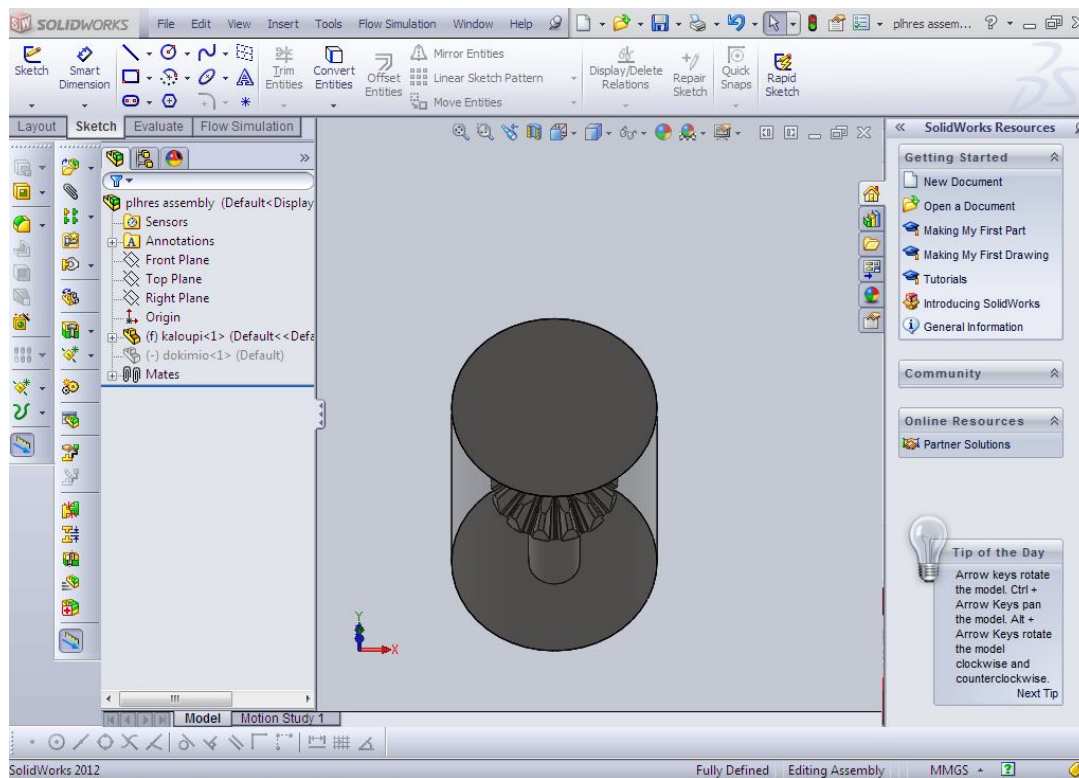
Add-Ins→Solidworks flow simulation

Με τον τρόπο αυτό κάναμε εισαγωγή της πρόσθετης λειτουργίας του solidworks, flow simulation, η οποία θα χρησιμεύσει για να πάρουμε το καλούπι σφυρηλάτησης. Έχοντας σαν αρχικό σχέδιο τον οδοντωτό τροχό, φτιάχνουμε τα κλεισίματα (Lid 1 και Lid 2), βάσει των οποίων θα ορισθεί η προσομοίωση της ροής ρευστού. Στην συνέχεια από το μενού του flow simulation, από το **command manager**, επιλέγουμε την επιλογή **check geometry**. Έπειτα από το αναδυόμενο παράθυρο, επιλέγουμε το create fluid body assembly. Οπότε δημιουργήθηκε το καλούπι σφυρηλάτησης το οποίο και παρουσιάζεται αμέσως. Το καλούπι αυτό που παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα είναι της γεωμετρίας που θα εισηχθεί στο Marc για την διενέργεια της προσομοίωσης(σε συμμετρία, για να γλιτώσουμε υπολογιστική ισχύ).



Σχήμα 6.8 : Καλούπι σφυρηλάτησης μετά από το flow simulation.

Στην συνέχεια, μέσω **assembly**, εισάγεται το προδιαμόρφωμα στο καλούπι και επομένως έχουμε ένα αρχείο assembly που φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα.



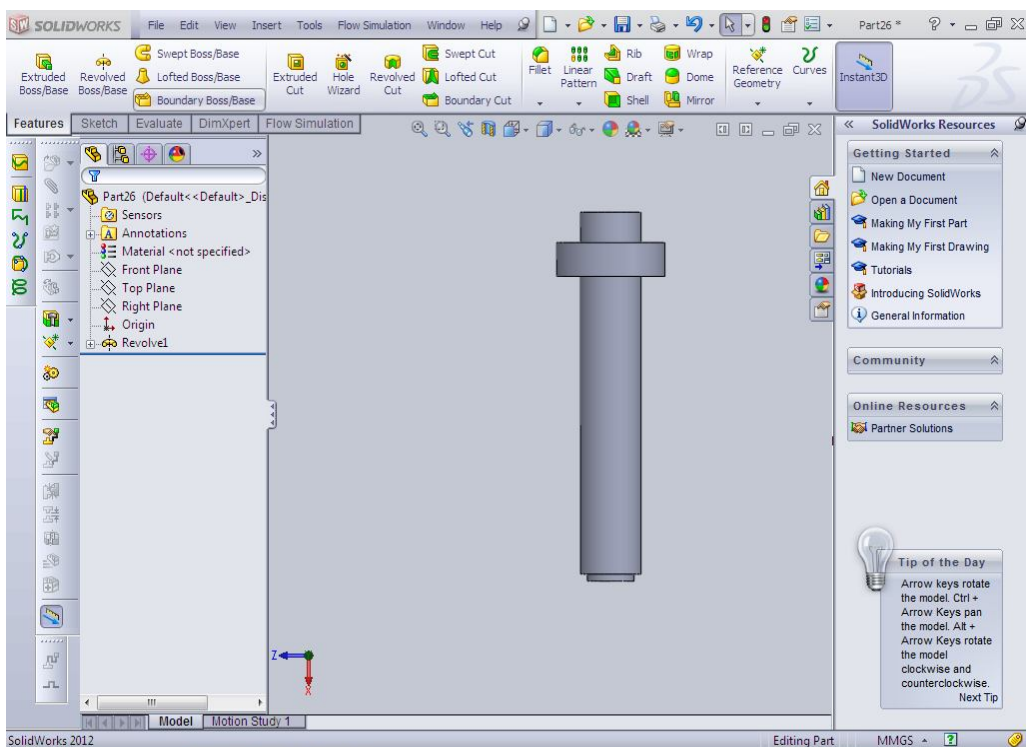
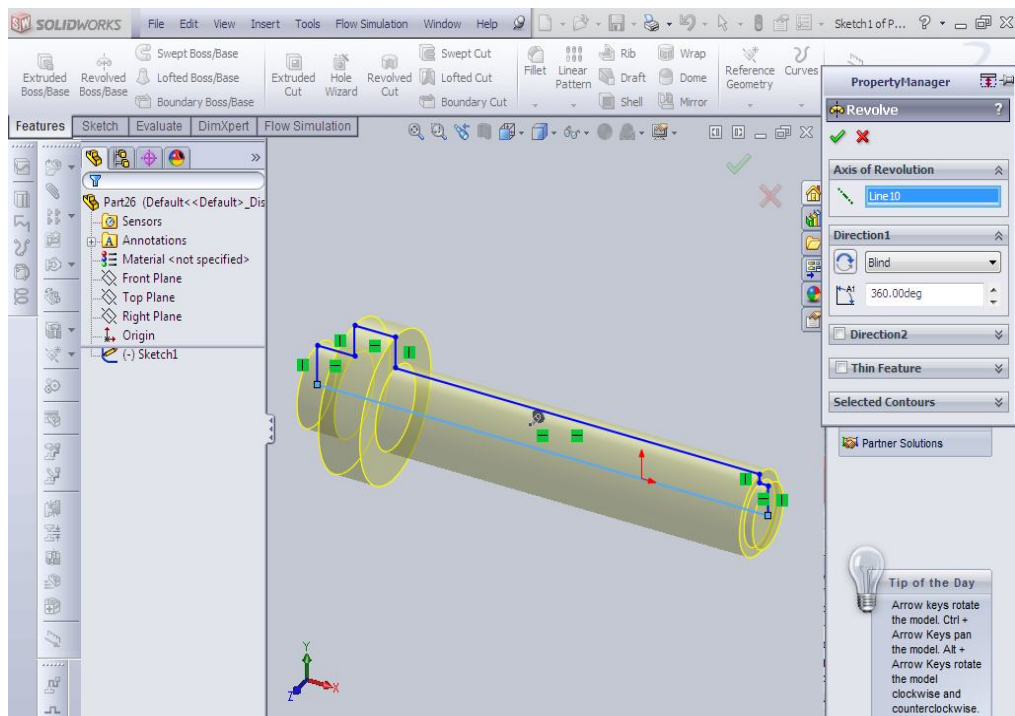
Σχήμα 6.9: Συναρμογή καλουπιού και προδιαμορφώματος.

Έπειτα, θα τμηματοποιήσουμε το assembly και θα πάρουμε την γεωμετρία στο 1 προς 26(μισό δόντι), την οποία και θα χρησιμοποιήσουμε στο Marc για την προσομοίωση.

6.4 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΜΗΤΡΑΣ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ

6.4.1 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ

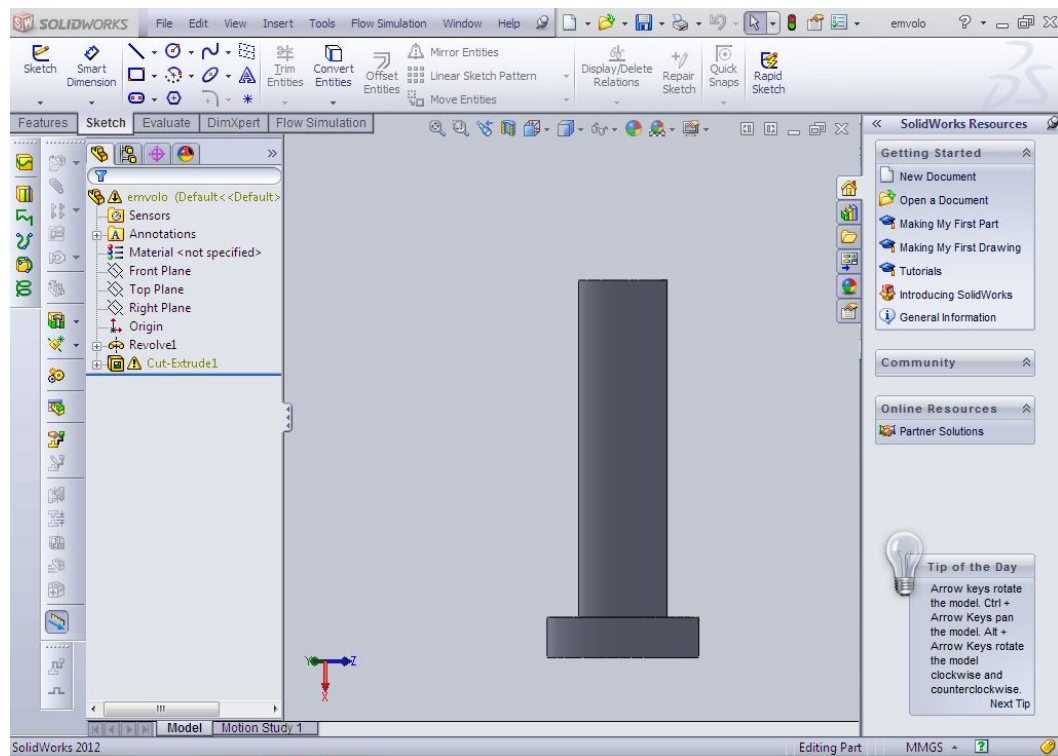
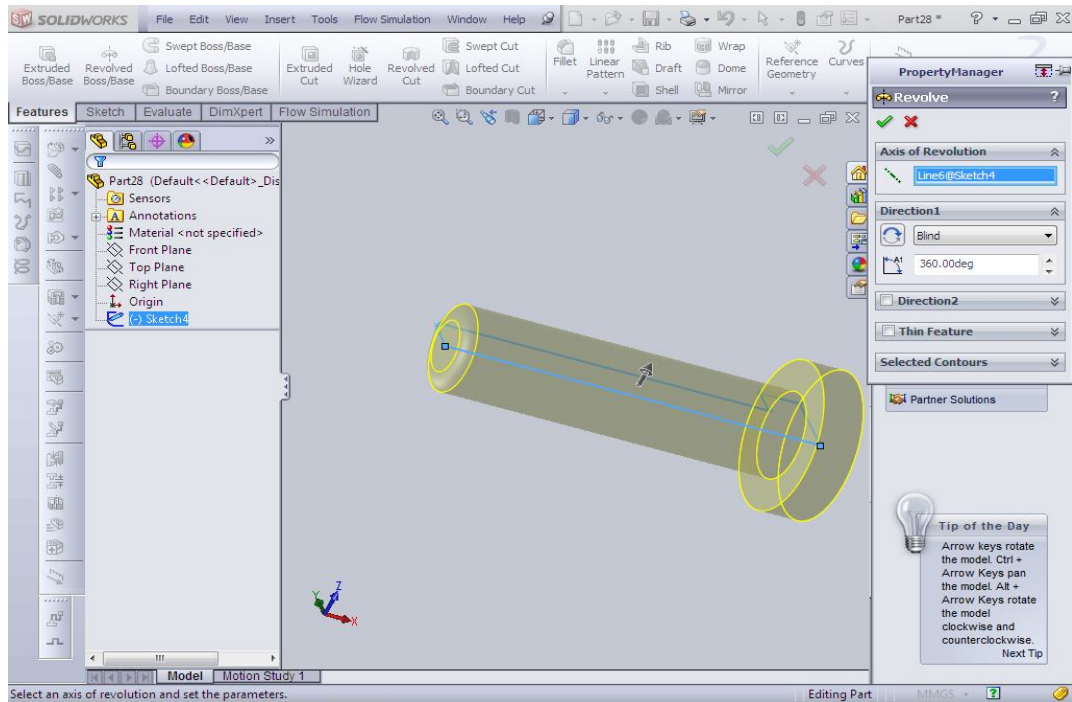
Σε αυτή την φάση, σχεδιάζουμε τα άνω και κάτω εσωτερικά τμήματα της μήτρας σφυρηλάτησης, όπως επίσης και τον εξωλκέα και το έμβολο. Η διαδικασία περιγράφεται συνοπτικά με τα ακόλουθα σχήματα:



Σχήμα 6.10 : Σχεδιασμός και τελική μορφή εξωλκεία.

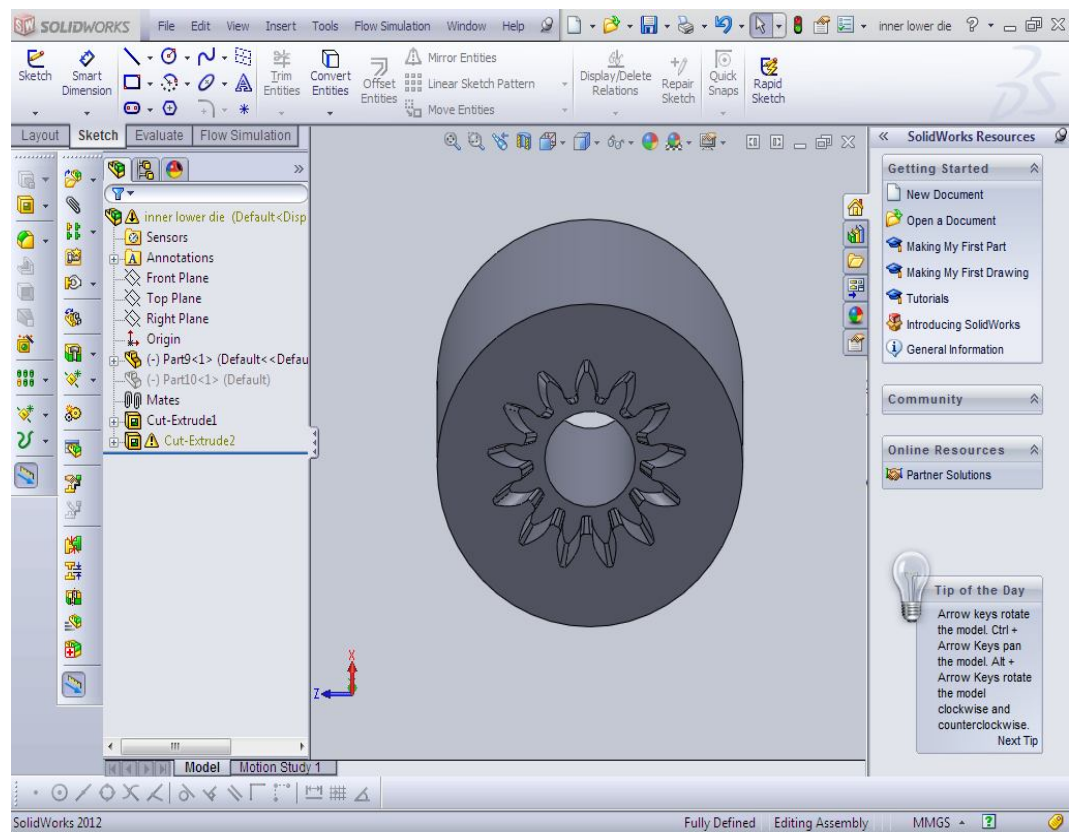
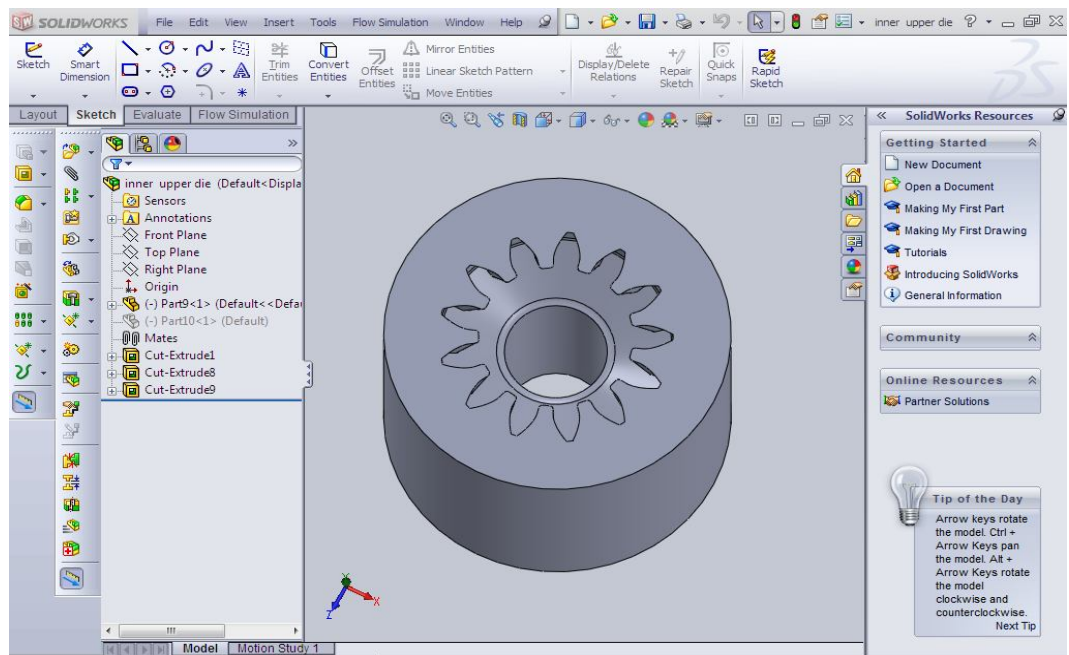
Σημειώνουμε ότι αφού δημιουργήσουμε ένα sketch σε ένα επίπεδο, στην συνέχεια με τη χρήση της εντολής **Revolved Boss/Base** το επεκτείνουμε στο χώρο γύρω από τον άξονα που φαίνεται στο παραπάνω σχήμα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να πάρουμε την τελική μορφή

του εξωλκέα. Κατά τρόπο όμοιο, σχεδιάζουμε με τις ανάλογες διαστάσεις και το έμβολο, το οποίο διακρίνεται στο επόμενο σχήμα:



Σχήμα 6.11 : Σχεδιασμός και τελική μορφή εμβόλου.

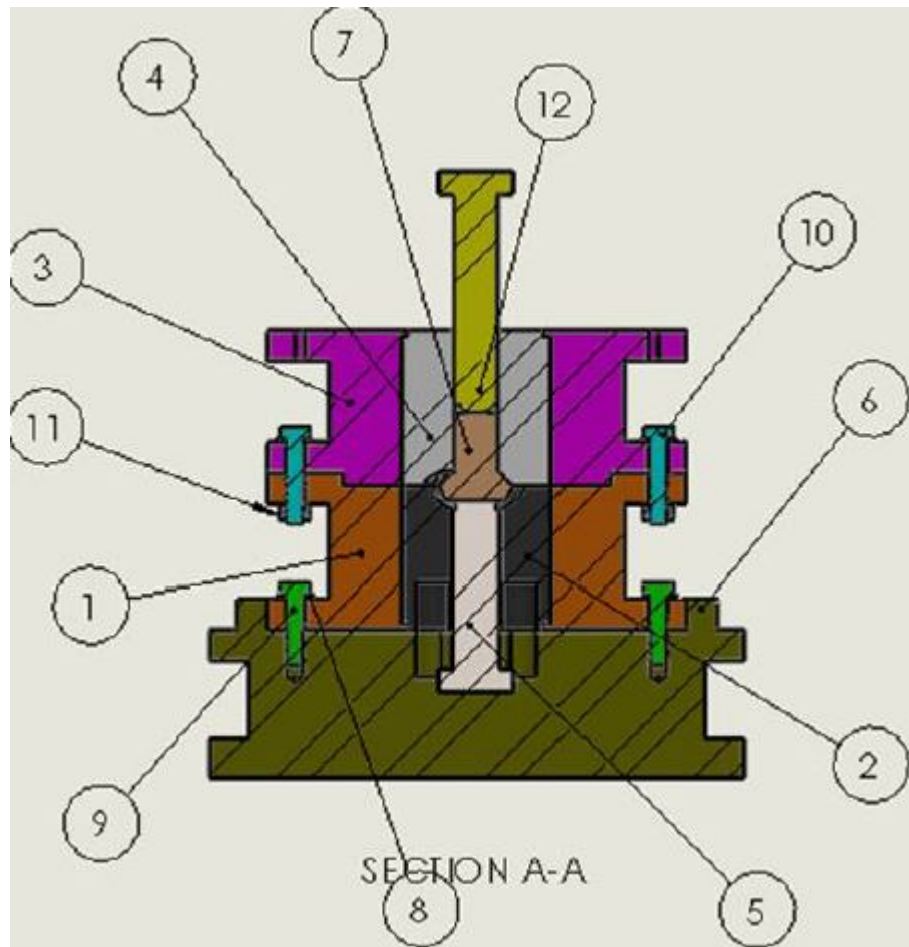
Ακολουθεί ο σχεδιασμός του άνω και του κάτω εσωτερικού τμήματος της μήτρας σφυρηλάτησης. Συνεπώς, έπονται τα σχήματα:



Σχήμα 6.12: Σχεδιασμός άνω και κάτω εσωτερικών τμημάτων της μήτρας.

6.4.2 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΣΥΝΟΛΟΥ ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ

Στο επόμενο σχήμα βλέπουμε με λεπτομέρεια το τελικό συναρμολογημένο καλούπι [11], όπου και παρουσιάζονται αναλυτικά τα επιμέρους τμήματά του.

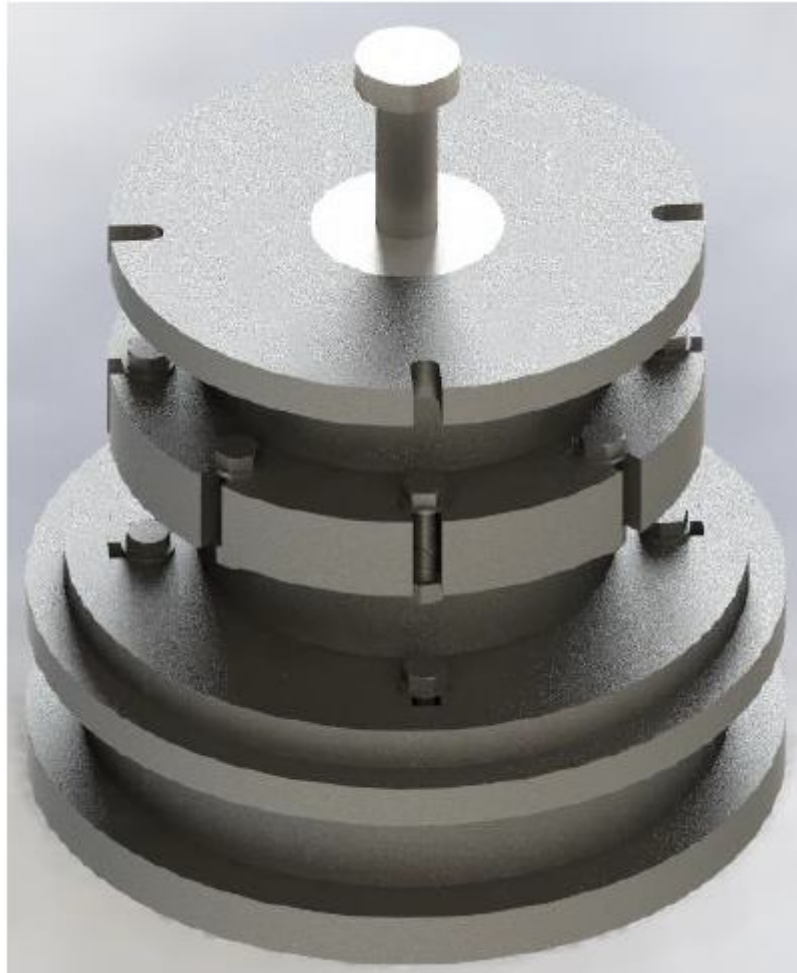


Σχήμα 6.13 : Τελικό συναρμολόγημα καλουπιού με τα επιμέρους στοιχεία του

Αντικείμενο A/A	Ονομασία	Ποσότητα
1	Κάτω εξωτερική μήτρα	1
2	Κάτω εσωτερική μήτρα	1
3	Πάνω εξωτερική μήτρα	1
4	Πάνω εσωτερική μήτρα	1
5	Εξωλκέας	1
6	Κέλυφος	1
7	Προδιαμόρφωμα	1
8	Ροδέλες M12	12
9	Κοχλίες συγκράτησης M12(L45)	4
10	Κοχλίες συγκράτησης M12(L55)	8
11	Περισκόχλια M12	8
12	Έμβολο	1

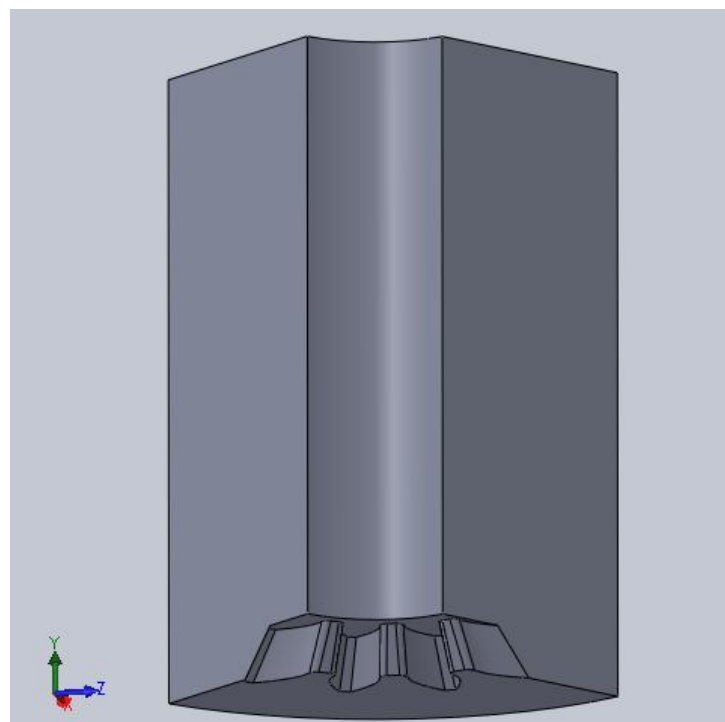
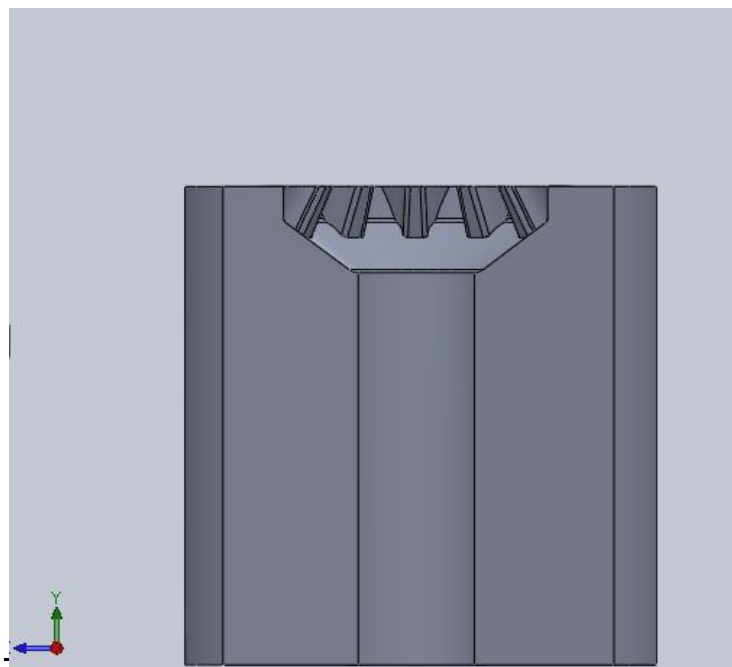
Πίνακας 6.1 : Επιμέρους στοιχεία καλουπιού σφρηλάτησης.

Αμέσως μετά ακολουθεί το συναρμολογημένο καλούπι όπως φαίνεται με λεπτομέρεια ,μετά την συναρμολόγηση [11].



Σχήμα 6.14 : Συναρμολόγημα καλούπιού.

Είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι στην παρούσα εργασία, βασιστήκαμε στο παραπάνω τελικό συναρμολόγημα. Όμως, τα άνω και κάτω εσωτερικά τμήματα της μήτρας, έχουν σχεδιαστεί και παρουσιαστεί με βάση τις διαστάσεις του οδοντωτού τροχού του οποίου η σφυρηλάτηση θα προσομοιωθεί στο επόμενο κεφάλαιο. Επομένως, θα γίνει η συναρμογή των άνω και κάτω εσωτερικών τμημάτων της μήτρας με τα υπόλοιπα εξωτερικά τμήματα. Κρίνεται σκόπιμο στην φάση που είμαστε να παρουσιάσουμε τα άνω και κάτω εσωτερικά τμήματα της μήτρας σε τομή , ώστε να υπάρχει ολοκληρωμένη εικόνα τους.



Σχήμα 6.15: Άνω και κάτω εσωτερικά τμήματα καλουπιού σε τομή.

Μέθοδος κατασκευής και υλικά

Αρχικά, αναφέρουμε ότι γίνεται η συναρμολόγηση (όπως και προαναφέρθηκε) του καλουπιού. Οι άνω και κάτω εσωτερικές μήτρες τοποθετούνται στις εξωτερικές με σφικτή συναρμογή. Το άνω μέρος του εμβόλου τοποθετείται στο έμβολο της πρέσας και το κέλυφος των μητρών δένεται στην τράπεζα της εργαλειομηχανής.

Όσον αφορά τα υλικά, το έμβολο, ο εξωλκέας και τα άνω και κάτω εσωτερικά τμήματα της μήτρας είναι φτιαγμένα από σκληρυμένο Χάλυβα X32CrMoV33. Αυτό, λόγω αυξημένης αντοχής του συγκεκριμένου Χάλυβα αλλά και της μεγάλης του σκληρότητας, ιδιότητα που είναι σημαντική όσον αφορά την μικρή παραμόρφωσή του, που έχει αποτέλεσμα στην πιο πιστή διαμόρφωση του τελικού προϊόντος. Έτσι παράγεται μεγαλύτερη ακρίβεια στην διαμόρφωση των οδόντων.

Για την κατασκευή των εσωτερικών μητρών εφαρμόζεται η μέθοδος της ηλεκτροδιάβρωσης σύρματος(wire –cut EDM) . Επίσης αναφέρουμε ότι τα δύο εσωτερικά τμήματα των μητρών που έχουμε σχεδιάσει, είναι εφικτό να κατασκευαστούν με φρεζάρισμα.

Όσον αφορά την τιμή της σφικτής συναρμογής, λήφθηκε ίση με 0.05 mm, που προκύπτει από διάφορες παρεμφερείς μελέτες. Αυτό θα μειώσει την τιμή των περιμετρικών εφελκυστικών τάσεων. Τέλος, για την πραγματοποίηση της σφυρηλάτησης υπήρξε και κατάλληλη λίπανση.

Στάδια συναρμολόγησης καλουπιού

- 1) Τοποθέτηση άνω και κάτω εσωτερικών μητρών στις αντίστοιχες εξωτερικές με σφικτή συναρμογή , όπως περιγράψαμε και πριν.
- 2) Τοποθέτηση του εξωλκέα επάνω στο κέλυφος.
- 3) Τοποθέτηση του κάτω τμήματος του καλουπιού στο κέλυφος.
- 4) Τοποθέτηση ροδελών και κοχλιών συγκράτησης(σύσφιξη κάτω τμήματος καλουπιού με το κέλυφος).
- 5) Τοποθέτηση προδιαμορφώματος.
- 6) Τοποθέτηση άνω τμήματος καλουπιού και σύσφιξη άνω και κάτω τμήματος.
- 7) Τοποθέτηση του εμβόλου στο άνω τμήμα του καλουπιού και έναρξη κατεργασίας.
- 8) Απομάκρυνση του εμβόλου και αποσυναρμολόγηση.
- 9) Με την βοήθεια του εξωλκέα αφαιρείται ο οδοντωτός τροχός που προέκυψε.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ ΚΩΝΙΚΟΥ ΟΔΟΝΤΩΤΟΥ ΤΡΟΧΟΥ

7.1 ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ MSC MARC

Όπως ήδη προαναφέραμε, λόγω της ραγδαίας εξάπλωσης των λογισμικών και της διαρκούς εξέλιξής τους, παλαιότερες μέθοδοι προσομοίωσης που βασίζονταν στην κατασκευή μοντέλων υπό κλίμακα και την πειραματική προσομοίωση της συμπεριφοράς τους, τείνουν να περιορισθούν σημαντικά. Έτσι την θέση τους παίρνουν σταδιακά μέθοδοι προσομοίωσης με προηγμένα λογισμικά, μία από της οποίες είναι και η ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία. Υπάρχουν πολλά πακέτα πεπερασμένων στοιχείων , μερικά από τα οποία είναι τα εξής:

- Patran

- Nastran

- LS DYNA

- Abaqus

- Ansys

- και Marc .

Όσον αφορά το Marc, είναι πολύ χρήσιμο στην μελέτη και την προσομοίωση καταπονήσεων και παραμορφώσεων σε διάφορες κατασκευές και συναρμογές. Με τη βοήθειά του, υπάρχει δυνατότητα βελτιστοποίησης των παραγωγικών διαδικασιών μέσω βέλτιστου σχεδιασμού προϊόντων, ώστε να εξοικονομείται υλικό και χρόνος. Με τον τρόπο αυτό περιορίζεται και το κόστος παρασκευής των προϊόντων, πολύ σημαντικός παράγοντας για την οικονομική πορεία μίας βιομηχανίας. Επίσης το Marc μπορεί να δώσει λύση σε προβλήματα αστοχίας υλικού σε κατασκευές με πολύ σύνθετη γεωμετρία και επομένως βελτιώνεται έτσι η αξιοπιστία. Παράγοντας επίσης πολύ σημαντικός για το κύρος και την πορεία μίας βιομηχανίας. Το **MSC MARC** έχει την δυνατότητα να κάνει πολλών ειδών αναλύσεις, όπως :

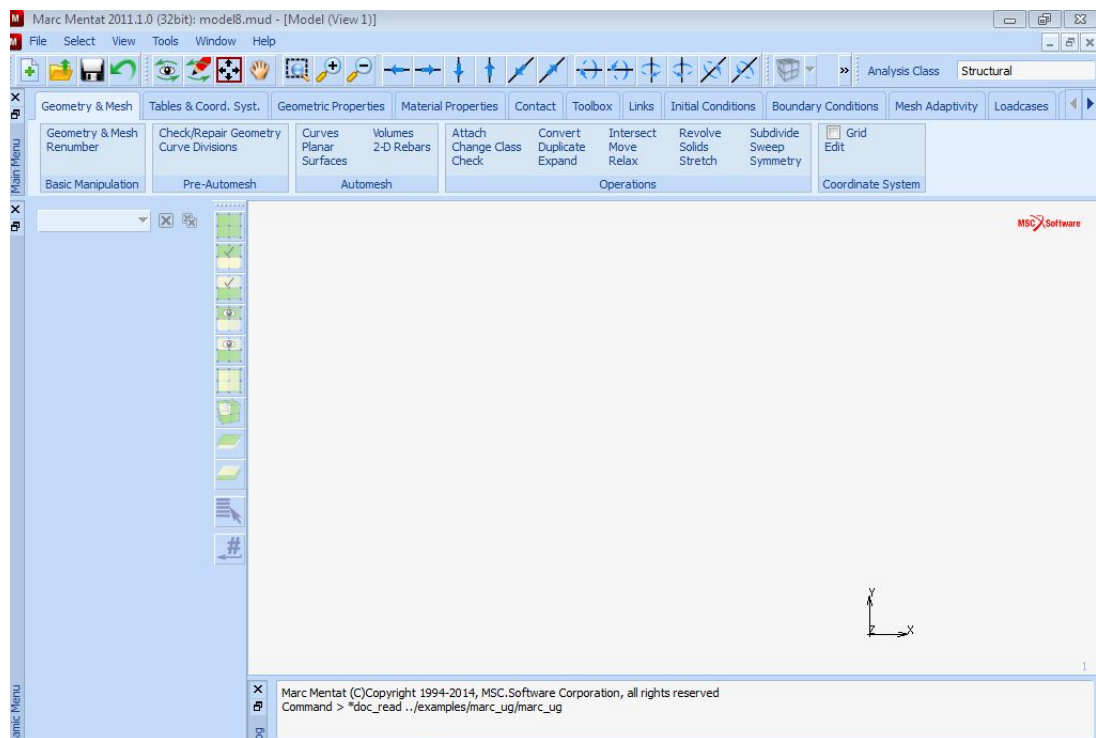
- Στατική ανάλυση

- Δυναμική ανάλυση

- **Θερμική ανάλυση**
- **Ηλεκτροστατική ανάλυση**
- **Μαγνητική ανάλυση**
- **Ακουστική ανάλυση**
- **Ρευστοδυναμική ανάλυση**

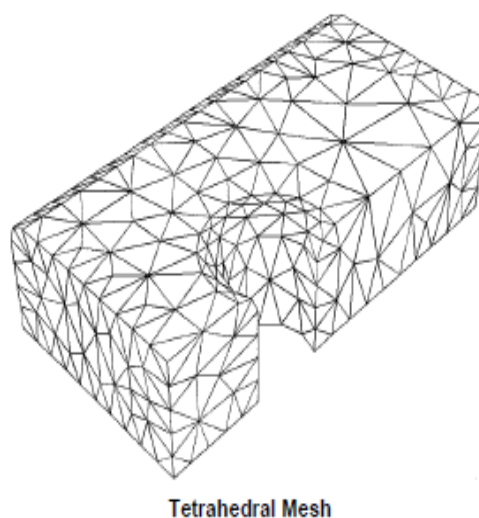
Το Marc έχει επιπλέον πολλές δυνατότητες τις οποίες κρίνεται σκόπιμο να μην τις αναφέρουμε. Παρόλα αυτά αναφέρουμε ότι το Marc έχει εφαρμογή στον αρχικό σχεδιασμό κατασκευών, στην μελέτη της συμπεριφοράς τους υπό ακραίες συνθήκες φόρτισης, στην δυνατότητα εντοπισμού προβλημάτων καθώς και στην ουσιαστική βελτιστοποίηση. Σήμερα υπάρχουν λογισμικά τα οποία είναι ίσως και πιο διαδεδομένα από το Marc, αλλά η ουσία είναι ότι κάθε πακέτο έχει τα υπέρ και τα κατά του. Συνεπώς είναι στην κρίση του κάθε μηχανικού τί να επιλέξει, ανάλογα την μελέτη που έχει αναλάβει. Πακέτα της MSC όπως το PATRAN ,αλλά και άλλα όπως το ANSYS και το LS DYNA χρησιμοποιούνται πολύ συχνά λόγω της πιο εύχρηστης μορφής τους.

Το MARC έχει σαν βασικό του πλεονέκτημα ότι μπορεί να επαναδημιουργήσει πλέγμα μετά από μεγάλες παραμορφώσεις. Έτσι, είναι κατάλληλο όταν μελετώνται κατεργασίες διαμόρφωσης όπως η σφυρηλάτηση, η έλαση, η διέλαση κ.α. Αμέσως, παρουσιάζουμε την βασική επιφάνεια εργασίας του marc στο επόμενο σχήμα.

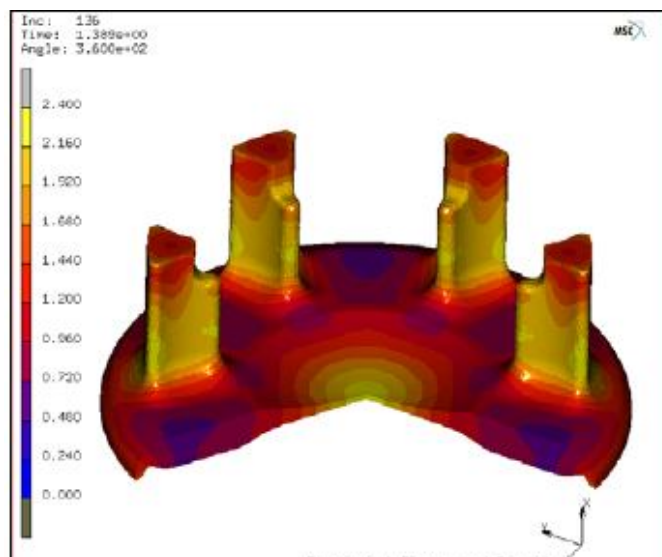


Σχήμα 7.1 : Βασική επιφάνεια εργασίας του Marc.

Αμέσως μετά παρουσιάζονται εικόνες με την δυνατότητα του Marc να δημιουργεί πλέγμα καθώς και μία περίπτωση μελέτης σφυρηλάτησης.



Σχήμα 7.2 : Δημιουργία πλέγματος τετραεδρικών πεπερασμένων στοιχείων στο Marc.



Σχήμα 7.3 : Τελικό αποτέλεσμα προσομοίωσης σφυρηλάτησης μίας φλάντζας.

7.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗΣ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ ΣΤΟ MARC

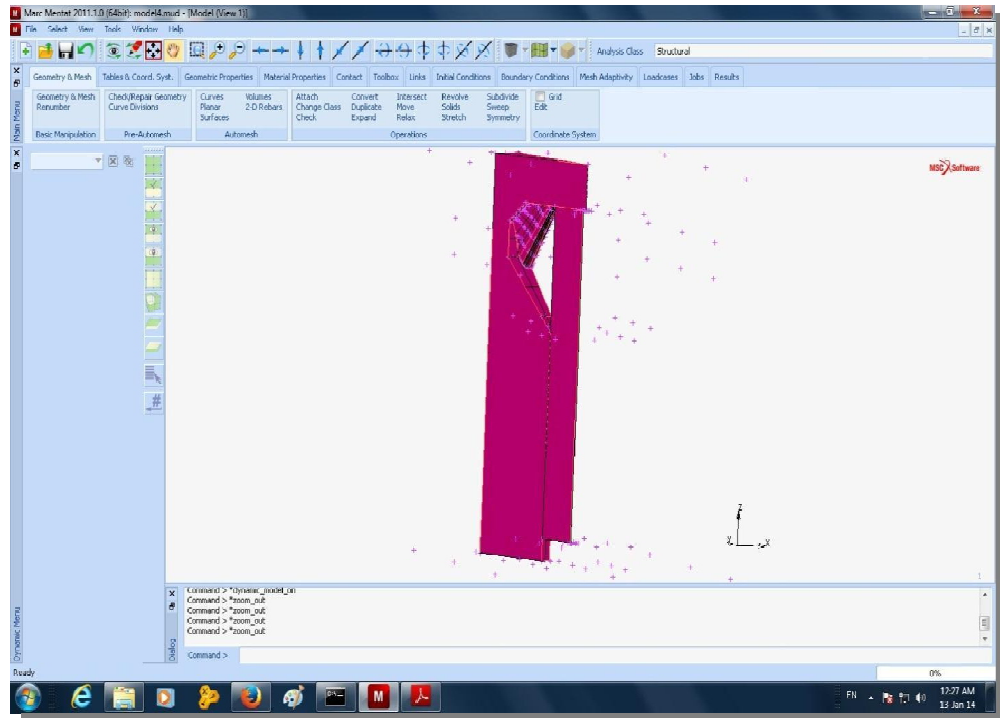
Στην παράγραφο αυτήν, παρουσιάζονται τα βήματα που ακολουθήθηκαν ώστε να σχεδιαστεί ο κωνικός οδοντωτός τροχός και έπειτα, μέσω του flow simulation που προσφέρει το Solidworks, να γίνει εφικτός και ο σχεδιασμός του καλουπιού σφυρηλάτησης(μήτρας). Παρουσιάζονται επίσης αναλυτικά τα βήματα τα οποία έγιναν ώστε να ρυθμιστούν όλες οι αναγκαίες παράμετροι για την επιτυχή προσομοίωση της διαδικασίας σφυρηλάτησης στο MSC MARC.

7.2.1 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΒΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΡΥΘΜΙΣΕΩΝ ΣΤΟ MARC

Στην παράγραφο αυτή, θα παρουσιάσουμε αναλυτικά τα στάδια των ρυθμίσεων στο πακέτο πεπερασμένων στοιχείων Marc, τα οποία θα αποφέρουν την διενέργεια της προσομοίωσης της κατεργασίας της σφυρηλάτησης με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια και αποτελεσματικότητα. Στο τέλος της παραγράφου θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της κατεργασίας που έδωσε το Marc.

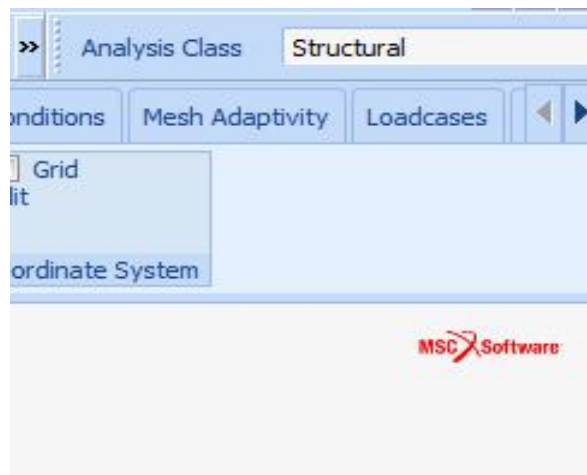
Εισαγωγή γεωμετρίας στο Marc

Αρχικά, με την εντολή **File→Import→IGES**, εισάγεται η γεωμετρία της μήτρας, του προδιαμορφώματος και του εμβόλου, όπως αυτή δημιουργήθηκε στο 3D λογισμικό DS Solidworks. Πρόκειται για το ένα εικοστό έκτο τμήμα της γεωμετρίας προκειμένου να μην απαιτηθεί μεγάλη υπολογιστική ισχύς για την διενέργεια της προσομοίωσης. Αυτό φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί



Σχήμα 7.4 : Εισαγωγή αρχείου.

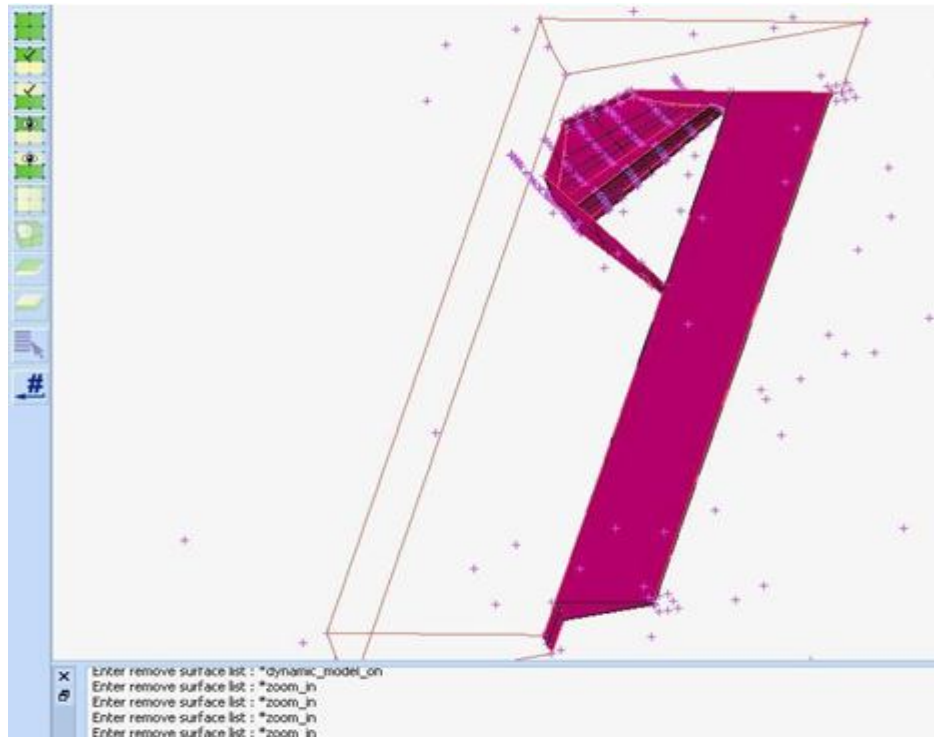
→ Μετέπειτα, ως analysis class επιλέγεται Structural:



Σχήμα 7.5 : Επιλογή κλάσης ανάλυσεως.

Αφαίρεση περιττών επιφανειών

Στο σημείο αυτό αφαιρούνται όλες οι περιττές επιφάνειες προκειμένου το μοντέλο να είναι εύκολα διαχειρίσιμο. Η διαδικασία συνοψίζεται στο ακόλουθο σχήμα:



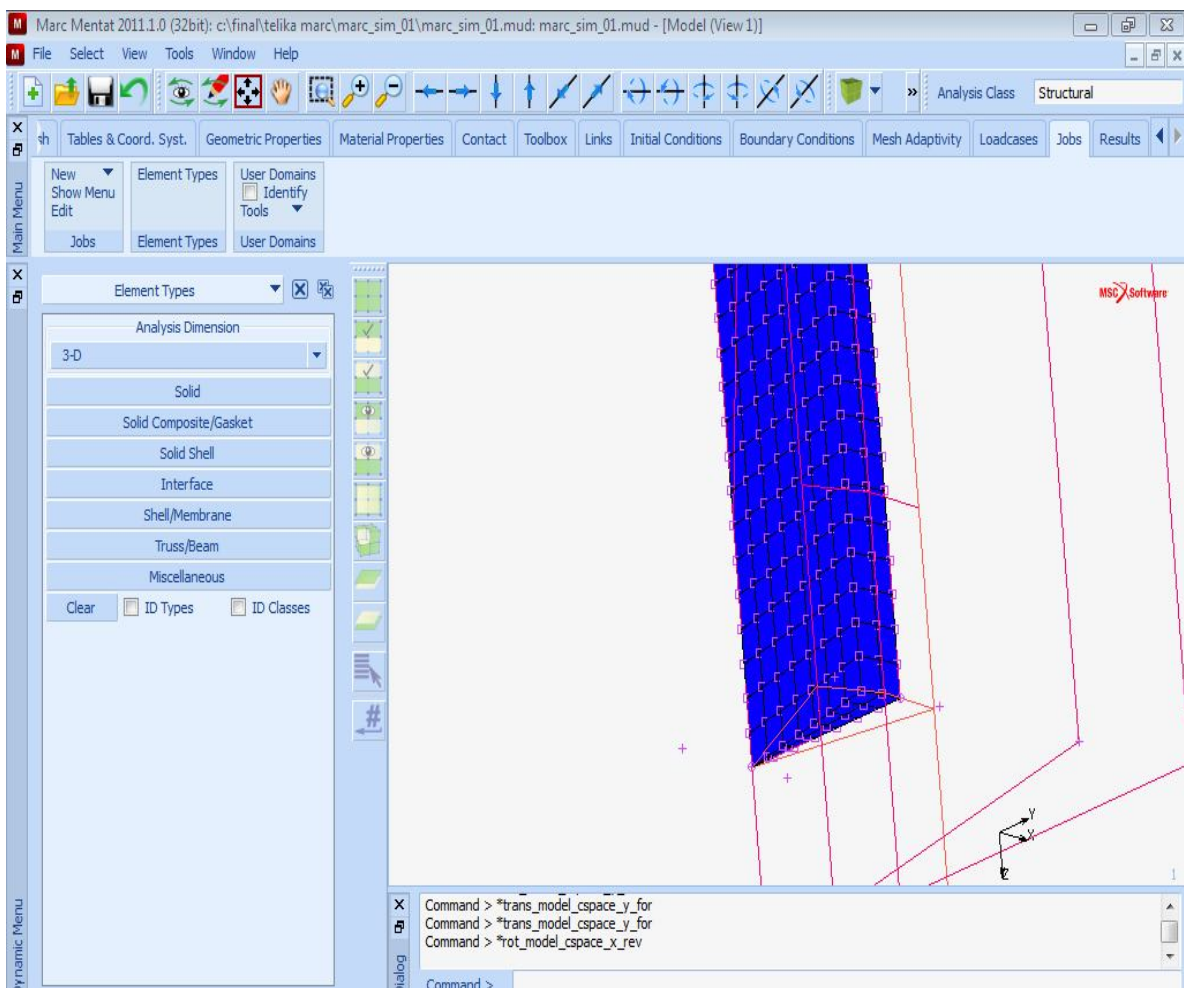
Σχήμα 7.6: Αφαίρεση περιττών επιφανειών.

Δημιουργία πεπερασμένων στοιχείων προδιαμορφώματος

Στην συνέχεια, με την εντολή **Geometry & Mesh**→**Convert**→**Surfaces to Elements**, δημιουργείται πλέγμα 44 x 7 πεπερασμένων στοιχείων στην μία επιφάνεια του προδιαμορφώματος. Στην συνέχεια αυτά επεκτείνονται στον χώρο, με την εντολή **Geometry & Mesh**→ **Expand**→ **Elements**. Η γωνία κλίσεως που θα χρησιμοποιήσουμε ισούται με 6.92308 μοίρες και προκύπτει ως εξής: $\frac{360/26}{2}$

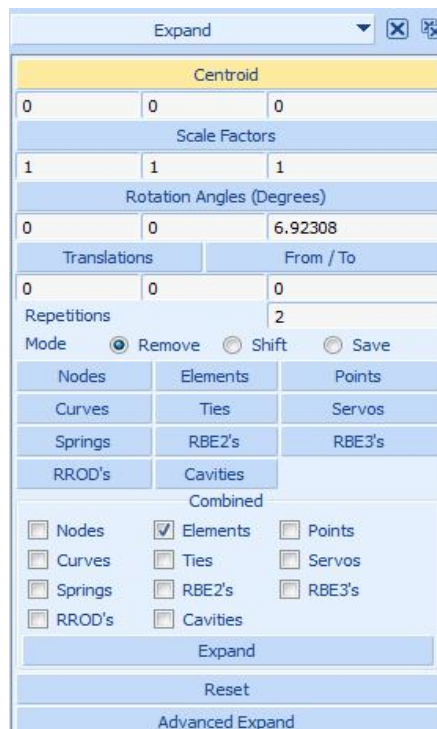
Αυτό λόγω του ότι έχουμε 13 οδόντες στον οδοντωτό τροχό, οπότε στην συμμετρία του μισού δοντιού, θα έχουμε 360/26 μοίρες κλίση. Επίσης παίρνουμε 2 repetitions. Οπότε προκύπτει και αυτή η γωνία.

Ακολουθεί το σχήμα όπου βλέπουμε τα παραπάνω.



Σχήμα 7.7: Δημιουργία πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων.

Στο επόμενο σχήμα φαίνονται οι ρυθμίσεις κατά την δημιουργία των πεπερασμένων στοιχείων στο αρχικό προδιαμόρφωμα. Φαίνεται η γωνία κλίσεως που ορίσαμε, καθώς και ο αριθμός των repetitions που ορίσαμε. Σημαντικό είναι επίσης να αναφέρουμε ότι επιλέγουμε κατά το expand μόνο την επιλογή elements, διαφορετικά θα υπάρχουν προβλήματα κατά την προσομοίωση. Με όλες αυτές τις ρυθμίσεις λοιπόν, είμαστε σε θέση να ολοκληρώσουμε την δημιουργία των πεπερασμένων στοιχείων στο προδιαμόρφωμα και να προχωρήσουμε στα επόμενα βήματα των ρυθμίσεων της προσομοίωσης.



Σχήμα 7.8 : Ρυθμίσεις κατά την δημιουργία πεπερασμένων στοιχείων.

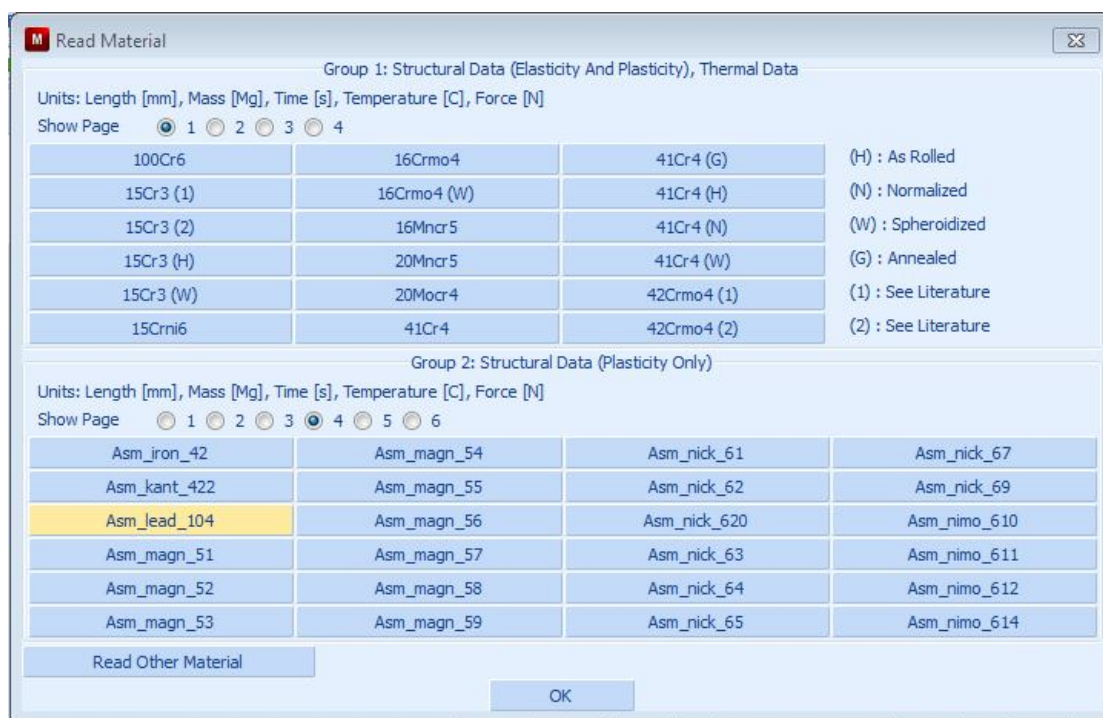
Αμέσως μετά, με την εντολή **Geometry & Mesh**→**Sweep**→**Nodes**, διαγράφονται οι διπλοί κόμβοι.(Κανένα πεπερασμένο στοιχείο δεν κατέρρευσε) Ακολουθεί το επόμενο σχήμα.



Σχήμα 7.9 : Διαγραφή διπλών κόμβων.

Επιλογή υλικού

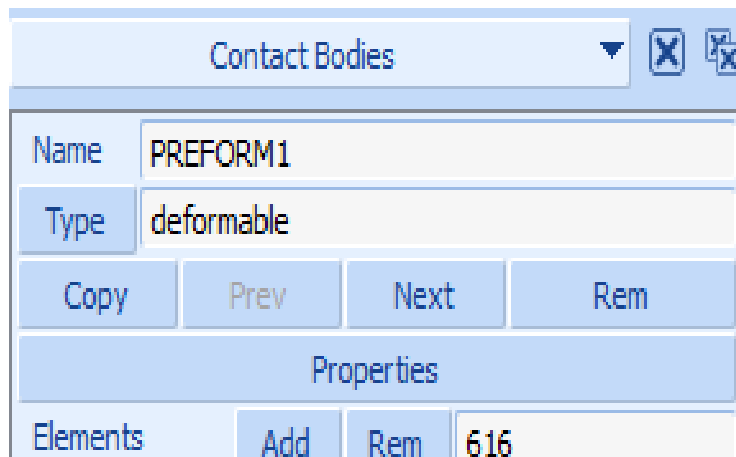
Στο σημείο αυτό αποδίδεται υλικό στο δημιουργηθέν πλέγμα το οποίο είναι μολύβι Asm Lead 104. Αυτό πραγματοποιείται με την εντολή **Material properties** → **Import** → **Asm lead 104** → **Add elements**. Ακολουθεί το σχήμα όπου φαίνονται τα προηγούμενα. Στην συγκεκριμένη προσομοίωση θα γίνουν δύο μοντέλα με υλικό μολύβι και διαφορετική γεωμετρία προδιαμορφωμάτων στην θερμοκρασία περιβάλλοντος.



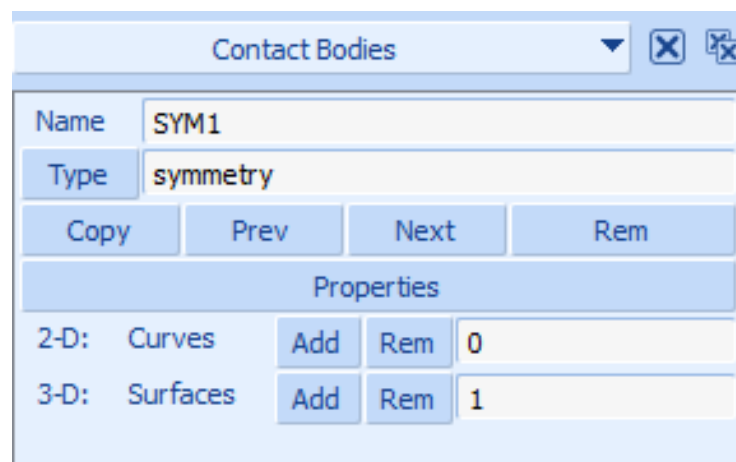
Σχήμα 7.10 : Επιλογή του μολύβδου ως υλικό από την βάση δεδομένων υλικών του MARC.

Ορισμός επιφανειών επαφής

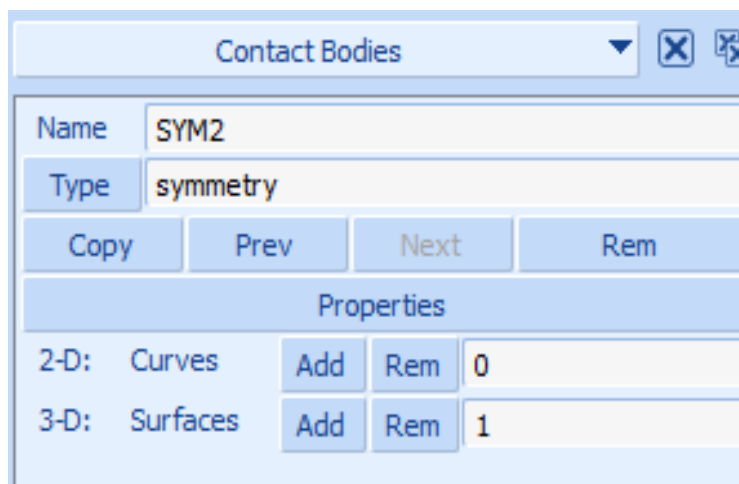
Σε αυτό το βήμα ορίζονται οι επιφάνειες επαφής του μοντέλου, **contact bodies**. Αυτό γίνεται με την εντολή: **contact** → **Contact Bodies** → **New** → **deformable** → **Name: PREFORM1**. Σημειώνουμε ότι θα ορίσουμε ως απαραμόρφωτα σώματα το έμβολο και την μήτρα. Επίσης ως επιφάνειες συμμετρίας θα ορισθούν οι Sym 1 και Sym 2 και ως παραμορφώσιμο σώμα θα ορισθεί το δοκίμιο (προδιαμόρφωμα). Είναι πολύ σημαντικό αυτό το βήμα των ρυθμίσεων καθώς κάποια παράλειψη θα μπορούσε να οδηγήσει σε σημαντικά λάθη ή και ακόμη στην αδυναμία διενέργειας της προσομοίωσης στο λογισμικό Marc. Πρέπει συνεπώς να είμαστε προσεκτικοί κατά την επιλογή και ορισμό των επιφανειών μέσα από το Marc, διότι μία λάθος επιλογή επιφάνειας μπορεί να αποδειχθεί καταστροφική.



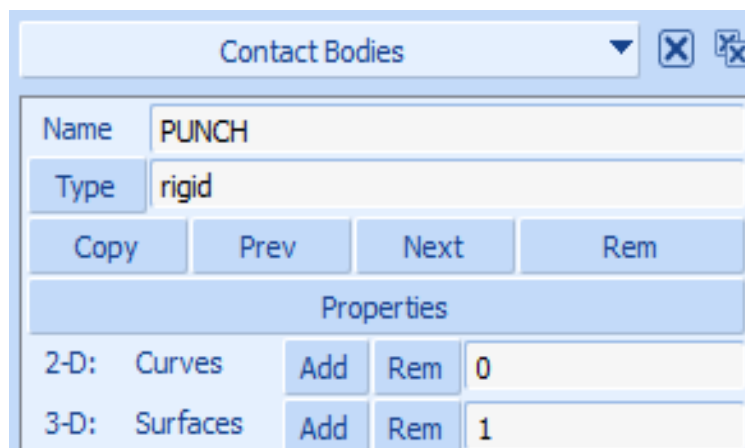
Σχήμα 7.11: Επιλογή Προδιαμορφώματος ως παραμορφώσιμο σώμα.



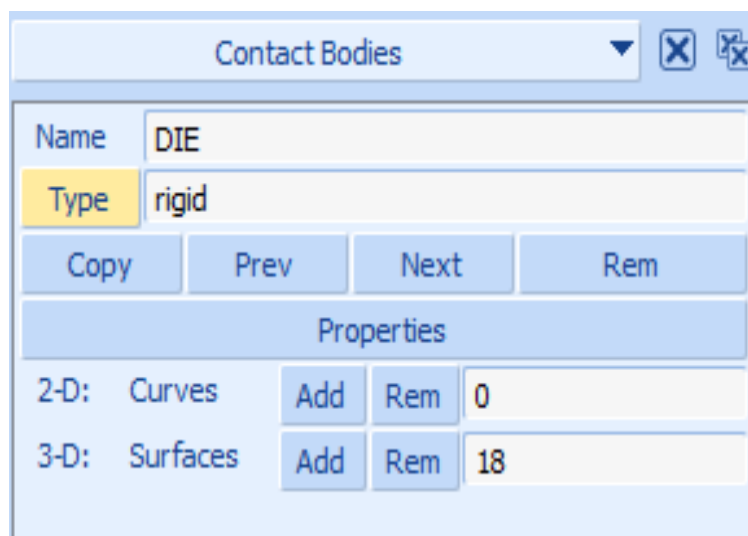
Σχήμα 7.12: Επιλογή και ορισμός επιφάνειας συμμετρίας 1.



Σχήμα 7.13: Επιλογή και ορισμός επιφάνειας συμμετρίας 2.



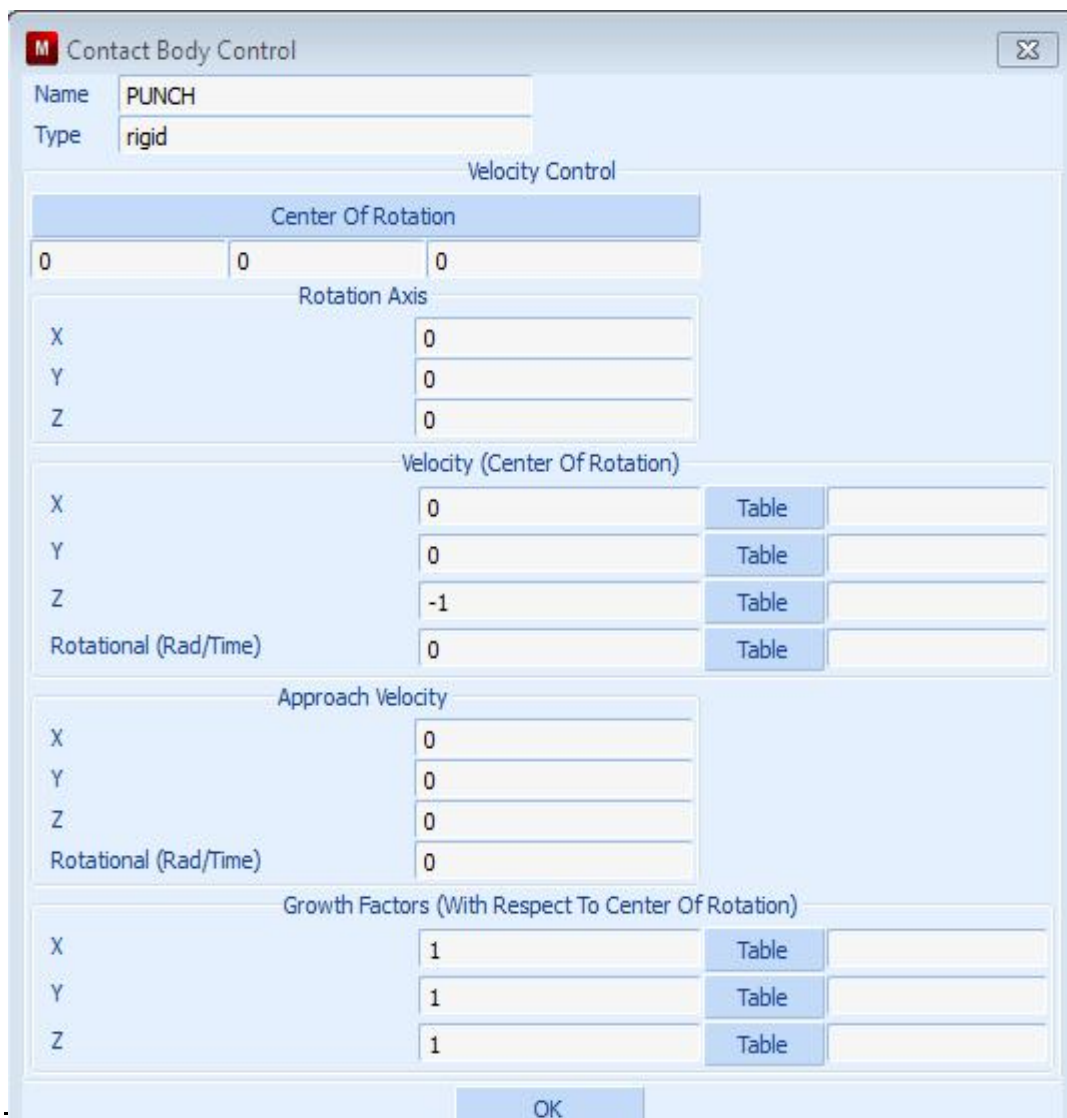
Σχήμα 7.14 : Ορισμός εμβόλου ως απαραμόρφωτο σώμα.



Σχήμα 7.15 : Ορισμός επιφανειών μήτρας ως απαραμόρφωτο σώμα.

Ορισμός ταχύτητας εμβόλου

Σε αυτό το βήμα θα πρέπει να ορισθεί η ταχύτητα του εμβόλου η οποία θα ισούται με 1 mm / sec. Αναφέρουμε επίσης ότι η ταχύτητα του εμβόλου θα ορισθεί μετά από δοκιμές και μετά από λήψη στοιχείων από παρόμοιες μελέτες που έχουν γίνει στην σφυρηλάτηση κωνικών οδοντωτών τροχών. Από το μενού του contact bodies, επιλέγουμε **PUNCH**→**properties**→**body control**→**velocity**→**parameters**. Είναι επίσης πολύ σημαντικό αυτό το στάδιο , καθώς με μία λάθος επιλογή της ταχύτητας ή του σημείου περιστροφής, ή και του άξονα της ταχύτητας θα οδηγηθούμε σε αδυναμία λήψης αποτελεσμάτων από το Marc. Οι ρυθμίσεις αυτές μπορούμε να πούμε ότι θα πρέπει να γίνονται πολύ προσεκτικά. Έτσι, ακολουθεί το σχήμα που δείχνει όσα αναφέραμε.



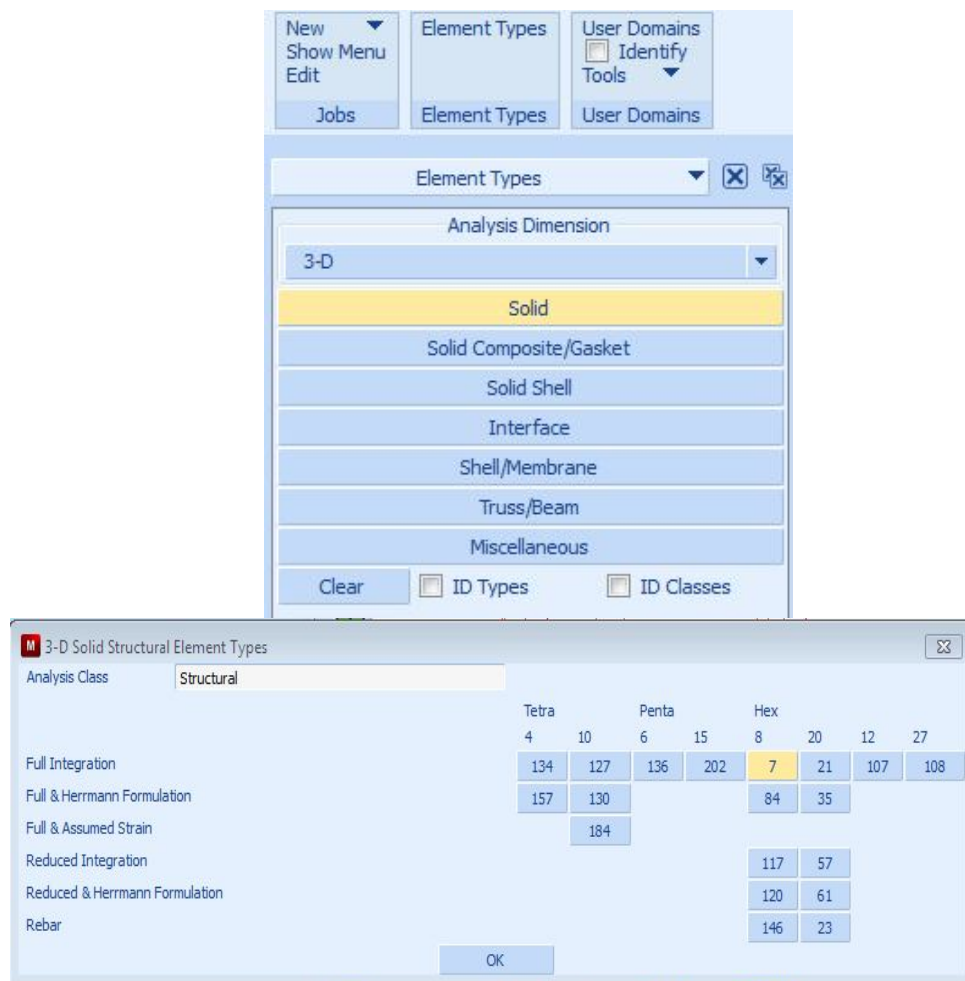
Σχήμα 7.16 : Ρύθμιση της ταχύτητας του εμβόλου.

Ορισμός τύπου πεπερασμένων στοιχείων ανάλυσης

Στο παρόν βήμα ορίζεται ο τύπος των πεπερασμένων στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν στην ανάλυση. Αυτό επιτυγχάνεται με την επόμενη εντολή :

Jobs→element types→solid,

όπου επιλέγονται τα εξαεδρικά πεπερασμένα στοιχεία τύπου 7 (Hex 8-Type 7). Τις επιλογές αυτές τις βλέπουμε στα ακόλουθα σχήματα. Επιλέγουμε, όπως βλέπουμε, την επιλογή solid και στο αμέσως μετά εμφανιζόμενο παράθυρο επιλέγουμε τον τύπο πεπερασμένων στοιχείων που προαναφέραμε.

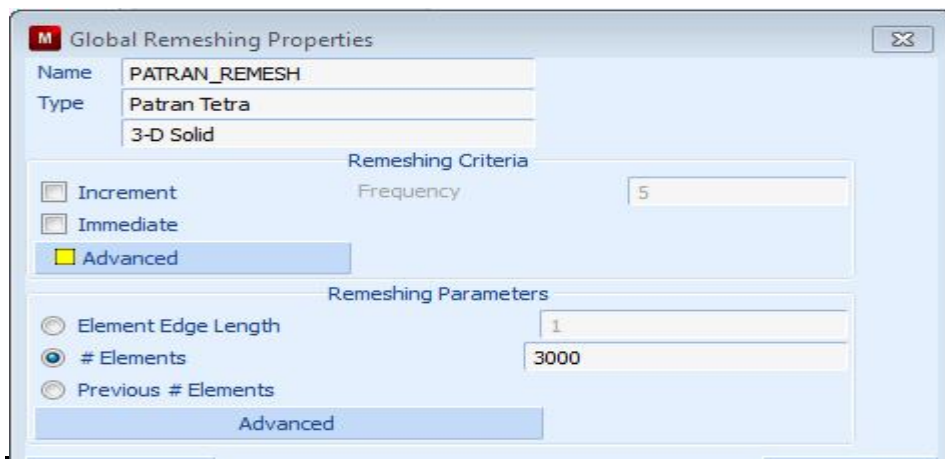


Σχήμα 7.17 : Επιλογή τύπου πεπερασμένων στοιχείων.

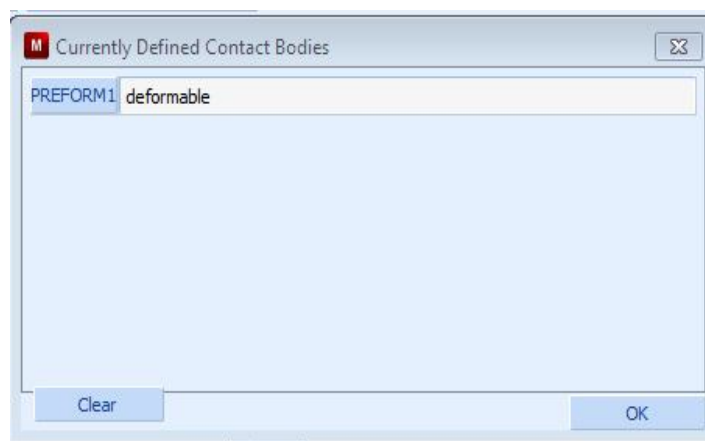
Ακολουθως, ορίζονται οι παράμετροι της επαναδημιουργίας πλέγματος(remeshing). Ρυθμίζεται η μετατροπή των Hex 8 - Type 7 πεπερασμένων στοιχείων στην μορφή τετραεδρικών στοιχείων τύπου 157 (Tetra 4-Type 157). Η μετατροπή αυτή γίνεται κατά την επαναδημιουργία πλέγματος. Η εντολή είναι η εξής:

Mesh Adaptivity→**Global remeshing criteria**→**New**→**Patran Tetra**

Τα παραπάνω φαίνονται στα επόμενα σχήματα.



Σχήμα 7.18 : Ρύθμιση παραμέτρων επαναδημιουργίας πλέγματος.



Σχήμα 7.19 : Επιλογή του προδιαμορφώματος για επαναδημιουργία πλέγματος.

Είμαστε πλέον σε θέση να ορίσουμε την επιφάνεια του εμβόλου, μέσω τριών σημείων τα οποία ορίζονται από την κάτω τριγωνική επιφάνεια του προδιαμορφώματος

Αυτό γίνεται μέσω της εντολής : **Geometry & mesh** → **Surfaces** → **Add**

Συνεπώς, έχουν ορισθεί όλες οι επιφάνειες του μοντέλου μας, οι οποίες παίζουν πρωτεύοντα ρόλο στην αποτελεσματική διενέργεια της προσομοίωσης της σφυρηλάτησης ακριβείας.

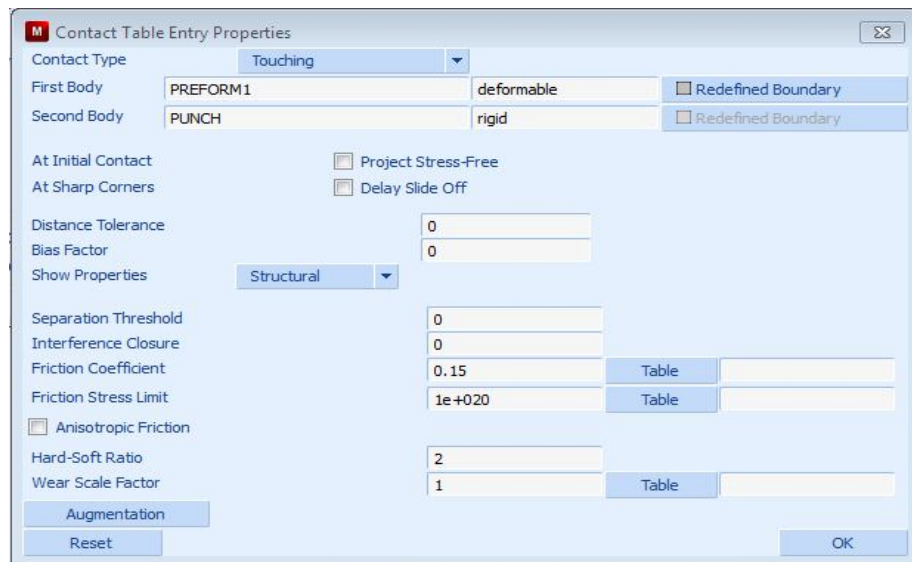
Δημιουργία πίνακα επαφής μεταξύ των στοιχείων του μοντέλου

Μεταξύ των στοιχείων του μοντέλου μας, ορίζουμε τον πίνακα επαφής ο οποίος φαίνεται στο επόμενο σχήμα. Σύμφωνα με αυτόν, επιλέγεται επαφή (touching). Στην επαφή αυτή ορίζεται και ένας συντελεστής τριβής $\mu=0.15$ μεταξύ όμως του εμβόλου και του προδιαμορφώματος και της μήτρας και του προδιαμορφώματος. Η εντολή που χρησιμοποιείται για τον πίνακα επαφής είναι η ακόλουθη:

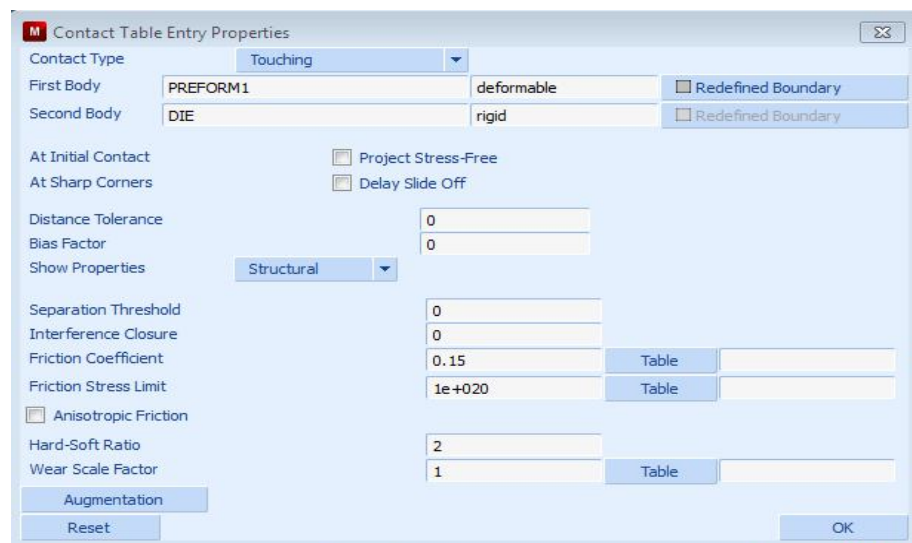
Contact→Contact Tables→New



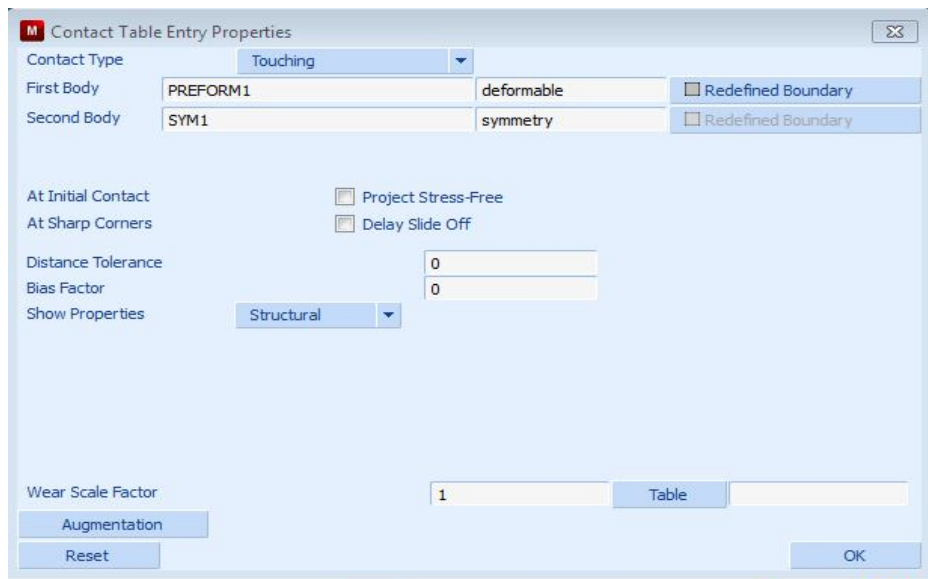
Σχήμα 7.20 : Πίνακας επαφών.



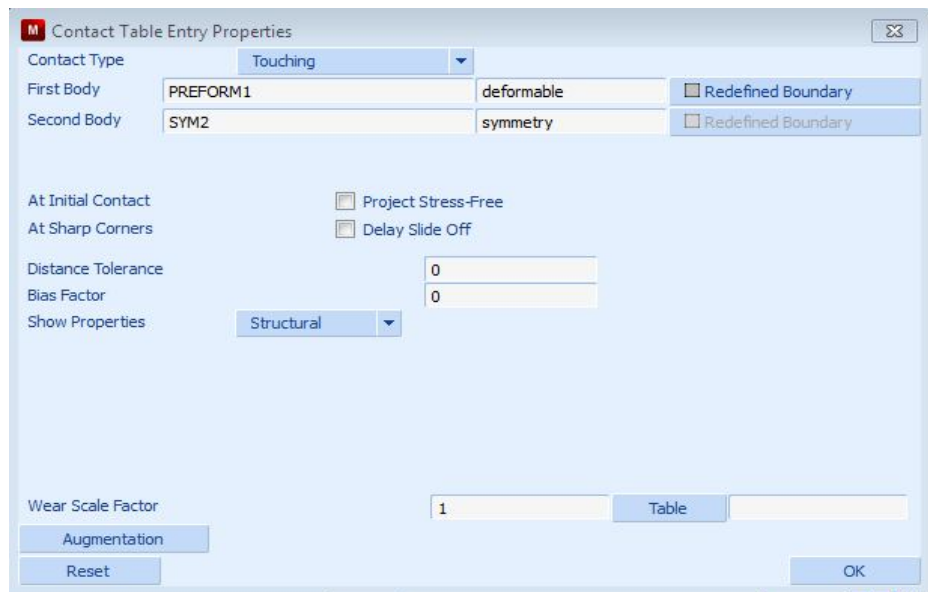
Σχήμα 7.21 : Ρύθμιση επαφής μεταξύ προδιαμορφώματος και εμβόλου.



Σχήμα 7.22 : Ρύθμιση επαφής μεταξύ προδιαμορφώματος και μήτρας.



Σχήμα 7.23 : Ρύθμιση επαφής μεταξύ του προδιαμορφώματος και της πρώτης επιφάνειας συμμετρίας.



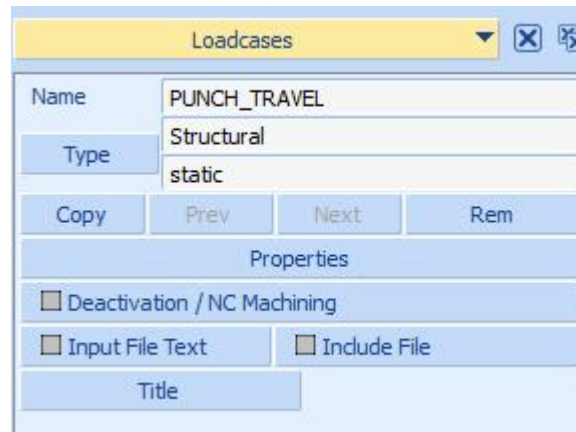
Σχήμα 7.24 : Ρύθμιση επαφής μεταξύ του προδιαμορφώματος και της δεύτερης επιφάνειας συμμετρίας.

Ρύθμιση της περίπτωσης φόρτισης

Σε αυτήν την φάση είμαστε έτοιμοι να ρυθμίσουμε την περίπτωση ή υπόθεση της φόρτισης, **loadcase**, χρησιμοποιώντας την επόμενη εντολή:

Loadcases→**New**→**Static**

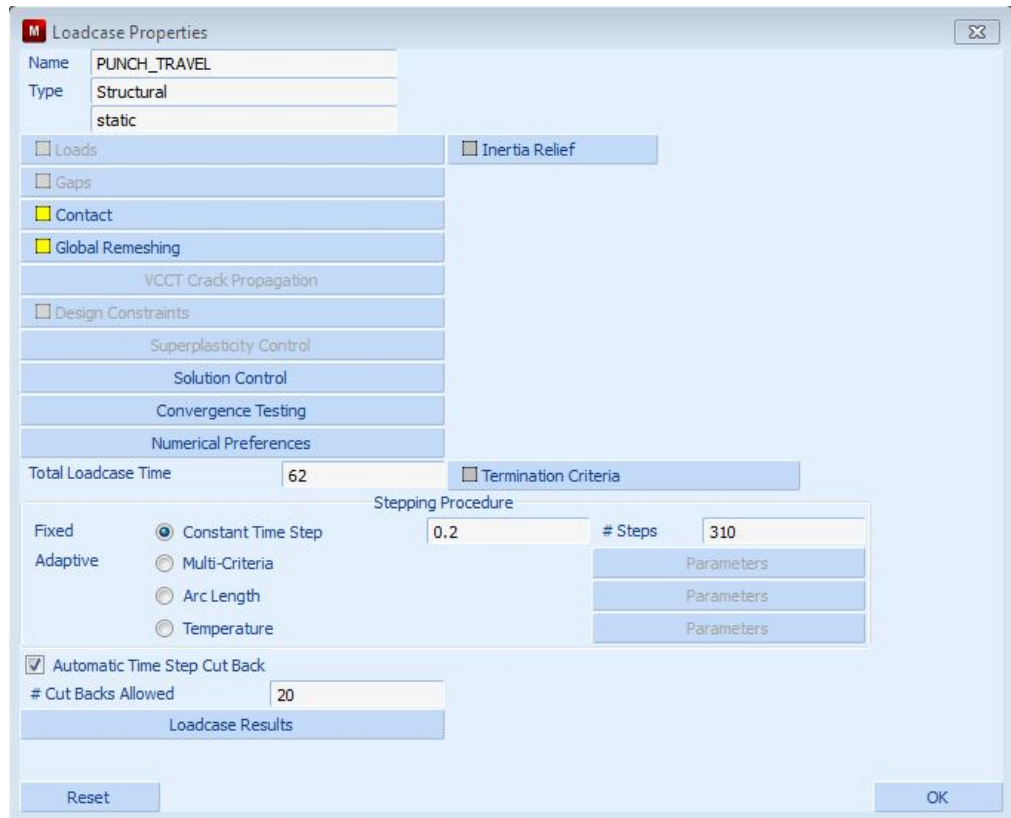
Επομένως έχουμε το ακόλουθο σχήμα:



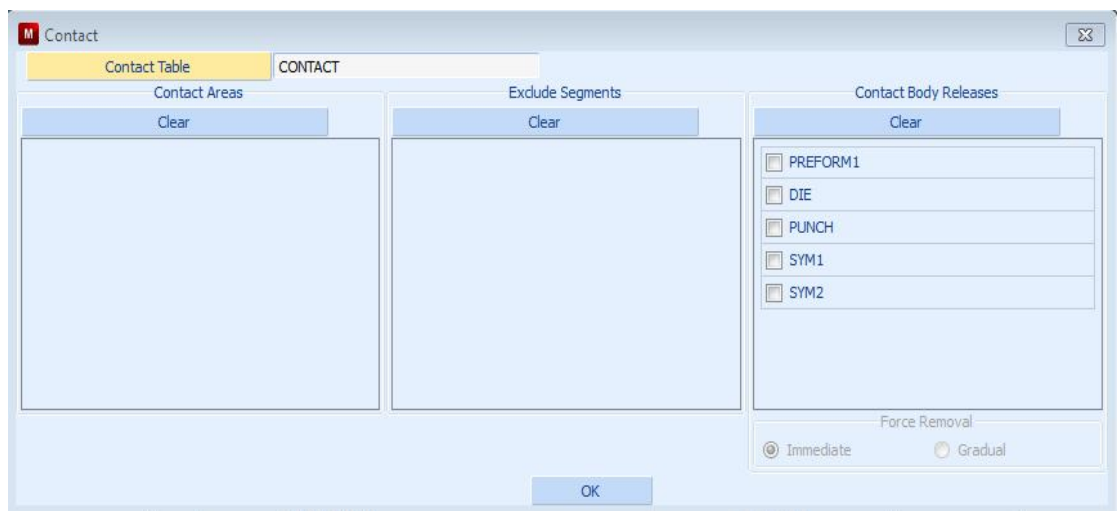
Σχήμα 7.25 : Ρύθμιση της περίπτωσης φόρτισης.

Έπειτα, αφού έχουμε λάβει υπόψιν την γεωμετρία του εμβόλου και της μήτρας καθώς και τις συνθήκες της σφυρηλάτησης του κωνικού οδοντωτού τροχού, ορίζουμε τις ακόλουθες παραμέτρους:

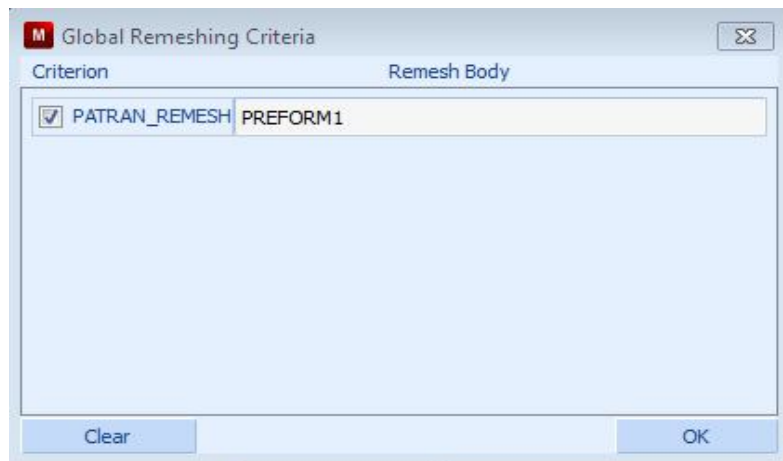
Αφού το έμβολο θα διανύσει διαδρομή ίση με 61.728 mm, έχοντας ταχύτητα 1 mm/sec, υπολογίζουμε ότι η σφυρηλάτηση θα διαρκέσει χρονικό διάστημα ίσο με 61.728 sec. Το χρονικό αυτό διάστημα θα το χωρίσουμε σε μικρά βήματα των 0.2 sec έκαστο. Αμέσως μετά, παρουσιάζουμε τον πίνακα επαφών που έχουμε ήδη κατασκευάσει, αλλά προχωράμε και σε επιπλέον αναγκαίες ρυθμίσεις όπως τον τρόπο σύγκλισης, τον έλεγχο της επίλυσης αλλά και τις αριθμητικές επιλογές της διεργασίας. Οι προηγούμενες ρυθμίσεις είναι απολύτως απαραίτητες για την επιτυχή σύγκλιση αλλά και για την ολοκλήρωση του job. Στα επόμενα σχήματα που παρουσιάζονται το ένα μετά το άλλο, διακρίνουμε αναλυτικά τις προαναφερθείσες ρυθμίσεις αλλά και τις υπορυθμίσεις τους. Ακολουθούν τα σχήματα:



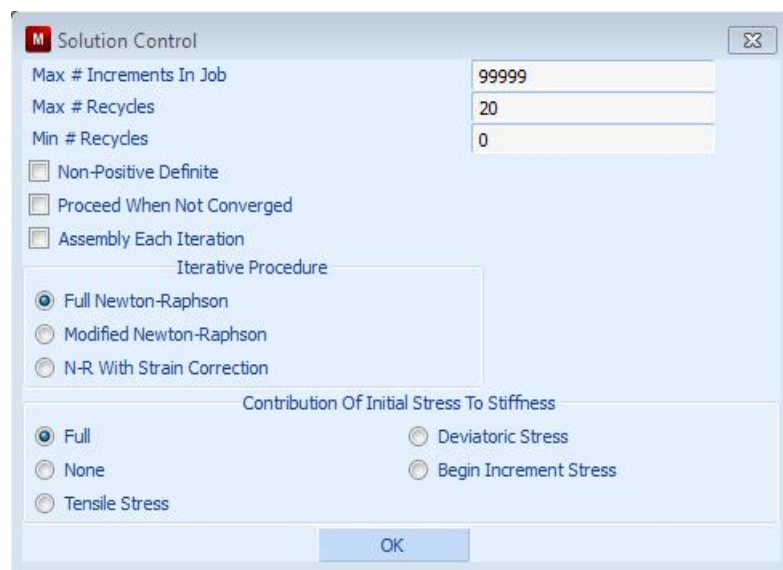
Σχήμα 7.26 : Ορισμός των ιδιοτήτων της περίπτωσης φόρτισης.



Σχήμα 7.27 : Ορισμός πίνακα επαφών.



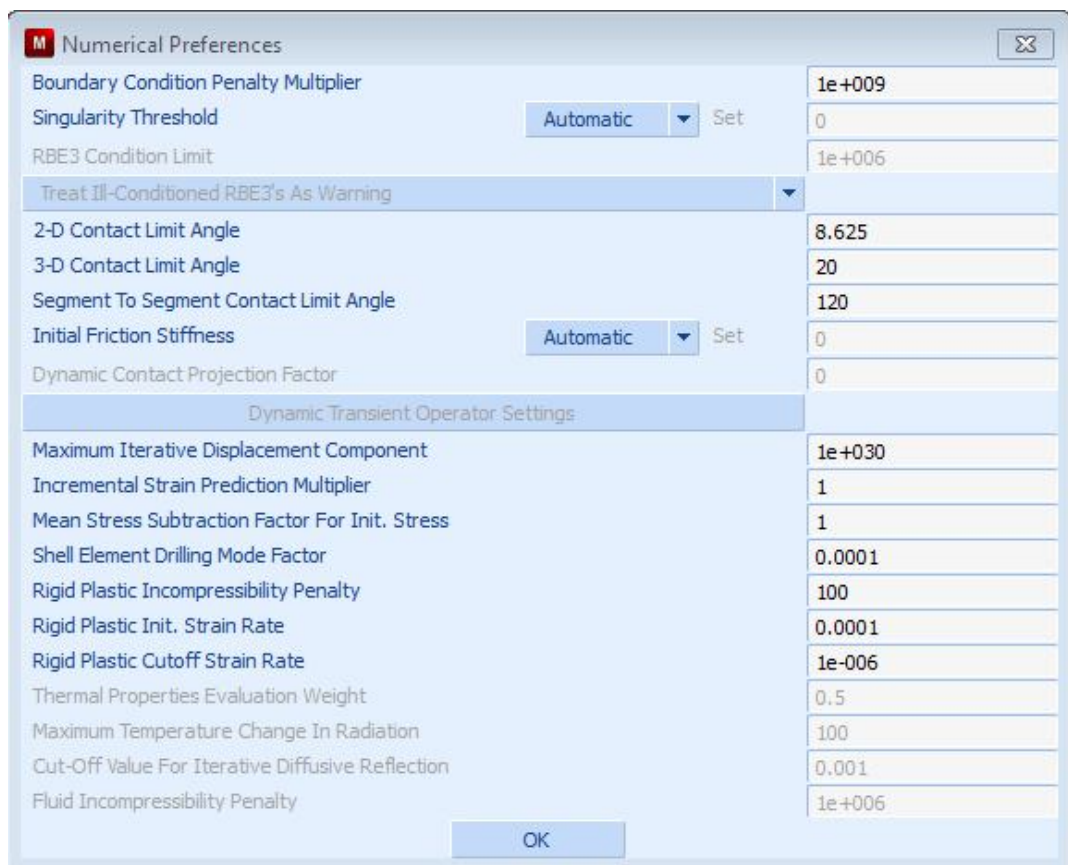
Σχήμα 7.28 : Ρύθμιση της επαναδημιουργίας πλέγματος.



Σχήμα 7.29 : Ρύθμιση του ελέγχου επίλυσης.



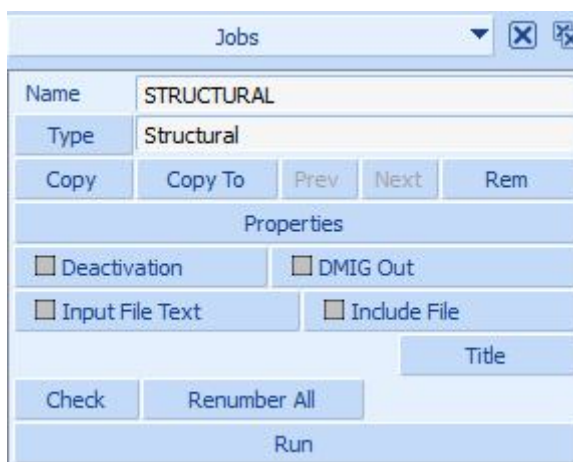
Σχήμα 7.30 : Ρύθμιση των κριτηρίων σύγκλισης.



Σχήμα 7.31 : Ρύθμιση αριθμητικών επιλογών.

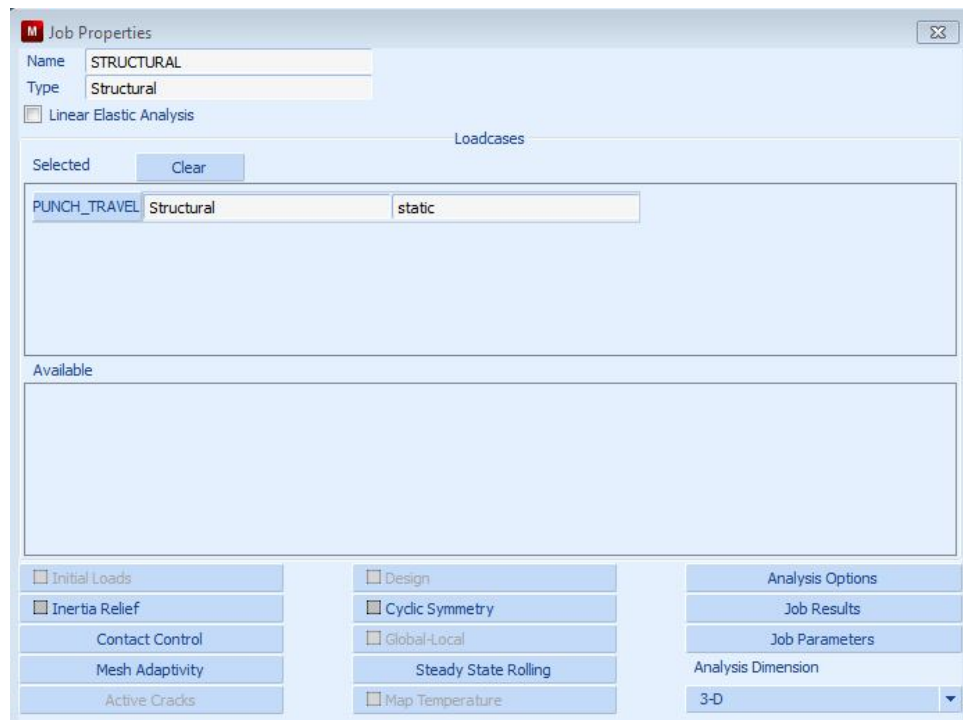
Ρύθμιση της διεργασίας

Στην παρούσα φάση πρέπει να ρυθμιστεί η διεργασία, γεγονός που είναι σημαντικό εξίσου με τα προηγούμενα σημαντικά βήματα που υποδείξαμε. Επομένως χρησιμοποιώντας την εντολή **Jobs**→**New**→**Structural**, ορίζουμε την διεργασία.



Σχήμα 7.32 : Ρύθμιση της διεργασίας.

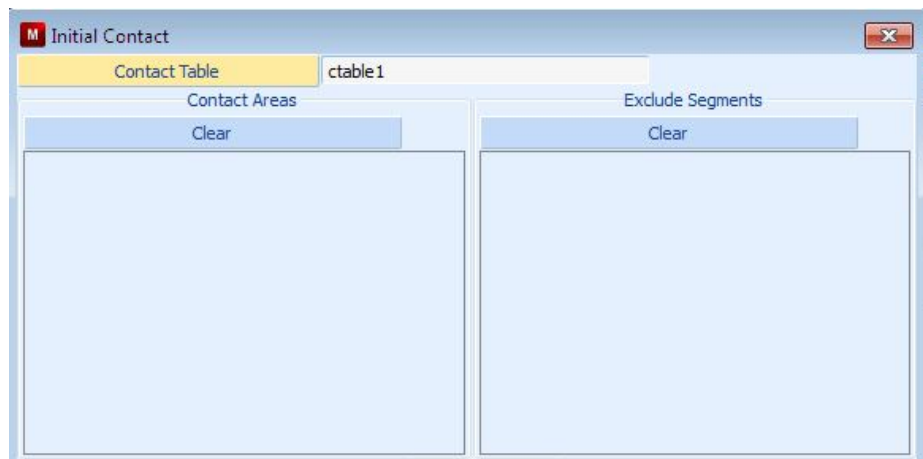
Στο παραπάνω σχήμα φαίνονται όσα προαναφέραμε. Αμέσως μετά επιλέγουμε κάποιες επιπρόσθετες ρυθμίσεις. Αρχικά, το μοντέλο τριβής ορίζεται ως κόμβος σε τεμάχιο(Node To Segment), με διγραμμικό αριθμητικό μοντέλο. Ακολούθως, στο κεντρικό παράθυρο των επιλογών της διεργασίας(Job Properties), ρυθμίζουμε τις επιλογές της ανάλυσης(Analysis options), όπου και επιλέγουμε την μεγάλη παραμόρφωση. Έπειτα, από το κεντρικό και πάλι παράθυρο των επιλογών της διεργασίας, επιλέγουμε και ρυθμίζουμε τα αποτελέσματα της διεργασίας(Job Results) όπου και επιλέγουμε τί θέλουμε να λάβουμε μετά την ανάλυση(επιλέγουμε την ισοδύναμη τάση κατά Von Mises και την συνολική παραμόρφωση). Τέλος, ορίζουμε από το ίδιο κεντρικό παράθυρο της διεργασίας τις παραμέτρους της διεργασίας(Job Parameters). Όλα αυτά συνοψίζονται στα επόμενα σχήματα.



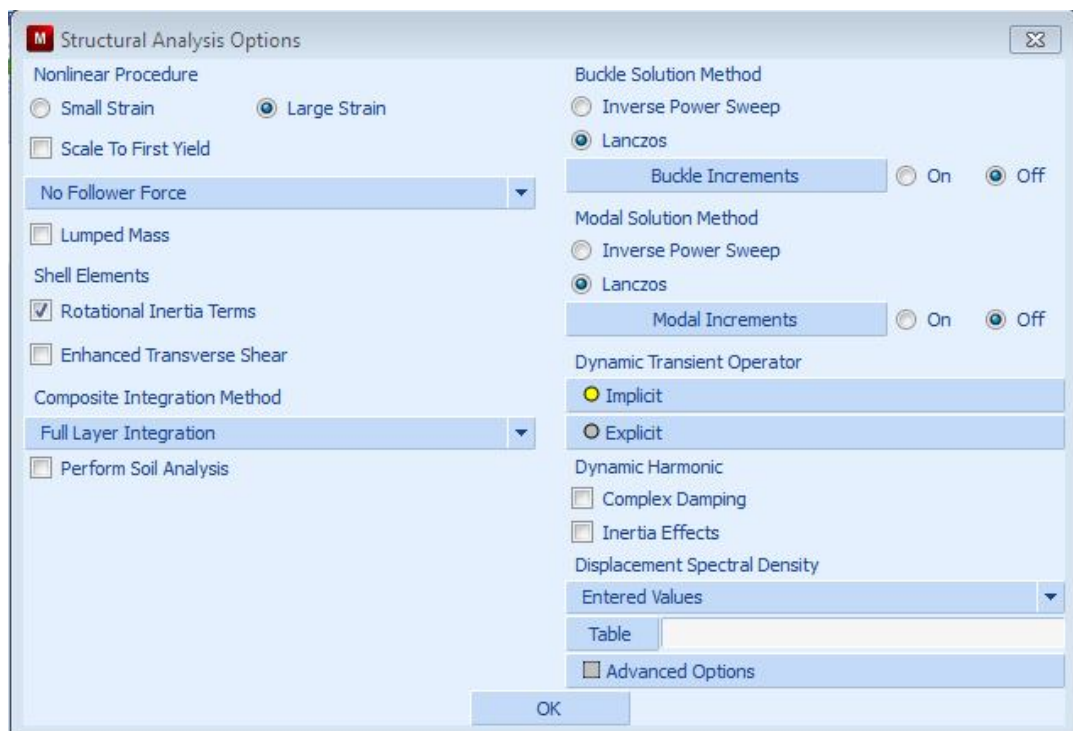
Σχήμα 7.33 : Κεντρικό παράθυρο των επιλογών της διεργασίας.



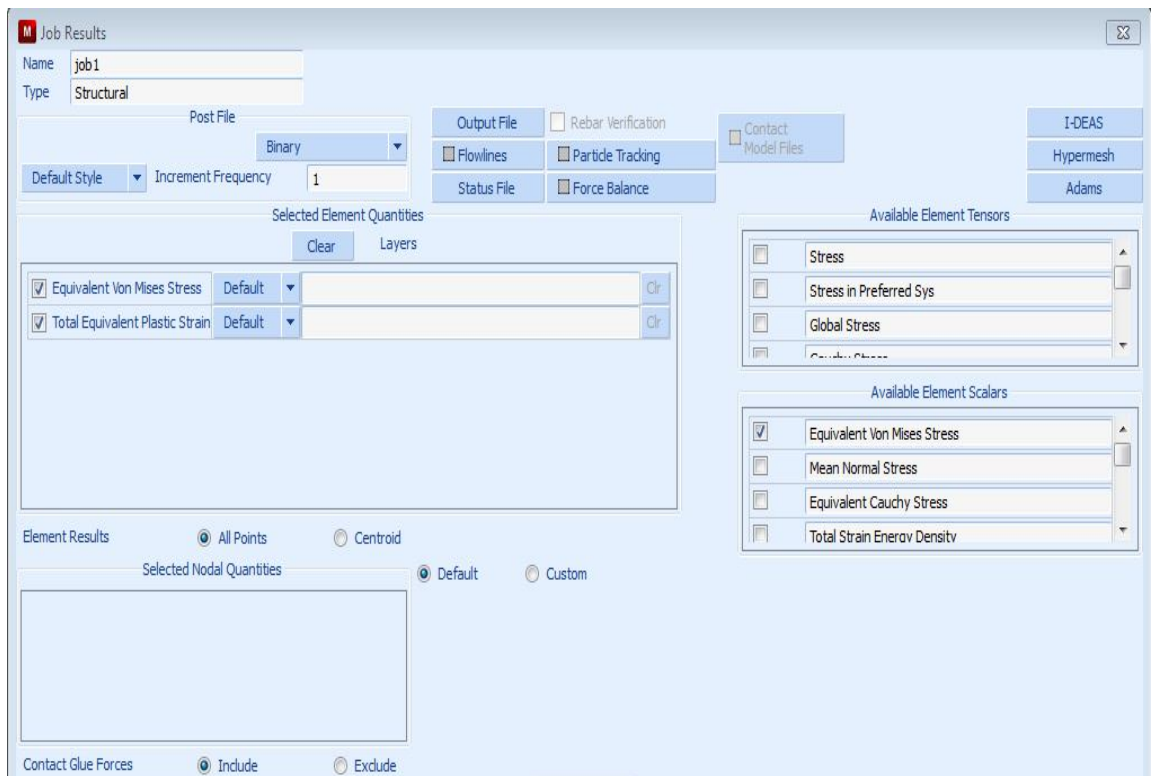
Σχήμα 7.34 : Επιλογή του μοντέλου τριβής.



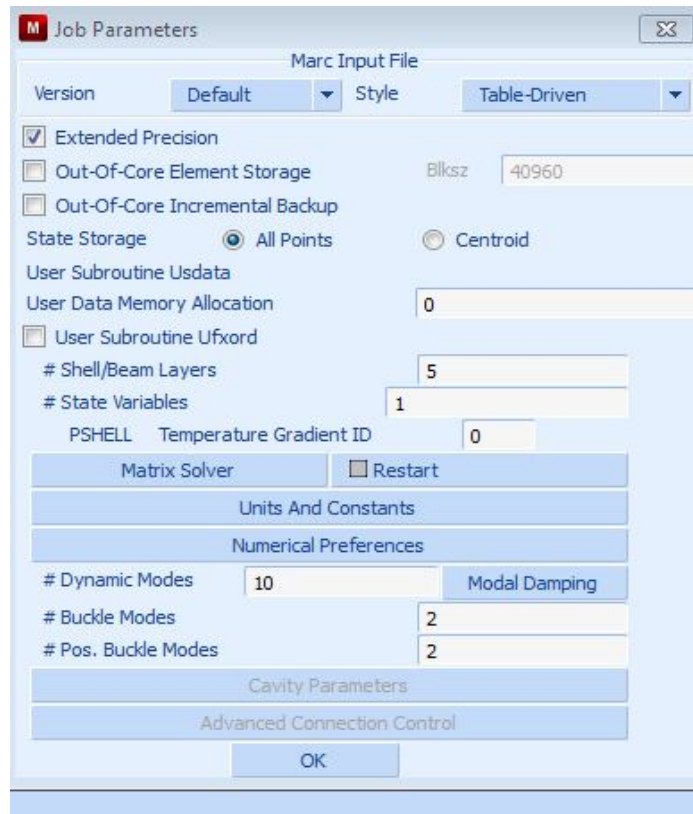
Σχήμα 7.35 : Ορισμός αρχικών συνθηκών επαφής.



Σχήμα 7.36 : Καθορισμός συνθηκών κατασκευαστικής ανάλυσης.



Σχήμα 7.37 : Καθορισμός των αποτελεσμάτων της διεργασίας.

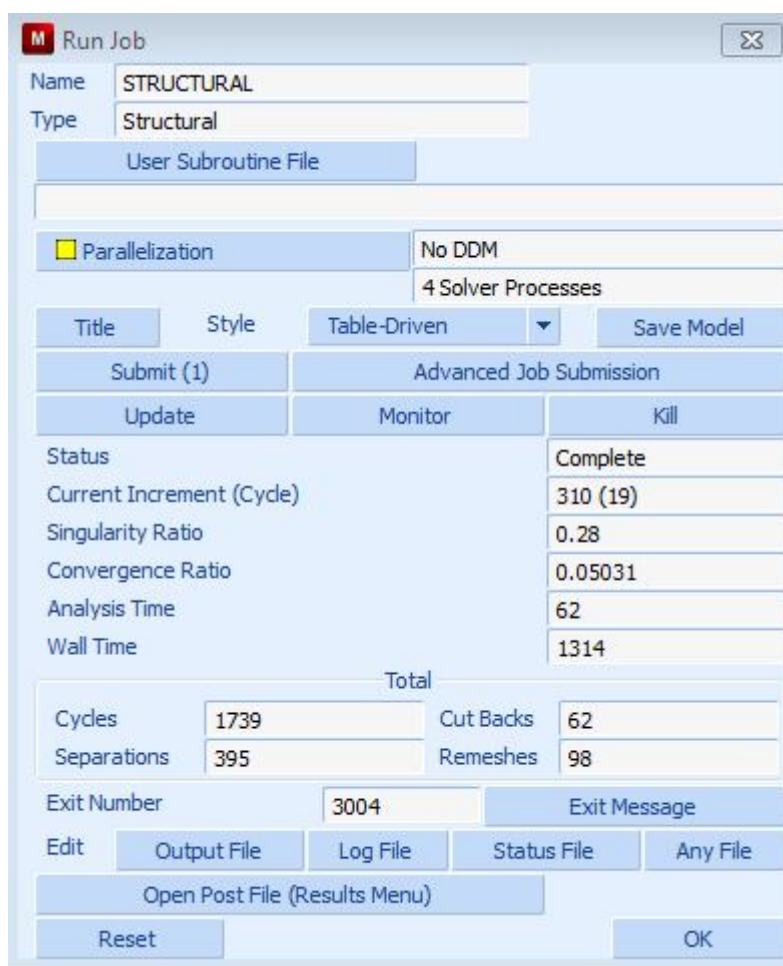


Σχήμα 7.38 : Καθορισμός των παραμέτρων της διεργασίας.

Μετά από όλα τα προαναφερθέντα βήματα, επιλέγουμε από το κεντρικό μενού της διεργασίας την επιλογή έλεγχο(check) όπου και βλέπουμε εάν υπάρχουν σφάλματα στο μοντέλο που έχουμε φτιάξει. Μετά και εάν δεν υπάρξουν σφάλματα, το επόμενο στάδιο είναι η επίλυση του μοντέλου η οποία πραγματοποιείται με την επόμενη εντολή.

Jobs→Run→Submit

Στην συνέχεια και αφού ολοκληρωθεί η επίλυση (ο χρόνος μπορεί να ποικίλει από κάποια λεπτά μέχρι και κάποιες ώρες, ανάλογα τον τύπο της ανάλυσης που έχουμε επιλέξει, την πολυπλοκότητα της γεωμετρίας και φυσικά από τα χαρακτηριστικά του ηλεκτρονικού υπολογιστή στον οποίον πραγματοποιείται η ανάλυση). Εφόσον ολοκληρωθεί η επίλυση, εμφανίζεται ένα μήνυμα εξόδου το οποίο πρέπει να είναι το 3004 δείχνοντας έτσι ότι υπάρχει σύγκλιση και ότι όλα τα βήματα έχουν ολοκληρωθεί σωστά. Αυτό παρουσιάζεται στο αμέσως επόμενο σχήμα.



Σχήμα 7.39 : Μήνυμα ολοκλήρωσης της διεργασίας.

Από το παράθυρο του μηνύματος της διεργασίας, παρατηρούμε και κάποια πολύ σημαντικά στοιχεία τα οποία είναι ο χρόνος επίλυσης, οι επαναλήψεις καθώς και ο αριθμός των επαναδημιουργηθέντων πλεγμάτων.

Αποτελέσματα προσομοίωσης

Για να λάβουμε τα ζητούμενα αποτελέσματα, θα χρησιμοποιήσουμε την εντολή:

Run Job→**Open Post File(Results Menu)**

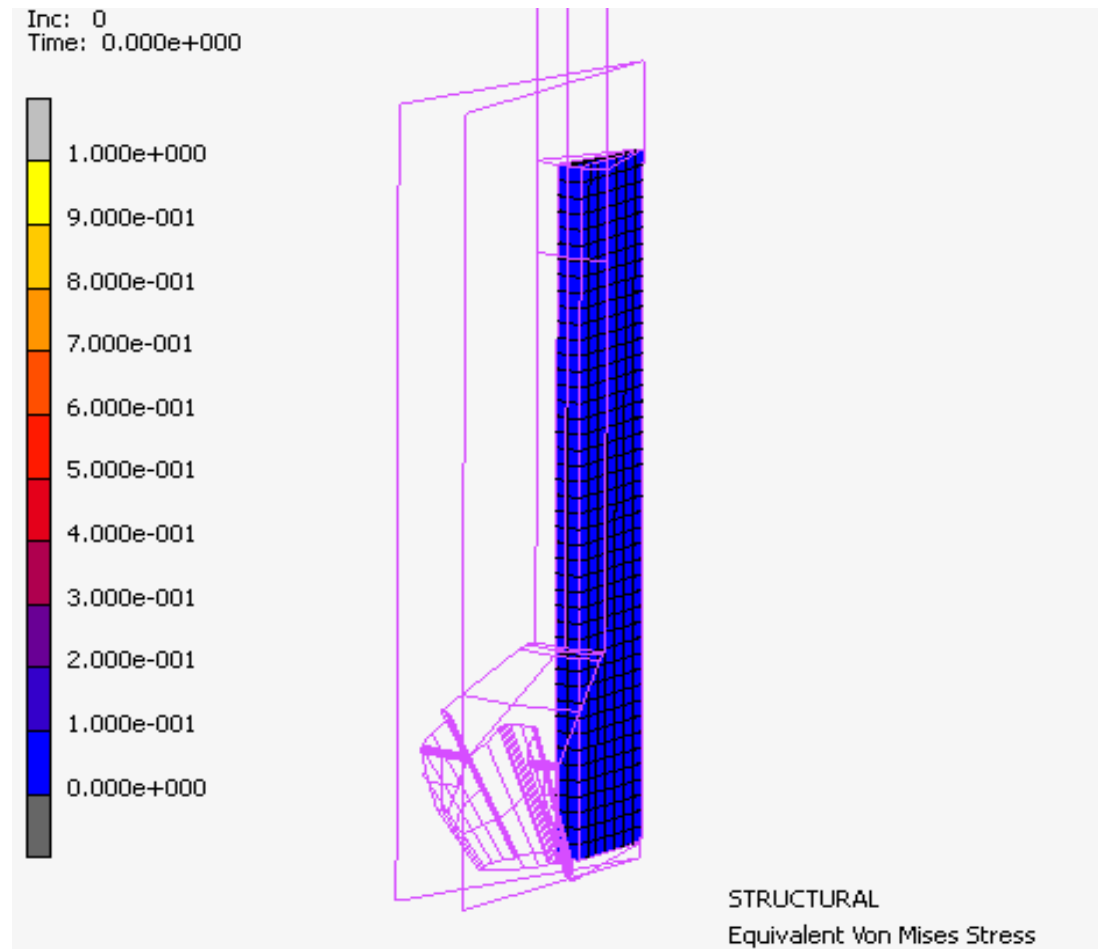
Έπειτα, με την εντολή **Results**→**Model Plot**, ρυθμίζουμε τα αποτελέσματα που θα βλέπουμε κατά την διενέργεια της προσομοίωσης(γραφικά αποτελέσματα) τα οποία θα παρουσιάσουμε αμέσως μετά. Εκεί θα φαίνονται τα στάδια της σφρηηλάτησης για κάθε επανάληψη καθώς και αναλυτική τιμή των τάσεων όπως και ακριβής απεικόνιση των παραμορφώσεων. Στο επόμενο σχήμα φαίνεται το πώς ρυθμίζουμε αυτά που μόλις προαναφέραμε.



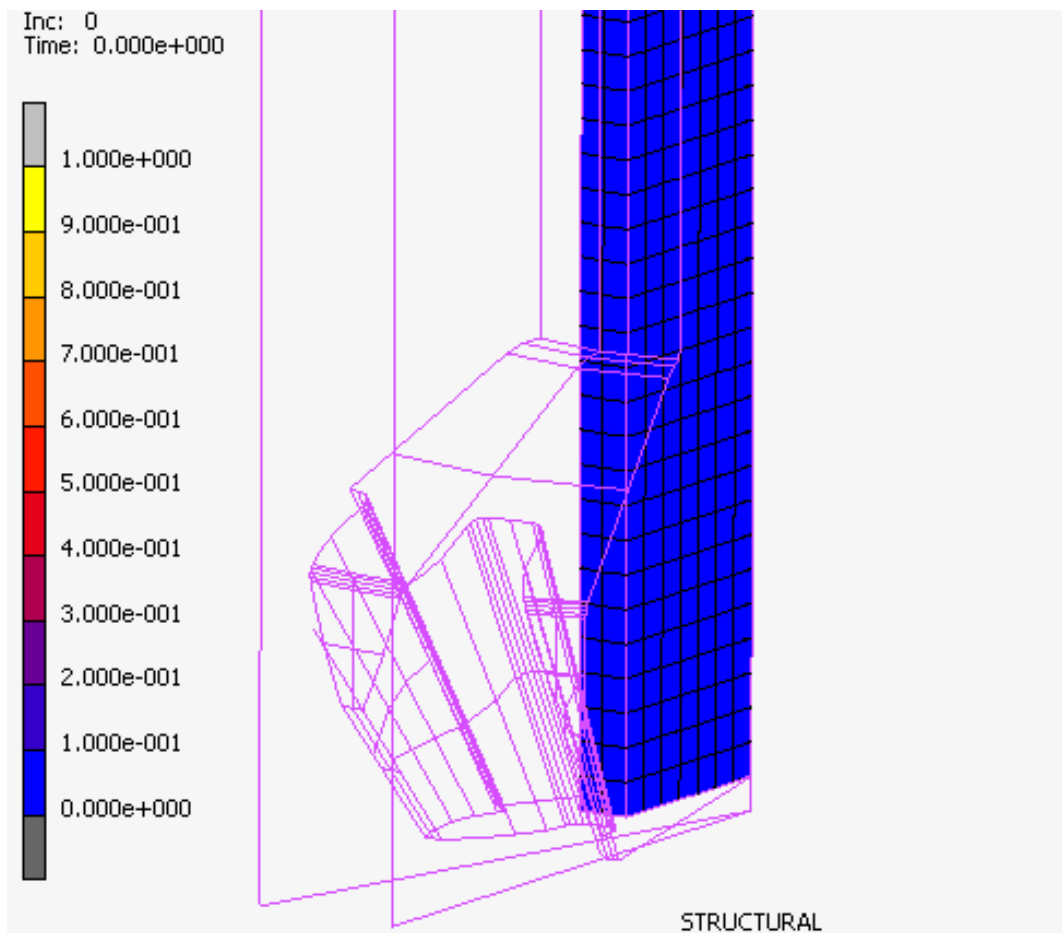
Σχήμα 7.40 : Ρύθμιση γραφικών αποτελεσμάτων της διεργασίας.

Έπειτα, θα δείξουμε την πορεία της προσομοίωσης για τα δύο είδη προδιαμορφωμάτων που χρησιμοποιήθηκαν, ένα το κυλινδρικό και ένα σε σχήμα μανιταριού. Στο επόμενο και τελευταίο κεφάλαιο, θα παρουσιάσουμε τα διαγράμματα που προέκυψαν καθώς και θα βγάλουμε συμπεράσματα επί των διαφορετικών δοκιμών που εφαρμόσαμε.

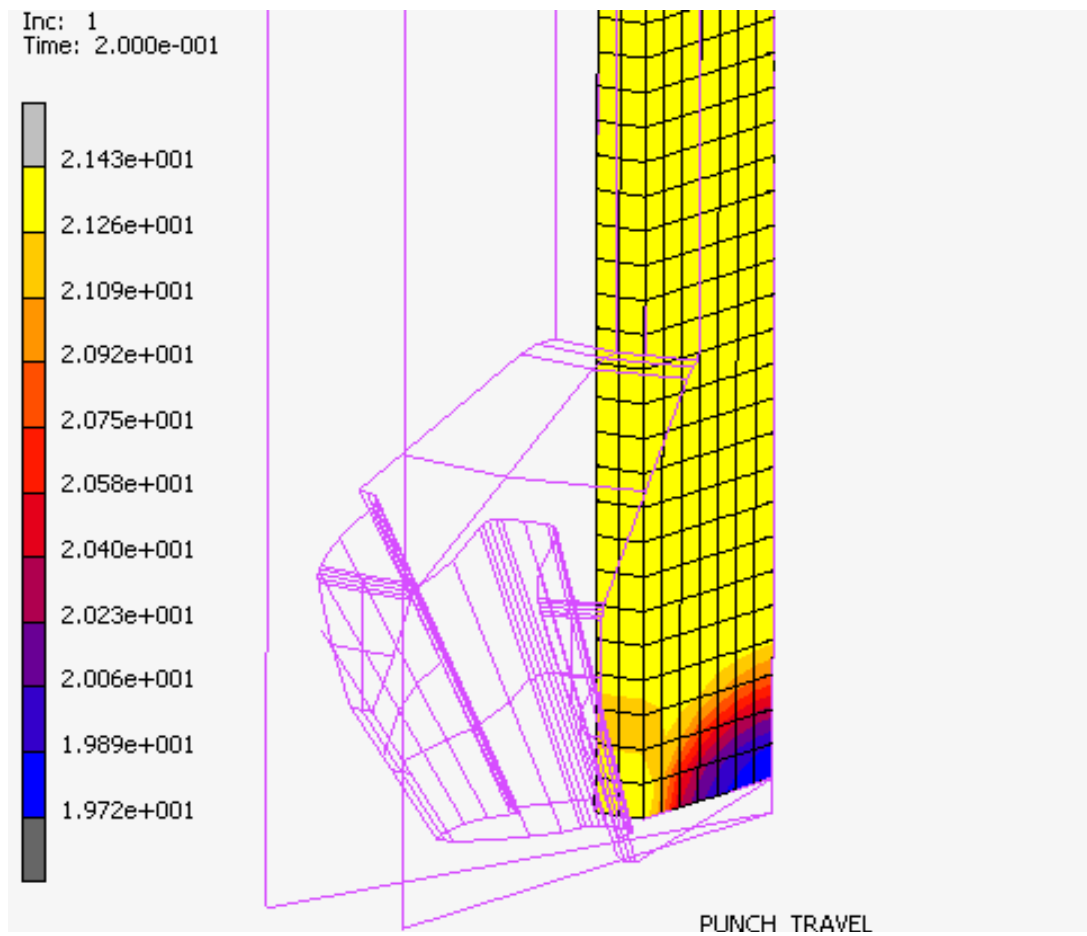
ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗ ΜΕ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΟ ΠΡΟΔΙΑΜΟΡΦΩΜΑ



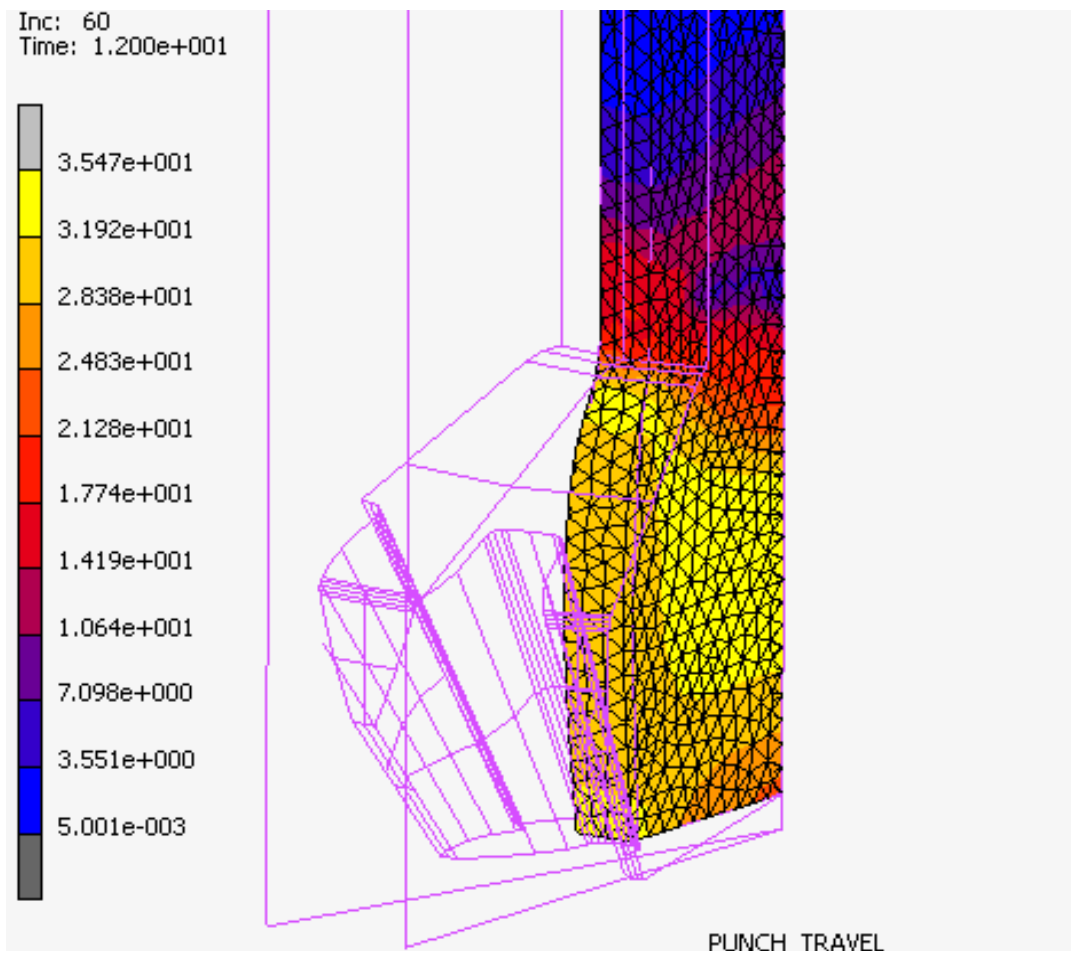
Σχήμα 7.41 : Αρχική γεωμετρία πριν την σφυρηλάτηση.



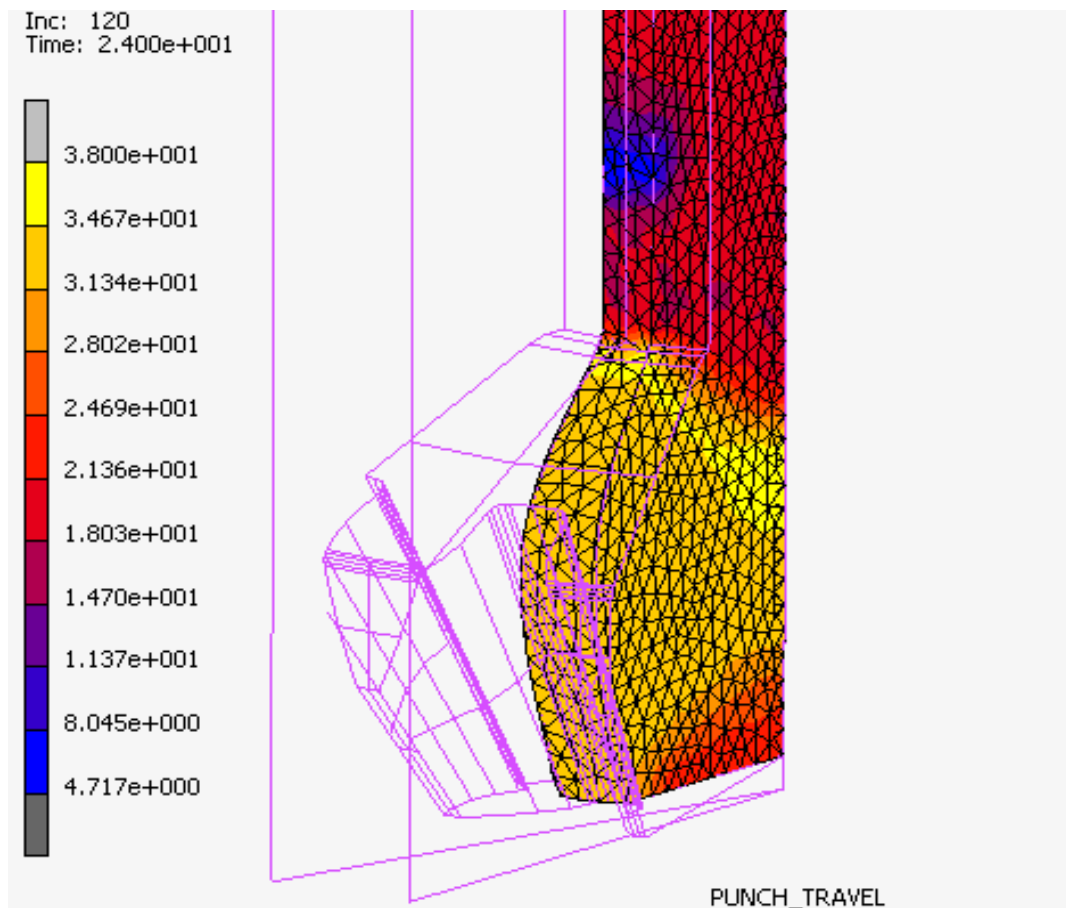
Σχήμα 7.42 : Προσομοίωση κατά την επανάληψη 0.



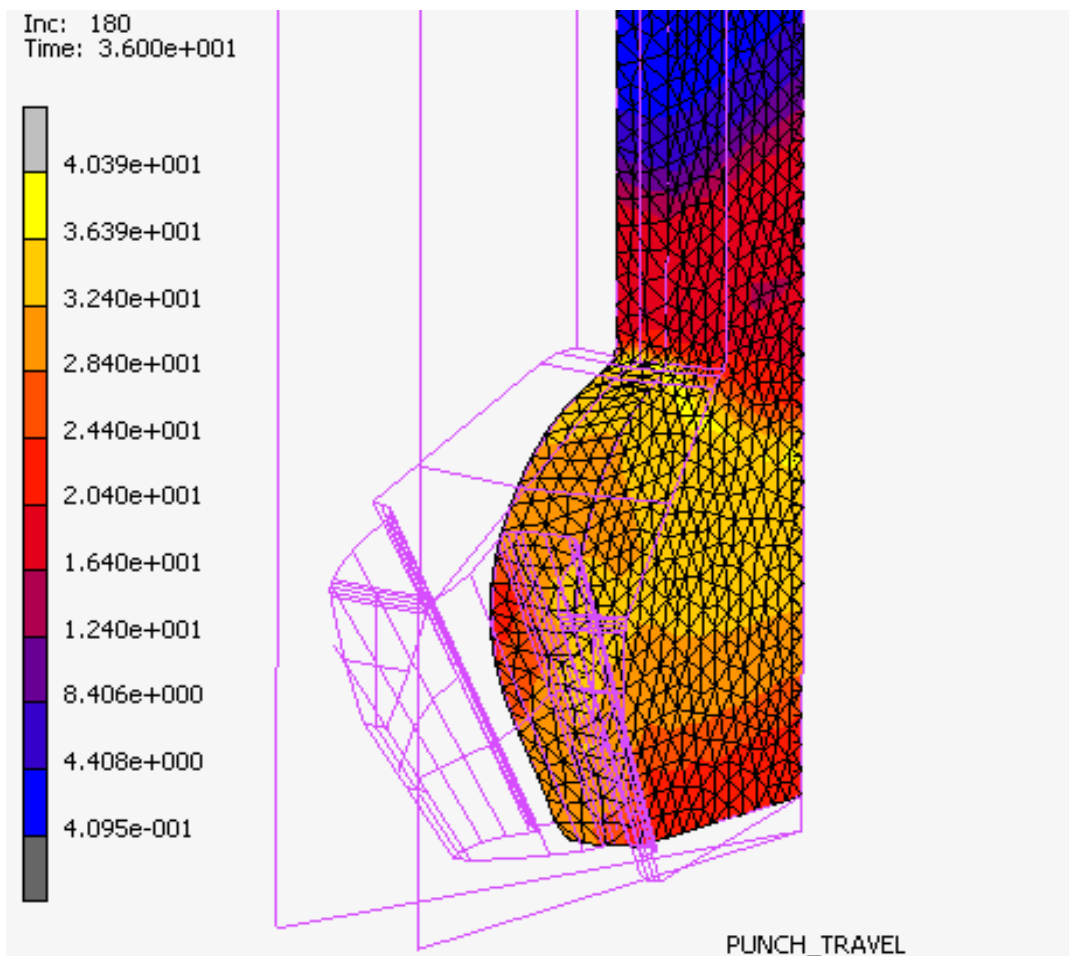
Σχήμα 7.43 : Προσομοίωση κατά την επανάληψη 1.



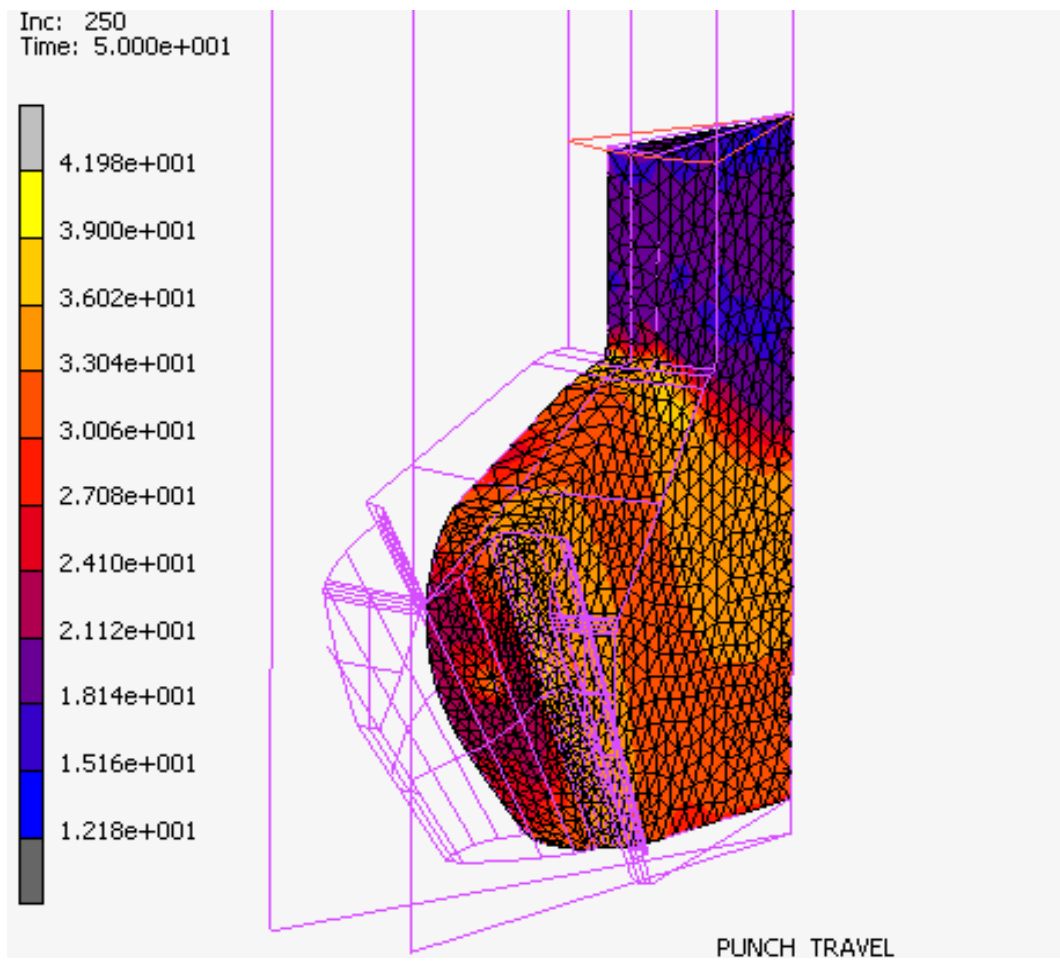
Σχήμα 7.44 : Προσομοίωση κατά την επανάληψη 60.



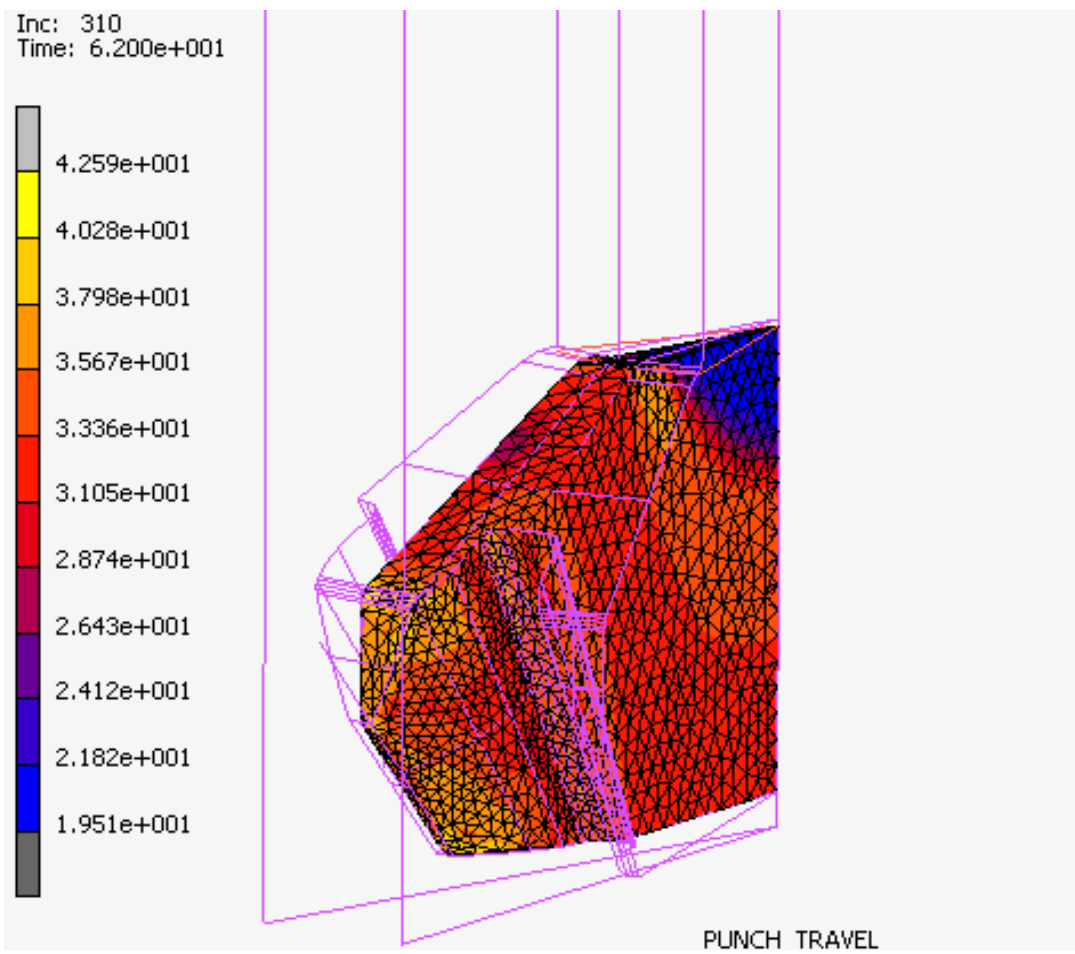
Σχήμα 7.45 : Προσομοίωση κατά την επανάληψη 120.



Σχήμα 7.46 : Προσομοίωση κατά την επανάληψη 180.

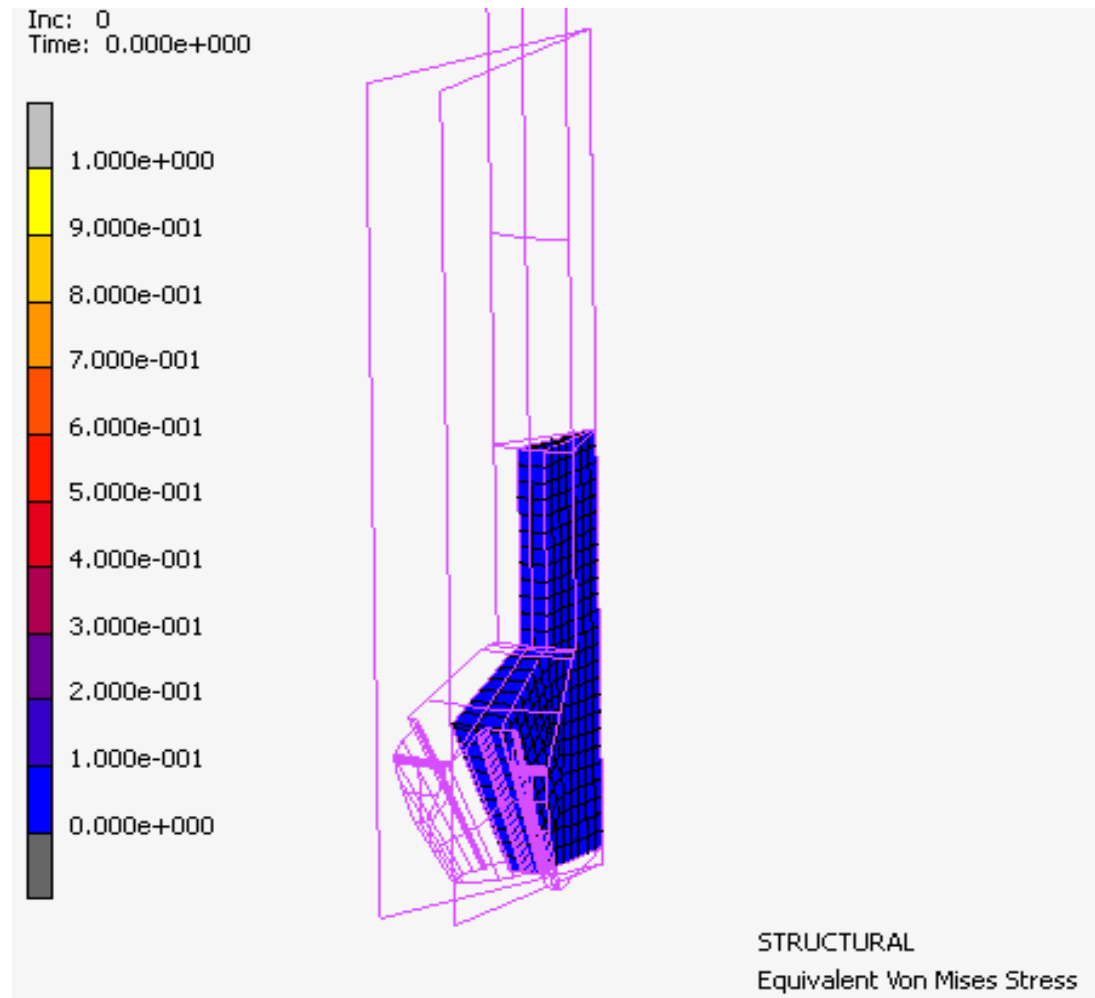


Σχήμα 7.47 : Προσομοίωση κατά την επανάληψη 250.

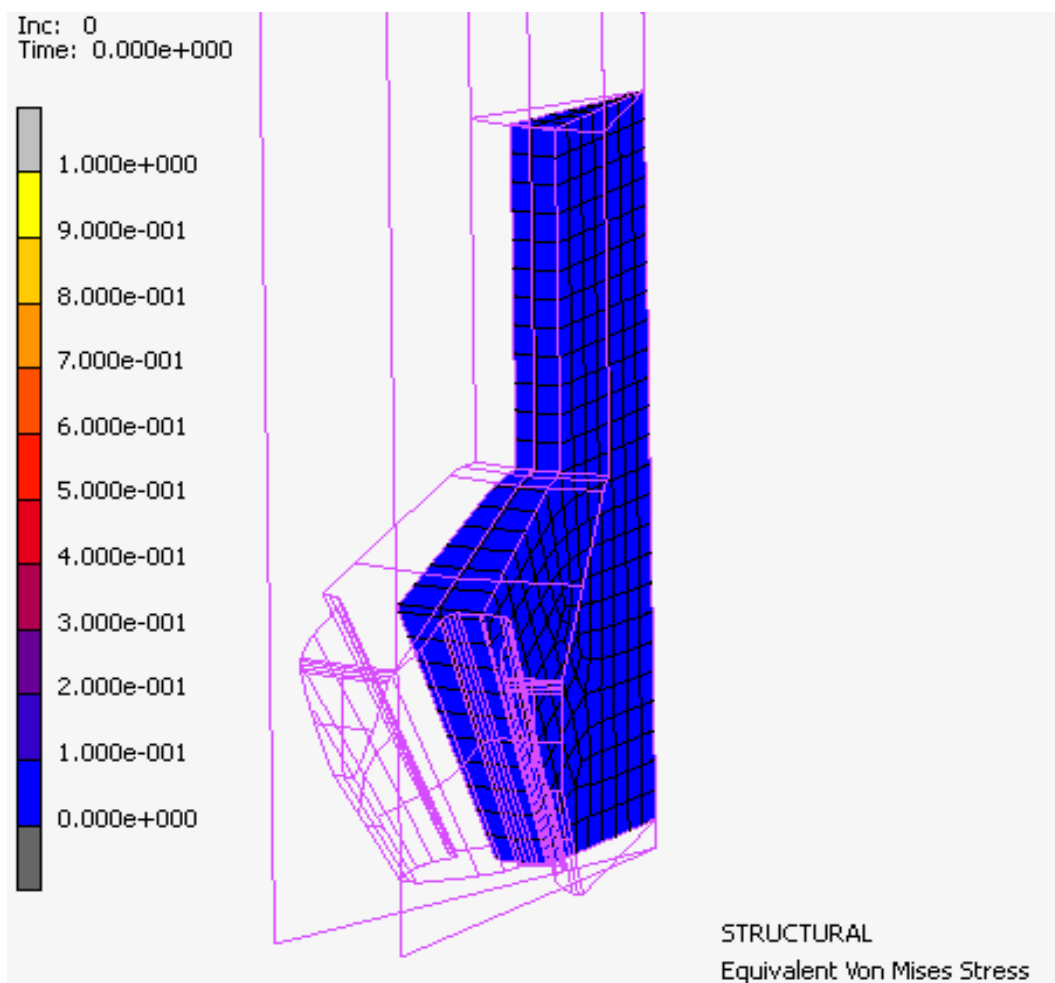


Σχήμα 7.48 : Προσομοίωση κατά την επανάληψη 310.

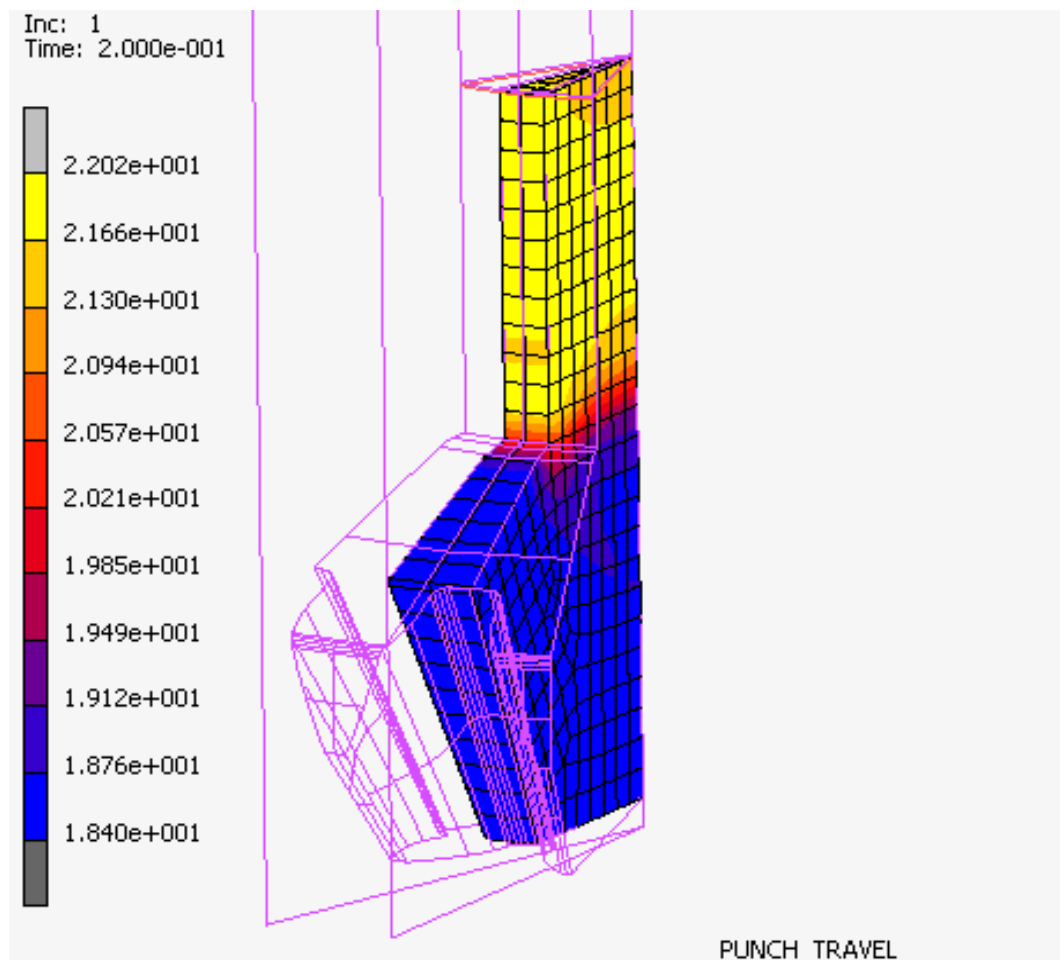
ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗ ΜΕ ΜΗ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΟ ΠΡΟΔΙΑΜΟΡΦΩΜΑ



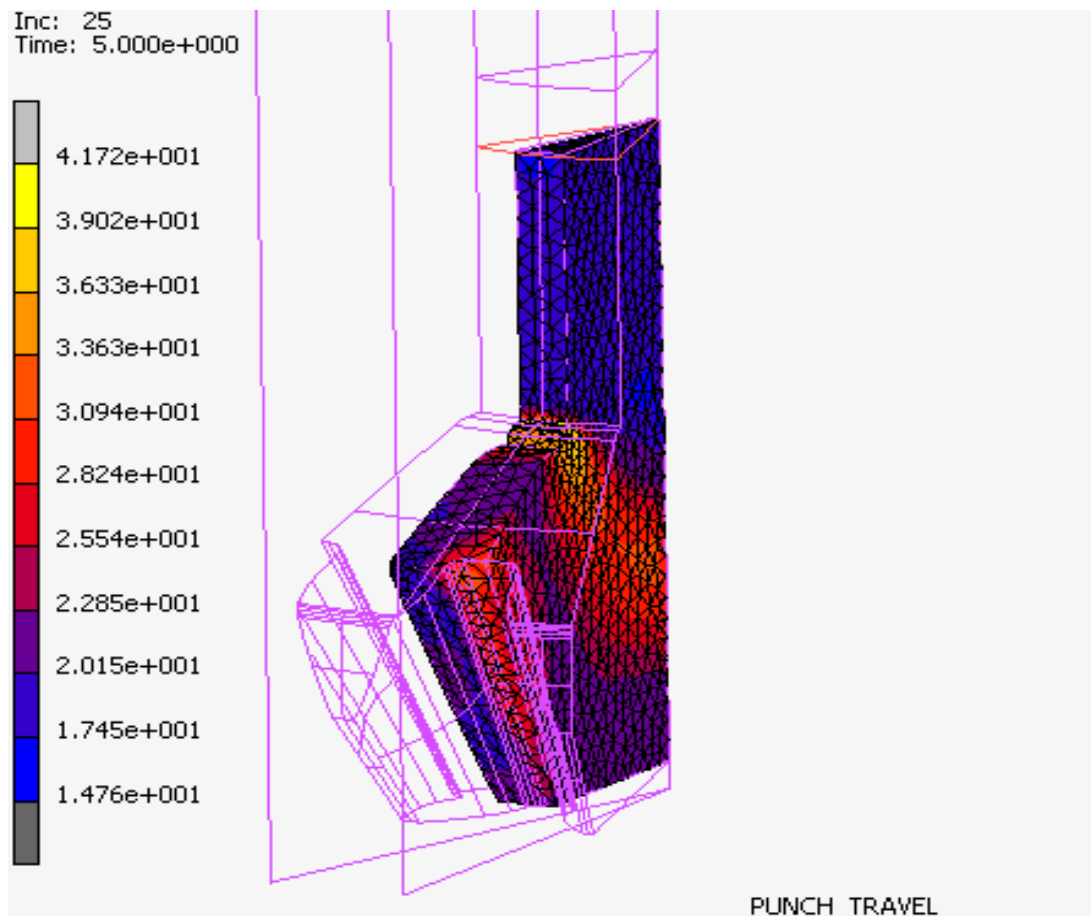
Σχήμα 7.49 : Αρχική γεωμετρία πριν την σφυρηλάτηση.



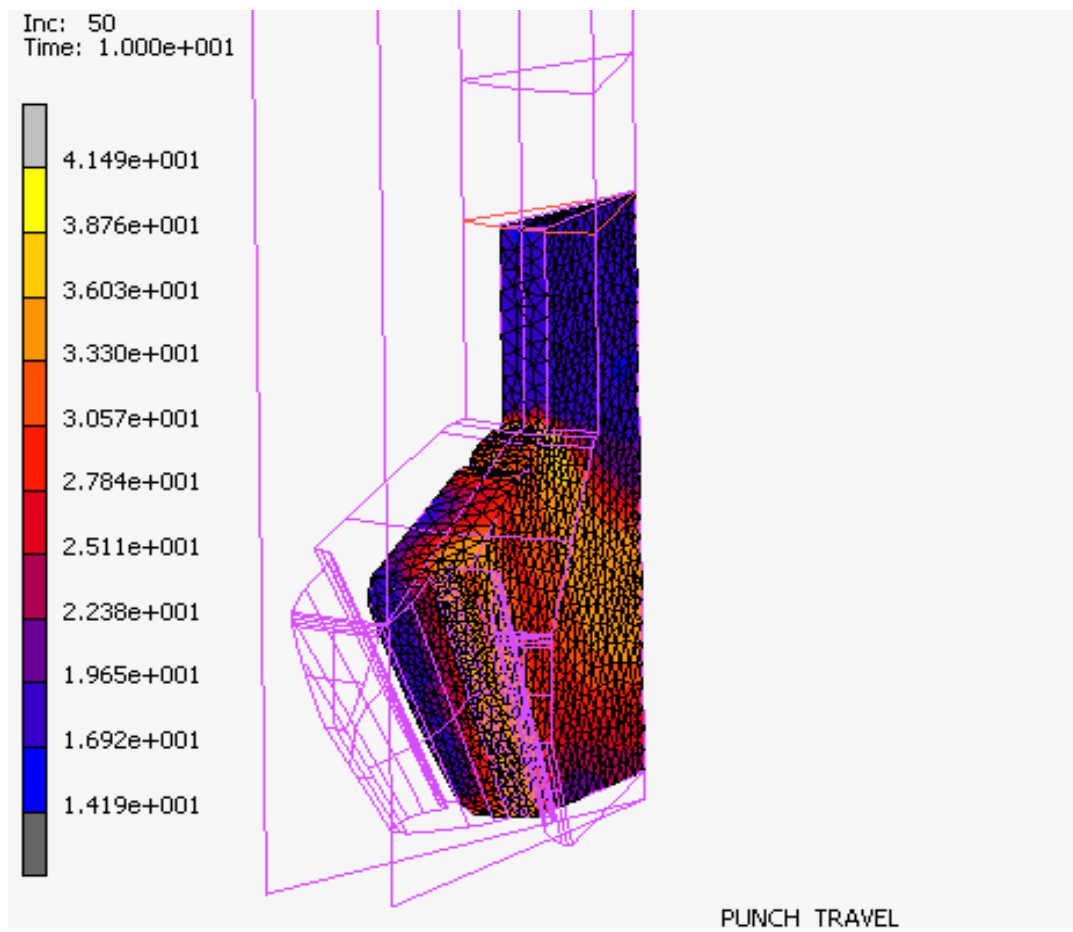
Σχήμα 7.50 : Προσομοίωση κατά την επανάληψη 0.



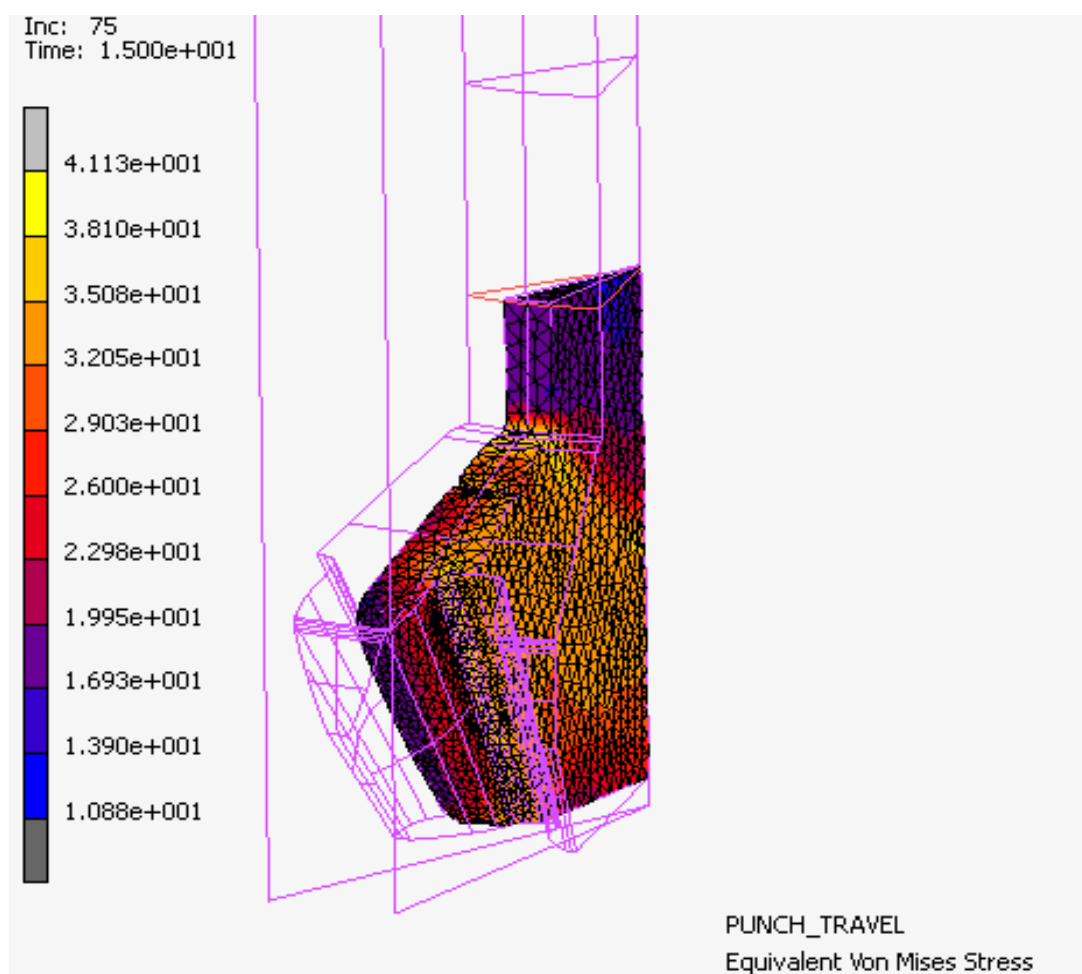
Σχήμα 7.51 : Προσομοίωση κατά την επανάληψη 1.



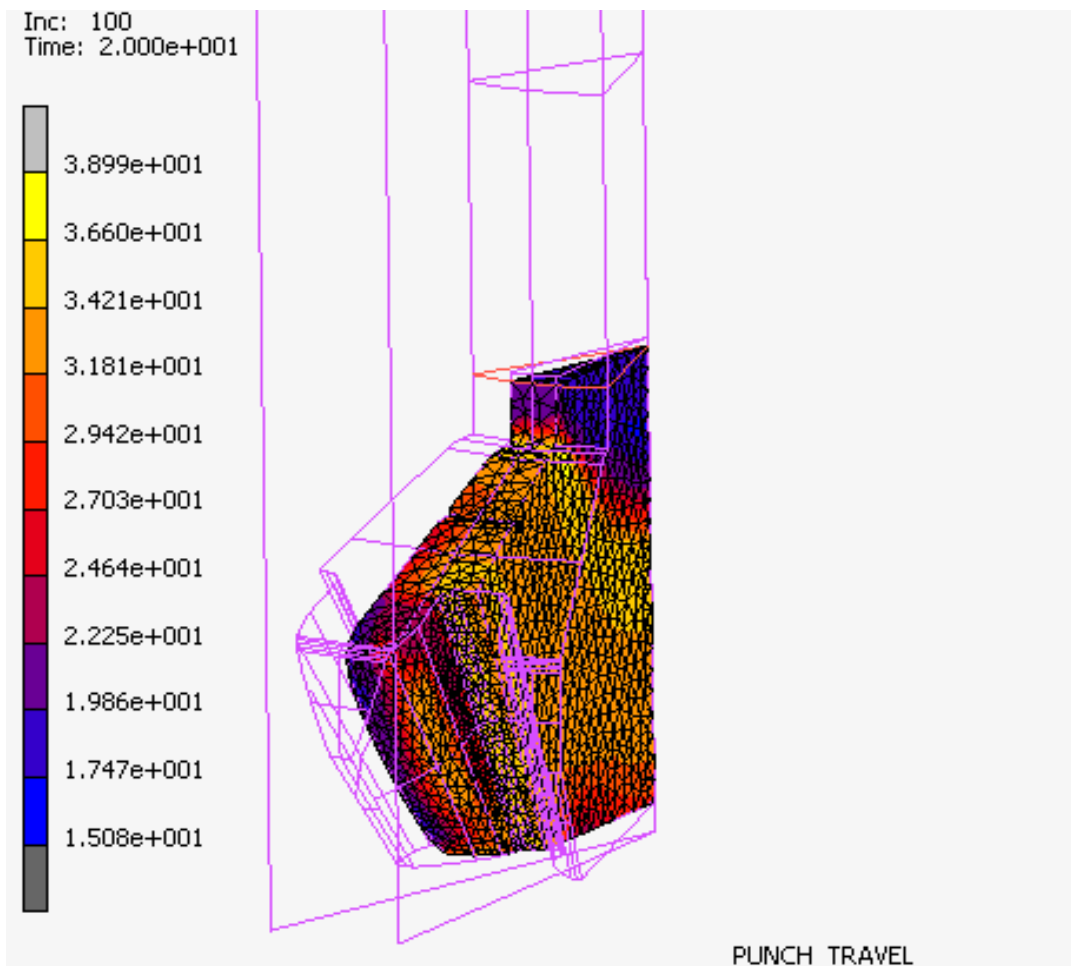
Σχήμα 7.52 : Προσομοίωση κατά την επανάληψη 25.



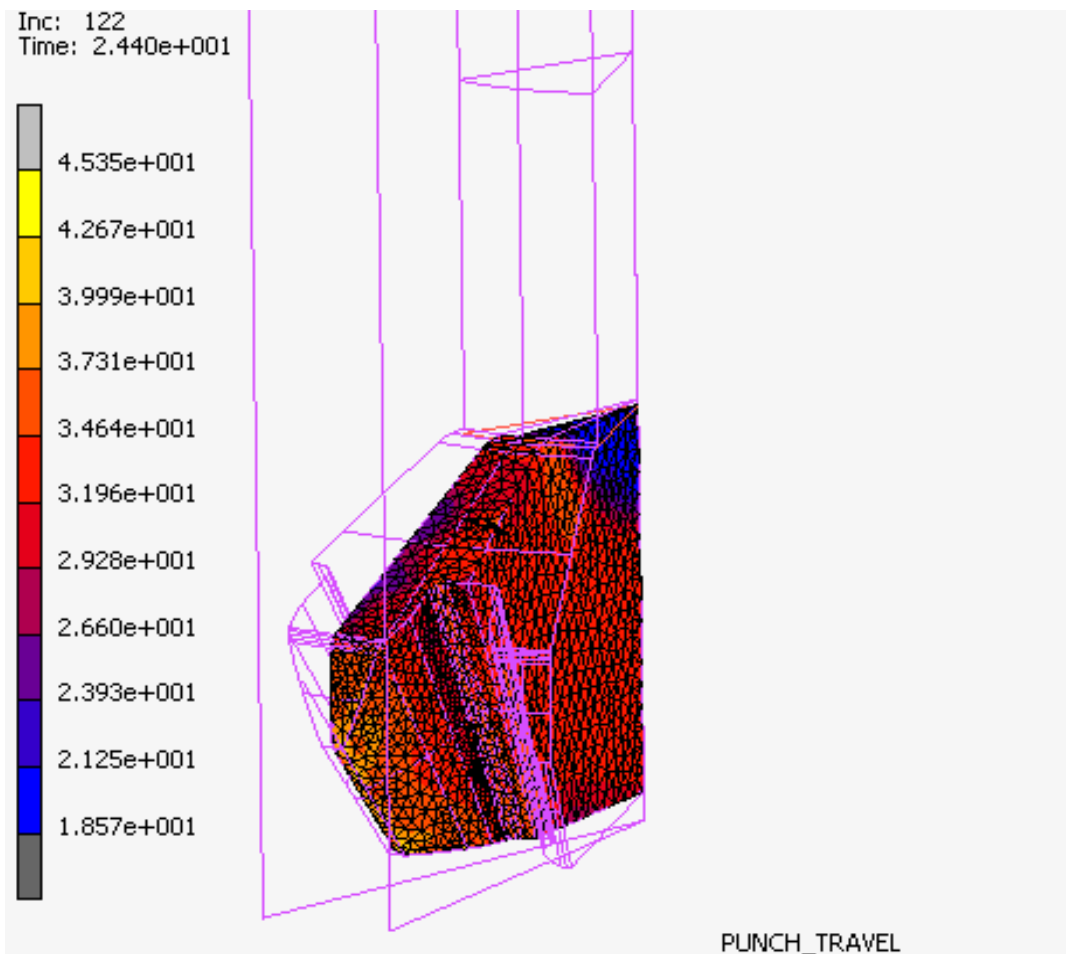
Σχήμα 7.53: Προσομοίωση κατά την επανάληψη 50.



Σχήμα 7.54 : Προσομοίωση κατά την επανάληψη 75.



Σχήμα 7.55 : Προσομοίωση κατά την επανάληψη 100.



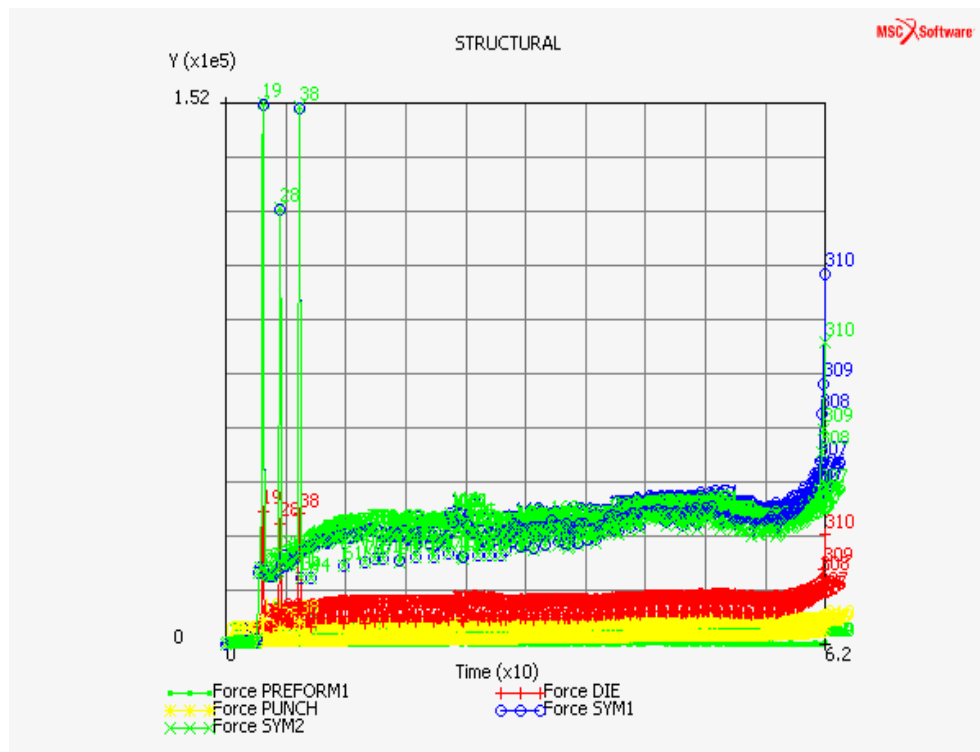
Σχήμα 7.56 : Προσομοίωση κατά την επανάληψη 122.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

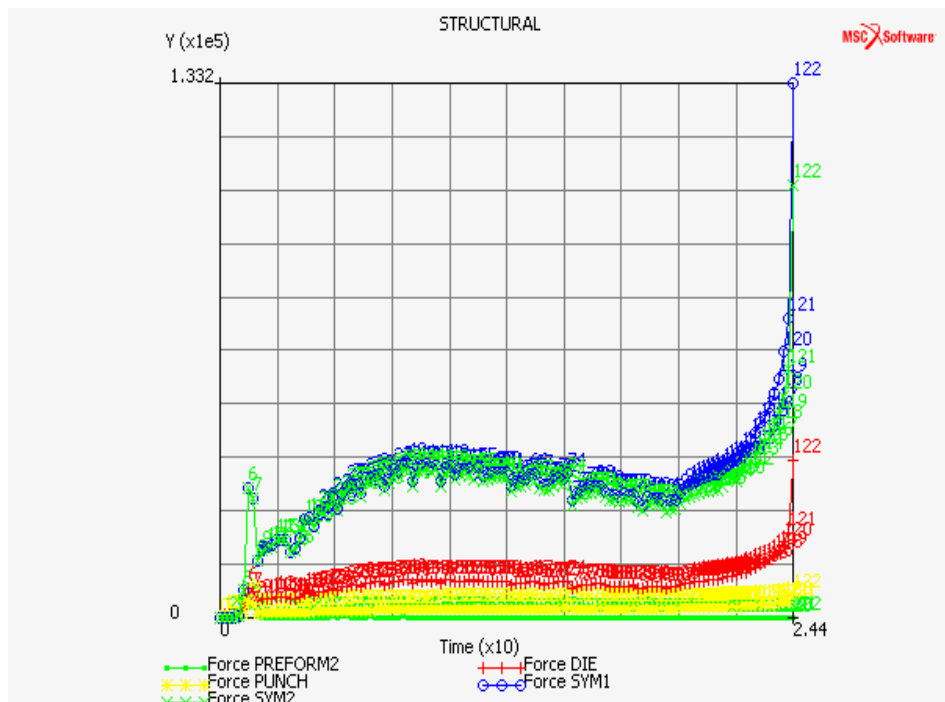
8.1 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΗΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ

Μετά το πέρας της επίλυσης των προσομοιώσεων, με την χρήση της εντολής **Results→History Plot**, λαμβάνουμε τα διαγράμματα διαφόρων ειδών. Στην παρούσα εργασία, θα λάβουμε το διάγραμμα των δυνάμεων των επιφανειών επαφής σε συνάρτηση με τον χρόνο. Στην συνέχεια, θα απομονώσουμε τις τιμές για την δύναμη του εμβόλου και θα την παρουσιάσουμε για κάθε προσομοίωση ξεχωριστά. Τέλος, θα κάνουμε αναγωγή της αξονικής δύναμης που ασκείται στο έμβολο(από το προδιαμόρφωμα) από την συμμετρία 1/26 σε ολόκληρο τον οδοντωτό τροχό. Θα δούμε δηλαδή την συνολική δύναμη που ασκείται στο έμβολο και την μορφή των αντίστοιχων διαγραμμάτων για κάθε προσομοίωση.

Σε πρώτη φάση, μετά την παραπάνω εντολή παίρνουμε τα διαγράμματα των επιφανειών επαφής για τις δύο προσομοιώσεις, τα οποία και παραθέτουμε αμέσως.

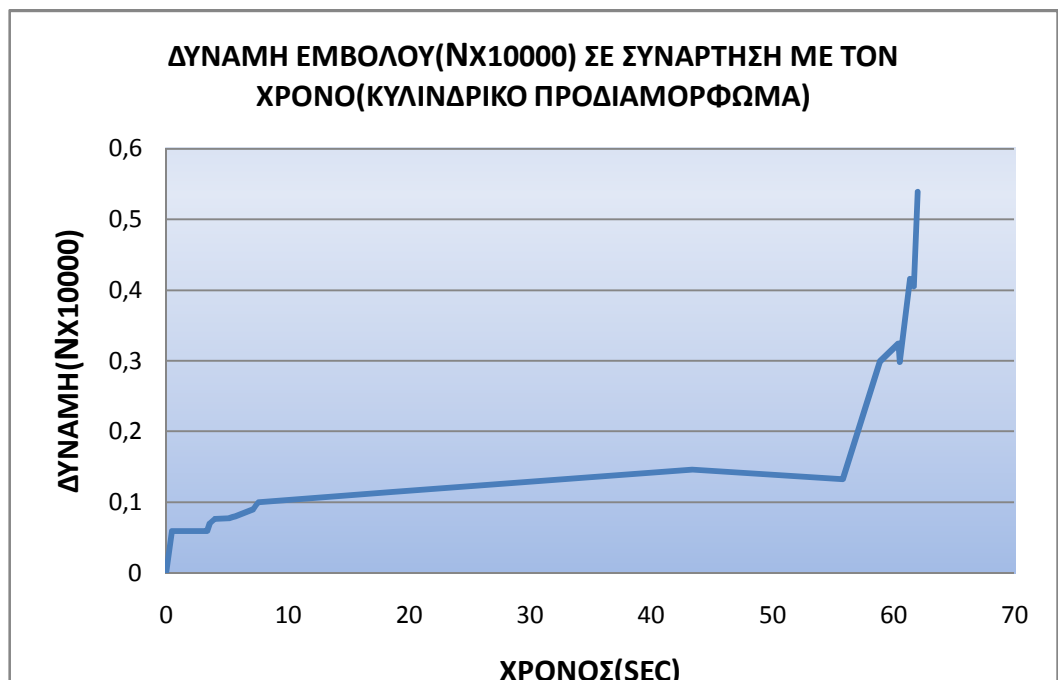


Σχήμα 8.1: Απεικόνιση συνόλου διαγραμμάτων δυνάμεων επιφανειών επαφής σε συνάρτηση με τον χρόνο(κυλινδρικό προδιαμόρφωμα).



Σχήμα 8.2 : Απεικόνιση συνόλου διαγραμμάτων δυνάμεων επιφανειών επαφής σε συνάρτηση με τον χρόνο(μή κυλινδρικό προδιαμόρφωμα).

Ακολουθούν τα διαγράμματα της δύναμης που ασκείται στο έμβολο για τις δύο περιπτώσεις των προδιαμορφωμάτων που χρησιμοποιήθηκαν. Από τα διαγράμματα μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα για το εύρος, το μέγεθος και την ομαλότητα των δυνάμεων που ασκούνται.

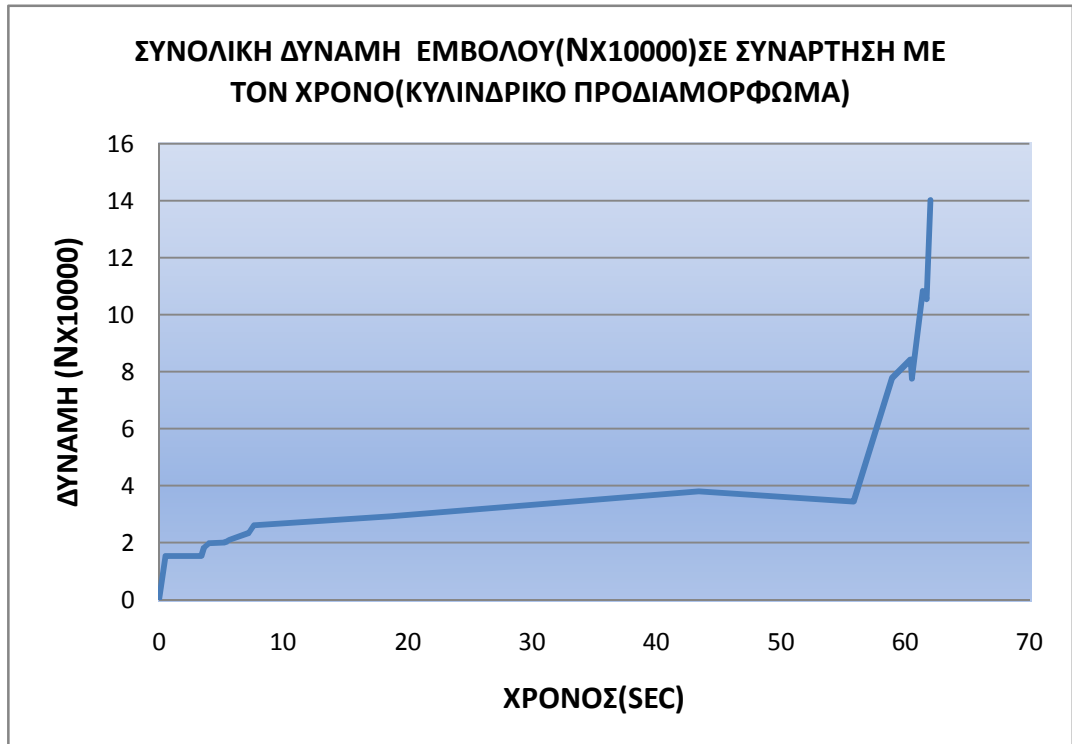


Σχήμα 8.3 : Διάγραμμα δύναμης εμβόλου σε συνάρτηση με τον χρόνο για το κυλινδρικό προδιαμόρφωμα.

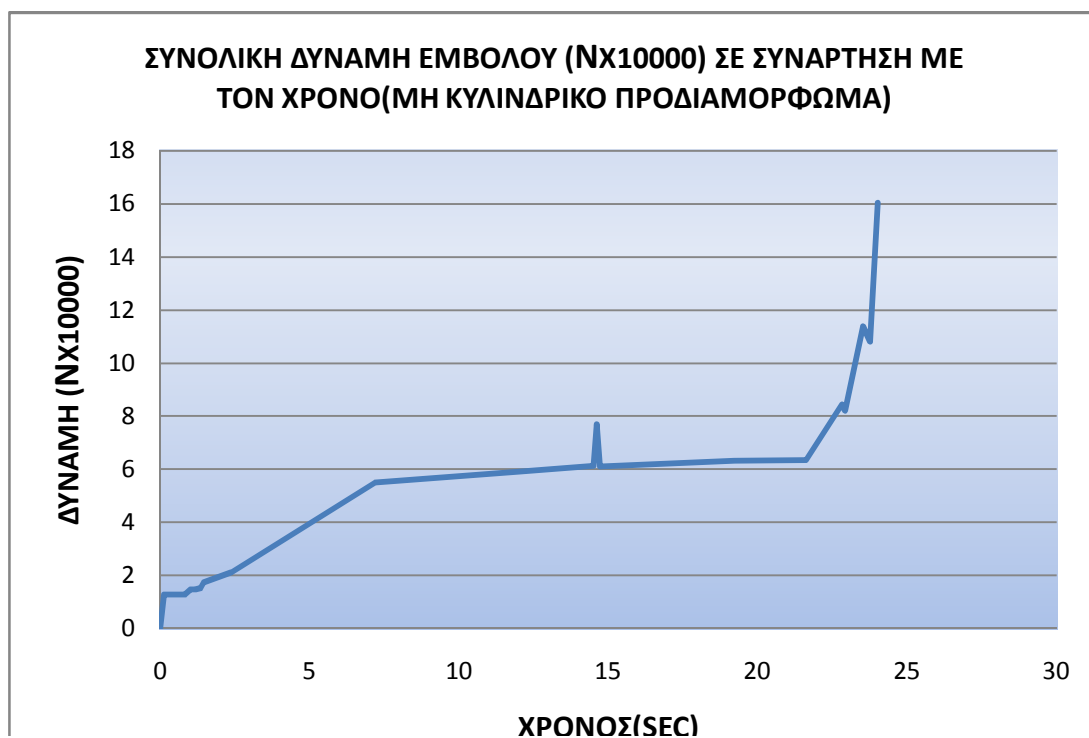


Σχήμα 8.4 : Διάγραμμα δύναμης εμβόλου σε συνάρτηση με τον χρόνο για το μή κυλινδρικό.

Σε αυτό το σημείο κάνουμε την αναγωγή των δυνάμεων του εμβόλου και για τις δύο περιπτώσεις προδιαμορφωμάτων σε ολόκληρη την γεωμετρία(πλήρες έμβολο και οδοντωτός τροχός).Συνεπώς ακολουθούν τα επόμενα σχήματα:



Σχήμα 8.5 : Διάγραμμα συνολικής δύναμης εμβόλου σε συνάρτηση με τον χρόνο για το κυλινδρικό προδιαμόρφωμα.



Σχήμα 8.6: Διάγραμμα συνολικής δύναμης εμβόλου σε συνάρτηση με τον χρόνο για το μή κυλινδρικό προδιαμόρφωμα.

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ

Αμέσως τώρα, παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά της επίλυσης με τα δύο είδη προδιαμορφωμάτων. Φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα:

	ΠΡΟΔΙΑΜΟΡΦΩΜΑ	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΤΡΙΒΗΣ(μ)	ΑΡΙΘΜΟΣ ΝΕΩΝ ΠΛΕΓΜΑΤΩΝ (REMESHES)	ΚΥΚΛΟΙ	ΕΠΑΝΑΛΗΨΕΙΣ	ΧΡΟΝΟΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ (SEC)
1	ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΟ	0,15	98	1739	310	1314
2	ΜΗ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΟ	0,15	50	975	122	802

Πίνακας 8.1: Χαρακτηριστικά της επίλυσης.

8.2 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

8.2.1 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΠΑΝΩ ΣΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΟΥ MARC

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ

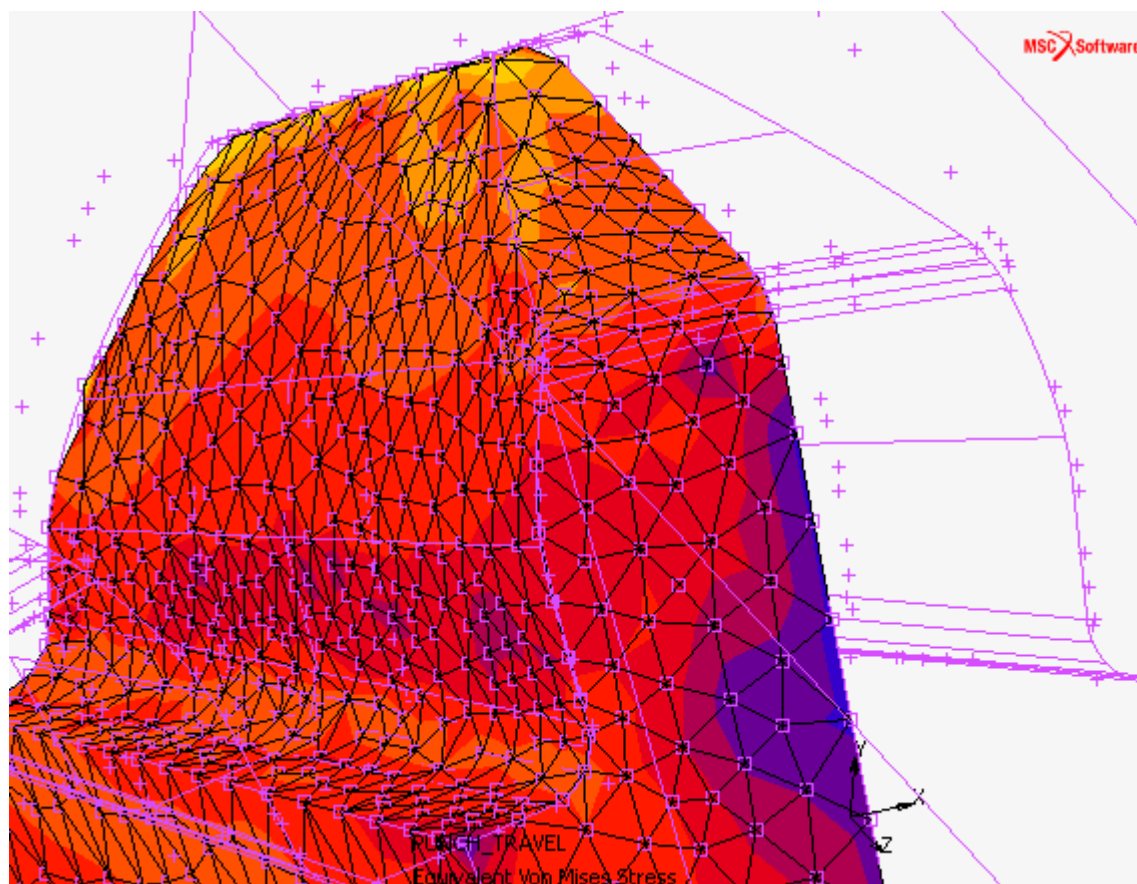
Κρίνοντας από τον πίνακα της προηγούμενης παραγράφου, μπορούμε να βγάλουμε κάποια συμπεράσματα πάνω στον τρόπο που γίνεται η επίλυση από το πακέτο πεπερασμένων στοιχείων. Συνεπώς, παρατηρούμε ότι ο χρόνος επίλυσης από το Marc είναι σημαντικά μικρότερος στο μή κυλινδρικό προδιαμόρφωμα(802 sec έναντι 1314 sec). Επομένως βλέπουμε ότι είναι πιά εύκολο για το πρόγραμμα να επιλύσει το μή κυλινδρικό δοκίμιο. Αυτό όμως είναι σχετικό, καθώς έχουμε διαφορετικές διαδρομές εμβόλου στις δύο περιπτώσεις και επομένως μεγαλύτερη διαδρομή κατά τον άξονα Z του εμβόλου κατά την προσομοίωση του κυλινδρικού προδιαμορφώματος. Αυτός είναι ένας παράγοντας που θα πρέπει να λάβουμε υπόψιν για τον μεγαλύτερο χρόνο επίλυσης, καθώς ο χρόνος αυτός δεν είναι απαραίτητα μεγαλύτερος λόγω υψηλότερου αριθμού επαναδημιουργίας πλέγματος.

Γενικότερα, παρατηρούμε ότι στο μοντέλο του κυλινδρικού προδιαμορφώματος χρειάζονται περισσότερες επαναδημιουργίες πλέγματος(remeshes), όπως και κύκλοι και επαναλήψεις για την επίλυση. Αυτό είναι, μπορούμε να πούμε, σε συνάρτηση με την μεγαλύτερη παραμόρφωση που παρατηρείται στο κυλινδρικό προδιαμόρφωμα. Είναι απολύτως λογικό, λόγω του μεγαλύτερου μήκους του δοκιμίου αλλά και της μη ολοκληρωμένης κάλυψης της μήτρας από υλικό αρχικά, να έχουμε πολύ μεγαλύτερες παραμορφώσεις στο κυλινδρικό προδιαμόρφωμα. Άρα αυτό συνεπάγεται και περισσότερες επαναδημιουργίες πλέγματος (remeshes), αλλά και χρόνο όπως προαναφέραμε.

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Από τα διαγράμματα που προέκυψαν και τα οποία παραθέσαμε στην προηγούμενη παράγραφο, βλέπουμε ότι η μέγιστη δύναμη του εμβόλου είναι μικρότερη κατά την σφυρηλάτηση του κυλινδρικού προδιαμορφώματος και είναι ίση με 140.14 KN. Από την άλλη, η μέγιστη δύναμη του εμβόλου κατά την σφυρηλάτηση του μή κυλινδρικού προδιαμορφώματος είναι ίση με 160.42 KN. Επίσης από την μορφή των καμπυλών παρατηρούμε ότι γενικά υπάρχει κάποια ανομοιομορφία στις τιμές της δύναμης αλλά αυτή περιορίζεται σε συγκεκριμένες και λίγες χρονικές στιγμές. Για παράδειγμα στο κυλινδρικό προδιαμόρφωμα(όπως και στο μή κυλινδρικό), παρατηρούνται δύο διακυμάνσεις δύναμης προς το τέλος της κατεργασίας, αλλά στην συνέχεια η καμπύλη ομαλοποιείται. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι προς το τέλος της κατεργασίας διαμορφώνονται πλήρως οι οδόντες. Στο μή κυλινδρικό προδιαμόρφωμα, παρατηρείται μία επιλέον διακύμανση(προς το μέσον της κατεργασίας) και στην συνέχεια η καμπύλη γίνεται πιο ομαλή. Επίσης παρατηρούμε προς το τέλος της κατεργασίας μεγάλη αύξηση της κλίσεως των διαγραμμάτων, πράγμα που σημαίνει ότι αυξάνεται κατά πολύ η δύναμη προς το τέλος(εύλογο καθώς σχηματίζονται τα δόντια αλλά και είμαστε στα όρια του να υπάρξει μικρή μείωση του όγκου του υλικού).

Επίσης, παρατηρώντας και τις δύο περιπτώσεις της τελικής επανάληψης(ολοκλήρωσης της προσομοίωσης) στις δύο προσομοιώσεις, βλέπουμε ότι υπάρχει πλήρης κάλυψη της μήτρας σφυρηλάτησης(σχεδόν 100 τοις εκατό). Αυτό το γεγονός είναι πολύ σημαντικό καθώς ένας από τους σκοπούς της σφυρηλάτησης ακριβείας είναι και η ακρίβεια στην παραγωγή των τελικών τεμαχίων. Είναι επίσης πολύ μεγάλης σημασίας παράγοντας, λόγω κέρδους σε χρόνο και κόστος(αποφυγή πρόσθετης κατεργασίας). Αυτό το βλέπουμε στο ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα 8.7: Απεικόνιση του τελικού σταδίου της κατεργασίας.

8.2.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε προσπάθεια της όσο το δυνατόν πιο ακριβούς προσομοίωσης της κατεργασίας της σφυρηλάτησης ακριβείας κωνικών οδοντωτών τροχών σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Αυτό απαιτούσε την χρήση κατάλληλου λογισμικού όπως το Marc που όπως έχουμε προαναφέρει είναι κατάλληλο όπου υπάρχουν μεγάλες παραμορφώσεις πεπερασμένων στοιχείων και αρκετές επαναδημιουργίες πλέγματος. Στόχος της εργασίας είναι να δείξει την κατεργασία της σφυρηλάτησης και πώς αυτή προσομοιώνεται με σύγχρονες υπολογιστικές μεθόδους που έχουν ολοένα και μεγαλύτερη εφαρμογή στην σύγχρονη εποχή σε ολοένα και πιο πολλούς τομείς.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1 : ΥΛΙΚΑ

ΣΚΛΗΡΥΜΕΝΟΣ ΧΑΛΥΒΑΣ X32CrMoV33 - ΥΛΙΚΟ ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ ΚΑΙ ΕΜΒΟΛΟΥ

Steel UTOP33 (Mat.No. 1.2365, DIN X32CrMoV33, AISI H10)

Designation by Standards

Brand Name	Ravne No.	Mat. No.	DIN	EN	AISI
UTOP33	864	1.2365	X32CrMoV33	30CrMoV1211	H10

Chemical Composition (in weight %)

C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V	W	Others
0.32	0.25	0.30	2.95	2.75	-	0.55	-	-

Description

Hot work, chromium-molybdenum type tool steel that exhibits excellent resistance to softening at elevated temperature. This grade is very resistant to thermal fatigue cracking (heat cracking), and can be water cooled in service.

Applications

It is recommended for difficult hot work tooling applications such as hot punches, forging dies, hot shear blades, extrusion tooling.

Physical properties (average values) at ambient temperature

Modulus of elasticity [$10^3 \times N/mm^2$]: 207, 176 (at 500°C), 165 (at 600°C)

Density [g/cm^3]: 7.88, 7.69 (at 500°C), 7.65 (at 600°C)

Thermal conductivity [$W/m.K$]: 30.0, 30.1 (at 500°C), 29.7 (at 600°C)

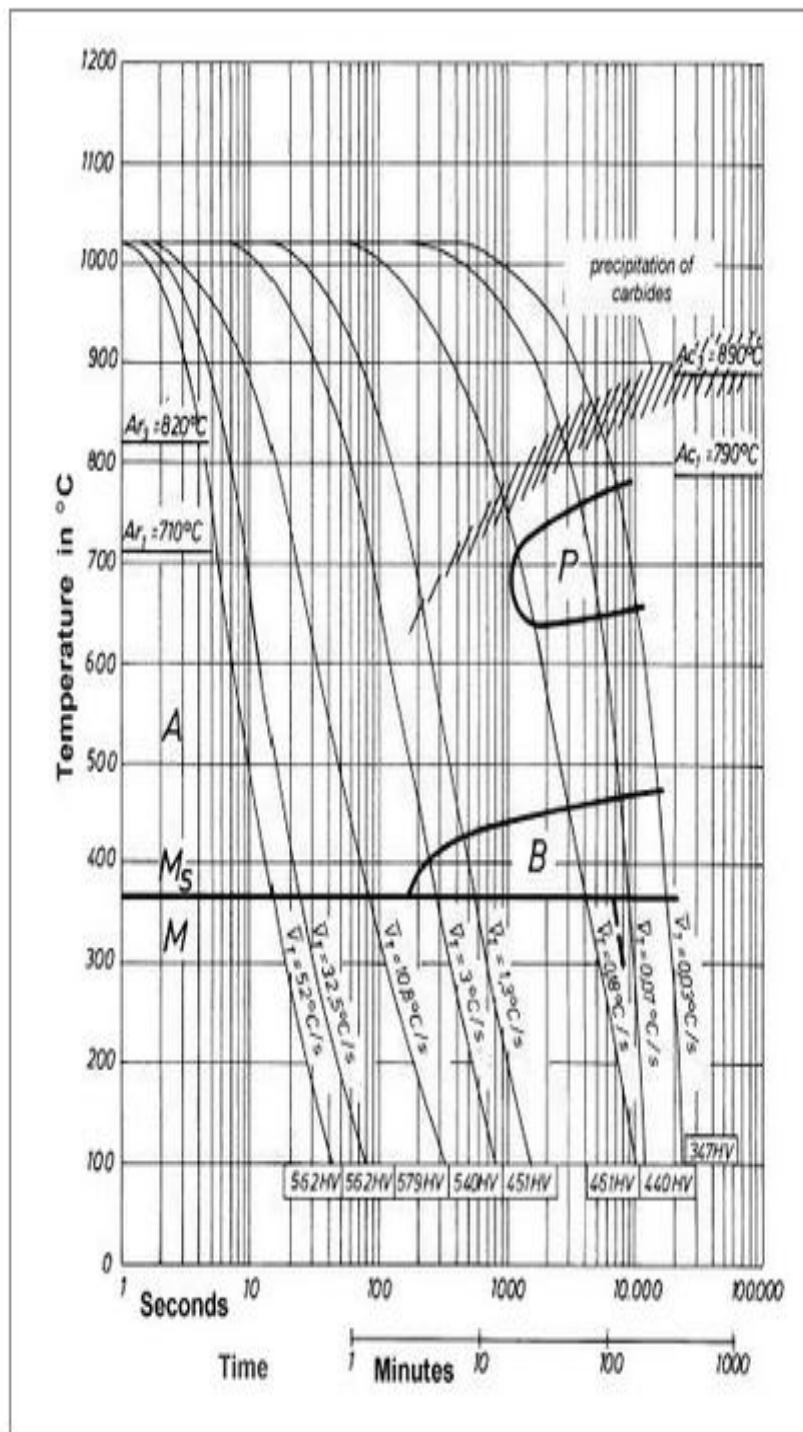
Electric resistivity [$\Omega mm^2/m$]: 0.37, 0.78 (at 500°C), 0.89 (at 600°C)

Specific heat capacity [$J/g.K$]: 0.46, 0.55 (at 500°C), 0.59 (at 600°C)

Coefficient of Linear Thermal Expansion $10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$

20-100°C	20-200°C	20-300°C	20-400°C	20-500°C	20-600°C	20-700°C
12.6	13.3	13.8	14.2	14.6	15.1	15.4

Continuous Cooling Transformation (CCT) Diagram



[Click the image to enlarge the diagram.](#)

Soft Annealing

Heat to $780\text{--}810^{\circ}\text{C}$. cool slowly in furnace. This will produce a maximum Brinell hardness of 229.

Stress Relieving

Stress relieving to remove machining stresses should be carried out by heating to 600-650°C, holding for one hour at heat, followed by air cooling. This operation is performed to reduce distortion during heat treatment. Hardness after quenching is 44-54 HRC.

Hardening

Harden from a temperature of 1010-1050°C followed by air, oil quenching or warm bath quenching 450-450°C.

Tempering

Tempering temperature: 538-621°C, double tempering is required.

Tempering Temperature (°C) vs. Hardness (HRC) vs. Tensile Strength (N/mm²)

100°C	200°C	300°C	400°C	500°C	550°C	600°C	650°C	700°C
51	50	49	49	49	50	48	41	29
1730	1680	1620	1620	1620	1680	1570	1300	940

Tempering Diagram

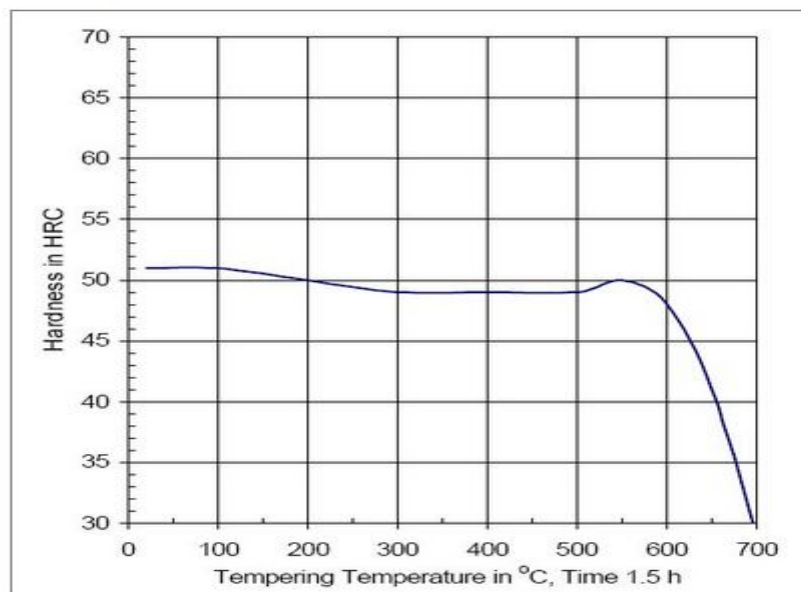


Diagram Tempering Temperature - Mechanical Properties

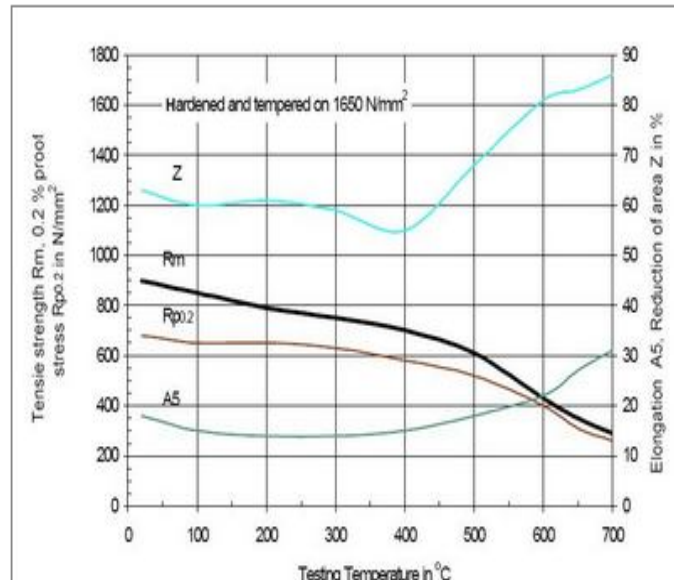
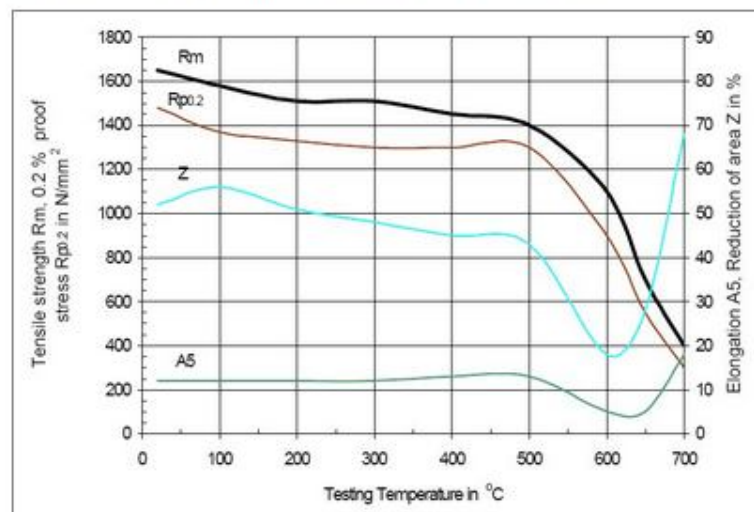


Diagram Tempering Temperature - Mechanical Properties



Click the image to enlarge the diagram.

Forging

Hot forming temperature: 1100-900°C.

Machinability


90-95% of a 1% carbon steel.

Corrosion Resistance

Corrosion resistance of this alloy is better than that of plain carbon steels. However it will rust unless given protective treatment.

ΜΟΛΥΒΔΟΣ – ΥΛΙΚΟ ΠΡΟΔΙΑΜΟΡΦΩΜΑΤΟΣ


Lead, Pb

Physical Properties	Metric	English
Density 	10.22 g/cc @Temperature 800 °C	0.3692 lb/in ³ @Temperature 1470 °F
	10.37 g/cc @Temperature 600 °C	0.3746 lb/in ³ @Temperature 1110 °F
	10.6 g/cc @Temperature 400 °C	0.383 lb/in ³ @Temperature 752 °F
	10.7 g/cc @Temperature 325 °C	0.387 lb/in ³ @Temperature 617 °F
	11.0 g/cc @Temperature 300 °C	0.397 lb/in ³ @Temperature 572 °F
	11.15 g/cc @Temperature 200 °C	0.4028 lb/in ³ @Temperature 392 °F
	11.35 g/cc @Temperature 25.0 °C	0.4100 lb/in ³ @Temperature 77.0 °F
Molecular Weight	207.2 g/mol	207.2 g/mol
Vapor Pressure 	0.001013 bar @Temperature 957 °C	0.7598 torr @Temperature 1750 °F
	0.01013 bar @Temperature 1140 °C	7.598 torr @Temperature 2080 °F
	0.1013 bar @Temperature 1389 °C	75.98 torr @Temperature 2532 °F
	1.013 bar @Temperature 1750 °C	759.8 torr @Temperature 3180 °F

Chemical Properties	Metric	English
Atomic Number	82	82
Thermal Neutron Cross Section	0.17 barns/atom	0.17 barns/atom
X-ray Absorption Edge	0.14077 Å	0.14077 Å
	0.78153 Å	0.78153 Å
	0.81552 Å	0.81552 Å
	0.95112 Å	0.95112 Å
Electrode Potential	-0.126 V	-0.126 V
Electronegativity	1.8	1.8
Ionic Radius	0.840 Å	0.840 Å
	1.20 Å	1.20 Å
Electrochemical Equivalent	3.858 g/A/h	3.858 g/A/h

Mechanical Properties	Metric	English
Hardness, Brinell	4.2	4.2
Hardness, Vickers	5.0	5.0
Tensile Strength, Ultimate	18.0 MPa	2610 psi
Modulus of Elasticity	14.0 GPa	2030 ksi
Poissons Ratio	0.42	0.42
Shear Modulus	4.90 GPa	711 ksi

Electrical Properties	Metric	English
Electrical Resistivity 	0.000020643 ohm-cm @Temperature 20.0 °C	0.000020643 ohm-cm @Temperature 68.0 °F
	0.000027021 ohm-cm @Temperature 100 °C	0.000027021 ohm-cm @Temperature 212 °F
	0.000036378 ohm-cm @Temperature 200 °C	0.000036378 ohm-cm @Temperature 392 °F
	0.000047938 ohm-cm @Temperature 300 °C	0.000047938 ohm-cm @Temperature 572 °F
	0.000097867 ohm-cm @Temperature 340 °C	0.000097867 ohm-cm @Temperature 644 °F
	0.000101418 ohm-cm @Temperature 400 °C	0.000101418 ohm-cm @Temperature 752 °F
Magnetic Susceptibility	-1.20e-7	-1.20e-7
Critical Magnetic Field Strength, Oersted	802 - 804	802 - 804
Critical Superconducting Temperature	7.19 - 7.202 K	7.19 - 7.202 K

Thermal Properties	Metric	English
Heat of Fusion	24.1 J/g	10.4 BTU/lb
Heat of Vaporization	850 J/g	366 BTU/lb
	866.313 J/g	372.688 BTU/lb
CTE, linear	29.1 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$ @Temperature 20.0 - 100 $^{\circ}\text{C}$	16.2 $\mu\text{in}/\text{in}\cdot^{\circ}\text{F}$ @Temperature 68.0 - 212 $^{\circ}\text{F}$
Specific Heat Capacity	0.100386 J/g $^{\circ}\text{C}$	0.0239929 BTU/lb $^{\circ}\text{F}$
	0.1287 J/g $^{\circ}\text{C}$ @Temperature 25.0 $^{\circ}\text{C}$	0.03076 BTU/lb $^{\circ}\text{F}$ @Temperature 77.0 $^{\circ}\text{F}$
	0.132 J/g $^{\circ}\text{C}$ @Temperature 127 $^{\circ}\text{C}$	0.0315 BTU/lb $^{\circ}\text{F}$ @Temperature 261 $^{\circ}\text{F}$
	0.1368 J/g $^{\circ}\text{C}$ @Temperature 227 $^{\circ}\text{C}$	0.03270 BTU/lb $^{\circ}\text{F}$ @Temperature 441 $^{\circ}\text{F}$
	0.139 J/g $^{\circ}\text{C}$ @Temperature 827 $^{\circ}\text{C}$	0.0332 BTU/lb $^{\circ}\text{F}$ @Temperature 1520 $^{\circ}\text{F}$
	0.1404 J/g $^{\circ}\text{C}$ @Temperature 727 $^{\circ}\text{C}$	0.03356 BTU/lb $^{\circ}\text{F}$ @Temperature 1340 $^{\circ}\text{F}$
	0.1421 J/g $^{\circ}\text{C}$ @Temperature 327.4 $^{\circ}\text{C}$	0.03396 BTU/lb $^{\circ}\text{F}$ @Temperature 621.3 $^{\circ}\text{F}$
	0.1433 J/g $^{\circ}\text{C}$ @Temperature 627 $^{\circ}\text{C}$	0.03425 BTU/lb $^{\circ}\text{F}$ @Temperature 1160 $^{\circ}\text{F}$
	0.1449 J/g $^{\circ}\text{C}$ @Temperature 527 $^{\circ}\text{C}$	0.03463 BTU/lb $^{\circ}\text{F}$ @Temperature 981 $^{\circ}\text{F}$
	0.1465 J/g $^{\circ}\text{C}$ @Temperature 427 $^{\circ}\text{C}$	0.03501 BTU/lb $^{\circ}\text{F}$ @Temperature 801 $^{\circ}\text{F}$
	0.1479 J/g $^{\circ}\text{C}$ @Temperature 327.4 $^{\circ}\text{C}$	0.03535 BTU/lb $^{\circ}\text{F}$ @Temperature 621.3 $^{\circ}\text{F}$
Thermal Conductivity	33.0 W/m-K	229 BTU-in/hr-ft $^2\cdot^{\circ}\text{F}$
Melting Point	327.5 $^{\circ}\text{C}$	621.5 $^{\circ}\text{F}$
Boiling Point	1749 $^{\circ}\text{C}$	3180 $^{\circ}\text{F}$
Heat of Formation	0.000 kJ/mol	0.000 kJ/mol
	195.2 kJ/mol	195.2 kJ/mol

Optical Properties	Metric	English
Emissivity (0-1)	0.050	0.050
	0.63	0.63
Reflection Coefficient, Visible (0-1)	0.62	0.62

Component Elements Properties	Metric	English
Lead, Pb	100 %	100 %

Descriptive Properties	
CAS Number	7439-92-1
Solubility	Soluble in concentrated Acid

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2: ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

3D Elements

Solid

This input data creates Marc element types 7, 21, 35, 57, 61, 84, 107, 108, 117, 120, 127, 130, 134, 149, 150, or 157 for structural problems and 43, 44, 71, 105, 106, 123, 133, 135, 175, or 176 for heat transfer problems. Properties that can vary spatially are defined by referencing a spatial field (table). See [Fields - Tables](#) for more information. When a preferred element coordinate system is requested, the ORIENTATION option is generated.

Property Name	Description
Formulation Options	This is set to none by default. If you wish to use an Assumed Strain, Constant Volume or Both of these formulation options, you must set this with the pull down menu to the right of this input property widget. The appropriate flag is placed in the GEOMETRY option to turn these options on if selected. Note that under the Translation Parameter form, Assumed Strain and Constant Volume (or Dilatation) can be globally turned ON for all elements. If you wish these options to vary with element property definitions, you must turn them OFF globally in Job Parameters .
Material Name	Defines the material to be used. A list of all materials (currently in the database) is displayed. Either select from the list or type in the name, preceded by an "m.". This property is required.
Orientation System	Selects the coordinate frame in which to define the preferred material orientation. See Material Orientation for more explanation. Only CID (coordinate frame specification) is valid (or a flagging User Sub. ORIENT).
Orientation Angle	Defines the angle through which the Orientation System is rotated to define the preferred orientation. This property is optional. See Material Orientation for more explanation.
[Rigidity]	In a Coupled analysis, if this is set to Rigid, the element exhibits only heat transfer capabilities and becomes structurally rigid.

Note: For solid laminated composite element 149, a GASKET option (material) can also be defined as explained in [2D Solid Elements](#).

Solid with Auto Tie

This input data creates Marc element types 7, 21, or 57 to tie shells to solid elements. Properties that can vary spatially are defined by referencing a spatial field (table). See [Fields - Tables](#) for more information. When a preferred element coordinate system is requested, the ORIENTATION option is generated. The thickness of the attached shell is placed in the GEOMETRY keyword option.

Property Name	Description
Formulation Options	Same explanation as for 3D Elements Solid elements.
Material Name	Defines the material to be used. A list of all materials (currently in the database) is displayed. Either select from the list or type in the name, preceded by an "m.". This property is required.
Orientation System	Selects the coordinate frame in which to define material orientation angle. See Material Orientation for more explanation. Only CID (coordinate frame specification) is valid (or a flagging User Sub. ORIENT).
Orientation Angle	Same explanation as for Solid elements above.
Tied Shell Thickness	Defines the transition thickness where the solid element attaches to the adjacent shell elements. It can be entered either as a real constant or a reference to an existing field definition. The value is entered in the EGEOM1 data field of the GEOMETRY option and is required.

ΕΞΑΕΔΡΙΚΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟ ΤΥΠΟΥ 7 (HEX 8 - TYPE 7)

Element 7

Three-dimensional Arbitrarily Distorted Brick

Element type 7 is an eight-node, isoparametric, arbitrary hexahedral. As this element uses trilinear interpolation functions, the strains tend to be constant throughout the element. This results in a poor representation of shear behavior. The shear (or bending) characteristics can be improved by using alternative interpolation functions. This assumed strain procedure is flagged through the [GEOMETRY](#) option.

In general, you need more of these lower-order elements than the higher-order elements such as types 21 or 57. Hence, use a fine mesh.

This element is preferred over higher-order elements when used in a contact analysis.

The stiffness of this element is formed using eight-point Gaussian integration.

For nearly incompressible behavior, including plasticity or creep, it is advantageous to use an alternative integration procedure. This constant dilatation method which eliminates potential element locking is flagged through the [GEOMETRY](#) option.

This element can be used for all constitutive relations. When using incompressible rubber materials (for example, Mooney and Ogden), the element must be used within the Updated Lagrange framework.

For rubber materials with total Lagrange procedure, element type 84 can be used. This is slightly more expensive because of the extra pressure degrees of freedom associated with element type 84.

Notes: For the assumed strain formulation, the interpolation functions are modified to improve the bending characteristics of the element.

As in all three-dimensional analyses, a large nodal bandwidth results in long computing times. Optimize the nodal bandwidth.

Quick Reference

Type 7

Three-dimensional, eight-node, first-order, isoparametric element (arbitrarily distorted brick).

Connectivity

Eight nodes per element. Node numbering must follow the scheme below (see Figure 3-7):

Nodes 1, 2, 3, and 4 are corners of one face, given in counterclockwise order when viewed from inside the element. Node 5 has the same edge as node 1. Node 6 has the same edge as node 2. Node 7 has the same edge as node 3. Node 8 has the same edge as node 4.

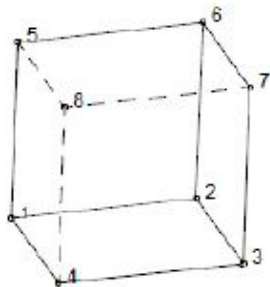


Figure 3-7 Arbitrarily Distorted Cube

Geometry

If the automatic brick to shell constraints are to be used, the first field must contain the transition thickness (see Figure 3-8). Note that in a coupled analysis, there are no constraints for the temperature degrees of freedom.

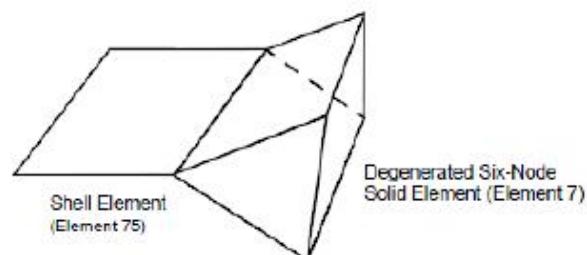


Figure 3-8 Shell-to-Solid Automatic Constraint

If a nonzero value is entered in the second data field (**BGCOM2**), the volumetric strain is constant throughout the element. This is particularly useful for analysis of approximately incompressible materials, and for analysis of structures in the fully plastic range. It is also recommended for creep problems in which it is attempted to obtain the steady state solution.

If a one is placed in the third field, the assumed strain formulation is activated.

Coordinates

Three coordinates in the global x-, y-, and z-directions.

Degrees of Freedom

Three global degrees of freedom u, v, and w per node.

Distributed Loads

Distributed loads chosen by value of **IBODY** are as follows:

Load Type	Description
0	Uniform pressure on 1-2-3-4 face.
1	Nonuniform pressure on 1-2-3-4 face; magnitude supplied through the FORCEM user subroutine.
2	Uniform body force per unit volume in -z-direction.
3	Nonuniform body force per unit volume (e.g., centrifugal force); magnitude and direction supplied through the FORCEM user subroutine.
4	Uniform pressure on 6-5-8-7 face.
5	Nonuniform pressure on 6-5-8-7 face (FORCEM user subroutine).
6	Uniform pressure on 2-1-5-6 face.
7	Nonuniform pressure on 2-1-5-6 face (FORCEM user subroutine).
8	Uniform pressure on 3-2-6-7 face.
9	Nonuniform pressure on 3-2-6-7 face (FORCEM user subroutine).
10	Uniform pressure on 4-3-7-8 face.
11	Nonuniform pressure on 4-3-7-8 face (FORCEM user subroutine).
12	Uniform pressure on 1-4-8-5 face.
13	Nonuniform pressure on 1-4-8-5 face (FORCEM user subroutine).
20	Uniform pressure on 1-2-3-4 face.
21	Nonuniform load on 1-2-3-4 face; magnitude and direction supplied in the FORCEM user subroutine.
22	Uniform body force per unit volume in -z-direction.
23	Nonuniform body force per unit volume (e.g., centrifugal force); magnitude and direction supplied through the FORCEM user subroutine.
24	Uniform pressure on 6-5-8-7 face.
25	Nonuniform load on 6-5-8-7 face; magnitude and direction supplied in the FORCEM user subroutine.
26	Uniform pressure on 2-1-5-6 face.
27	Nonuniform load on 2-1-5-6 face; magnitude and direction supplied in the FORCEM user subroutine.
28	Uniform pressure on 3-2-6-7 face.
29	Nonuniform load on 3-2-6-7 face; magnitude and direction supplied in the FORCEM user subroutine.
30	Uniform pressure on 4-3-7-8 face.

Load Type	Description
31	Nonuniform load on 4-3-7-8 face; magnitude and direction supplied in the FORCEM user subroutine.
32	Uniform pressure on 1-4-8-5 face.
33	Nonuniform load on 1-4-8-5 face; magnitude and direction supplied in the FORCEM user subroutine.
40	Uniform shear 1-2-3-4 face in the 1-2 direction.
41	Nonuniform shear 1-2-3-4 face in the 1-2 direction.
42	Uniform shear 1-2-3-4 face in the 2-3 direction.
43	Nonuniform shear 1-2-3-4 face in the 2-3 direction.
48	Uniform shear 6-5-8-7 face in the 5-6 direction.
49	Nonuniform shear 6-5-8-7 face in the 5-6 direction.
50	Uniform shear 6-5-8-7 face in the 6-7 direction.
51	Nonuniform shear 6-5-8-7 face in the 6-7 direction.
52	Uniform shear 2-1-5-6 face in the 1-2 direction.
53	Nonuniform shear 2-1-5-6 face in the 1-2 direction.
54	Uniform shear 2-1-5-6 face in the 1-5 direction.
55	Nonuniform shear 2-1-5-6 face in the 1-5 direction.
56	Uniform shear 3-2-6-7 face in the 2-3 direction.
57	Nonuniform shear 3-2-6-7 face in the 2-3 direction.
58	Uniform shear 3-2-6-7 face in the 2-6 direction.
59	Nonuniform shear 3-2-6-7 face in the 2-6 direction.
60	Uniform shear 4-3-7-8 face in the 3-4 direction.
61	Nonuniform shear 4-3-7-8 face in the 3-4 direction.
62	Uniform shear 4-3-7-8 face in the 3-7 direction.
63	Nonuniform shear 4-3-7-8 face in the 3-7 direction.
64	Uniform shear 1-4-8-5 face in the 4-1 direction.
65	Nonuniform shear 1-4-8-5 face in the 4-1 direction.
66	Uniform shear 1-4-8-5 in the 1-5 direction.
67	Nonuniform shear 1-4-8-5 face in the 1-5 direction.

Pressure forces are positive into element face.

For other types of distributed loads that are normally applicable for all types of elements, please refer to [Distributed Loads](#) in Chapter 1 of this manual.

Output of Strains

- 1 = ϵ_{xx}
- 2 = ϵ_{yy}
- 3 = ϵ_{zz}
- 4 = γ_{xy}
- 5 = γ_{yz}
- 6 = γ_{zx}

Output of Stresses

Output of stresses is the same as for [Output of Strains](#).

Transformation

Standard transformation of three global degrees of freedom to local degrees of freedom.

Tying

No special tying available. An automatic constraint is available for brick-to-shell transition meshes (see [Geometry](#)).

Output Points

Centroid or the eight integration points as shown in [Figure 3-9](#).

Updated Lagrange Procedure and Finite Strain Plasticity

Capability is available.

Coupled Analysis

In a coupled thermal-mechanical analysis, the associated heat transfer element is type [43](#). See [Element 43](#) for a description of the conventions used for entering the flux and film data for this element. Volumetric flux generated by dissipated plastic energy is specified with type [101](#).

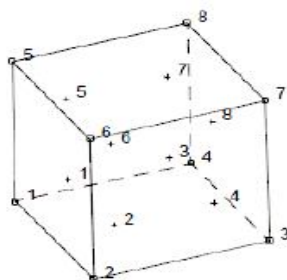


Figure 3-9 Eight-Point Gauss Integration Scheme for Element 7

Assumed Strain

The assumed strain formulation is available to improve the bending behavior. This increases the stiffness assembly costs per element, but it improves the accuracy.

Notes: The element can be collapsed to a tetrahedron.

By collapsing one plane of the element to a line (see [Figure 3-8](#)), a transition element for connecting bricks with four-node shell element type [75](#) is generated. Thickness of the shell must be specified in the geometry field of the brick element.

ΤΕΤΡΑΕΔΡΙΚΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟ ΤΥΠΟΥ 157(TET 4 - TYPE 157)

Element 157

Three-dimensional, Low-order, Tetrahedron, Herrmann Formulations

This element is a three-dimensional, isoparametric, 4 + 1-node, low-order, tetrahedron with an additional pressure degree of freedom at each of the four corner nodes (see Figure 3-234). It is written for incompressible or nearly incompressible three-dimensional applications. The shape function for the center node is a bubble function. Therefore, the displacements and the coordinates for the element are linearly distributed along the element boundaries. The stiffness of this element is formed using four Gaussian integration points. The degrees of freedom of the center node are condensed out on the element level before the assembly of the global matrix.

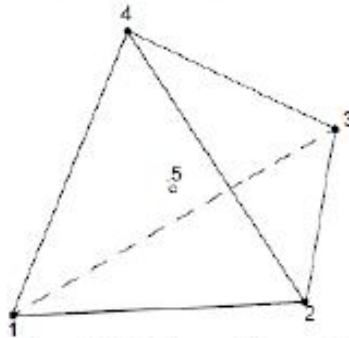


Figure 3-234 Form of Element 157

This element can be used for incompressible elasticity via total Lagrangian formulations or for rubber elasticity and elasto-plasticity via updated Lagrangian (F^{UP}) formulations. To activate large strain analysis via updated Lagrangian formulations use either the **LARGE STRAIN,2** parameter (see *Marc Volume A: Theory and User Information* and *Marc Volume C: Program Input* for more information).

Integration

Four integration points are used to correctly interpolate the cubic shape function. For the mass matrix in volumetric loads, 16 integration points are used.

Quick Reference

Type 157

4 + 1-node, isoparametric, three-dimensional, tetrahedron using Herrmann formulation. Written for incompressible or nearly incompressible applications.

Connectivity

Five nodes per element (see Figure 3-234). Node numbering for the first four nodes is the same as for element type 134; that is, nodes 1, 2, 3, being the corners of the first face in counterclockwise order when viewed from inside the element and node 4 on the opposing vertex. The fifth node is located at the element center.

Coordinates

Three global coordinates in the x-, y- and z-directions. Marc automatically calculates the coordinates of the fifth (center) node of the element.

Degrees of Freedom

- 1 - u
- 2 - v
- 3 - w
- 4 - p

Distributed Loads

Distributed loads chosen by value of **IBODY** are as follows:

Load Type	Description
0	Uniform pressure on 1-2-3 face.
1	Nonuniform pressure on 1-2-3 face.
2	Uniform pressure on 1-2-4 face.
3	Nonuniform pressure on 1-2-4 face.
4	Uniform pressure on 2-3-4 face.
5	Nonuniform pressure on 2-3-4 face.
6	Uniform pressure on 1-3-4 face.
7	Nonuniform pressure on 1-3-4 face.
8	Uniform body force per unit volume in x direction.
9	Nonuniform body force per unit volume in x direction.
10	Uniform body force per unit volume in y direction.
11	Nonuniform body force per unit volume in y direction.
12	Uniform body force per unit volume in z direction.
13	Nonuniform body force per unit volume in z direction.
100	Centrifugal load, magnitude represents square of angular velocity [rad/time]. Rotation axis is specified in the ROTATION A option.
102	Gravity loading in global direction. Enter three magnitudes of gravity acceleration in respectively global x, y, z direction.
103	Coriolis and centrifugal load; magnitude represents square of angular velocity [rad/time]. Rotation axis is specified in the ROTATION A option.

For other types of distributed loads that are normally applicable for all types of elements, please refer to [Distributed Loads](#) in Chapter 1 of this manual.

Output of Strain and Stresses

Stresses and Strains are output at each integration point. For the case of large deformations, the stresses are the second Piola-Kirchhoff stresses and the strains are the Green strains.

- 1 = global xx strain
- 2 = global yy strain
- 3 = global zz strain
- 4 = global xy strain
- 5 = global yz strain
- 6 = global zx strain

If a 1 is entered in the 14th field of the 2nd data block of the **POST** option, the post file contains only one integration point for each element. The element stresses and strains in the point are the averaged results over three integration points of the element. This is to reduce the size of the post file.

Transformation

Any local set (u, v, w) can be used at any node.

Updated Lagrange Procedure and Finite Strain Plasticity

Capability is available.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3 : ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ(ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ) ΓΙΑ ΤΗΝ ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ ΤΟΥ ΘΕΜΑΤΟΣ

Αμέσως μετά, περιγράφουμε τα λογισμικά το οποία χρησιμοποιήθηκαν για την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Τα λογισμικά αυτά είναι απολύτως απαραίτητα τόσο για την προσομοίωση της κατεργασίας όσο και για την συγγραφή της εργασίας. Ακολουθεί η λίστα:

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ – ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ : **DS SOLIDWORKS 2012**

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΗΣ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ : **MSC MARC 2011**

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ : **Microsoft EXCEL 2010**

ΣΥΓΓΡΑΦΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: **Microsoft WORD 2010**

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 4 : ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΕΛΛΗΝΙΚΗ

1. Δ.Μανωλάκος: Σημειώσεις μαθήματος Κατεργασίες I, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ.
2. Δ.Μανωλάκος: Σημειώσεις μαθήματος Κατεργασίες II, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ.
3. Α.Γ.Μάμαλη: Τεχνολογία των Κατεργασιών των Υλικών, Μή Συμβατικές Κατεργασίες, Εκδόσεις Άνωση 2000.
4. Α.Γ.Μάμαλη: Κατεργασίες των Υλικών , Έκδοση Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, Αθήνα 1991.
5. Α.Γ.Μάμαλη: Κατεργασίες των Υλικών II , Έκδοση Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, Αθήνα 1999.
6. Θ.Ν Κωστόπουλος: Οδοντώσεις και Μειωτήρες Στροφών, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα 1991.
7. Α.Κανάραχος, Χ.Προβατίδης: Πεπερασμένα Στοιχεία στη Μηχανολογία , Ασκήσεις, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 2000.
8. Γ.Ι Τσαμασφύρος: Μηχανική Παραμορφώσιμων Σωμάτων I, Εκδόσεις Συμμετρία, 1990.
9. Προβατίδης Χ., Αντωνιάδης Ι.: Υπολογιστικές Μέθοδοι στις Κατασκευές, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 2004.
10. Γ. Παπαδόπουλος: Ανάλυση Μηχανολογικών Κατασκευών- Πεπερασμένα Στοιχεία, Εκδόσεις Φούντας.

**11. Ντανίλο Γκαρσία: Αντίστροφος Σχεδιασμός Μήτρας Σφυρηλάτησης
Ακριβείας Κωνικών Οδοντωτών Τροχών με τη Χρήση Σαρωτή Δομημένου
Φωτός.**

ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ

**12. Gitin M Maitra: Handbook of gear design, second edition, Tata McGraw-Hill
2008.**

13. P.Seshu: Textbook of finite element analysis, Prentice- Hall, New Delhi, 2006.

**14. F.H.Osman, A.N. Bramley: Preform design for forging rotationally symmetric
parts, University of Bath, U.K, 1995.**

**15. J.-H. Song, Y.-T. Im: Process design for closed-die of bevel gearby finite
element analyses, journal of material processing technology 192-193, 2007.**

**16. E.Doege, H.Nagele: FE Simulation of the Precision Forging Process of Bevel
Gears, 1994.**

**17. A.G.Mamalis, D.E.Manolakos, A.K.Baldoukas: Simulation of the precision
forging of bevel gears using implicit and explicit FE techniques, Department of
Mechanical Engineering, National Technical University of Athens 1994,Journal of
materials processing technology 57, 164-171, 1996.**

**18. Steffen Reinsch, Bernd Móssig, Bernd Schmidt and Kirsten Tracht :
Advanced manufacturing system for forging products, Journal of
Materials Processing Technology, Volume 138, 16-21, 2003.**

**19. 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, 113-123,1986.

20. 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, 871-889, 1996.

21. S. Mukherjee and Q. Zhang: Design sensitivities in problems involving material and geometric nonlinearities, International Journal of Solids and Structures, Volume 31, 1793-1827,1994.

22. Taylan Altan, Gracious Ngaile, Gangshu Shen: Cold and Hot Forging, Fundamentals and Applications, ASM International, 2005.

ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΕΣ

en.wikipedia.org

users.sch.gr

intranet.cramlingtonlv.co.uk

www.metal.ntua.gr

upatras.gr

www.metalravne.com

www.mscsoftware.com

