

# **Μέθοδοι Σφυρηλάτησης οδοντωτών τροχών**



**ΜΙΛΤΙΑΔΟΥΣ ΑΥΓΟΥΣΤΙΝΟΣ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**  
**ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ**



## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

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

Αθήνα, Οκτώβριος 2012

Αυγουστίνος Μιλτιάδους

Μηχανολόγος Μηχανικός Ε.Μ.Π.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στη συγκεκριμένη εργασία παρουσιάζεται η μέθοδος σφυρηλάτησης των οδοντωτών τροχών. Στη σφυρηλάτηση ένα αρχικά απλό κομμάτι παραμορφώνεται πλαστικά ανάμεσα σε δύο εργαλεία προκειμένου να επιτευχθεί το τελικό επιθυμητό σχήμα του. Οι διαδικασίες της σφυρηλάτησης δεν αφήνουν απόβλητα συνήθως και θα μπορούσε κανείς να υποστηρίξει πως εξοικονομούν σε ενέργεια και υλικό, ειδικά κατά την παραγωγή μέσων και μεγάλων ποσοτήτων αφού το κόστος των εργαλείων που χρησιμοποιούνται μπορεί εύκολα να αποσβεστεί. Η σφυρηλάτηση αποτελεί μια τεχνολογία εμπειρική προσανατολισμένη στις εκάστοτε ανάγκες. Τα φυσικά φαινόμενα που περιγράφουν τη σφυρηλάτηση είναι δύσκολο να αποδοθούν με ποσοτικές σχέσεις. Οι σφυρηλάτοι οδοντωτοί τροχοί αποτελούν μια από τις πιο χαρακτηριστικές εφαρμογές της σφυρηλάτησης ως διεργασίας διαμόρφωσης.

Σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας είναι να προσδιοριστούν τα χαρακτηριστικά των σφυρηλάτων οδοντωτών τροχών και των μεθόδων ανάλυσής της κατεργασίας της σφυρηλάτησης, καθώς και να παρουσιαστούν χαρακτηριστικά παραδείγματα εφαρμογής τους προκειμένου να κατανοηθεί η χρησιμότητά τους.

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

<b>ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....</b>	<b>2</b>
<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....</b>	<b>3</b>
<b>ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ.....</b>	<b>6</b>
<b>ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ.....</b>	<b>9</b>
<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....</b>	<b>10</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗ.....</b>	<b>12</b>
1.1 Ιστορική αναδρομή.....	12
1.2. Είδη και Μέθοδοι σφυρηλάτησης .....	12
1.2.1 Σφυρηλάτηση ανοικτής μήτρας (Open Die Forging).....	14
1.2.2 Σφυρηλάτηση κλειστής μήτρας (Closed die forging) .....	16
1.2.3 Σφυρηλάτηση κλειστής μήτρας με προεξοχή (Impression Die Forging) .....	17
1.3. Μηχανές και Εργαλεία Σφυρηλάτησης .....	19
1.3.1. Υδραυλικές πρέσες.....	19
1.3.2 Μηχανικές πρέσες .....	22
1.3.3 Πρέσες με κοχλία.....	23
1.3.4 Σφύρες .....	24
1.4 Εφαρμογές Σφυρηλάτησης.....	25
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΟΔΟΝΤΩΤΟΙ ΤΡΟΧΟΙ .....</b>	<b>28</b>
2.1. Είδη οδοντωτών τροχών .....	28
2.1.1 Μετωπικοί Οδοντωτοί τροχοί.....	29
2.1.2 Ελικοειδείς οδοντωτοί τροχοί. ....	32
2.1.3 Κωνικοί οδοντωτοί τροχοί.....	34
2.1.4 Υποειδής οδοντωτοί τροχοί. ....	36
2.1.5 Οδοντωτοί τροχοί με ατέρμονα κοχλία.....	37
2.1.6 Μη κυκλικοί οδοντωτοί τροχοί.....	39
2.2. Χαρακτηριστικά οδοντωτών τροχών .....	40
2.3 Σφυρηλάτηση οδοντωτών τροχών .....	43
2.3.1 Σφυρηλάτηση ακριβείας οδοντωτών τροχών (Precision Forging) .....	47
2.3.2 Μειονεκτήματα σφυρηλάτησης οδοντωτών τροχών .....	52

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΤΗΣ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ ΤΩΝ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ.....54**

3.1. Μέθοδος του «λόφου τριβής» (Slab Method of analysis).....	55
3.1.1 Μέθοδος λόφου τριβής σε μικτό σύστημα συντεταγμένων .....	56
3.1.2 Μέθοδος ανάλυσης λόφου τριβής σε κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων .....	60
3.2. Μέθοδος άνω οριακών φορτίσεων (Upper Bound Method) .....	63
3.3 Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Analysis) .....	69
3.3.1 Εφαρμογή της αριθμητικής μοντελοποίησης.....	73
3.3.2 Εφαρμογή των πεπερασμένων στοιχείων στη σφυρηλάτηση .....	76
3.3.3 Εφαρμογή μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων στη Σφυρηλάτηση οδοντωτών τροχών .....	80

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4:ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ .....83**

4.1 Απευθείας σφυρηλάτηση ακριβείας για ελικοειδείς και μετωπικούς οδοντωτούς τροχούς .....	83
4.1.1 Σχεδιασμός μήτρας .....	83
4.1.2 Σχεδιασμός του αρχικού όγκου και της αρχικής γεωμετρίας .....	84
4.1.3 Ακρίβεια στη διαστασιολόγηση .....	85
4.1.4 Εκτίμηση φορτίων και ενέργειας .....	86
4.2. Σφυρηλάτοι οδοντωτοί τροχοί για χρήση σε αυτοκίνητα .....	88
4.2.1 Κωνικοί οδοντωτοί τροχοί.....	92
4.2.2 Κενά οδοντωτών τροχών.....	93
4.2.3 Μετωπικοί και ελικοειδείς τροχοί.....	97
4.3. Παραγωγή οδοντωτών τροχών με κονιομεταλλουργία .....	99
4.4 Παράδειγμα θεωρητικής ανάλυσης των οδοντωτών τροχών βάσει των γεωμετρικών χαρακτηριστικών τους με προσομοίωση δισδιάστατης και τρισδιάστατης ανάλυσης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.....	104
4.4.1 Διαδικασίες σφυρηλάτησης και αρχικός σχεδιασμός.....	105
4.4.2 Τα χαρακτηριστικά της γεωμετρίας των προϊόντων σφυρηλάτησης .....	105
4.4.3 Χαρακτηριστικά της ροής υλικού στο στάδιο φινιρίσματος .....	106
4.4.4 Κανονισμοί σχεδιασμού των κατεργασιών σφυρηλάτησης και των προδιαμορφωμένων προϊόντων.....	107
4.4.5 Σχεδιασμός της μήτρας σφυρηλάτησης και κατεργασία προσομοίωσης .....	108
4.4.6 Αριθμητικά μοντέλα προσομοίωσης για τις διαδικασίες σφυρηλάτησης .....	109
4.4.7 Παρατηρήσεις από τη εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων ....	112

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....115**

**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....117**

## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

<b>Σχήμα 1.1:</b> Σχηματική αναπαράσταση σφυρηλάτησης με ανοικτή μήτρα [4].	14
<b>Σχήμα 1.2:</b> Σφυρηλάτηση με ανοικτή μήτρα αξόνων [1].	14
<b>Σχήμα 1.3:</b> Διάφορα σφυρήλατα αντικείμενα [4].	15
<b>Σχήμα 1.4:</b> Σφυρηλάτηση κλειστής μήτρας [4].	16
<b>Σχήμα 1.5:</b> Σφυρηλάτηση κλειστής μήτρας i) απλή μορφή, ii) τυπική μορφή, iii) Σχεδόν καθαρού σχήματος [4].	17
<b>Σχήμα 1.6:</b> Σφυρηλάτηση κλειστής μήτρας με προεξοχή [4].	18
<b>Σχήμα 1.7:</b> Απλή υδραυλική πρέσα [4].	19
<b>Σχήμα 1.8:</b> Σχηματική αναπαράσταση των οδηγών της υδραυλικής πρέσας. α) οδηγός συσσώρευσης και β) άμεση οδήγηση [6].	20
<b>Σχήμα 1.9:</b> Σύγχρονη υδραυλική πρέσα [4].	21
<b>Σχήμα 1.10:</b> Μηχανική πρέσα [4].	22
<b>Σχήμα 1.11:</b> Οι πιο συνηθισμένες πρέσες με οδηγό κοχλία α) οδηγός τριβής και β) άμεσος ηλεκτρικός οδηγός [6].	23
<b>Σχήμα 1.12:</b> Διάφοροι τύποι σφυρών με πτώση βαρύτητας [6].	25
<b>Σχήμα 1.13:</b> Σφυρήλατα αντικείμενα που εφαρμόζονται στα αυτοκίνητα [4].	25
<b>Σχήμα 1.14:</b> Σφυρήλατα αντικείμενα [4].	27
<b>Σχήμα 2.1:</b> Καμπύλη εξελιγμένης που προέρχεται από την αποκοπή ενός τόξου από έναν κύκλο [7].	29
<b>Σχήμα 2.2:</b> Μετωπικοί οδοντωτοί τροχοί [7].	29
<b>Σχήμα 2.3:</b> Οι μετωπικοί οδοντωτοί τροχοί έχουν ευθεία δόντια κομμένα παράλληλα στον άξονα περιστροφής [7].	30
<b>Σχήμα 2.4:</b> Εσωτερικοί (δακτυλιοειδής) οδοντωτοί τροχοί [7].	31
<b>Σχήμα 2.5:</b> Ελικοειδής οδοντωτοί τροχοί [7].	32
<b>Σχήμα 2.6:</b> Οδοντωτοί τροχοί διπλής ελίκωσης [7].	33
<b>Σχήμα 2.7:</b> Κωνικοί οδοντωτοί τροχοί με ευθύγραμμους οδόντες [7].	34
<b>Σχήμα 2.8:</b> Κωνικοί οδοντωτοί τροχοί με ευθύγραμμους οδόντες [7].	35
<b>Σχήμα 2.9:</b> Σπειροειδής κωνικοί οδοντωτοί τροχοί [7].	35
<b>Σχήμα 2.10:</b> Υποειδής οδοντωτοί τροχοί [7].	36
<b>Σχήμα 2.11:</b> Οδοντωτός τροχός με ατέρμονα [7].	37
<b>Σχήμα 2.12:</b> Σύστημα με ατέρμονα κοχλία [7].	38
<b>Σχήμα 2.13:</b> Μη κυκλικοί οδοντωτοί τροχοί [7].	39
<b>Σχήμα 2.14:</b> Βασικά μεγέθη των οδοντωτών τροχών [9].	40
<b>Σχήμα 2.15:</b> Δημιουργία διάκενου οδοντωτών τροχών με σφυρηλάτηση κλειστής μήτρας [11].	44
<b>Σχήμα 2.16:</b> Καλούπια-μήτρες σφυρηλάτησης [7].	45

<b>Σχήμα 2.17:</b> Τροχός μικρής διαμέτρου[7].....	46
<b>Σχήμα 2.18:</b> Παράδειγμα πίεσης πραγματικού φορτίου[7].....	46
<b>Σχήμα 2.19:</b> Οδοντωτός τροχός[7].....	47
<b>Σχήμα 2.20:</b> Τελική επιφάνεια[7].....	48
<b>Σχήμα 2.21:</b> Καλούπι σφυρηλάτησης[7].....	49
<b>Σχήμα 2.22:</b> Εξοικονόμηση υλικού/ βάρους χρησιμοποιώντας τη σφυρηλάτηση σχεδόν καθαρού σχήματος [11].....	50
<b>Σχήμα 2.23:</b> Τελικός τροχός[7].....	51
<b>Σχήμα 2.24:</b> Παράδειγμα σφυρήλατου οδοντωτού τροχού ακριβείας σχεδόν καθαρού σχήματος [11].....	52
<b>Σχήμα 2.25:</b> Οδοντωτός τροχός[7].....	52
<b>Σχήμα 2.26:</b> Βλάβες σε οδόντες[7].....	53
<b>Σχήμα 3.1:</b> Υποδιαίρεση ενός μετωπικού οδοντωτού τροχού (N=4) σε ίδιες περιοχές παραμόρφωσης [18]. .....	56
<b>Σχήμα 3.2:</b> Υποδιαίρεση μετωπικού οδοντωτού τροχού σε όμοιες ζώνες παραμόρφωσης N=15 [18] .....	56
<b>Σχήμα 3.3:</b> Υποδιαίρεση της περιοχής μέσα στις ζώνες [18].....	57
<b>Σχήμα 3.4:</b> Τάσεις που αναπτύσσονται στο στοιχείο στις Ζώνες 1,2,3 με την ανάλυση λόφου τριβής σε μικτό σύστημα συντεταγμένων[18]. .....	58
<b>Σχήμα 3.5:</b> Υποδιαίρεση περιοχής σε ζώνες [18].....	61
<b>Σχήμα 3.6:</b> Μέθοδος ανάλυσης λόφου-τριβής σε κυλινδρικές συντεταγμένες [18].....	61
<b>Σχήμα 3.7:</b> Ζώνες παραμόρφωσης για το μισό βήμα του μετωπικού οδοντωτού τροχού [19] .....	64
<b>Σχήμα 3.8:</b> Σχηματική αναπαράσταση της σφυρηλάτησης μετωπικού οδοντωτού τροχού [19]. .....	65
<b>Σχήμα 3.9:</b> Μεταβλητές για τις κατεργασίες διαμόρφωσης [27].....	71
<b>Σχήμα 3.10:</b> Σχεδιασμός προϊόντος και διαδικασίας για τη διαμόρφωση καθαρού σχήματος (net shape manufacturing) [26].....	72
<b>Σχήμα 4.1:</b> Μήτρες για τη σφυρηλάτηση α) μετωπικών και β) ελικοειδών οδοντωτών τροχών [53]. .....	83
<b>Σχήμα 4.2:</b> Πειραματικό προφίλ ενός σφυρηλατημένου οδόντα συγκριτικά με το θεωρητικό προφίλ της θεωρούμενης μήτρας και της τελικής σφυρηλάτησης για τη σφυρηλάτηση στους 1000°C [53]. .....	86
<b>Σχήμα 4.3:</b> Μεταβολή της σχετικής πίεσης σφυρηλάτησης με την παραμόρφωση για διαφορετικό αριθμό οδόντων στη σφυρηλάτηση επίπεδων μετωπικών τροχών [53]. .....	87
<b>Σχήμα 4.3:</b> Κιβώτιο ταχυτήτων.....	88



<b>Σχήμα 4.5:</b> Εργαλείο για τη σφυρηλάτηση ακριβείας για τους ελικοειδή οδοντωτούς τροχούς [63].....	88
<b>Σχήμα 4.6:</b> Ελικοειδείς οδοντωτοί τροχοί από το IFUM [62].....	89
<b>Σχήμα 4.7:</b> Ελικοειδής οδοντωτοί τροχοί [62].....	89
<b>Σχήμα 4.8:</b> Επίδραση της θερμοκρασίας και του υλικού στη διάμετρο του ελικοειδούς οδοντωτού τροχού [62].....	90
<b>Σχήμα 4.9:</b> Γεωμετρίες που χρησιμοποιήθηκαν για τη διερεύνηση της επίδρασης της επιφάνειας [62].....	91
<b>Σχήμα 4.10:</b> Η επίδραση της επιφάνειας του τεμαχίου στη διάμετρο του πρότυπου ελικοειδούς τροχού [62].....	91
<b>Σχήμα 4.11:</b> Κωνικοί οδοντωτοί τροχοί [40] .....	92
<b>Σχήμα 4.12:</b> Η μήτρα για την κατασκευή κωνικών οδοντωτών τροχών [40] .....	93
<b>Σχήμα 4.13:</b> Οδοντωτοί τροχοί κατασκευασμένοι με ψυχρή σφυρηλάτηση [40].....	94
<b>Σχήμα 4.14:</b> Οδοντωτός τροχός κατασκευασμένος με συνεχή εξώθηση και στρέβλωση της μετωπικής επιφάνειας [40].....	94
<b>Σχήμα 4.15:</b> Σφυρήλατοι οδοντωτοί τροχοί με κενά και μεγάλους κωνικούς οδόντες [40] ....	95
<b>Σχήμα 4.16:</b> Κενός οδοντωτός τροχός [40] .....	96
<b>Σχήμα 4.17:</b> Τυπική γραμμή σφυρηλάτησης οδοντωτών τροχών με κενά [52].....	96
<b>Σχήμα 4.18:</b> Εξέλιξη της τεχνολογίας ανάπτυξης οδοντωτών τροχών για την αυτοκινητοβιομηχανία [66],.....	97
<b>Σχήμα 4.19:</b> Σφυρήλατος οδοντωτός τροχός για αυτοκίνητα με διαδικασία σφυρηλάτησης κλειστής μήτρας [40].....	98
<b>Σχήμα 4.20:</b> Σφυρήλατος ελικοειδής οδοντωτός τροχός με τη διαδικασία της κλειστής μήτρας [40].....	99
<b>Σχήμα 4.21:</b> Οδοντωτοί τροχοί κατασκευασμένοι με τη μέθοδο near net shape [67].....	99
<b>Σχήμα 4.22:</b> Οδοντωτοί τροχοί κωνιομεταλλουργίας για εφαρμογές σε μικρά συστήματα ισχύος [67] .....	100
<b>Σχήμα 4.23:</b> Σχηματική αναπαράσταση της κατεργασίας σφυρηλάτησης σκόνης [67]. .....	101
<b>Σχήμα 4.24:</b> Κωνικοί οδοντωτοί τροχοί κατασκευασμένοι με σφυρηλάτηση σκόνης [67].....	102
<b>Σχήμα 4.25:</b> Σχηματική αναπαράσταση της περιστροφικής σφυρηλάτησης [68].....	103
<b>Σχήμα 4.26:</b> Σχηματισμός ενός κωνικού οδοντωτού τροχού με χρήση της περιστροφικής σφυρηλάτησης [67].....	104
<b>Σχήμα 4.27:</b> Γεωμετρία και διαστάσεις του σφυρήλατου οδοντωτού τροχού [52] .....	106
<b>Σχήμα 4.28:</b> Απεικόνιση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών και τα πεδία ροής [52].....	106
<b>Σχήμα 4.29:</b> Απεικόνιση μπιγιέτας ενός βήματος (πάνω) και αρχικού σχεδιασμού δύο βημάτων (μέσο και κάτω) [52]. .....	107
<b>Σχήμα 4.30:</b> Τελική μήτρα σφυρηλάτησης [52].....	109

<b>Σχήμα 4.31:</b> Διδιάστατα μοντέλα CAD και πεπερασμένων στοιχείων [52]. .....	110
<b>Σχήμα 4.32:</b> Τρισδιάστατα πλέγματα CAD και πεπερασμένων στοιχείων για τη μπιγιέτα, την προδιαμόρφωση και το σφυρήλατο τεμάχιο [52]. .....	110
<b>Σχήμα 4.33:</b> Τα διδιάστατα πλέγματα ροής της προδιαμόρφωσης και της τελικής σφυρηλάτησης [52]. .....	112
<b>Σχήμα 4.34:</b> Παρατηρούμενες ατέλειες με τις αριθμητικές αναλύσεις για το σχεδιασμό προδιαμόρφωσης [52]. .....	113
<b>Σχήμα 4.35:</b> Κατανομή των τάσεων για σχεδιασμούς σφυρηλάτησης ενός και δύο βημάτων [52]. .....	114

#### **ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ**

<b>Πίνακας 2.1:</b> Σύγκριση οδοντωτών τροχών (MSD 2001) .....	28
<b>Πίνακας 2.2:</b> Τιμές modul σε mm κατά DIN 780 [8]. .....	41
<b>Πίνακας 2.3:</b> Χαρακτηριστικά μεγέθη οδοντωτών τροχών [8] .....	42

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τις τελευταίες δεκαετίες ο μεγάλος ανταγωνισμός που επικρατεί στις βιομηχανίες κατεργασιών θέτει ως απαραίτητη προϋπόθεση την εξασφάλιση σταθερού κόστους. Η έρευνα και η τεχνολογική ανάπτυξη στις κατεργασίες διαμόρφωσης είναι οι βασικές προϋποθέσεις για να καλυφθούν οι απαιτήσεις του κόστους και της ποιότητας για να επιβιώσουν στην αγορά.

Τα σφυρήλατα υλικά έχουν χαρακτηριστικές ιδιότητες που αφορούν τόσο το υλικό όσο και το τεμάχιο. Διαθέτουν μεγάλη μηχανική και δυναμική αντοχή λόγω της εκλέπτυνσης κόκκων, της αδιάσπαστης ροής κόκκων καθώς και της απόλυτης ελευθερίας από οπές. Ιδιαίτερα οι ελαφρές κατασκευές ενισχύονται από την αυξανόμενη ισχύ της διεργασίας σφυρηλάτησης.

Στη σφυρηλάτηση ένα αρχικά απλό κομμάτι παραμορφώνεται πλαστικά ανάμεσα σε δύο εργαλεία προκειμένου να επιτευχθεί το τελικό επιθυμητό σχήμα του. Με άλλα λόγια ένα τεμάχιο απλής γεωμετρίας μετασχηματίζεται σε σύνθετο ενώ τα εργαλεία διαμορφώνουν την επιθυμητή γεωμετρία και την αναπτυσσόμενη πίεση «αποθηκεύοντάς» τα στη διεπιφάνεια υλικού/ εργαλείου.

Οι διαδικασίες της σφυρηλάτησης δεν αφήνουν απόβλητα συνήθως και θα μπορούσε κανείς να υποστηρίξει πως εξοικονομούν σε ενέργεια και υλικό ειδικά κατά την παραγωγή μέσων και μεγάλων ποσοτήτων αφού το κόστος των εργαλείων που χρησιμοποιούνται μπορεί εύκολα να αποσβεστεί. Επιπλέον τα τεμάχια που κατασκευάζονται με τη σφυρηλάτηση παρουσιάζουν καλύτερες μηχανικές και μεταλλουργικές ιδιότητες καθώς και αξιοπιστία σε σχέση με τα αντίστοιχα τεμάχια που κατασκευάζονται με χύτευση ή με μεταλλοτεχνικές μεθόδους.

Η σφυρηλάτηση αποτελεί μια τεχνολογία εμπειρική προσανατολισμένη στις εκάστοτε ανάγκες. Μέσα από την εμπειρία χρόνων έχει συσσωρευτεί μια μεγάλη τεχνογνωσία και εμπειρία σε αυτόν τον τομέα η οποία αποκτήθηκε κατά κύριο λόγο με τη μέθοδο δοκιμής-σφάλματος. Παρόλα αυτά η σχετική βιομηχανία μπορεί να παρέχει απαιτητικά προϊόντα που ακολουθούν πολύ αυστηρά πρότυπα και κατασκευάζονται από νέα αναπτυσσόμενα υλικά ή κράματα δύσκολα στο σχηματισμό.

Τα φυσικά φαινόμενα που περιγράφουν τη σφυρηλάτηση είναι δύσκολο να αποδοθούν με ποσοτικές σχέσεις. Η ροή του μετάλλου, η τριβή ανάμεσα στο εργαλείο και στο υλικό, η παραγωγή θερμότητας και η μεταφορά της μέσω πλαστικής ροής καθώς και οι σχέσεις μεταξύ των ιδιοτήτων και της μικροδομής του υλικού με τις συνθήκες κατεργασίας είναι δύσκολο να εξαχθούν και να αναλυθούν.

Οι σφυρήλατοι οδοντωτοί τροχοί αποτελούν μια από τις πιο χαρακτηριστικές εφαρμογές της σφυρηλάτησης ως διεργασίας διαμόρφωσης. Οι οδοντωτοί τροχοί χρησιμοποιούνται ευρέως για τη μετάδοση κίνησης από τον ένα άξονα στον άλλο μέσω των οδόντων του ενός τροχού που μπαίνουν μέσα στα διάκενα του άλλου. Για αυτό η ακρίβεια και η ποιότητα της κατασκευής τους αποτελούν βασικές προϋποθέσεις που εξασφαλίζουν τη σωστοί λειτουργία τους.

Στο πλαίσιο της συγκεκριμένης εργασίας παρουσιάζονται οι σφυρήλατοι οδοντωτοί τροχοί και η διεργασία της σφυρηλάτησης. Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια ιστορική αναδρομή στη σφυρηλάτηση. Παρουσιάζονται τα είδη της διεργασίας και οι βασικές μέθοδοι πραγματοποίησής της. Επιπλέον γίνεται αναφορά στις μηχανές και τα εργαλεία που χρησιμοποιούνται για τη σφυρηλάτηση και παρουσιάζονται οι βασικές εφαρμογές στις οποίες μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος διεργασίας επικεντρώνοντας στη συνέχεια στους σφυρήλατους οδοντωτούς τροχούς.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται εκτενής αναφορά στους οδοντωτούς τροχούς. Παρουσιάζονται τα είδη των τροχών καθώς και τα βασικά χαρακτηριστικά τους. Περιγράφεται η διεργασία σφυρηλάτησης των οδοντωτών τροχών και τα βασικά χαρακτηριστικά ακρίβειας και ποιότητας των σφυρήλατων τροχών. Τέλος παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των σφυρήλατων τροχών.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναφέρονται οι τρεις βασικές μέθοδοι ανάλυσης της σφυρηλάτησης στους σφυρήλατους τροχούς. Συγκεκριμένα παρουσιάζονται τα στοιχεία της μεθόδου «λόφου- τριβής», της μεθόδου «άνω οριακών φορτίσεων» και των πεπερασμένων στοιχείων και περιγράφεται η εφαρμογή τους στους σφυρήλατους οδοντωτούς τροχούς. Επιπλέον συγκρίνονται οι τρεις μέθοδοι ως προς την ακρίβειά και την ποιότητα.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται παραδείγματα εφαρμογών σφυρήλατων οδοντωτών τροχών. Τέλος παρουσιάζονται στο πέμπτο κεφάλαιο τα βασικά συμπεράσματα που προκύπτουν από τη συγκεκριμένη εργασία.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗ

### 1.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Η τέχνη της σφυρηλάτησης ξεκίνησε πιθανότατα πριν από το 4000π.Χ. Τα μέταλλα όπως ο χαλκός και ο σίδηρος σφυρηλατούνταν από τον προϊστορικό άνθρωπο για την παραγωγή χειροκίνητων εργαλείων και πολεμικών όπλων. Η σφυρηλάτηση του σιδήρου και του χάλυβα συνεχίστηκε μέχρι το τέλος του 19<sup>ου</sup> αιώνα εξυπηρετώντας παρόμοιους σκοπούς ενώ η σφυρηλάτηση ως μέθοδος παραγωγής πολεμικών όπλων χρησιμοποιούνται ακόμα και σήμερα με ακόμα πιο σύγχρονα μέταλλα [1].

Οι σιδεράδες του 19<sup>ου</sup> αιώνα είχαν ιδιαίτερα εντυπώσει στη χειροκίνητη σφυρηλάτηση και στην ανοιχτή σφυρηλασία του κατεργασμένου σιδήρου. Καθώς η παραγωγή του κατεργασμένου σιδήρου γινόταν μόνο με τη θερμότητα οι σιδεράδες ήταν εξοικειωμένοι με τη συγκόλληση σφυριών και πολλές σφυρηλατήσεις μεγάλων αξόνων με βάρος 10 τόνων ή και μεγαλύτερο κατασκευάζονταν βαθμιαία τόσο με την κατεργασία της σφυρηλάτησης όσο και με την σφυρηλασία. Η ανακάλυψη του χάλυβα τύπου Bessemer το 1856 αποτέλεσε μια σοβαρή εξέλιξη για τη βιομηχανία σφυρηλάτησης του σιδήρου. Οι σφυρηλατείς απέκτησαν ένα υλικό από χάλυβα με χαμηλό κόστος που μπορούσαν να το χρησιμοποιήσουν για την παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων σφυρηλατών υλικών. Οι πρώτες χαλύβδινες κοιλότητες πραγματοποιήθηκαν μέσω κλειστής διαδικασίας σφυρηλάτησης στις ΗΠΑ το 1862 όπου χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή στοιχείων του όπλου Colt [1].

Η περαιτέρω ανάπτυξη της διαδικασίας Bessemer απ' όπου προήλθε και ο βασικός χάλυβας σήμαινε πρακτικά πως ήταν δυνατή η σμίλευση φθηνότερων σιδηρομεταλλευμάτων που μπορούσαν να περιέχουν και ποσότητες θείου και φωσφόρου για την παραγωγή χάλυβα καλής ποιότητας. Η παράλληλη ανάπτυξη της διαδικασίας λήψης χάλυβα στο τέλος του 19<sup>ου</sup> αιώνα έδωσε στη βιομηχανία των σφυρηλατών υλικών ένα αξιόπιστο, φθινό μεγάλο όγκου ακατέργαστο υλικό[1].

Με την ανάπτυξη της αυτοκινητοβιομηχανίας και ιδιαίτερα του μοντέλου T της Ford αυξήθηκε και η ανάγκη των σφυρηλατών υλικών στις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα. Μέχρι το 1930 που η Εθνική Εταιρεία Μηχανημάτων (National Machinery Company) στις ΗΠΑ εισήγαγε τη σφυρηλατη πρέσα, όλα τα σφυρηλατά προϊόντα παράγονταν με σφυριά. Το πλεονέκτημα της σφυρηλατης πρέσας ήταν οι μεγαλύτεροι ρυθμοί παραγωγής της χωρίς να απαιτούνται ιδιαίτερες δεξιότητες όπως συμβαίνει με τη σφυρηλάτηση με το σφυρί.

Η εισαγωγή της σφυρήλατης πρέσας δεν αντικατέστησε το σφυρί αλλά προκάλεσε τους κατασκευαστές να βελτιώσουν τα προϊόντα τους, βεβαίως υπάρχουν πολλά σφυρήλατα προϊόντα που κατασκευάζονται καλύτερα με τη χρήση του σφυριού[1].

Σήμερα υπάρχουν πολλά ηλεκτρονικά σφυριά και πρέσες σφυρηλάτησης ικανές να κατασκευάζουν ένα πλήθος σφυρήλατων υλικών τα οποία χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές όπως στην αεροδυναμική, την αυτοκινητοβιομηχανία και άλλες.

### 1.2. ΕΙΔΗ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ

Η σφυρηλάτηση μπορεί να ταξινομηθεί με βάση τη θερμοκρασία λειτουργίας στην οποία πραγματοποιείται, σε θερμή και ψυχρή σφυρηλάτηση. Με τον όρο θερμή σφυρηλάτηση εννοείται η κατεργασία εκείνη που πραγματοποιείται σε θερμοκρασία ενδιάμεση της θερμοκρασίας τήξης και της θερμοκρασίας ανακρυστάλλωσης του κατεργαζόμενου υλικού, ενώ με τον όρο ψυχρή σφυρηλάτηση εννοείται εκείνη η σφυρηλάτηση που πραγματοποιείται στη θερμοκρασία περιβάλλοντος[2].

Η ψυχρή σφυρηλάτηση όπως ήδη αναφέρθηκε αφορά την κατεργασία της σφυρηλάτησης που πραγματοποιείται σε θερμοκρασία δωματίου χωρίς να πραγματοποιείται προθέρμανση του υλικού ή ενδιάμεσα στάδια. Η ψυχρή εξώθηση αποτελεί έναν ειδικό τύπο σφυρηλάτησης κατά την οποία το ψυχρό μέταλλο ρέει πλαστικά κάτω από δυνάμεις συμπίεσης σχηματίζοντας διάφορα σχήματα. Τα σχήματα αυτά συνήθως είναι αξονοσυμμετρικά με μικρές ασυμμετρίες και αντίθετα με την περίπτωση της σφυρηλάτησης κλειστής μήτρας με προεξοχή, κατά την κατεργασία δεν σχηματίζεται προεξοχή .

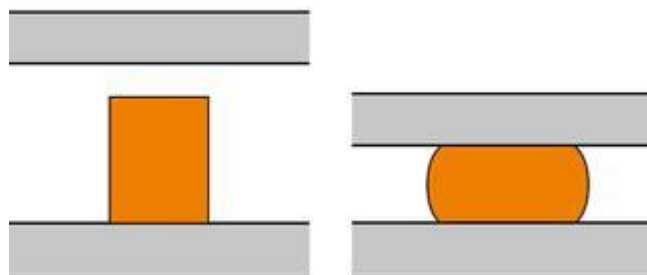
Η ψυχρή και η θερμή σφυρηλάτηση είναι εξαιρετικά σημαντικές και οικονομικές κατεργασίες ειδικά για την παραγωγή σφαιρικών ή σχεδόν σφαιρικών τεμαχίων σε μεγάλες ποσότητες. Μερικά από τα πλεονεκτήματα των συγκεκριμένων κατεργασιών είναι [3].

- Οι μεγάλοι ρυθμοί παραγωγής
- Εξαιρετικά υψηλές αντοχές στο τέλος των σφυρήλατων τεμαχίων
- Σημαντική εξοικονόμηση υλικού
- Εμφάνιση μεγαλύτερων εφελκυστικών τάσεων στο σφυρήλατο τμήμα σε σχέση με το αρχικό υλικό εξαιτίας της μεγαλύτερης σκληρότητας
- Ευνοϊκή ροή κόκκων για βελτίωση της αντοχής του υλικού

Για την κατασκευή ενός σφυρήλατου υλικού υπάρχουν τρεις βασικές μέθοδοι: η σφυρηλάτηση ανοικτής μήτρας (Open die forging), η σφυρηλάτηση κλειστής μήτρας (Closed die forging) και η σφυρηλάτηση κλειστής μήτρας με προεξοχή (Impression die Forging).

### 1.2.1 ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗ ΑΝΟΙΚΤΗΣ ΜΗΤΡΑΣ (OPEN DIE FORGING)

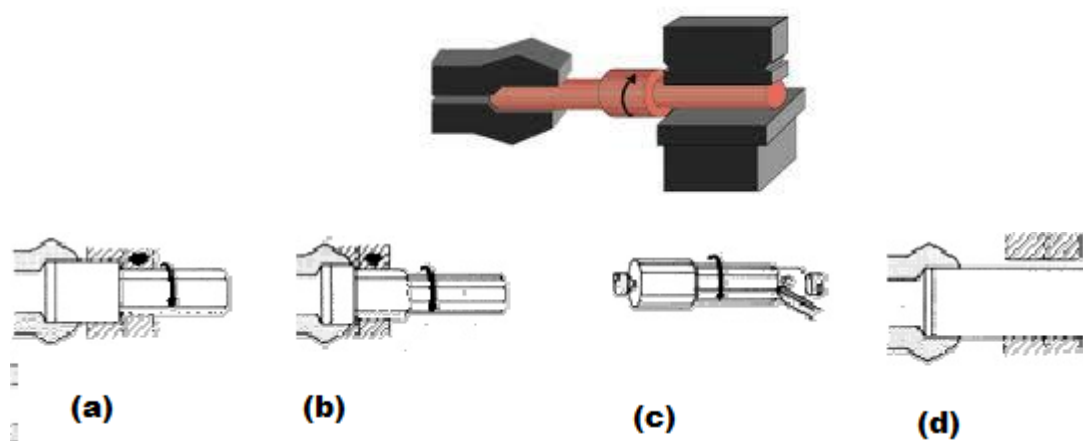
Η σφυρηλάτηση ανοικτής μήτρας πραγματοποιείται ανάμεσα σε επίπεδες μήτρες χωρίς να είναι οι μήτρες με καλούπι κοπής. Η κίνηση του τεμαχίου εργασίας είναι το βασικό στοιχείο σε αυτή τη μέθοδο. Συνήθως αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται για την κατασκευή μεγάλων κομματιών με βάρος πάνω από 900kg και με μήκος 25m. Τα συγκεκριμένα κομμάτια μπορούν να σφυρηλατηθούν ή να συμπιεστούν με τη μέθοδο ανοικτής μήτρας και να αποκτήσουν το επιθυμητό μήκος.



**Σχήμα 1.1:** Σχηματική αναπαράσταση σφυρηλάτησης με ανοικτή μήτρα [7].

Στη μέθοδο αυτή παράγονται οι δυνάμεις συμπίεσης που μπορούν να δημιουργηθούν από εργαλεία χειρός ή μηχανικές σφύρες με τοπική άσκηση στο κατεργαζόμενο τεμάχιο. Στη συνέχεια, περιορίζεται πλευρικά η ροή του μετάλλου ή ολικά ή σε πολύ μικρή έκταση.

Το επιθυμητό σχήμα αποδίδεται στο κατεργαζόμενο τεμάχιο με απλή μετακίνηση ή στροφή του μεταξύ δύο διαδοχικών κτυπημάτων.



**Σχήμα 1.2:** Σφυρηλάτηση με ανοικτή μήτρα αξόνων [7]

Χαρακτηριστικό παράδειγμα σφυρηλάτησης ανοικτής μήτρας είναι η κατασκευή αξόνων. Κατά τη συγκεκριμένη κατεργασία αρχικά το τεμάχιο στερεώνεται στο βραχίονα και αρχίζουν τα κτυπήματα (Σχήμα 1.2(a)). Στη συνέχεια πραγματοποιείται η σφυρηλάτηση

ανοικτής μήτρας (Σχήμα 1.2(b) και (c)) και τέλος το τεμάχιο στρέφεται στον τόρνο μέχρι να πάρει το επιθυμητό τελικό του σχήμα. Επιπλέον μπορεί η συγκεκριμένη μέθοδος να χρησιμοποιηθεί για την κατεργασία δακτυλιοειδών κομματιών.

Η σφυρηλάτηση ανοικτής μήτρας πραγματοποιείται με εργαλεία χειρός κατά κύριο λόγο, γεγονός που την καθιστά ιδιαίτερα φθηνή κατεργασία, προτιμάται για μικρή παραγωγή τεμαχίων, καλύπτει μεγάλο εύρος διαστάσεων τεμαχίων και αποδίδει καλά χαρακτηριστικά αντοχής στο κατεργαζόμενο τεμάχιο.



Σχήμα 1.3: Διάφορα σφυρήλατα αντικείμενα [7]

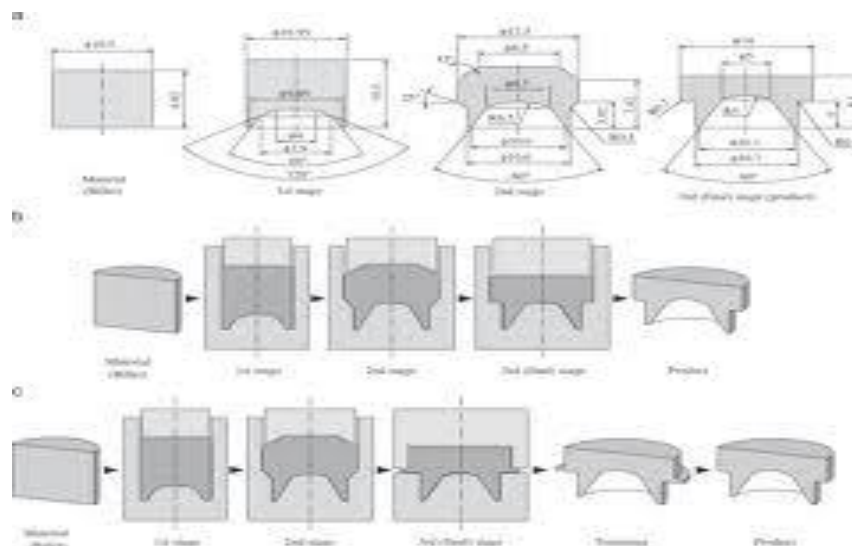
Από την άλλη όμως η σφυρηλάτηση ανοικτής μήτρας περιορίζεται σε απλές γεωμετρίες και δεν είναι εύκολη η επίτευξη ακριβής διαστασιολόγησης των κατεργαζόμενων τεμαχίων. Επιπλέον, για την απόκτηση της τελικής μορφής του τεμαχίου θα πρέπει να γίνει και δευτερογενής επεξεργασία. Στα βασικά μειονεκτήματα της μεθόδου συγκαταλέγονται και ο αργός ρυθμός παραγωγής καθώς και η απαιτούμενη εμπειρία και τεχνική δεξιότητα για την πραγματοποίησή της.

Ο υπολογισμός του απαιτούμενου φορτίου σφυρηλάτησης εξαρτάται από το είδος της παραμόρφωσης που υφίσταται το τεμάχιο που είναι για κατεργασία. Στην περίπτωση της ομογενούς παραμόρφωσης το φορτίο σφυρηλάτησης θα εξαρτάται και από το αν η κατεργασία γίνεται εν ψυχρώ ή εν θερμώ. Στην περίπτωση της ψυχρής σφυρηλάτησης η κατανομή του φορτίου σφυρηλάτησης θα είναι ομοιόμορφη και ίση με την τάση ροής που αντιστοιχεί στη μέγιστη παραμόρφωση του υλικού. Στην περίπτωση της θερμής κατεργασίας αυτή επηρεάζεται από την ταχύτητα με την οποία πραγματοποιείται. Στην περίπτωση που το υπό κατεργασία τεμάχιο υφίσταται ανομοιογενή παραμόρφωση το φορτίο σφυρηλάτησης προσδιορίζεται λαμβάνοντας υπόψη το συντελεστή ανομοιογένειας.



### 1.2.2 ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗ ΚΛΕΙΣΤΗΣ ΜΗΤΡΑΣ (CLOSED DIE FORGING)

Στη σφυρηλάτηση κλειστής μήτρας αναπτύσσονται θλιπτικά φορτία από σφύρες ή πρέσες τα οποία ασκούνται σε όλη την επιφάνεια του θερμαινόμενου μετάλλου.

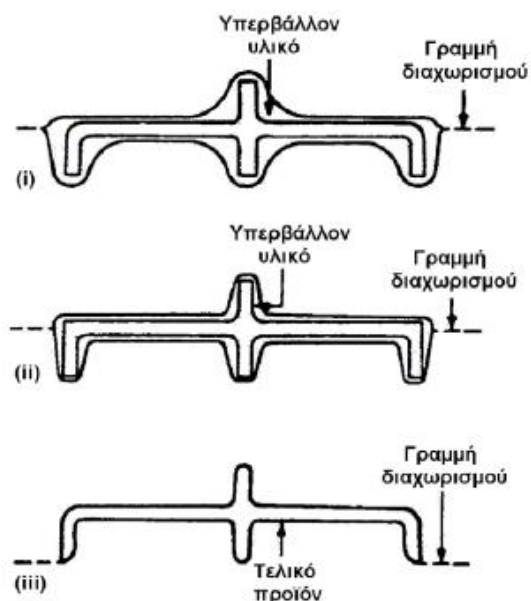


Σχήμα 1.4: Σφυρηλάτηση κλειστής μήτρας [7].

Το υλικό που υφίσταται κατεργασία παραμορφώνεται πλαστικά μέσα στην ειδικά διαμορφωμένη μήτρα και καταλαμβάνει όλο το διαθέσιμο χώρο μέσα σε αυτήν. Η μήτρα που χρησιμοποιείται σε αυτήν την περίπτωση έχει την ίδια γεωμετρία και τις ίδιες διαστάσεις με το τελικό επιθυμητό τεμάχιο.

Η διαδικασία της κλειστής μήτρας χαρακτηρίζεται από την ακρίβεια των διαστάσεων που αποδίδονται στο τελικό προϊόν και μπορεί να είναι: απλής μορφής, τυπικής μορφής ή Near net shape μορφής.

Η σφυρηλάτηση σχεδόν καθαρού σχήματος (Near net shape) κλειστής μήτρας είναι αυτή που χρησιμοποιείται ευρέως εξαιτίας των μικρότερων μηχανικών ανοχών που απαιτούνται, του μικρότερου εύρους αντοχής και του μικρότερου συντελεστή χρήσης του υλικού που απαιτείται[5].



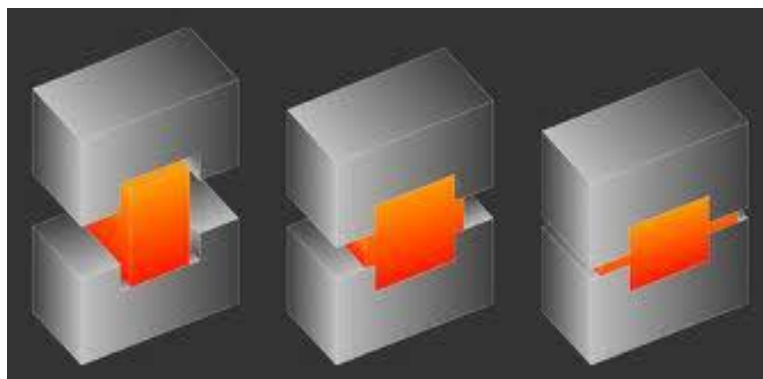
**Σχήμα 1.5:** Σφυρηλάτηση κλειστής μήτρας i) απλή μορφή, ii) τυπική μορφή, iii) σχεδόν καθαρού σχήματος. [7]

Με τη σφυρηλάτηση κλειστής μήτρας επιτυγχάνεται καλή εκμετάλλευση του υλικού και το τεμάχιο που υπόκειται στη συγκεκριμένη κατεργασία παρουσιάζει καλύτερες ιδιότητες από το αντίστοιχο τεμάχιο που σφυρηλατείται σε ανοιχτή μήτρα. Με τη συγκεκριμένη μέθοδο προσεγγίζονται ιδιαίτερα ικανοποιητικά οι διαστάσεις του τεμαχίου, ενώ η παραγωγή γίνεται με γρήγορους ρυθμούς.

Παρά το γεγονός ότι η σφυρηλάτηση κλειστής μήτρας χρησιμοποιείται για μικρές παραγωγές, τα εργαλεία που απαιτούνται για την πραγματοποίησή της παρουσιάζουν ιδιαίτερα υψηλό κόστος. Για την τελική μορφοποίηση του κατεργαζόμενου τεμαχίου δεν αποκλείεται να χρειαστεί και δευτερογενής κατεργασία του τεμαχίου.

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

Στην κατεργασία σφυρηλάτησης κλειστής μήτρας με προεξοχή υπάρχουν δυο μήτρες που έρχονται σε επαφή και το τεμάχιο εργασίας υφίσταται πλαστική παραμόρφωση μέχρι οι μεγάλες του πλευρές να ακουμπήσουν τα πλευρικά τοιχώματα της μήτρας. Στην ψυχρή σφυρηλάτηση όταν συμβαίνει αυτό, ένα μικρό μέρος του υλικού ρέει προς τα έξω από την προεξοχή της μήτρας που λεπταίνει συνεχώς. Η προεξοχή ψύχεται γρήγορα και παρουσιάζει μεγάλη αντίσταση στην πλαστική παραμόρφωση και βοηθάει στην ανάπτυξη πίεσης στο εσωτερικό της μήτρας ενώ το τεμάχιο εργασίας σπρώχνει το υλικό προς τα έξω εξασφαλίζοντας την ασφαλή πλήρωση της μήτρας.



**Σχήμα 1.6:** Σφυρηλάτηση κλειστής μήτρας με προεξοχή [7]

Στη θερμή σφυρηλάτηση επειδή ο λόγος επιφάνειας προς το πάχος της προεξοχής είναι μεγάλος, η προεξοχή λειτουργεί ως πτερύγιο το οποίο αποψύχεται πιο γρήγορα από το υπόλοιπο υλικό. Με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται η αντίσταση του υλικού και παραμορφώνεται περαιτέρω στην περιοχή της προεξοχής, ενώ το υπόλοιπο υλικό εξαναγκάζεται να κινηθεί στο εσωτερικό της μήτρας.

Η σφυρηλάτηση κλειστής μήτρας με προεξοχή του χάλυβα, του αλουμινίου, του τιτανίου και άλλων κραμάτων μπορεί να παράγει μια σχετικά περιορισμένη ποικιλία τρισδιάστατων σχημάτων που ποικίλουν σε βάρος από μερικά γραμμάρια έως 25 τόνους. Η συγκεκριμένη διαδικασία συνήθως πραγματοποιείται σε υδραυλικές πρέσες, μηχανικές πρέσες και σφύρες. Όπως ήδη αναφέρθηκε, δύο ή περισσότερες μήτρες περιέχουν προεξοχή από το κατεργάσιμο υλικό και έρχονται σε επαφή καθώς πραγματοποιείται η πλαστική παραμόρφωση του υλικού. Επειδή η ροή του υλικού περιορίζεται από το περίγραμμα της μήτρας, η συγκεκριμένη διαδικασία μπορεί να αποδώσει πιο σύνθετα σχήματα και ισόβαθμες αντοχές με τη διαδικασία ανοικτής μήτρας. Επιπλέον παρέχει μεγαλύτερη ευελιξία στα συμμετρικά και μη συμμετρικά σχήματα εξαιτίας των διαφόρων συνθηκών λειτουργίας πριν τη σφυρηλάτηση ημιτελών μήτρων [1]

Με τη σφυρηλάτηση κλειστής μήτρας με προεξοχή μπορούν να παραχθούν από τα απλούστατα σφαιρικά σχήματα, σύνθετα ορθογωνικά στερεά και δισκοειδή σώματα, έως πιο περίπλοκα εξαρτήματα με λεπτά και μακριά τμήματα που έχουν σχετικά μεγάλες κάθετες προβολές όπως οι ράβδοι. Παρά το γεγονός πως πολλά τμήματα είναι γενικά συμμετρικά υπάρχουν και άλλα που περιλαμβάνουν άλλου τύπου σχεδιασμούς που συνδυάζονται δίνοντας σφυρήλατα υλικά μη συμμετρικά. Επιπλέον, διάφορα υλικά μπορούν να καμφθούν ή να λυγίσουν σε ένα ή περισσότερα επίπεδα και τα οποία είναι συνήθως μεγάλου μήκους, κυλινδρικά ή επίπεδα. Τα περισσότερα μηχανολογικά υλικά μπορούν να σφυρηλατηθούν με τη μέθοδο κλειστής μήτρας με προεξοχή.

### 1.3. ΜΗΧΑΝΕΣ ΚΑΙ ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ

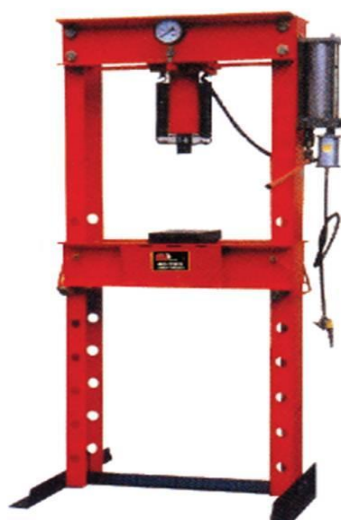
Γενικά κάθε κατεργασία διαμόρφωσης σχετίζεται με έναν τύπο εργαλείων διαμόρφωσης. Οι μηχανές διαμόρφωσης ποικίλουν σε διάφορες παραμέτρους όπως για παράδειγμα είναι η ενέργεια που εφαρμόζεται στο τεμάχιο εργασίας και η ικανότητα για τον έλεγχο της ενέργειας. Κάθε τύπος μηχανήματος έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που εξαρτώνται από τον επιθυμητό αριθμό σφυρηλάτων τεμαχίων που πρέπει να παραχθούν, την ακρίβεια των διαστάσεων καθώς και το είδος του υλικού που πρόκειται να σφυρηλατηθεί. Η εισαγωγή κάθε νέας κατεργασίας εξαρτάται κυρίως από το κόστος, την αποτελεσματικότητα και το ρυθμό παραγωγής της μηχανής που αφορά στη συγκεκριμένη κατεργασία.

Οι μηχανές που χρησιμοποιούνται στη σφυρηλάτηση όπως για παράδειγμα οι πρέσες και οι σφύρες επηρεάζουν την κατεργασία, επηρεάζοντας το ρυθμό παραμόρφωσης και τις θερμοκρασιακές συνθήκες και είναι αυτές που καθορίζουν το ρυθμό παραγωγής σφυρηλάτων υλικών. Οι απαιτήσεις για μια δεδομένη κατεργασία σφυρηλάτησης θα πρέπει να είναι συμβατές με το φορτίο, την ενέργεια, τον χρόνο και τα χαρακτηριστικά που προβλέπονται για κάθε μηχανή [6].

Υπάρχουν τρία είδη πρέσων που χρησιμοποιούνται για την ψυχρή και τη θερμή σφυρηλάτηση: οι υδραυλικές, οι μηχανικές και οι κοχλιωτές πρέσες.

#### 1.3.1. ΥΔΡΑΥΛΙΚΕΣ ΠΡΕΣΕΣ

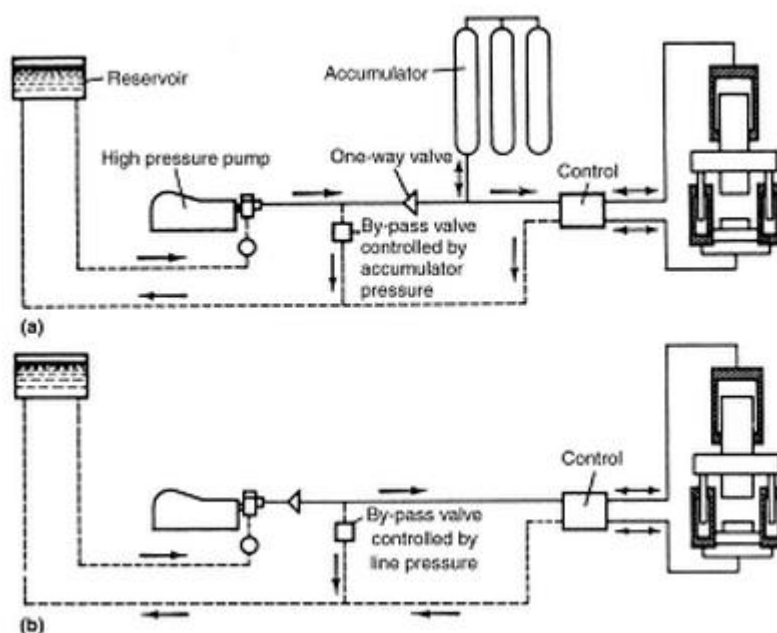
Η λειτουργία των υδραυλικών πρέσων είναι σχετικά απλή και βασίζεται στην κίνηση ενός υδραυλικού πιστονιού που οδηγείται σε έναν κύλινδρο. Οι υδραυλικές πρέσες είναι μηχανήματα περιορισμένου φορτίου, δηλαδή η ικανότητά τους να διεξάγουν μια κατεργασία διαμόρφωσης περιορίζεται από το μέγιστο διαθέσιμο φορτίο.



Σχήμα 1.7: Απλή υδραυλική πρέσα [7]

Οι υδραυλικές πρέσες προσφέρουν τις ακόλουθες σημαντικές λειτουργίες:

- Στις υδραυλικές πρέσες άμεσης οδήγησης το μέγιστο φορτίο συμπίεσης είναι διαθέσιμο σε κάθε σημείο της διαδρομής του εμβόλου. Στις πρέσες συσσώρευσης το διαθέσιμο φορτίο μειώνεται ελαφρά ανάλογα με το μήκος του εμβόλου και τα χαρακτηριστικά του εμφανιζόμενου φορτίου στην κατεργασία διαμόρφωσης.
- Ενώ το μέγιστο φορτίο είναι διαθέσιμο κατά τη διάρκεια της εσωτερικής διαδρομής, είναι διαθέσιμες μεγάλες ποσότητες ενέργειας για την παραμόρφωση. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως οι ιδανικές πρέσες είναι ιδανικές για εφαρμογές εξώθησης που απαιτούν ένα σχεδόν σταθερό φορτίο σε ένα μακρύ φορτίο.
- Σχετικά με την δυνατότητα μιας υδραυλικής πρέσας το μέγιστο φορτίο μπορεί να περιοριστεί για την προστασία του εργαλείου. Δεν είναι πιθανόν να ξεπεραστεί το αρχικό φορτίο επειδή η βαλβίδα εκτόνωσης της πίεσης περιορίζει την πίεση του ρευστού που δρα στο έμβολο.
- Μέσα στα όρια της μηχανής, η ταχύτητα του εμβόλου μπορεί να μεταβάλλεται συνεχώς κατά τη διάρκεια της εσωτερικής διαδρομής του εμβόλου. Ανάλογα συστήματα ελέγχου μπορούν να ρυθμίσουν την ταχύτητα του εμβόλου με βάση την πίεση διαμόρφωσης ή τη θερμοκρασία του προϊόντος. Αυτή η λειτουργία ελέγχου μπορεί να προσφέρει ένα σημαντικό πλεονέκτημα στη βελτιστοποίηση της κατεργασίας διαμόρφωσης.



**Σχήμα 1.8:** Σχηματική αναπαράσταση των οδών της υδραυλικής πρέσας. α) οδηγός συσσώρευσης και β) άμεση οδήγηση [6]

Τα λειτουργικά χαρακτηριστικά μιας υδραυλικής πρέσας καθορίζονται από τον τύπο και το σχεδιασμό του υδραυλικού συστήματος οδήγησης. Οι πρέσες άμεσης οδήγησης χρησιμοποιούν συνήθως ως μέσο εργασίας υδραυλικό λάδι ή υδατικό γαλάκτωμα. Σε προηγούμενους σχεδιασμούς κάθετων πρέσων στην αρχή της διαδρομής το πάνω μέρος του εμβόλου πέφτει εξαιτίας της βαρύτητας και το λάδι σύρεται από τη δεξαμενή μέσα στον κύλινδρο του εμβόλου. Όταν το έμβολο έρθει σε επαφή με το τεμάχιο εργασίας η βαλβίδα ανάμεσα στον κύλινδρο του εμβόλου και τη δεξαμενή κλείνει και στον κύλινδρο του εμβόλου δημιουργείται πίεση από την αντλία. Η συγκεκριμένη λειτουργία αποδίδει μεγάλους χρόνους παραμονής πριν να ξεκινήσει η πλαστική παραμόρφωση.

Στις σύγχρονες πρέσες άμεσης οδήγησης μια εναπομένουσα πίεση διατηρείται στους κυλίνδρους επιστροφής ή στις γραμμές επιστροφής μέσω μιας βαλβίδας εκτόνωσης πίεσης. Με αυτόν τον τρόπο το πάνω μέρος του εμβόλου κινείται προς τα κάτω αντίθετα προς την πίεση.

Οι πρέσες συσσωρευτικής οδήγησης συνήθως χρησιμοποιούν ως μέσο μίγμα νερού – λαδιού και επίσης χρησιμοποιούν άζωτο, αέρα ή ατμό για τη διατήρηση της πίεσης στο μέσο. Η αρχή λειτουργίας τους είναι παρόμοια με αυτή των πρέσων άμεσης οδήγησης και η διαφορά τους έγκειται στο ότι η πίεση δημιουργείται στους συσσωρευτές από το μίγμα νερού – λαδιού. Κατά συνέπεια, ο ρυθμός διεύδυσης δεν εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της αντλίας και μπορούν να ποικίλουν ανάλογα με την πίεση στο συσσωρευτή, τη συμπίεστικότητα του μέσου πίεσης και την αντίσταση του τεμαχίου εργασίας στην πλαστική παραμόρφωση. Στο τέλος της διαδρομής διαμόρφωσης, καθώς προχωράει η πλαστική παραμόρφωση, το μέσο εργασίας εκτονώνεται και η απαιτούμενη δύναμη για το σχηματισμό του υλικού αυξάνει, ενώ η ταχύτητα διεύδυσης και το διαθέσιμο φορτίο μειώνεται.



**Σχήμα 1.9:** Σύγχρονη υδραυλική πρέσα [7]

Τόσο στις πρέσες με άμεση οδήγηση ή με συσσωρευτική οδήγηση καθώς δημιουργείται η πίεση και το μέσο εργασίας συμπιέζεται, πραγματοποιείται επιβράδυνση του ρυθμού διεύθυνσης. Αυτή η επιβράδυνση είναι πιο έντονη στην περίπτωση της πρέσας που χρησιμοποιεί ως μέσο εργασίας το λάδι, επειδή το λάδι είναι πιο συμπιέσιμο από το νερό.

Η προσέγγιση και οι ταχύτητες αρχικής πλαστικής παραμόρφωσης είναι μεγαλύτερες στις πρέσες με συσσωρευτική οδήγηση. Αυτό βελτιώνει τις συνθήκες θερμής σφυρηλάτησης μειώνοντας τους χρόνους επαφής, αλλά αυξάνει παράλληλα τη φθορά των υδραυλικών στοιχείων στο σύστημα. Στα συστήματα με μέσο οδήγησης το λάδι υπάρχουν λιγότερο σοβαρά προβλήματα στεγανότητας ενώ ο έλεγχος και η ακρίβεια είναι γενικά το ίδιο για τα δύο είδη πρέσας.

### 1.3.2 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΠΡΕΣΕΣ

Σε όλες τις μηχανικές πρέσες υπάρχουν οδοντωτοί τροχοί η ενέργεια των οποίων μεταφέρεται στο τεμάχιο εργασίας μέσω ενός δικτύου γραναζιών, στροφάλων, έκκεντρων και μοχλών. Η ικανότητα των μηχανικών πρέσων να παραμορφώνουν πλαστικά το υλικό του τεμαχίου εργασίας καθορίζεται από το μήκος του εμβόλου και τις διάφορες δυνάμεις που αναπτύσσονται στα διάφορα σημεία της διαδρομής. Οι δύο βασικές ομάδες μηχανικών πρέσων είναι: οι πρέσες με οδηγό στρόφαλο και οι πρέσες με εκκεντροφόρο οδηγό [6].



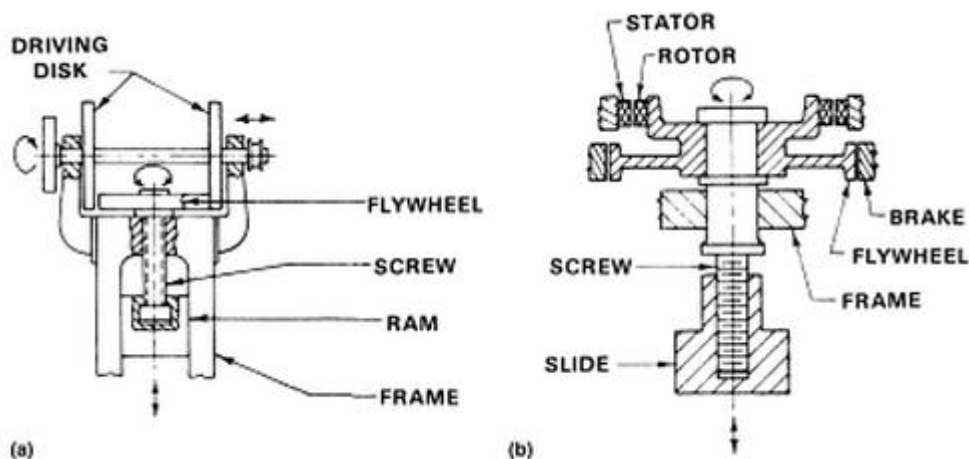
Σχήμα 1.10: Μηχανική πρέσα [7]

Οι στροφαλοφόρες πρέσες μπορεί να έχουν είτε απλούς είτε πιο σύνθετους στρόφαλους ως οδηγούς. Στις συμβατικές στροφαλοφόρες πρέσες η συνολική διαδρομή δεν μπορεί να αλλάξει, ενώ στις εκκεντροφόρες πρέσες η συνολική διαδρομή είναι μεταβλητή. Και οι δύο ανήκουν στους απλούστερους τύπους οδήγησης. Στην περίπτωση που το ίδιο έμβολο καθοδηγείται από δύο ή περισσότερους στρόφαλους τότε η πρέσα είναι πολλαπλή. Επίσης οι μηχανικές πρέσες μπορεί να ταξινομηθούν ανάλογα με τον τύπο του πλαισίου σε πρέσες τύπου C ή κλειστού πλαισίου.

Το σύστημα οδήγησης που χρησιμοποιείται στις περισσότερες μηχανικές πρέσες βασίζεται σε ένα ρυθμιστικό μηχανισμό στροφάλου που μετατρέπει την περιστροφική κίνηση σε μια παλινδρομική γραμμική κίνηση. Ο εκκεντρος άξονας συνδέεται μέσω ενός συμπλέκτη και ενός συστήματος φρεναρίσματος απευθείας με τον τροχό. Για σχεδιασμούς μεγαλύτερης δυναμικής ο τροχός τοποθετείται στο γρανάζι του άξονα που οδηγεί τον εκκεντροφόρο άξονα.

### 1.3.3 ΠΡΕΣΕΣ ΜΕ ΚΟΧΛΙΑ

Οι πρέσες με κοχλία χρησιμοποιούν, μια δύναμη τριβής, γρανάζια, ηλεκτρικό ή υδραυλικό σύστημα οδήγησης για την επιτάχυνση του τροχού και της σύνδεσης με κοχλία και μετατρέπει την γωνιακή κινητική ενέργεια σε ευθύγραμμη ενέργεια του άξονα ή του εμβόλου.



**Σχήμα 1.11:** Οι πιο συνηθισμένες πρέσες με οδηγό κοχλία α) οδηγός τριβής και β) άμεσος ηλεκτρικός οδηγός [6].

Στις πρέσες με οδηγό τριβής οι δίσκοι οδήγησης τοποθετούνται σε έναν οριζόντιο άξονα και περιστρέφονται συνεχώς. Για μια διαδρομή ένας δίσκος οδήγησης πιέζεται πάνω στον τροχό με ένα βοηθητικό μοτέρ. Ο τροχός που συνδέεται στον κοχλία είτε σε συγκεκριμένη θέση είτε με έναν συμπλέκτη τριβής ολίσθησης, επιταχύνεται μέσω αυτού του δίσκου μέσω της τριβής. Η ενέργεια του τροχού και η ταχύτητα του εμβόλου συνεχίζει να αυξάνεται μέχρι το έμβολο να χτυπήσει στο τεμάχιο εργασίας. Με αυτόν τον τρόπο το



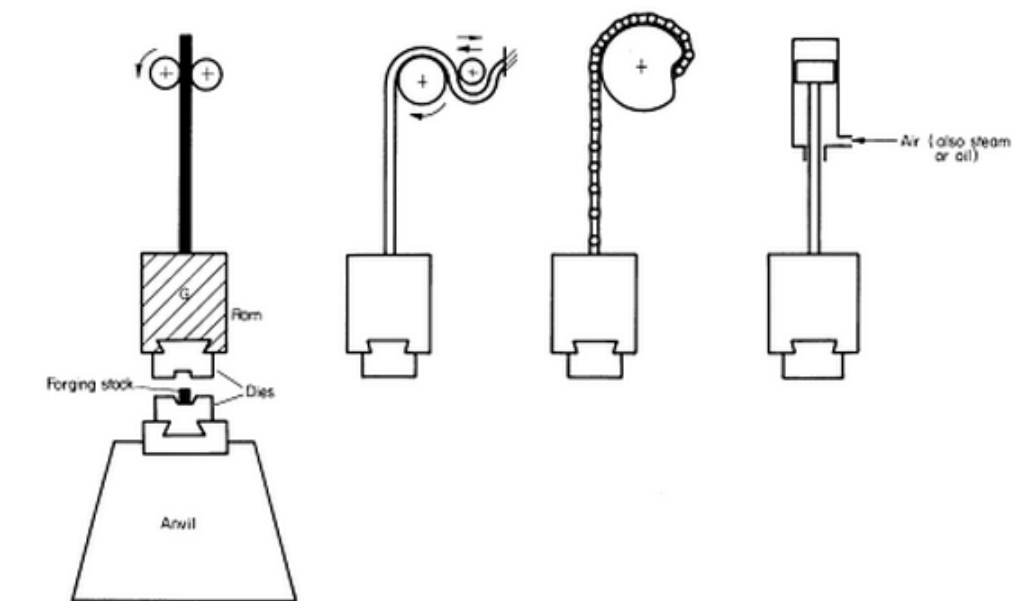
απαιτούμενο φορτίο για τη διαμόρφωση δημιουργείται και μεταφέρεται μέσω της ολίσθησης, του κοχλίας και του πλαισίου πίεσης. Όταν η εσωτερική ενέργεια στον τροχό χρησιμοποιείται στην πλαστική παραμόρφωση του τεμαχίου εργασίας και εκτρέπεται ελαστικά την πίεση τότε ο τροχός, ο κοχλίας και η ολίσθηση σταματούν. Τότε το βοηθητικό μοτέρ ενεργοποιεί τον οριζόντιο άξονα και πιέζει τον τροχό οδήγησης στην πάνω διαδρομή πάνω στον τροχό του γραναζιού. Με αυτόν τον τρόπο ο τροχός του γραναζιού και ο κοχλίας επιταχύνονται στην αντίθετη κατεύθυνση και η ολίσθηση μεταφέρεται στην πάνω θέση.

### 1.3.4 ΣΦΥΡΕΣ

Οι σφύρες είναι ο πιο οικονομικός και ευέλικτος τύπος εξοπλισμού για την παραγωγή φορτίου και ενέργειας για να διεξαχθεί μια διαδικασία διαμόρφωσης. Αυτή η τεχνολογία χαρακτηρίζεται από πολλαπλά κτυπήματα ανάμεσα στις μήτρες. Οι σφύρες αρχικά χρησιμοποιήθηκαν για τη θερμή σφυρηλάτηση και σε περιορισμένη έκταση για τη διαμόρφωση μεταλλικών φύλλων που κατασκευάζονται σε μικρές ποσότητες. Οι σφύρες σφυρηλάτησης αποτελούν έναν τρόπο ενίσχυσης των μεταλλουργικών ιδιοτήτων πολλών υλικών συμπεριλαμβανομένου υλικών μεγάλης απόδοσης. Η σφύρα είναι ένας μηχανισμός περιορισμού της ενέργειας. Κατά τη διάρκεια μιας διαδρομής εργασίας η πλαστική παραμόρφωση πραγματοποιείται μέχρι η συνολική κινητική ενέργεια διαχέεται από την πλαστική παραμόρφωση του υλικού και από την ελαστική παραμόρφωση του εμβόλου και των ακμών όταν οι μήτρες έρχονται σε επαφή μεταξύ τους.

Υπάρχουν δύο τύποι σφυρών: σφύρες με πτώση της βαρύτητας και σφύρες δυναμικής πτώσης. Στις απλές σφύρες πτώσης της βαρύτητας το άνω έμβολο συνδέεται σε έναν πίνακα, έναν ιμάντα, μια αλυσίδα ή ένα πιστόνι. Κατά τη διάρκεια της κάτω διαδρομής το έμβολο επιταχύνεται από τη βαρύτητα και δημιουργεί ενέργεια από το κτύπημα. Μετά το κτύπημα πραγματοποιείται άμεσα η πάνω διαδρομή. Οι αρχές λειτουργίας μια δυναμικής σφύρας είναι ίδια με αυτήν με πτώση αέρα. Στη διάρκεια της κατώτερης διαδρομής εκτός από την βαρύτητα το έμβολο επιταχύνεται από τον υδρατμό, τον ψυχρό αέρα ή την πίεση του θερμού αέρα. Στις ηλεκτροδυναμικές σφύρες το έμβολο μετακινείται από την πίεση του λαδιού έναντι ενός στρώματος αέρα. Ο συμπιεσμένος αέρας μετακινεί το πάνω μέρος του εμβόλου και συνεισφέρει στην επιτάχυνση του κατά την κάτω διαδρομή. Κατά συνέπεια και οι ηλεκτροδυναμικές σφύρες έχουν επίσης ένα ελάχιστο ισχύος.

Στις σφύρες δυναμικής πτώσης η επιτάχυνση του εμβόλου ενισχύεται από την πίεση του αέρα που εφαρμόζεται στο πάνω μέρος του κυλινδρικού εμβόλου. Σήμερα οι περισσότερες σφύρες πτώσης έχουν οδήγηση ισχύος ή πίεσης.



Σχήμα 1.12: Διάφοροι τύποι σφυρών με πτώση βαρύτητας[6].

## 1.4 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ

Τα σφυρήλατα υλικά μπορεί κανείς να τα βρει σε διάφορες εφαρμογές. Στα αυτοκίνητα και τα φορτηγά τα σφυρήλατα στοιχεία μπορούν να βρεθούν στα σημεία δονήσεων και τάσεων. Τα αυτοκίνητα και τα φορτηγά μπορεί να περιέχουν πάνω από 250 σφυρήλατα στοιχεία τα περισσότερα από τα οποία παράγονται από άνθρακα ή κράματα χάλυβα. Τα σφυρήλατα στοιχεία της μηχανής και των κινητήρων περιλαμβάνει ράβδους σύνδεσης, τους στροφαλοφόρους άξονες, τους άξονες μετάδοσης κινήσεως και οδοντωτούς τροχούς, τους άξονες οδήγησης, τους κόμβους του συμπλέκτη και την καθολική σύνδεση σταυρών και πινιόν.



Σχήμα 1.13: Σφυρήλατα αντικείμενα που εφαρμόζονται στα αυτοκίνητα [7]

Οι σφυρήλατοι εκκεντροφόροι άξονες, τα πηνία, τα γρανάζια και τα κοκοράκια προσφέρουν ευκολία στην επιλεκτική σκλήρυνση όπως και στην δύναμη. Επιπλέον, από σφυρήλατα υλικά είναι και οι άξονες των τροχών, οι σφήνες, οι αξονικές ράβδοι, οι ράβδοι στρέψης, τα σφαιρικά καρφιά, οι βραχίονες του ρελαντί στα επιβατικά αυτοκίνητα, τα λεωφορεία καθώς και σε εφαρμογές φορτηγών που απαιτούν επιπλέον αντοχή και σκληρότητα.

Οι υψηλοί λόγοι δύναμης προς βάρος και η κατασκευαστική αξιοπιστία βελτιώνει την απόδοση, το εύρος και το ωφέλιμο φορτίο στα αεροπλάνα. Αυτός είναι και ο βασικός λόγος που τα σιδηρούχα και τα μη σιδηρούχα σφυρήλατα υλικά χρησιμοποιούνται στα ελικόπτερα, στα μηχανοκίνητα αεροπλάνα, τα εμπορικά αεροσκάφη και τα υπερηχητικά στρατιωτικά αεροσκάφη. Πολλά αεροσκάφη είναι σχεδιασμένα γύρω από τα σφυρήλατα υλικά και περιέχουν πάνω από 450 κατασκευαστικά σφυρήλατα τεμάχια όπως επίσης και εκατοντάδες σφυρήλατα τμήματα μηχανής. Τα σφυρήλατα τμήματα περιλαμβάνουν τα διαφράγματα, τα φτερά και τις κεραίες, τμήματα της μηχανής, άξονες και στηρίγματα καθώς και τους κυλίνδρους του συστήματος προσγείωσης και τα φρένα.

Στους αεριωθούμενους στροβιλοκινητήρες τα κράματα σιδήρου, νικελίου και κοβαλτίου σφυρηλατούνται σε καμπίνες, συνδέσμους, πολλαπλασιαστές, δακτυλίου, τροχούς και άξονες. Όλα αυτά τα στοιχεία απαιτούν ομοιόμορφη ανάπτυξη τάσης και τάσης ερπυσμού όπως επίσης και καλή ολκιμότητα σε εύρος θερμοκρασιών από 800 έως 1400K.

Τα προϊόντα σφυρηλάτησης από χάλυβες, τιτάνιο και αλουμίνιο βρίσκουν παρόμοιες εφαρμογές σε χαμηλότερες θερμοκρασίες. Τα σφυρήλατα εξαρτήματα των πυραύλων από τιτάνιο, κολόμβιο και πυρίμαχα υλικά, μπορούν να αποδώσουν μοναδικές μηχανικές και φυσικές ιδιότητες κάτω από διάφορες συνθήκες.

Σφυρήλατα τεμάχια συναντώνται σε μεγάλο βαθμό και στο στρατό από απλά όπλα έως τους άξονες των πυρηνικών υποβρυχίων. Τα βαριά άρματα μάχης περιέχουν περισσότερα από 550 ξεχωριστά σφυρήλατα υλικά ενώ στα τεθωρακισμένα οχήματα μεταφοράς προσωπικού συναντώνται πάνω από 250. Η πλειοψηφία των κελυφών με διάμετρο 155 και 75mm όπως επίσης και τα βλήματα περιέχουν από τουλάχιστον δύο σφυρήλατα στοιχεία.

Για τις βαλβίδες και τις συνδέσεις οι μηχανικές ιδιότητες των σφυρήλατων τμημάτων καθώς και η μη πορώδης φύση τους επιτρέπει να χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές υψηλής πίεσης. Υλικά με ανθεκτικότητα στη διάβρωση και στη θερμότητα χρησιμοποιούνται για φλάντζες, σώματα βαλβίδων και στελέχη, ταφ, γωνίες, μειωτήρες, σέλες και άλλα εξαρτήματα. Οι εφαρμογές στον τομέα του πετρελαίου περιλαμβάνουν τους σπαστήρες βράχων, τα μηχανήματα των γεωτρήσεων, βαλβίδες και εξαρτήματα υψηλής πίεσης.

Οι σταθερές μηχανές εσωτερικής καύσης περιλαμβάνουν σφυρήλατους στροφαλοφόρους άξονες, διωστήρες, καλύμματα ράβδων, εκκεντροφόρους άξονες, βαλβίδες, γρανάζια, άξονες μοχλούς και διασυνδέσεις. Εξωλέμβιοι κινητήρες, μοτοσυκλέτες και πριόνια ισχύος είναι χαρακτηριστικά παραδείγματα της εντατικής χρήσης των σφυρήλατων υλικών σε μικρότερους κινητήρες.



**Σχήμα 1.14:** Σφυρήλατα αντικείμενα (στροφαλοφόρος άξονας, διωστήρες και κεφαλές εμβόλων) [7]

Τέλος στις βιομηχανίες τα σφυρήλατα υλικά χρησιμοποιούνται σε συστήματα χειρισμού των υλικών, σε αλυσίδες ανύψωσης και στα ανυψωτικά μηχανήματα.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΟΔΟΝΤΩΤΟΙ ΤΡΟΧΟΙ

### 2.1. ΕΙΔΗ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ

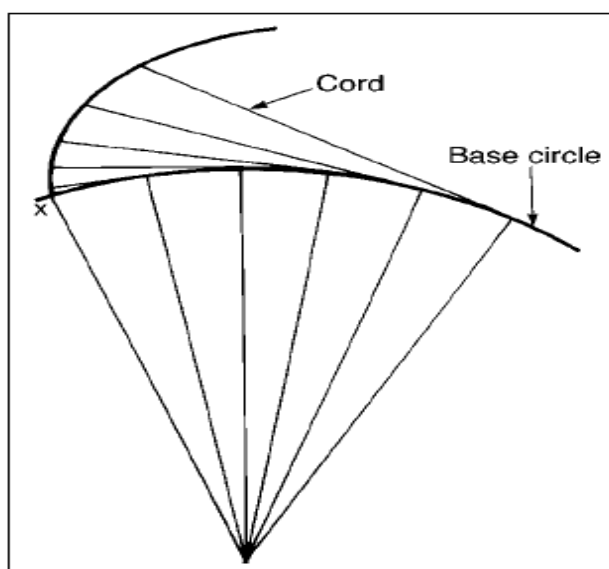
Οι οδοντωτοί τροχοί είναι συμπαγή στοιχεία μετάδοσης ισχύος που καθορίζουν την ταχύτητα, τη ροπή και τη φορά περιστροφής των οδηγών στοιχείων. Οι οδοντωτοί τροχοί χωρίζονται σε πέντε κατηγορίες: Μετωπικοί (Spur), ελικοειδής (Helical), κωνικοί (Bevel), υποειδής (hypoid) και ατέρμονες (worm gears) (MSD, 2001). Το ποιος από τους παραπάνω τύπους οδοντωτών τροχών θα χρησιμοποιηθεί εξαρτάται από τον προσανατολισμό του άξονα, την απόδοσή του και την ταχύτητα που απαιτείται σε κάθε συγκεκριμένη εφαρμογή. Στον πίνακα 2.1 παρουσιάζεται η σύγκριση των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται για την επιλογή των οδοντωτών τροχών.

**Πίνακας 2.1:** Σύγκριση οδοντωτών τροχών [7]

Είδος Τροχού	Απόδοση,%	Λόγος Μείωσης	Μέγιστη ταχύτητα βήματος rpm	
			Υψηλή Ακρίβεια	Εμπορικοί
Εξωτερικοί μετωπικοί τροχοί	97-99	1:1-5:1	20000	4000
Εξωτερικοί ελικοειδής τροχοί	97-99	1:1-9:1	40000	5000
Εξωτερικοί τροχοί διπλής έλικας	97-99	1:1-9:1	40000	5000
Ευθείς κωνικοί οδοντωτοί τροχοί	97-99	1:1-10:1	10000	1000
Σπειροειδής κωνικοί οδοντωτοί τροχοί	97-99	1:1-10:1	25000	5000
Κυλινδρικός ατέρμονας	50-90	3:1-100:1	10000	5000
Διπλός ατέρμονας	50-98	3:1-100:1	10000	4000
Υποειδής οδοντωτοί τροχοί	90-98	1:1-10:1	10000	4000

### 2.1.1 ΜΕΤΩΠΙΚΟΙ ΟΔΟΝΤΩΤΟΙ ΤΡΟΧΟΙ

Οι μετωπικοί οδοντωτοί τροχοί είναι οι τροχοί που χρησιμοποιούνται συνήθως στις διάφορες εφαρμογές. Οι συγκεκριμένοι τροχοί έχουν ευθεία δόντια που κόβουν παράλληλα προς τον άξονα περιστροφής. Η μορφή των οδόντων βασίζεται στην καμπύλη εξελιγμένης που φαίνεται στο σχήμα 2.1.



**Σχήμα 2.1:** Καμπύλη εξελιγμένης που προέρχεται από την αποκοπή ενός τόξου από έναν κύκλο [7].

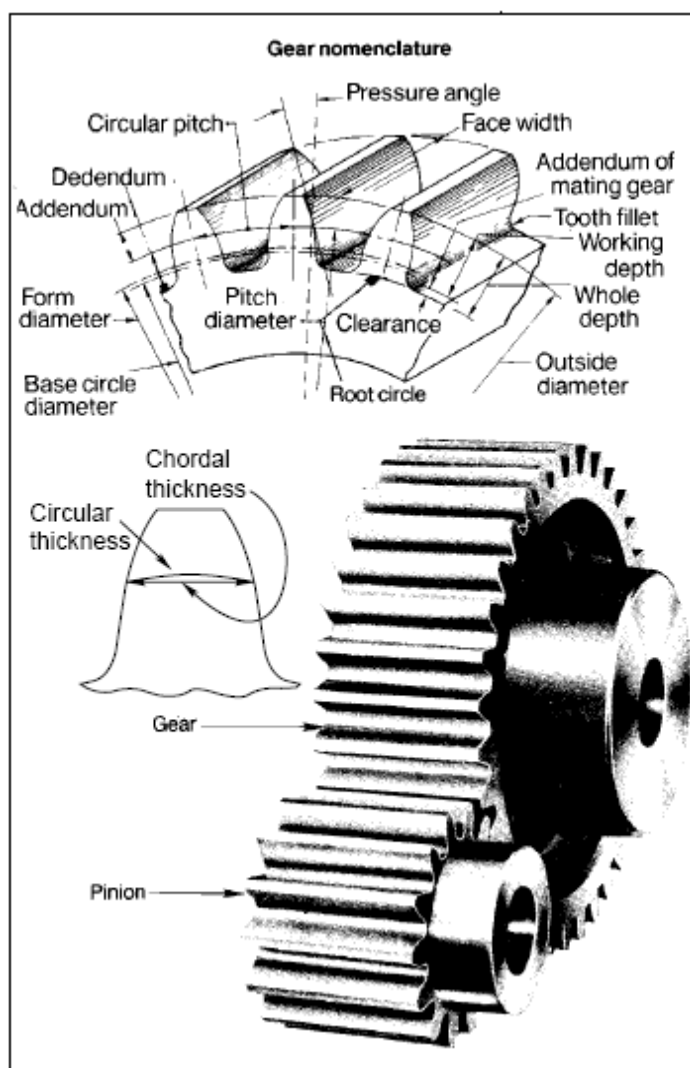
Πρακτικά έχει αποδειχθεί ότι αυτός ο σχεδιασμός ευνοεί την κυλιόμενη επαφή αντί της συρόμενης επαφής των οδόντων. Η καμπύλη εξελιγμένης δημιουργείται κατά τη μηχανική διαμόρφωση των τροχών με τη χρήση κοφτών δοντιών με ευθείες πλευρές. Κοντά στη ρίζα του οδόντα όμως το εργαλείο ανιχνεύει ένα τροχοειδές μονοπάτι. Εξαιτίας αυτής της γεωμετρίας η επαφή μεταξύ των δοντιών δημιουργείται κατά κύριο λόγο με κύλιση. Η απόδοση των μετωπικών τροχών είναι ιδιαίτερη υψηλή δεδομένου ότι κατά την κύλιση των οδόντων παράγεται μικρότερη ποσότητα θερμότητας.



**Σχήμα 2.2:** Μετωπικός οδοντωτός τροχός (πριν-μετά) [7]

Επειδή η επαφή γίνεται ταυτόχρονα στο εσωτερικό πάχος των οδόντων δημιουργείται στους τροχούς μια συνεχής σειρά απότομων κραδασμών που προκαλούν θόρυβο και ταλαντώσεις. Επιπλέον, τα φορτία κραδασμών σε υψηλές ταχύτητες προκαλούν φθορά των οδόντων. Τόσο ο θόρυβος όσο και η φθορά στους μετωπικούς τροχούς με την κατάλληλη λίπανση μειώνεται η επιφάνεια επαφής καθώς επίσης και τα αντίστοιχα φορτία κραδασμών[7]. Οι μετωπικοί τροχοί είναι οι πιο φθινοί οδοντωτοί τροχοί στην κατασκευή και χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές με παράλληλους άξονες. Υπάρχουν τρεις βασικές κατηγορίες τροχών: με εξωτερικούς οδόντες, με εσωτερικούς οδόντες και με οδοντωτό πιονόν.

Η πιο συνηθισμένη κατηγορία μετωπικών τροχών είναι αυτή των εξωτερικών οδόντων.



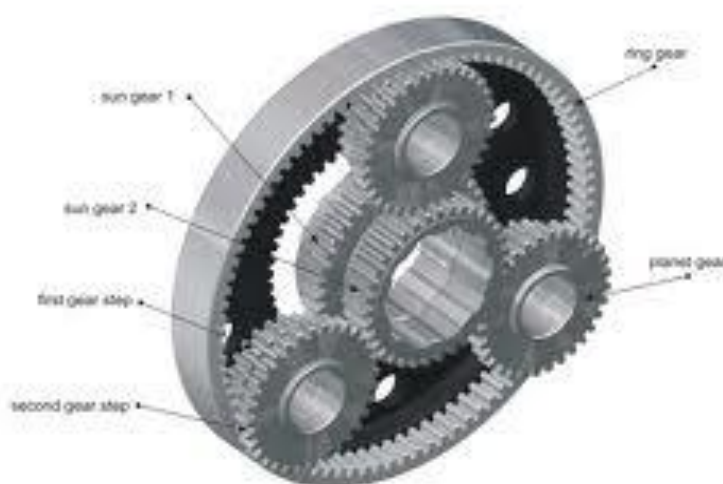
**Σχήμα 2.3:** Οι μετωπικοί οδοντωτοί τροχοί έχουν ευθεία δόντια κομμένα παράλληλα στον άξονα περιστροφής [7].

Στο Σχήμα 2.3 παρουσιάζεται το σχήμα των οδοντωτών τροχών με εξωτερικούς οδόντες . Ο μεγαλύτερος τροχός ονομάζεται οδοντωτός ενώ ο μικρότερος πιονόν. Η απλούστερη

διευθέτηση των μετωπικών οδοντωτών τροχών είναι ένα απλό ζεύγος τροχών που ονομάζεται απλό επίπεδο μείωσης και στο οποίο η εξωτερική περιστροφή είναι αντίθετη από την εσωτερική.

Η μεγαλύτερη καθαρή μείωση παράγεται με πολλαπλά επίπεδα στα οποία ο οδηγός οδοντωτός τροχός συνδέεται με έναν τρίτο. Αυτός ο τρίτος τροχός οδηγεί ένα ζεύγος με έναν τέταρτο τροχό που λειτουργεί ως έξοδος για το δεύτερο επίπεδο. Με αυτόν τον τρόπο μπορούν να παραχθούν διάφορες ταχύτητες εξόδου σε διαφορετικούς άξονες που μπορούν να παραχθούν από μια απλή περιστροφή εισόδου.

Οι οδοντωτοί τροχοί με εσωτερικούς οδόντες λέγονται συχνά και δακτυλιοειδής και παράγουν μια εξωτερική περιστροφή στην ίδια κατεύθυνση με την εσωτερική. Όπως δηλώνει και το όνομά τους οι οδόντες δημιουργούνται στο εσωτερικό ενός κυλινδρικού δακτυλίου μέσα στο οποίο τοποθετούνται ένας απλός οδοντωτός τροχός με εξωτερικούς οδόντες ή ένα ζεύγος οδοντωτών τροχών με εξωτερικούς οδόντες. Στην τυπική τους μορφή αποτελούνται από τρεις ή τέσσερις μεγαλύτερους μετωπικούς οδοντωτούς τροχούς (πλανήτες-planets) που συνήθως περιβάλλονται από ένα μικρότερο κεντρικό πινιόν (ήλιος-sun).



**Σχήμα 2.4:** Εσωτερικοί (δακτυλιοειδής) οδοντωτοί τροχοί [7].

Σε φυσιολογικές συνθήκες οι εσωτερικοί οδοντωτοί τροχοί είναι σταθεροί προκαλώντας τους πλανήτες να κινούνται γύρω από τον ήλιο με την ίδια φορά περιστροφής με αυτήν του ήλιου. Αυτός είναι και ο λόγος που το συγκεκριμένο είδος οδοντωτών τροχών αναφέρεται ως πλανητικό σύστημα. Η περιστροφική κίνηση των πλανητών μεταφέρεται στον άξονα εξόδου μέσω ενός πλανήτη που αποτελεί το φορέα[7].

Σε μια εναλλακτική διαμόρφωση του πλανητικού συστήματος, οι πλανήτες μπορούν να ακινητοποιούνται γύρω από τον ήλιο και ο δακτύλιος είναι έτσι ελεύθερος να κινηθεί. Αυτό



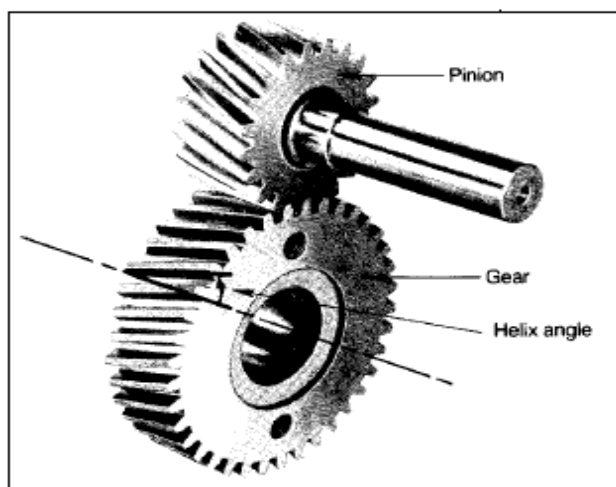
έχει ως αποτέλεσμα ο εσωτερικός οδοντωτός τροχός να περιστρέφεται αντίθετα ως προς τον ήλιο. Επιτρέποντας τόσο στον πλανήτη – φορέα όσο και στον δακτυλιοειδή τροχό να περιστρέφονται, παράγεται ένας διαφορετικός οδηγός οδοντωτός τροχός και η ταχύτητα του ενός άξονα εξαρτάται από την ταχύτητα του άλλου.

Στην περίπτωση των οδοντωτών τροχών με πινιόν πρόκειται για μια ευθύγραμμη ράβδο με οδόντες διαμορφωμένους κατά μήκος της. Οι συγκεκριμένοι οδοντωτοί τροχοί είναι μια ειδική περίπτωση μετωπικών οδοντωτών τροχών και χρησιμεύουν στη μετατροπή της περιστροφικής κίνησης σε γραμμική και το αντίστροφο. Συγκεκριμένα η μετατόπιση του οδοντωτού τροχού προκαλεί την περιστροφή του πινιόν ενώ η περιστροφική κίνηση του πινιόν έχει ως αποτέλεσμα τη γραμμική μετατόπιση του οδοντωτού τροχού (rack).

Οι οδοντωτοί τροχοί με πινιόν χρησιμοποιούνται ευρέως στα εργαλεία διαμόρφωσης, τα φορητά ανύψωσης, τα μηχανικά φτυάρια και άλλα βαριά μηχανήματα στα οποία η περιστροφική κίνηση προκαλεί την ευθύγραμμη κίνηση ενός παλινδρομικού τμήματος. Γενικά σε αυτές τις εφαρμογές ο οδοντωτός τροχός λειτουργεί χωρίς να υπάρχει κάποιο είδος μόνωσης. Παρόλα αυτά απαιτείται κάποιο είδος καλύμματος για να κρατάει τη σκόνη και άλλες προσμίξεις μακριά από τις συνεργαζόμενες επιφάνειες [7].

### 2.1.2 ΕΛΙΚΟΕΙΔΕΙΣ ΟΔΟΝΤΩΤΟΙ ΤΡΟΧΟΙ.

Οι ελικοειδής οδοντωτοί τροχοί διαφέρουν από τους μετωπικούς ως προς τη μορφή των οδόντων. Στους ελικοειδής οι οδόντες έχουν ελικοειδή μορφή και διαμορφώνονται στην πρόσοψη του τροχού σε γωνία και όχι επίπεδοι. Κατά συνέπεια, η γραμμή επαφής εξελίσσεται στους οδόντες κατά μήκος της πρόσοψης από το άκρο του ενός στη ρίζα του άλλου μειώνοντας το θόρυβο και τα χαρακτηριστικά ταλάντωσης των μετωπικών τροχών. Επίσης κάθε στιγμή βρίσκονται σε επαφή διαφορετικοί οδόντες παράγοντας ένα βαθμιαίο φορτίο στον οδόντα που μειώνει βαθμιαία τη φθορά τους.

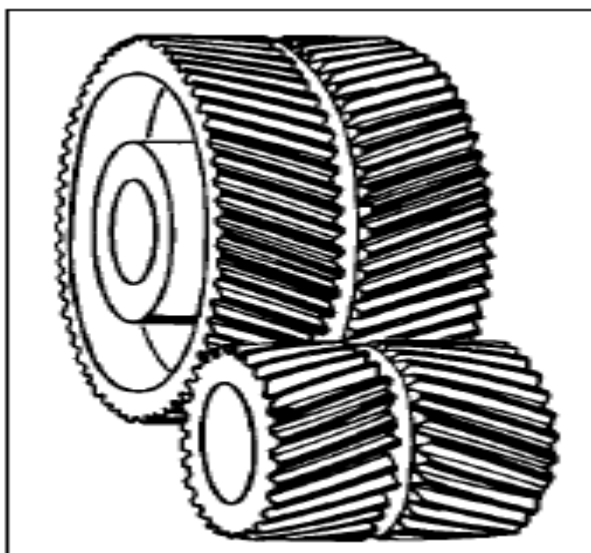


Σχήμα 2.5: Ελικοειδής οδοντωτοί τροχοί [7]

Η αυξανόμενη ολίσθηση ανάμεσα στους οδόντες του ελικοειδούς οδοντωτού τροχού όμως απαιτεί μεγαλύτερη λίπανση για να αποτραπεί η επαφή ανάμεσα στις μεταλλικές επιφάνειες που έρχονται σε επαφή και έχουν ως αποτέλεσμα την αστοχία του τροχού. Επίσης, ενώ οι οδόντες διαμορφώνονται υπό γωνία, κατά μήκος του άξονα του τροχού παράγεται ένα πλευρικό αξονικό φορτίο. Κατά συνέπεια είναι απαραίτητη η χρήση εδράνων κύλισης για την απορρόφηση αυτού του φορτίου έτσι ώστε να διατηρούν οι τροχοί την κατάλληλη ευθυγράμμιση.

Υπάρχουν τρεις βασικές κατηγορίες ελικοειδών οδοντωτών τροχών [7]: οι διπλής έλικας, διάταξης ψαροκόκαλου (herring bone) και διασταυρούμενης ελίκωσης[7].

Στους οδοντωτούς τροχούς ελαχιστοποιείται το αξονικό φορτίο χρησιμοποιώντας διπλή ελίκωση στην οποία οι γωνίες των οδόντων είναι αντίθετες μεταξύ τους. Με αυτόν τον τρόπο το πλευρικό αξονικό φορτίο του ενός τροχού ακυρώνει το αξονικό φορτίο στον άλλο τροχό. Αυτοί οι αντίθετοι τροχοί συνήθως διαμορφώνονται με ένα κενό ανάμεσα στα αντίθετα ζεύγη των οδόντων[8].



**Σχήμα 2.6:** Οδοντωτοί τροχοί διπλής ελίκωσης[7]

Οι οδόντες στους οδοντωτούς τροχούς herringbone μοιάζουν με τη σπονδυλική στήλη ψαριού με νευρώσεις που επεκτείνονται από τις αντίθετες πλευρές σε παράλληλες γραμμές. Οι συγκεκριμένοι οδοντωτοί τροχοί έχουν αντίθετους οδόντες που ελαχιστοποιούν τα αξονικά φορτία όπως και οι διπλής ελίκωσης αλλά στην περίπτωση αυτή οι αντίθετοι οδόντες συνδέονται στο μέσο της περιφέρειας του τροχού. Αυτή η διαμόρφωση καθιστά τους συγκεκριμένους τροχούς πιο συμπαγή από τους διπλής ελίκωσης. Όμως απαιτείται τα κέντρα των τροχών να είναι πολύ καλά ευθυγραμμισμένα για να αποφεύγονται οι παρεμβολές ανάμεσα στις εμπλεκόμενες έλικες [7].

Οι οδοντωτοί τροχοί διασταυρούμενης έλικας χρησιμοποιούνται σε σπάνιες εφαρμογές όπου τα φορτία είναι σχετικά ελαφριά. Επειδή η επαφή ανάμεσα στους οδόντες είναι ένα σημείο εκτός γραμμής τα υψηλά αξονικά φορτία που δημιουργούνται με την ολίσθηση των οδόντων απαιτεί εκτεταμένη λίπανση. Κατά συνέπεια, με τις διασταυρούμενες ελικώσεις μπορεί να μεταφερθεί πολύ μικρό φορτίο ισχύος.

### 2.1.3 ΚΩΝΙΚΟΙ ΟΔΟΝΤΩΤΟΙ ΤΡΟΧΟΙ.

Αντίθετα με τους μετωπικούς και τους ελικοειδής τροχούς με οδόντες, διαμορφώνονται από ένα κενό κυλινδρικό κωνικό τροχό με τους οδόντες να κόβονται σε γωνιακή ή κωνική επιφάνεια. Οι κωνικοί οδοντωτοί τροχοί χρησιμοποιούνται όταν οι κεντρικές γραμμές των αξόνων εισόδου και εξόδου διασταυρώνονται. Οι οδόντες δημιουργούνται με τέτοια γωνία ώστε οι άξονες να διασταυρώνονται κάθετα.

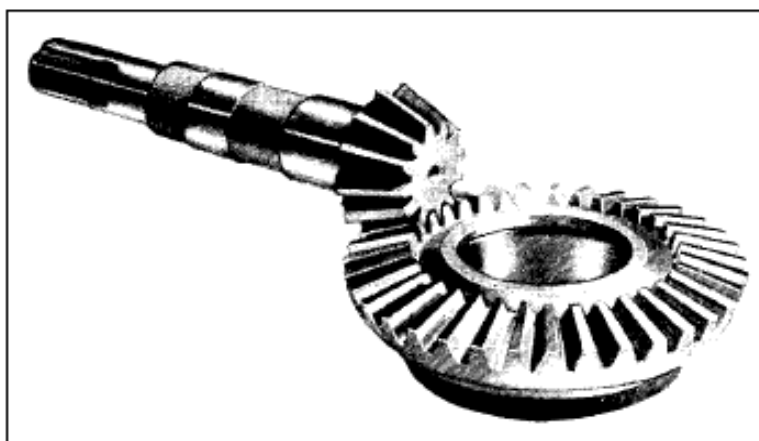


**Σχήμα 2.7:** Κωνικοί οδοντωτοί τροχοί με ευθύγραμμους οδόντες [7].

Μια ειδική κατηγορία των κωνικών οδοντωτών τροχών είναι οι τροχοί λοξότμησης στους οποίους οι τροχοί έχουν το ίδιο μέγεθος με τους άξονες στις δεξιές τους γωνίες. Επειδή οι άξονες διασταυρώνονται συνήθως οι κωνικοί οδοντωτοί τροχοί δεν εδράζονται και στα δύο μέρη τους. Έτσι ο ένας ή και οι δύο τροχοί προεξέχουν από τους υποστηρικτικούς άξονες. Αυτό το φορτίο προεξοχής μπορεί να εκτρέψει τον άξονα και να χαλάσει την ευθυγράμμιση

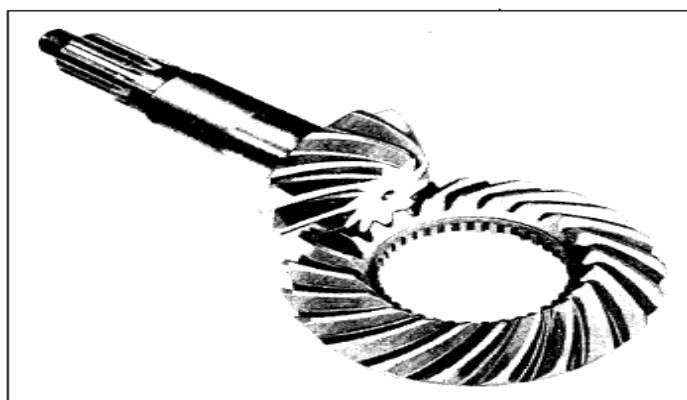
των τροχών, που προκαλούν μικρή επαφή ανάμεσα στους οδόντες και επιταχύνει τη φθορά τους. Η απόκλιση του άξονα μπορεί να ξεπεραστεί τοποθετώντας ένα έδρανο σε κάθε πλευρά του τροχού όπου υπάρχει κενό που να το επιτρέπει. Υπάρχουν δύο βασικά είδη κωνικών οδοντωτών τροχών: με ευθύγραμμους οδόντες και σπειροειδή.

Οι τροχοί με ευθύγραμμους οδόντες είναι γνωστοί και ως επίπεδοι κωνικοί τροχοί με οδόντες που είναι διαμορφωμένοι κατά μήκος της πρόσοψης του τροχού. Εξαρτώνται από τις ίδιες συνθήκες λειτουργίας με τους μετωπικούς οδοντωτούς τροχούς. Οι ευθύγραμμοι οδόντες των κωνικών τροχών είναι αποδοτικοί αλλά προκαλούν θόρυβο. Επιπλέον, παράγουν αξονικά φορτία στην κατεύθυνση που τείνει να διαχωρίσει τους τροχούς.



**Σχήμα 2.8:** Κωνικοί οδοντωτοί τροχοί με ευθύγραμμους οδόντες [7].

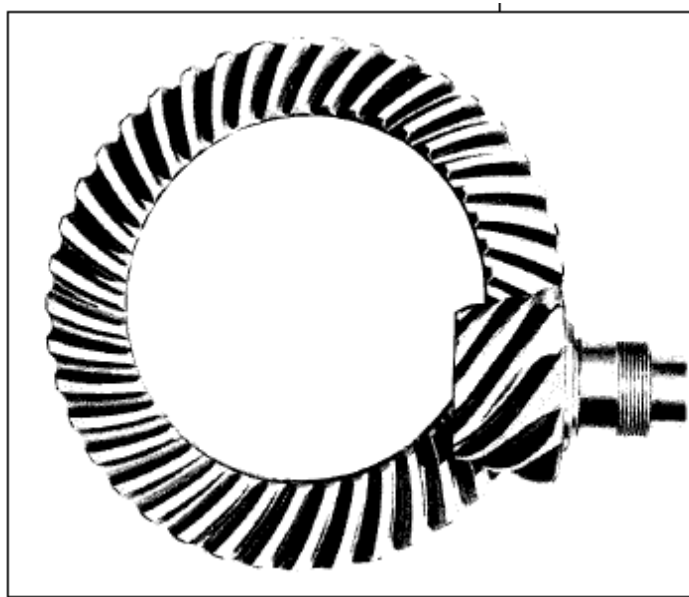
Στους σπειροειδείς κωνικούς τροχούς οι καμπύλοι οδόντες δημιουργούν μια δράση παρόμοια με τους ελικοειδείς τροχούς. Οι συγκεκριμένοι τροχοί παράγουν ομαλότερη και πιο ήσυχη λειτουργία σε σχέση με τους κωνικούς τροχούς ευθύγραμμων οδόντων. Τα αξονικά φορτία εξαρτώνται από την κατεύθυνση περιστροφής και ενώ η σπειροειδής γωνία στην οποία διαμορφώνονται οι οδόντες είναι θετική ή αρνητική.



**Σχήμα 2.9:** Σπειροειδείς κωνικοί οδοντωτοί τροχοί [7]

### 2.1.4 ΥΠΟΕΙΔΗΣ ΟΔΟΝΤΩΤΟΙ ΤΡΟΧΟΙ.

Οι υποειδής οδοντωτοί τροχοί μοιάζουν με τους σπειροειδή κωνικούς οδοντωτούς τροχούς αλλά οι άξονες του πινιόν και του οδηγού τροχού δεν διασταυρώνονται.



Σχήμα 2.10: Υποειδής οδοντωτοί τροχοί [7]

Αυτή η διαμόρφωση επιτρέπει και στους δυο άξονες να στηριχθούν και στα δύο άκρα. Στους υποειδής τροχούς το σημείο σύμπλεξης του πινιόν με τον οδηγό τροχό είναι περίπου στο μέσο ανάμεσα στην κεντρική θέση του πινιόν σε ένα σπειροειδή κωνικό τροχό και στην ακραία πάνω ή κάτω θέση του ατέρμονα.

Η συγκεκριμένη γεωμετρία επιτρέπει να τοποθετηθούν στο τέλος των οδηγούμενων και οδηγών αξόνων τα ρουλεμάν. Αυτά τα έδρανα παρέχουν μεγαλύτερη ακαμψία σε σχέση με τις προβόλους στήριξης που χρησιμοποιούνται σε μερικούς κωνικούς τροχούς. Επιπλέον, εκτός από τη στιβαρότητα και την υψηλή αντοχή του υποειδή τροχού, το υποειδές πινιόν έχει μεγαλύτερη διάμετρο και μεγαλύτερη βάση από το πινιόν ενός κωνικού ή σπειροειδή κωνικού τροχού ισοδύναμου λόγου. Παρά το γεγονός πως οι υποειδής τροχοί είναι πιο συμπαγής και πιο ανθεκτικοί από τους περισσότερους τύπους οδοντωτών τροχών είναι πιο δύσκολη η λίπανσή τους εξαιτίας των υψηλών πιέσεων που αναπτύσσονται στην επαφή των οδόντων [7].

Επιπλέον, η μεγάλη ολίσθηση που αναπτύσσεται ανάμεσα στους οδόντες μειώνει την απόδοση. Στην πραγματικότητα ο υποειδής τροχός συνδυάζει την ολίσθηση του ατέρμονα τροχού με την περιστροφική κίνηση και την υψηλή πίεση οδόντων που σχετίζονται με τον σπειροειδή κωνικό τροχό. Επιπλέον τόσο οι οδηγοί όσο και οι οδηγούμενοι τροχοί

κατασκευάζονται από χάλυβα που αυξάνει περισσότερο τις απαιτήσεις για λίπανση. Κατά συνέπεια, απαιτούνται ειδικά λιπαντικά εξαιρετικά μεγάλης πίεσης και με αντιδιαβρωτικές ιδιότητες προκειμένου να διατηρούνται οι μεγάλες επιφανειακές πιέσεις και οι ταχύτητες τριβής στους υποειδής τροχούς. Παρά τις απαιτήσεις για ειδική λίπανση, οι υποειδής τροχοί χρησιμοποιούνται εκτενώς στους πίσω άξονες των αυτοκινήτων όπως επίσης και σε βιομηχανικές μηχανές.

### 2.1.5 ΟΔΟΝΤΩΤΟΙ ΤΡΟΧΟΙ ΜΕ ΑΤΕΡΜΟΝΑ ΚΟΧΛΙΑ

Τα ζεύγη των οδοντωτών τροχών με ατέρμονα αποτελούνται από έναν ατέρμονα σαν κοχλία άξονα (worm) που συνδυάζεται με έναν μεγαλύτερο οδοντωτό τροχό που ονομάζεται τροχός. Ο ατέρμονας λειτουργεί ως κοχλίας, οι πολλές στροφές του οποίου σπρώχνουν τον τροχό σε μια απλή περιστροφή. Με αυτόν τον τρόπο με μια απλή μείωση μπορεί να επιτευχθεί ένα μεγάλο εύρος λόγων ταχυτήτων, μεγαλύτερων από 60:1.

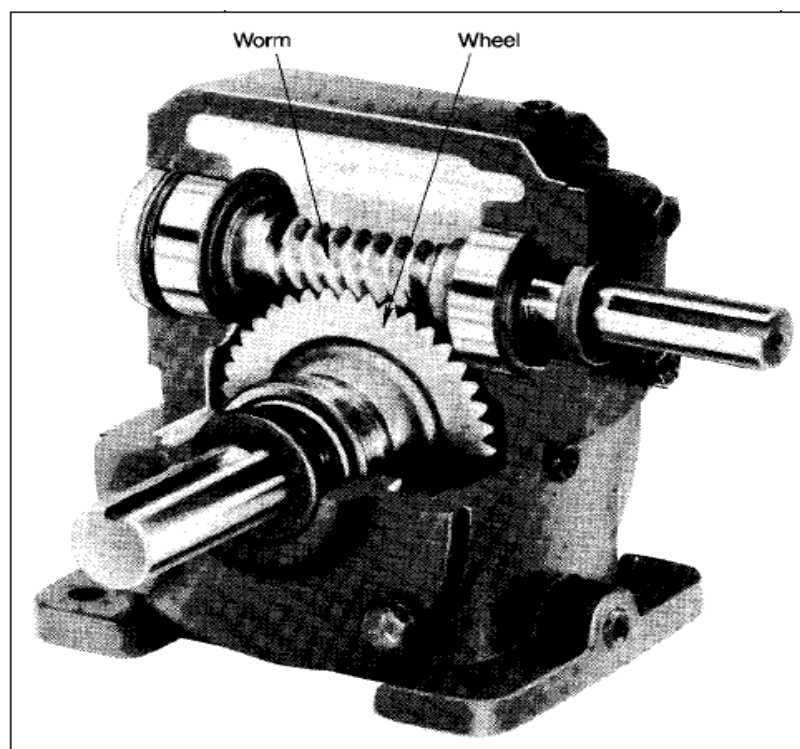


**Σχήμα 2.11:** Οδοντωτός τροχός με ατέρμονα [7]

Οι περισσότεροι ατέρμονες είναι κυλινδρικού σχήματος με ομοιόμορφη διάμετρο βήματος. Όμως ένας διπλός ατέρμονας έχει μεταβλητή διάμετρο που είναι στενότερη στο μέσο και μεγαλύτερη στα άκρα. Αυτή η διαμόρφωση επιτρέπει στον ατέρμονα να δεσμεύει περισσότερους οδόντες στον τροχό αυξάνοντας το ωφέλιμο φορτίο.

Στα ζεύγη των οδοντωτών τροχών με ατέρμονα, ο ατέρμονας είναι συνήθως το οδηγό στοιχείο. Όμως ένας αντιστρεπτός τροχός με ατέρμονα διατηρεί σε αναλογία το βήμα

ανάμεσα στον ατέρμονα και τον τροχό έτσι ώστε η κίνηση του τροχού να θέτει σε περιστροφή τον ατέρμονα [7].



**Σχήμα 2.12:** Σύστημα ατέρμονα κοχλία [7]

Στους περισσότερους οδοντωτούς τροχούς με ατέρμονα ο τροχός έχει παρόμοιους οδόντες με τους ελικοειδής τροχούς αλλά το πάνω μέρος των οδόντων καμπυλώνει προς τα μέσα για να τυλιχθεί ο ατέρμονας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο ατέρμονας να ολισθαίνει αντί να κυλάει καθώς οδηγεί τον τροχό. Λόγω της μεγάλης τριβής που αναπτύσσεται ανάμεσα στους οδόντες του τροχού και του ατέρμονα η απόδοση των συγκεκριμένων οδοντωτών τροχών είναι μικρότερη από τους άλλους βασικούς τύπους των οδοντωτών τροχών.

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα των οδοντωτών τροχών με ατέρμονα είναι η μικρή φθορά που υφίστανται εξαιτίας του πλήρους στρώματος λιπαντικού που τείνει να σχηματιστεί ανάμεσα στις επιφάνειες των οδόντων από την ολίσθηση του ατέρμονα [8].

Η τριβή στον οδοντωτό τροχό με ατέρμονα μειώνεται περαιτέρω με τη χρήση μετάλλων που έχουν χαμηλούς συντελεστές τριβής. Για παράδειγμα ο τροχός συνήθως κατασκευάζεται από μπρούντζο και ο ατέρμονας από χάλυβα. Και τα δύο αυτά υλικά έχουν χαμηλό συντελεστή τριβής και μπορούν να χρησιμοποιηθούν στους οδοντωτούς τροχούς με ατέρμονα επειδή η κατανομή των επιφανειακών πιέσεων στους οδόντες είναι περισσότερο ομοιόμορφη σε σχέση με τα υπόλοιπα είδη οδοντωτών τροχών. Οι άξονες των οδοντωτών

τροχών με ατέρμονα είναι κάθετοι, δεν τέμνονται και μπορούν να τοποθετηθούν σε διαφορετικούς προσανατολισμούς.

### 2.1.6 ΜΗ ΚΥΚΛΙΚΟΙ ΟΔΟΝΤΩΤΟΙ ΤΡΟΧΟΙ

Αν και συχνά παραβλέπεται, οι μη κυκλικοί οδοντωτοί τροχοί μπορεί να αποδώσουν διάφορους τύπους ασυνήθιστων κινήσεων ή χαρακτηριστικών ταχυτήτων. Αυτές οι ιδιαίτερες απαιτήσεις κίνησης μπορούν να αποδοθούν από έκκεντρα και τις διασυνδέσεις τους, αλλά οι μη κυκλικοί οδοντωτοί τροχοί συχνά αντιπροσωπεύουν μια απλούστερη, πιο συμπαγή και ακριβέστερη λύση.

Οι μη κυκλικοί οδοντωτοί τροχοί μετατρέπουν τη σταθερή ταχύτητα εισόδου σε μεταβλητή ταχύτητα εξόδου και αποδίδουν διάφορα τμήματα σταθερής ταχύτητας κατά τη διάρκεια ενός κύκλου λειτουργίας. Άλλες εφαρμογές απαιτούν τη συνδυαστική μετατροπή και περιστροφή ή κίνηση με σταμάτημα και στάση.

Διάφοροι τύποι μη κυκλικών οδοντωτών τροχών ειδικότερα οι ελλειπτικοί τροχοί παράγουν μεταβλητές ταχύτητες εξόδου. Άλλοι τύποι που χρησιμοποιούνται λιγότερο είναι οι τριγωνικοί και οι τετράγωνοι οδοντωτοί τροχοί.



Σχήμα 2.13: Μη κυκλικοί οδοντωτοί τροχοί [4]

Ένα ζεύγος ελλειπτικών οδοντωτών τροχών μπορούν να είναι τοποθετημένοι σε μια σταθερή κεντρική απόσταση αλλά μεταφέρουν μια μεταβαλλόμενη ταχύτητα εξόδου καθώς περιστρέφονται [7]. Οι ελλειπτικοί τροχοί μπορούν να περιστρέφονται είτε γύρω από ένα είτε από δύο σταθερά σημεία ή γύρω από το κέντρο της έλλειψης.

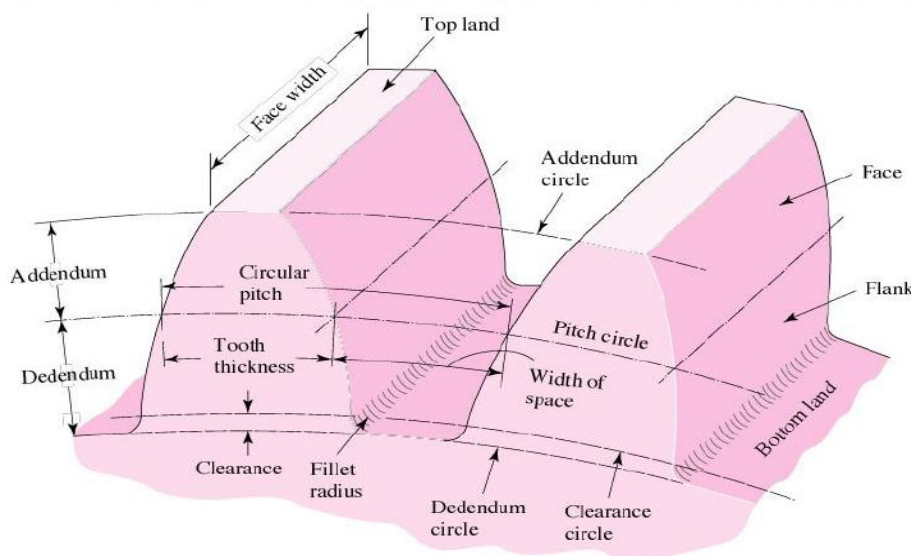


Όταν για μια εφαρμογή απαιτούνται διάφορες περίοδοι σταθερής ταχύτητας σε έναν κύκλο μπορούν να χρησιμοποιηθούν οδοντωτοί τροχοί πολλαπλών ταχυτήτων. Αυτοί οι τροχοί πραγματοποιούν τη μετάδοση ανάμεσα στις διάφορες ταχύτητες χρησιμοποιώντας ειδικά σημεία της περιμέτρου των τροχών ανάμεσα σε τμήματα σταθερής ταχύτητας.

## 2.2. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ

Όπως ήδη αναφέρθηκε ένα ζεύγος οδοντωτών τροχών προέρχεται από δύο λείους κυλίνδρους που εφάπτονται και κυλίνονται συνεχώς. Ο ένας κύλινδρος είναι ο κινητήριος και μεταδίδει την κίνηση στον κινούμενο με την τριβή χωρίς ολίσθηση. Οι οδόντες δημιουργούνται από εσοχές και εξοχές που υπάρχουν στην περιφέρεια των κυλίνδρων.

Η διάμετρος του κύκλου κατά τον οποίο εφάπτεται ο ένας κύλινδρος πάνω στον άλλο αποτελεί τη *διάμετρο του αρχικού κύκλου ή κύκλου κύλισης*  $d$ . Ο κύκλος αυτός χρησιμοποιείται για την κατασκευή του οδοντωτού τροχού, είναι δηλαδή ο κύκλος πάνω στον οποίο κυλιέται το κοπτικό εργαλείο[8].



Σχήμα 2.14: Βασικά μεγέθη των οδοντωτών τροχών [9]

Κάθε ζεύγος οδοντωτών τροχών χαρακτηρίζεται από τη *σχέση μετάδοσης*  $i$  που ονομάζεται ο λόγος του αριθμού των στροφών  $n_a$  του κινητήριου τροχού προς τον αριθμό στροφών  $n_b$  του κινούμενου τροχού.

Η απόσταση μεταξύ δύο οδόντων αποτελεί το *βήμα*  $p$  των οδοντωτών τροχών ενώ ο λόγος του βήματος προς το  $\pi$  αποτελεί το *μέτρο ή module*  $m$  του τροχού.

Για να περιοριστεί ο αριθμός των απαιτούμενων κοπτικών εργαλείων στη βιομηχανία χρησιμοποιούνται τα τυποποιημένα module που περιέχονται στον πίνακα που ακολουθεί.

**Πίνακας 2.2:** Τιμές module σε mm κατά DIN 780 [8]

Σειρά 1	0.05	0.06	0.08	0.10	0.12	0.16	0.20	0.25	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.25
	1.5	2	2.5	3	4	5	6	8	10	12	16	20	25	32	40	50	60
Σειρά 2	0.055	0.07	0.09	0.11	0.14	0.18	0.22	0.28	0.35	0.45	0.55	0.65	0.75	0.85	0.95	1.125	1.375
	1.75	2.25	2.75	3.5	4.5	5.5	7	9	11	14	18	22	28	36	45	55	70

Η ακτινική απόσταση μεταξύ του αρχικού κύκλου και του κύκλου κεφαλής αποτελεί το *ύψος κεφαλής*  $h_a$  και είναι συνήθως ίσο με το module. Η ακτινική απόσταση μεταξύ του αρχικού κύκλου και του κύκλου πόδα αποτελεί το *ύψος πόδα*  $h_f$  το οποίο ανάλογα με το κοπτικό εργαλείο που χρησιμοποιείται είναι ίσο με 1.167m ή 1.25m. Το άθροισμα του ύψους κεφαλής και του ύψους πόδα αποτελεί το *ύψος οδόντα*  $h$ .

Η διάμετρος του κύκλου που περιορίζει εξωτερικά τους οδόντες είναι η *διάμετρος του κύκλου κεφαλής*  $d_a$ , ενώ η διάμετρος που περιορίζει εσωτερικά τους οδόντες αποτελεί τη *διάμετρο του κύκλου πόδα*  $d_f$ .

Το ημιάθροισμα των διαμέτρων των αρχικών κύκλων αποτελεί την *απόσταση αξόνων*  $a_d$ .

Ένα άλλο σημαντικό μέγεθος που αφορά στους οδοντωτούς τροχούς είναι το πάχος οδόντων  $s$  που μετράται πάνω στον αρχικό κύκλο και είναι  $s=p-e$  όπου με  $e$  συμβολίζεται το διάκενο μεταξύ των οδόντων. Το διάκενο ισούται γενικά με το μισό του βήματος δηλαδή:  $e=p/2$  και θεωρητικά το πάχος των οδόντων πρέπει να είναι ίσο με το διάκενο. Στην πραγματικότητα όμως το διάκενο θα πρέπει να είναι λίγο μεγαλύτερο από το πάχος του οδόντα έτσι ώστε να αντιμετωπίζονται οι ανακρίβειες στην κατασκευή και στην τοποθέτηση αλλά και πιθανές θερμικές διαστολές και προβλήματα λίπανσης. Τόσο το πάχος όσο και το διάκενο  $e$  εξαρτώνται από την κατεργασία των οδόντων και έχουν τις ακόλουθες τιμές:

Για ακατέργαστους οδόντες :  $s = \frac{19}{40}p$  ,  $e = \frac{21}{40}p$  και για κατεργασμένους οδόντες:

$$s = \frac{39}{80} \Psi \frac{79}{160} \Psi \frac{1}{2}p \quad \text{και} \quad e = \frac{41}{80} \Psi \frac{81}{160} \Psi \frac{1}{2}p$$

Στον πίνακα 2.3 συνοψίζονται τα χαρακτηριστικά των οδοντωτών τροχών (Σχήμα 2.14).

**Πίνακας 2.3:** Χαρακτηριστικά μεγέθη οδοντωτών τροχών [8]

$d_a$	διάμετρος κύκλου κεφαλής	$d_a=d+2m$
$d$	διάμετρος αρχικού κύκλου	$d=mz$
$d_f$	διάμετρος κύκλου πόδα	$d_f=d-2 \times 1.16m$
$b$	πλάτος οδόντα	-
$p$	βήμα	$p = \pi \frac{d}{z}$
$s$	πάχος οδόντων	$s=p-e$
$e$	διάκενο μεταξύ των οδόντων	-
$h_a$	ύψος κεφαλής	$h_a=m$
$h_f$	ύψος πόδα	$h_f=1.16m$
$a_d$	απόσταση αξόνων	$a_d = \frac{d_1 + d_2}{2} = \frac{m(z_1 + z_2)}{2}$

Οι οδοντωτοί τροχοί γενικά κατασκευάζονται για ορισμένη διάρκεια ζωής. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται κυρίως για την κατασκευή τους είναι τα κράματα του αλουμινίου. Όσον αφορά στους οδόντες των τροχών η επιφάνεια τους πρέπει να παρουσιάζει σκληρότητα με μαλακό και σκληρό πυρήνα για τη διασφάλιση της αντοχής τους στην κόπωση και στην φθορά. Τα βασικά χαρακτηριστικά που πρέπει να συγκεντρώνουν τα υλικά των οδοντωτών τροχών είναι [10]:

- Πολύ καλή σκληρότητα που βοηθά στη λήψη προβλέψιμου αποτελέσματος μετά από θερμική κατεργασία. Η σκληρότητα είναι η ιδιότητα του χάλυβα που καθορίζει το βάθος και τη κατανομή της σκληρότητας από τις ψυχρές κατεργασίες
- Ελάχιστη περιεκτικότητα σε οξείδια που γενικά παρουσιάζουν δυσκολία ως προς την κατεργασία
- Καλή διαμορφωσιμότητα για καλύτερη σφυρηλάτηση και διάρκεια ζωής της μήτρας και ποιότητας της σφυρηλάτησης
- Μεγάλη κατεργασιμότητα
- Χαμηλή παραμόρφωση και σταθεροποιημένη βαφή
- Μη ανάπτυξη κόκκων στη σφυρηλάτηση σε υψηλή θερμοκρασία η οποία μπορεί να προκαλέσει στρέβλωση στην απότομη ψύξη και χαμηλότερη σκληρότητα.

Τις τελευταίες δεκαετίες έχει σημειωθεί σημαντική πρόοδος στην παραγωγή χαλύβων που θεωρούνται ιδανικοί για τη χρήση σε οδοντωτούς τροχούς. Οι χαλύβδινοι οδοντωτοί τροχοί αναπτύσσονται έτσι ώστε να έχουν ολικά ελέγξιμη σκληρότητα μειώνοντας την στρεβλότητα ή καθιστώντας την με ακρίβεια επιλήψιμη και προβλέψιμη. Οι χάλυβες με βελτιωμένες

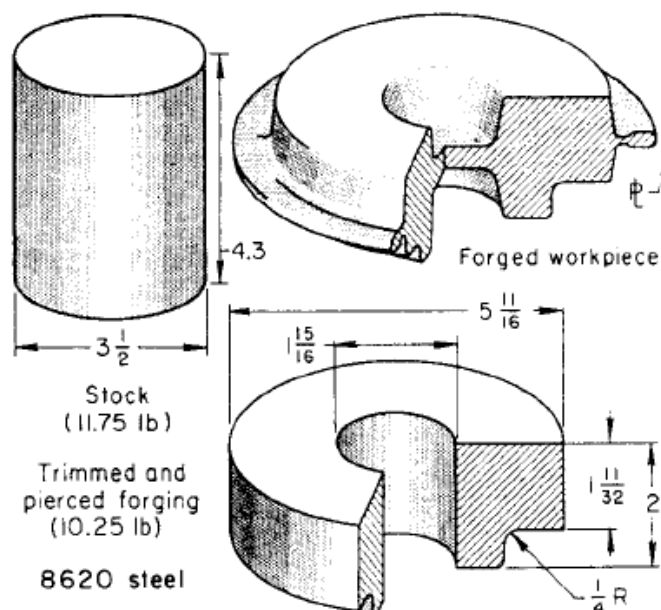
κατεργασίες και χημικές συστάσεις έχουν καθιερωθεί για τη μείωση της οξειδωσης των εσωτερικών κόκκων. Η κόπωση και η σκληρότητα βελτιώνονται με αυτά τα υλικά [10].

### 2.3 ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ

Η διαμόρφωση των οδοντωτών τροχών εξαρτάται από τα διαθέσιμα εργαλεία, τις ιδιαιτερότητες του σχεδιασμού, το κόστος παραγωγής και το είδος του υλικού από το οποίο θα κατασκευαστεί ο οδοντωτός τροχός. Για τη διαμόρφωση των οδοντωτών τροχών υπάρχουν διάφορες μέθοδοι όπως (ASM International, 2005): οι διαδικασίες αφαίρεσης μετάλλου (μορφοποίηση, φρεζάρισμα, λείανση, στίλβωση κτλ), διαδικασίες χύτευσης για το σχηματισμό τόσο των κενών των οδοντωτών τροχών όσο και για τη σχεδόν καθαρή διαμόρφωση του σχήματος των οδοντωτών τροχών, ψυχρή σφυρηλάτηση και διέλαση, διαδικασίες κονιομεταλλουργίας, τροχηλάτηση οδοντωτών τροχών και σφυρηλάτηση για την παραγωγή των διάκενων των οδοντωτών τροχών και με μεγάλη ακρίβεια διαμόρφωση του σχήματος τους.

Οι περισσότερες από αυτές τις διεργασίες αφορούν στους οδοντωτούς τροχούς για τους οποίους απαιτείται μικρή φθορά, χαμηλές σχέσεις μετάδοσης και σχετικά μικρή ακρίβεια στην προς μετάδοση δύναμη (Krenzer and Coniglio, 1989). Όταν η εφαρμογή περιλαμβάνει υψηλότερες τιμές για ένα ή περισσότερα από τα παραπάνω χαρακτηριστικά χρησιμοποιούνται οι σφυρήλατοι οδοντωτοί τροχοί.

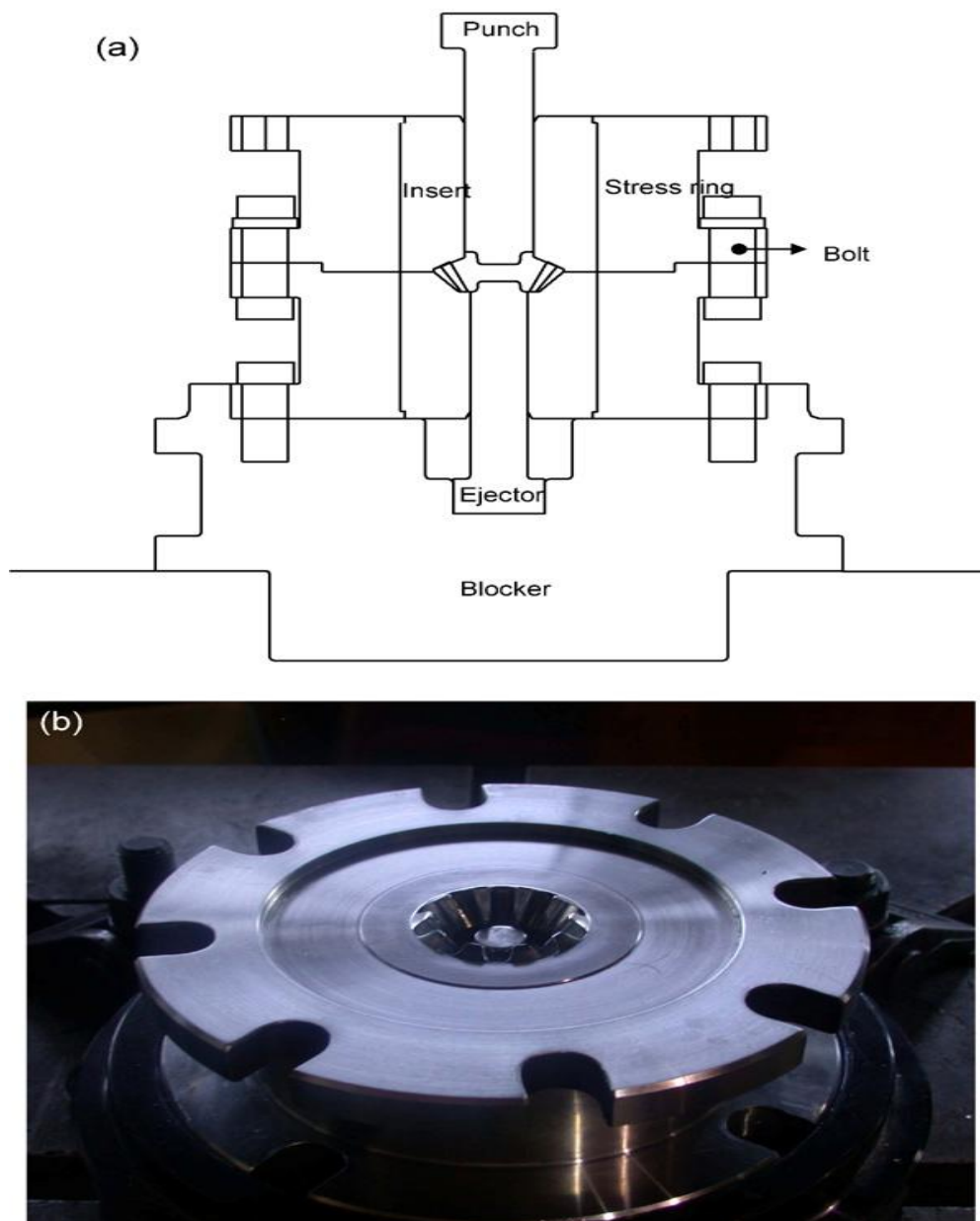
Η σφυρηλάτηση προτιμάται και χρησιμοποιείται ευρέως στη διαμόρφωση των οδοντωτών τροχών για την παραγωγή των διάκενων των τροχών που μπορούν να κοπούν/διαμορφωθούν στην τελική επιθυμητή διαμόρφωσή τους. Τα διάκενα των οδοντωτών τροχών μπορούν να παραχθούν με σφυρηλάτηση ανοικτής ή κλειστής μήτρας και θερμή σφυρηλάτηση.



**Σχήμα 2.15:** Δημιουργία διάκενου οδοντωτών τροχών με σφυρηλάτηση κλειστής μήτρας [11].

Μια από τις πρώτες διεργασίες σφυρηλάτησης για τη διαμόρφωση σχεδόν ή καθαρού σχήματος των οδοντωτών τροχών ήταν η διεργασία σφυρηλάτησης με υψηλό ρυθμό ενέργειας που αντιστοιχεί στη σφυρηλάτηση κλειστής μήτρας, θερμή ή ψυχρή, στην οποία το μέταλλο παραμορφώνεται σε ασυνήθιστα μεγάλες ταχύτητες. Στην ιδανική περίπτωση η τελική διαμόρφωση των σφυρηλάτων οδοντωτών τροχών γίνεται με ένα χτύπημα ή αλλιώς με λίγα χτυπήματα. Η ταχύτητα του εμβόλου αντίθετα από τη μάζα του παράγει την κύρια δύναμη σφυρηλάτησης.

Η παραγωγή των οδοντωτών τροχών είναι πιθανό να πραγματοποιηθεί με προγραμματισμένη ροή κόκκων που ακολουθεί τη διαμόρφωση των οδόντων χρησιμοποιώντας τη σφυρηλάτηση με μεγάλο ρυθμό ενέργειας. Στην περίπτωση των μετωπικών οδοντωτών τροχών αυτό επιτυγχάνεται με την πλευρική ροή του μετάλλου σε μια μήτρα που στην περιφέρεια της έχει την επιθυμητή διαμόρφωση του οδόντα. Η ελεγχόμενη ροή των κόκκων αυξάνει την δυνατότητα φορτίου χωρίς να αυξάνει το μέγεθος των οδόντων. Επιπλέον, η συγκεκριμένη διεργασία ελαχιστοποιεί την απαιτούμενη κατεργασία για την παραγωγή του τελικού τροχού. Παρά το γεγονός πως οι οδοντωτοί τροχοί είναι πιο εύκολο να σφυρηλατηθούν, οι ελικοειδής και οι σπειροειδείς κωνικοί τροχοί μπορούν επίσης να σφυρηλατηθούν αν οι διαμορφώσεις τους επιτρέπουν την εξώθηση των τροχών από τη μήτρα. Οι σφυρήλατοι τροχοί κατασκευάζονται από κράματα αλουμινίου, χάλυβα, χαλκό, τιτάνιο και κάποια κράματα που παρουσιάζουν ανθεκτικότητα από τη θερμότητα.



Σχήμα 2.16: Καλούπια-μήτρες σφυρηλάτησης οδοντωτών τροχών [7]

Οι τροχοί με διάμετρο από 5 έως 20μm είναι συνήθως σφυρηλάτοι με μικρή μηχανουργική χάρη. Η ζωή της μήτρας μειώνεται σημαντικά όταν σφυρηλατούνται τροχοί λεπτότερου βήματος.

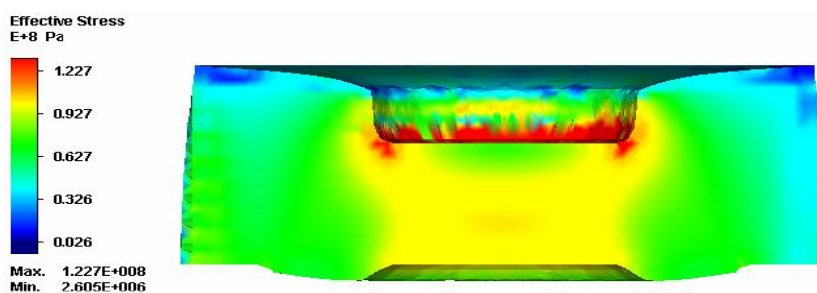
Η σφυρηλάτηση των τροχών με μια ανοχή της τάξης των 0.013mm και συνολικό σύνθετο σφάλμα της τάξης των 0.08mm, σφυρηλατούνται με διάκενο μεταξύ των οδόντων με απόκλιση γύρω στα 0.025mm και συνολική απόκλιση ίση με 0.089mm. Η διατήρηση των μικρών ανοχών στις διαστάσεις μπορεί να ελαχιστοποιήσει το φινίρισμα της κατεργασίας αλλά η εξοικονόμηση μπορεί να ξεπεραστεί από την κατασκευή μεγαλύτερων μήτρων και του κόστους διατήρησης. Κατά συνέπεια οι περισσότεροι σφυρηλάτοι τροχοί παρουσιάζουν ανοχή στην κατεργασία. Ένα επιφανειακό φινίρισμα από 0.5 έως 1.5μm στους οδόντες των

τροχών είναι πρακτικό. Όμως με ένα φινίρισμα της τάξης των 0.5μm οι τοπικές ατέλειες μπορούν να αυξήσουν το μέσο όρο στο 1.5μm ή ακόμα περισσότερο. Κατά συνέπεια θα ήταν ιδιαίτερα δύσκολο να διατηρηθεί ένα καλό φινίρισμα της επιφάνειας χωρίς να πραγματοποιηθεί λείανση [11].



**Σχήμα 2.17:** Τροχός μικρής διαμέτρου [7]

Η θερμή σφυρηλάτηση είναι η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη για τους οδοντωτούς τροχούς. Η μέγιστη και υψηλά ομοιόμορφη πυκνότητα διασφαλίζεται από το πλήρες γέμισμα της μήτρας σφυρηλάτησης. Όπως ήδη αναφέρθηκε κατά τη σφυρηλάτηση οι κόκκοι του υλικού ρέουν προς τη δεξιά γωνία στη διεύθυνση της τάσης που αναπτύσσεται στους οδόντες του τροχού κάτω από πραγματικό δυναμικό φορτίο.



**Σχήμα 2.18:** Παράδειγμα πίεσης πραγματικού φορτίου [7]

Η σφυρηλάτηση κύλισης χρησιμοποιείται για συμπλέγματα οδοντωτών τροχών για μεγάλη παραγωγικότητα. Οι οδοντωτοί τροχοί που παράγονται από θερμή και ψυχρή σφυρηλάτηση αποτελούν τους κύριους σφυρηλατούς τροχούς και οι συγκεκριμένες μέθοδοι χρησιμοποιούνται για την παραγωγή των διάκενων των οδοντωτών τροχών παρέχοντας καλύτερο έλεγχο της διαστασιολόγησης και περίπου 20% εξοικονόμηση υλικού.

Η καλή σφυρηλάτηση αποτελεί αναγκαιότητα αφού η άστοχη σφυρηλάτηση έχει ως αποτέλεσμα να μην υπάρχει καλός σχεδιασμός και καλή διαμόρφωση των οδοντωτών τροχών. Επιπλέον η προσεκτική διαμόρφωση των οδοντωτών τροχών μπορεί να διασφαλίσει

και την αποτελεσματικότητά τους. Οι μέθοδοι σφυρηλάτησης επιπλέον επηρεάζουν τη δυνατότητα κατεργασίας, τον εφελκυσμό, την τελική παραμόρφωση και το φινίρισμα της επιφάνειας των οδοντωτών τροχών.



**Σχήμα 2.19:** Οδοντωτοί τροχοί [7]

Οι νέες μέθοδοι ψυχρής σφυρηλάτησης συνδυάζουν τη σφυρηλάτηση με την κύλιση δημιουργώντας ένα καθαρό προφίλ σφυρηλάτου τροχού. Με καθαρούς σχηματισμούς οδόντων κατασκευάζονται οι διάφοροι εμπορικοί οδοντωτοί τροχοί που χρησιμοποιούνται στα αυτοκίνητα. Επίσης, οι οδόντες στους σπειροειδή κωνικούς τροχούς σχηματίζονται με πλαστική παραμόρφωση του θερμαινόμενου με επαγωγή διάκενου του κωνικού τροχού χρησιμοποιώντας τροχήλατο εργαλείο. Η διαδικασία παράγει οδόντες με ψηλό φινίρισμα και έχει ως αποτέλεσμα την εξοικονόμηση του υλικού.

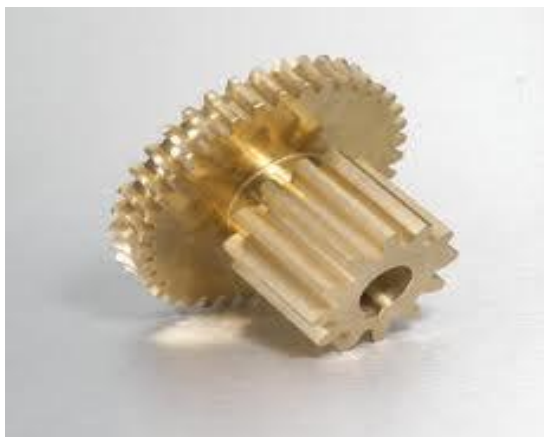
### **2.3.1 ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ (PRECISION FORGING)**

Γενικά οι εκτεταμένες κατεργασίες χύτευσης και διαμόρφωσης χρησιμοποιούνται για τη διαμόρφωση σύνθετων υλικών. Εξαιτίας της μεγάλης ποσότητας υλικού και ειδικά της εσωτερικής αντοχής των χυτών και διαμορφωμένων τεμαχίων όπως οι οδοντωτοί τροχοί τα τεμάχια αυτά σφυρηλατούνται και τελειώνουν με φινίρισμα. Η ακρίβεια στη σφυρηλάτηση είναι μια καινοτόμα κατεργασία για τη διαμόρφωση ιδιαίτερα υψηλών τάσεων σχεδόν καθαρού σχήματος συστατικών. Ανήκει στην κατηγορία της σφυρηλάτησης και είναι λιγότερο ακαριαία σε σχέση με την σφυρηλάτηση κλειστής μήτρας [12].

Είναι προφανές ότι ο όρος «ακρίβεια στη σφυρηλάτηση» αναφέρεται στην παραγωγή ενός καθαρού σχήματος ή σχεδόν καθαρού σχήματος στις συνθήκες σφυρηλάτησης. Ο όρος καθαρό σχήμα ή σχεδόν καθαρό υποδεικνύει ότι δεν απαιτείται καμία μεταγενέστερη κατεργασία ή φινίρισμα της επιφάνειας σφυρηλάτησης. Κατά συνέπεια ένα καθαρό σχήμα σφυρηλάτησης δεν απαιτεί περαιτέρω εργασία σε κάθε μια από τις σφυρηλατημένες



επιφάνειες παρά το γεγονός πως μπορεί να απαιτούνται δευτερεύουσες εργασίες για την παραγωγή μικρότερων οπών, στοιχείων κτλ [11].



**Σχήμα 2.20:** Τελική επιφάνεια (μετά από όλες τις διαδικασίες) [7]

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

Τα τελευταία χρόνια οι μέθοδοι διαμόρφωσης μέσω υπολογιστή (CAD/CAM) εφαρμόζονται στις διάφορες κατεργασίες σφυρηλάτησης [13]. Αυτή η υπολογιστική προσέγγιση εφαρμόζεται στη θερμή σφυρηλάτηση ακριβείας των σπειροειδών κωνικών, των μετωπικών και των ελικοειδών οδοντωτών τροχών στις συμβατικές πρέσες, γεγονός που επιτρέπει στο σχεδιαστή της μήτρας να εξετάζει λεπτομερώς τις διάφορες λειτουργικές παραμέτρους (φορτία, τάσεις και θερμοκρασία) στο σχεδιασμό της μήτρας.

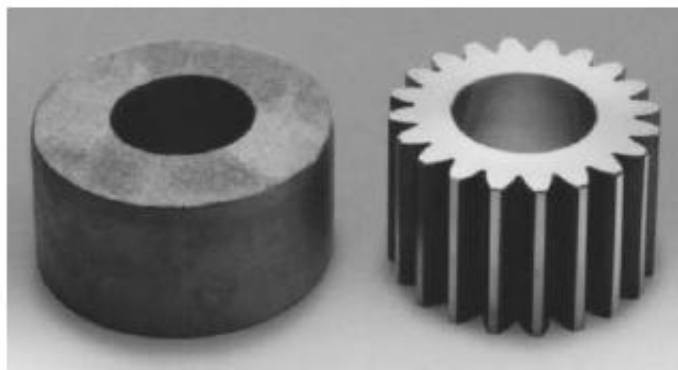


Σχήμα 2.21: Καλούπι σφυρηλάτησης [7]

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

Η εξοικονόμηση υλικού συνοδεύεται από εξοικονόμηση κόστους τόσο του υλικού όσο και της κατεργασίας. Επιπλέον οι σφυρηλατοί οδοντωτοί τροχοί ακριβείας έχουν το πλεονέκτημα του αυξανόμενου φορτίου. Αυτή η επιπρόσθετη δύναμη στο σχηματισμό της αυξανόμενης κόπωσης οφείλεται στη διαφορετική ροή κόκκων ανάμεσα στους τροχούς κοπής και στους σφυρηλατούς. Η ροή των κόκκων στους οδοντωτούς τροχούς κοπής καθορίζεται από τον προσανατολισμό της έλασης της ράβδου και δεν έχει καμία σχέση με το περίγραμμα των οδόντων του τροχού.

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



**Σχήμα 2.22:** Εξοικονόμηση υλικού/ βάρους χρησιμοποιώντας τη σφυρηλάτηση σχεδόν καθαρού σχήματος [11].

Οι κατεργασίες διαμόρφωσης ξεκινούν με χαλύβδινες ράβδους που συνήθως περιστρέφονται και γυαλίζονται προκειμένου να βελτιωθεί η επιφάνεια τους και κόβονται στο επιθυμητό ακριβές βάρος [11]. Το ακριβές βάρος είναι κρίσιμο επειδή η ποσότητα του χάλυβα πρέπει να γεμίζει πλήρως τη μήτρα για να παράγεται πλήρως το προφίλ του τροχού. Πριν τη σφυρηλάτηση οι ράβδοι θερμαίνονται από τους 925° έως τους 1230° C σε ηλεκτρικούς φούρνους που ελέγχονται από οπτικά πυρόμετρα με ακρίβεια  $\pm 14^{\circ}$  C [11].

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



**Σχήμα 2.23:** Τελικός τροχός (μετά από όλες τις διαδικασίες) [7]

Οι οδοντωτοί τροχοί σχεδόν καθαρού σχήματος μπορούν να παραχθούν από οποιοδήποτε σκληρυμένο χάλυβα στις πέντε βασικές διαμορφώσεις τους: σπειροειδείς κωνικούς, ελικοειδείς, απευθείας κωνικοί, μετωπικοί τροχοί με 1mm ανοχή και μετωπικοί οδοντωτοί τροχοί με ανοχές από 0.1 έως 0.3mm. Οι διάμετροι των σχεδόν καθαρού σχήματος οδοντωτών τροχών μπορούν να είναι πάνω από 425mm με ανοχές από 0.1 έως 1.5mm. ειδικότερα για τις διάφορες διαμορφώσεις οδοντωτών τροχών ισχύει [11]:

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



**Σχήμα 2.24:** Παράδειγμα σφυρήλατου οδοντωτού τροχού ακριβείας σχεδόν καθαρού σχήματος [11].

### 2.3.2 ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ

Οι σφυρήλατοι οδοντωτοί τροχοί παρουσιάζουν μεγαλύτερη αντοχή από τους αντίστοιχους τροχούς που κατασκευάζονται με χύτευση ή με άλλες μηχανικές κατεργασίες.

Οι σφυρήλατοι οδοντωτοί τροχοί από σίδηρο ή αλουμίνιο μπορούν να κατασκευαστούν μόνο με θερμή σφυρηλάτηση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μην επιτυγχάνεται η σκληρότητα που μπορεί να επιτευχθεί με την ψυχρή σφυρηλάτηση και κατά συνέπεια, αυξάνεται η δυσκολία πραγματοποίησης δευτερευουσών κατεργασιών στους τροχούς.



**Σχήμα 2.25:** Οδοντωτός τροχός (έχασε τμήμα του λόγω κακής επεξεργασίας) [7]

Η παραγωγή των σφυρήλατων οδοντωτών τροχών απαιτεί ένα αρκετά σημαντικό κόστος για την κατεργασία τους αλλά και για τα εργαλεία που χρησιμοποιούνται. Στην περίπτωση της θερμής σφυρηλάτησης οδοντωτών τροχών απαιτείται ειδική κατασκευή στέγασης της μηχανής πραγματοποίησής της γεγονός που αυξάνει το κόστος της κατεργασίας [14].



**Σχήμα 2.26:** Βλάβες σε οδόντες (εξαρτήματα που έπαθαν βλάβη λόγω κακής επεξεργασίας) [7]

Οι αστοχίες που μπορούν να παρατηρηθούν στους σφυρήλατους οδοντωτούς τροχούς μπορεί να οφείλονται στις λανθασμένες περιελίξεις τους, στο μη σωστό γέμισμα της μήτρας ή στη μη αντοχή της. Επειδή με τη σφυρηλάτηση οι οδοντωτοί τροχοί είναι περιορισμένου σχήματος είναι πιθανή και η υποβάθμιση της ποιότητάς τους. Τέλος για την κατασκευή των σφυρήλατων οδοντωτών τροχών απαιτούνται συνήθως περισσότερα βήματα κατεργασίας[15].

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΤΗΣ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ ΤΩΝ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ

Η ανάπτυξη των κατεργασιών σφυρηλάτησης και του σχεδιασμού μήτρων για την πραγματοποίηση της αποτελούν μια μέθοδο ακριβείας για την παραγωγή ενός εύρους σφυρήλατων υλικών όπως είναι οι σφυρήλατοι οδοντωτοί τροχοί. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα σχεδόν καθαρού σχήματος σφυρήλατων τροχών που παρουσιάζει μεγάλη ομοιότητα με τους μηχανικά κατεργασμένους οδοντωτούς τροχούς είναι οι κωνικοί και κυλινδρικοί σφυρήλατοι οδοντωτοί τροχοί. Οι συγκεκριμένοι τροχοί παρουσιάζουν βασικά πλεονεκτήματα όπως τη μείωση στο χρησιμοποιούμενο υλικό και τις μικρές ανοχές στην μηχανολογική τους κατεργασία που οδηγούν τόσο σε μείωση του χρόνου κατεργασίας όσο και σε μείωση του κόστους αποδίδοντας παράλληλα σημαντική αύξηση στην αντοχή των συγκεκριμένων τροχών εξαιτίας της επιθυμητής μακροδομής του τροχού. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι απαιτούμενα για όλα τα σφυρήλατα τεμάχια [16].

Τόσο η σφυρηλάτηση ανοικτής όσο και η σφυρηλάτηση κλειστής μήτρας είναι οι δύο πιο συνηθισμένες κατεργασίες που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή των σφυρήλατων οδοντωτών τροχών σχεδόν καθαρού σχήματος. Συνήθως υπάρχουν συνδυασμοί μη μόνιμης κατάστασης της κατεύθυνσης της ροής διαφόρων μετάλλων ή σύνθετων σχημάτων μήτρας [17].

Τις τελευταίες δεκαετίες υπάρχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την παραγωγή οδοντωτών τροχών με τις μεθόδους ακριβείας σφυρηλάτησης. Η συγκεκριμένη μέθοδος αναπτύχθηκε εξαιτίας των υψηλών ρυθμών παραγωγής, τη βελτιωμένη αντοχή που προσδίδει στο σφυρήλατο τροχό και θεωρείται ότι πλεονεκτεί σημαντικά σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους κοπής.

Στους σφυρήλατους οδοντωτούς τροχούς όπως και σε κάθε κατεργασία σφυρηλάτησης είναι σημαντική η ανάλυση των τάσεων στη διεπιφάνεια εργαλείου-τεμαχίου που έχουν επίδραση στην παραμόρφωση του υλικού. Η ανάλυση των αναπτυσσόμενων τάσεων γίνεται με τρεις μεθόδους: τη μέθοδο «λόφου-τριβής», τη μέθοδο των άνω οριακών φορτίσεων και τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο αναφέρονται παραδείγματα τριών βασικών μεθόδων ανάλυσης της σφυρηλάτησης των οδοντωτών τροχών. Συγκεκριμένα αναφέρεται η μέθοδος λόφου τριβής για μετωπικούς οδοντωτούς τροχούς σε μικτό σύστημα συντεταγμένων και σε κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων όπως αναπτύχθηκε από τους N. R. Chitkara and M. A. Bhutta, [18] και η μέθοδος άνω οριακών φορτίσεων για μετωπικούς τροχούς όπως προτάθηκε από τον Choi και τους συνεργάτες του [19]. Τέλος παρουσιάζεται η θεωρία των πεπερασμένων στοιχείων στη σφυρηλάτηση οδοντωτών τροχών.

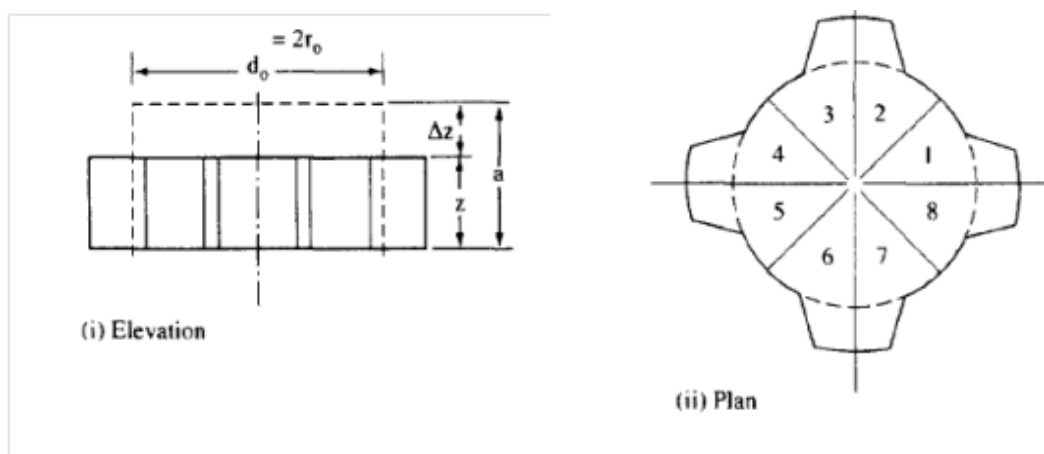
### 3.1. ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΟΥ «ΛΟΦΟΥ ΤΡΙΒΗΣ» (SLAB METHOD OF ANALYSIS)

Η μέθοδος λόφου – τριβής είναι επίσης γνωστή ως προσέγγιση ισορροπίας ελεύθερου σώματος και χρησιμοποιείται κυρίως για την ανάλυση των προβλημάτων πλαστικής ροής. Αρχικά προτάθηκε από τον Siebel ο οποίος τη χρησιμοποίησε για να αναλύσει τις τάσεις σε διάφορα προβλήματα ροής μετάλλων. Εφαρμόζοντας αυτήν τη μέθοδο αρχικά επιλέγεται από το υλικό που υπόκειται σε πλαστική παραμόρφωση μια πλάκα απειροελάχιστου μεγέθους στο επίπεδο της οποίας ασκούνται ορθές και διατμητικές τάσεις. Με βάση τις θεωρούμενες τάσεις στο στοιχειώδες δίσκο/πλάκα εφαρμόζεται το ισοζύγιο δυνάμεων και οι διαφορικές εξισώσεις που προκύπτουν για τη στατική ισορροπία, επιλύονται σε συνδυασμό με την υπόθεση ενός κατάλληλου κριτηρίου για τις υπάρχουσες συνοριακές συνθήκες[18].

Ο Altan [20] και ο Bocharon και οι συνεργάτες του [21], θεωρούν ότι η πλαστική παραμόρφωση είναι περιορισμένη στα σφυρήλατα υλικά, ενώ δεν σχηματίζεται καμία απότομη μεταβολή. Η απλοποιημένη αυτή παραδοχή υιοθετείται και από τους Chitkara και Brutta [18] για την ανάλυση της διαδικασίας σφυρηλάτησης ενός μετωπικού οδοντωτού τροχού από μια αρχικά κυλινδρική μπιλιέτα. Επιπλέον για τη συγκεκριμένη ανάλυση που θα παρουσιαστεί στη συνέχεια της παραγράφου θεωρείται ότι η ακτίνα της αρχικής κυλινδρικής μπιγιέτας είναι ίση με την ακτίνα του κυλινδρικού τροχού που πρόκειται να σφυρηλατηθεί. Επίσης η μήτρα σφυρηλάτησης έχει το ίδιο σχήμα και αριθμό οδόντων με τη θηλυκή στάσιμη μήτρα που αποδίδει το σχήμα και το μέγεθος του οδοντωτού τροχού που σφυρηλατείται. Στην εφαρμογή της μεθόδου ανάλυσης λόφου τριβής για λόγους απλοποίησης το σχήμα κάθε οδόντα του τροχού θεωρείται ότι είναι επίπεδο αλλά κωνικό οπότε η σχετική γωνία λαμβάνεται διπλάσια από τη συνήθη γωνία πίεσης των  $14,5^\circ$  [22]. Η γεωμετρία του στοιχείου αρχικά χωρίζεται σε 2N ίδια τμήματα όπου N ο αριθμός των οδόντων του τροχού [23]. Κάθε ένα από τα τμήματα αυτά υποδιαιρείται σε τρεις ζώνες παραμόρφωσης 1,2 και 3 όπου θεωρείται πλαστική ροή.

Οι Chitkara και Bhutta [18] χρησιμοποιούν δύο είδη ανάλυσης λόφου-τριβής για τη σφυρηλάτηση του στερεού μετωπικού οδοντωτού τροχού. Η μία θεωρεί ότι η παραμόρφωση πραγματοποιείται και στις τρεις ζώνες και η ανάλυση γίνεται σε ένα μικτό σύστημα κυλινδρικών και καρτεσιανών συντεταγμένων ενώ η δεύτερη γίνεται σε ένα καθαρά κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων.

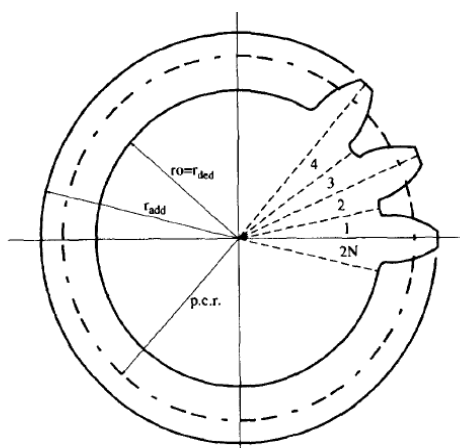




**Σχήμα 3.1:** Υποδιαίρεση ενός μετωπικού οδοντωτού τροχού ( $N=4$ ) σε ίδιες περιοχές παραμόρφωσης [18].

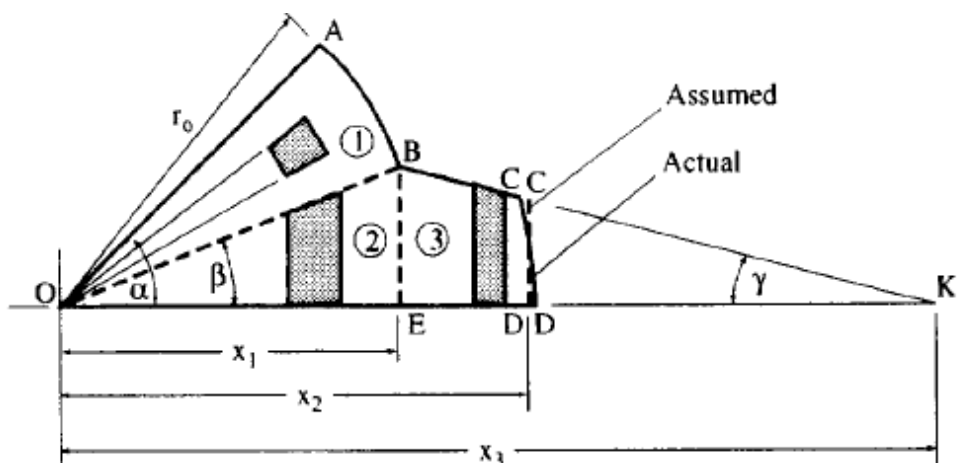
### 3.1.1 ΜΕΘΟΔΟΣ ΛΟΦΟΥ ΤΡΙΒΗΣ ΣΕ ΜΙΚΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΩΝ

Στο Σχήμα 3.2 φαίνονται τα όρια των ζωνών 1, 2 και 3 στα οποία ένα ομοιόμορφης παραμόρφωσης στοιχείο έχει υποδιαιρεθεί σε  $2N$  ίσα στοιχεία που προέρχονται από το σχηματισμό ενός μετωπικού οδοντωτού τροχού με  $N$  οδόντες που ισαπέχουν μεταξύ τους [18].



**Σχήμα 3.2:** Υποδιαίρεση μετωπικού οδοντωτού τροχού σε όμοιες ζώνες παραμόρφωσης  $N=15$  [18]

Οι τάσεις στα μικρά στοιχεία αναπτύσσονται στη Ζώνη 1 όπου εκφράζονται σε κυλινδρικές συντεταγμένες ενώ στις Ζώνες 2 και 3 εκφράζονται σε καρτεσιανές συντεταγμένες. Στη Ζώνη 1 το υλικό δεν ρέει κυκλικά δηλαδή  $de_{r1}=0$ . Στις Ζώνες 2 και 3 οι ρυθμοί παραμόρφωσης είναι ίσοι. Στη Ζώνη 3 για τη διευκόλυνση της ανάλυσης το προφίλ του σχήματος των οδόντων του τροχού θεωρείται κωνικό όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.3: Υποδιαίρεση της περιοχής μέσα στις ζώνες [18]

Για τον καθορισμό των αξονικών τάσεων και των φορτίων στις διαφορετικές ζώνες 1,2 και 3 η ανάλυση λόφου τριβής ξεκινάει από τη ζώνη 3 θεωρώντας τη στατική ισορροπία των δυνάμεων στον άξονα x εξαιτίας των τάσεων που δρουν στο στοιχειώδες στοιχείο που εξετάζεται. Για τη Ζώνη 3 η ισορροπία δυνάμεων στον άξονα x γράφεται:

$$\sigma_x \cdot h \cdot y - (\sigma_x + d\sigma_x) \cdot h \cdot (y - dy) - p \cdot h \cdot \tan \gamma \cdot dx - 2 \cdot m \cdot k \cdot y \cdot dx - m \cdot k \cdot h \cdot dx = 0 \quad (1)$$

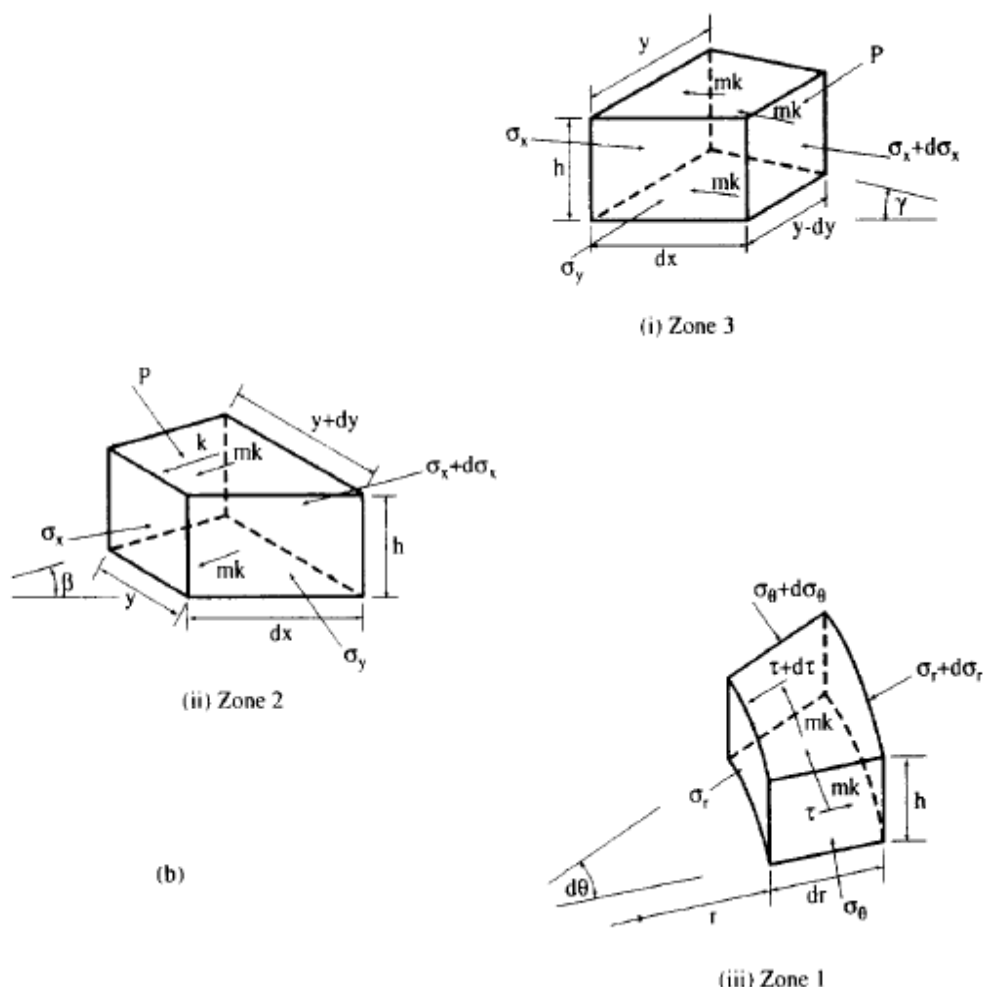
και για τον y άξονα είναι:

$$p \cdot h \cdot dx - \sigma_y \cdot h \cdot dx - m \cdot k \cdot h \cdot dx \cdot \tan \gamma = 0 \quad (2)$$

όπου  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ , είναι οι τάσεις που αναπτύσσονται στο x, y επίπεδο των καρτεσιανών συντεταγμένων, h είναι το στιγμιαίο ύψος, m ο συντελεστής τριβής που αναπτύσσεται ανάμεσα στις επιφάνειες, k η αποδιδόμενη διατμητική τάση και p η μέση πίεση που ορίζεται ως P/A όπου P είναι το φορτίο στη μήτρα και A η διασταυρούμενη επιφάνεια της [18] ενώ  $\gamma$  είναι η ημιγωνία όπως ορίζεται στο Σχήμα 25.

Για μια μικρή κίνηση της κορυφής της μήτρας οι ρυθμοί παραμόρφωσης στις x και y κατευθύνσεις στη ζώνη 3 μπορούν να συγκριθούν με τους αντίστοιχους ρυθμούς παραμόρφωσης στην z κατεύθυνση εξαιτίας μιας μεγάλης ποσότητας υλικού που εισέρχεται στη Ζώνη 3 από τις ζώνες 1 και 2. Με βάση αυτή την παραδοχή μπορεί να υποθεθεί ότι  $d\epsilon_x = d\epsilon_y$  και άρα  $\sigma_x = -\sigma_y$  και η εξίσωση (2) γράφεται:

$$p + \sigma_x - mk \tan \gamma = 0 \quad (3)$$



**Σχήμα 3.4:** Τάσεις που αναπτύσσονται στο στοιχείο στις Ζώνες 1,2,3 με την ανάλυση λόφου τριβής σε μικτό σύστημα συντεταγμένων[18].

Αγνοώντας τα μεγαλύτερης τάξης διαφορικά και αντικαθιστώντας την πίεση  $p$  από την εξίσωση 3 στην 1 και θεωρώντας τις συνοριακές συνθήκες και χρησιμοποιώντας το κριτήριο τάσεων  $(\sigma_z - \sigma_x) = \bar{\sigma}$  προκύπτει μια έκφραση για την τάση  $\sigma_z$  που είναι η τάση θλίψης που αναπτύσσεται στο στοιχείο από τη μήτρα στη Ζώνη 3 για κάθε απόσταση  $x$  από το σημείο 0 (Σχήμα 26) για  $x_1 < x < x_2$  [18].

$$\sigma_{z3} = \bar{\sigma} \left( 1 - (2m)^2 \left\{ \frac{(x_2 - x)}{h} + \frac{1}{\sin^2 \gamma} \ln \left| \frac{(x_3 - x)}{(x_3 - x_2)} \right| \right\}^2 \right)^{1/2} \quad (4)$$

Όπου με  $\bar{\sigma}$  συμβολίζεται η ροή τάσης του υλικού.

Το συνολικό φορτίο σφυρηλάτησης στη μήτρα που προέρχεται από το υλικό στη Ζώνη 3 είναι:

$$P_3 = \int_{x_1}^{x_2} \sigma_{z_3} (x_3 - x) \tan \gamma dx \quad (5)$$

και αντικαθιστώντας το  $\sigma_{z_3}$  από την εξίσωση (4) προκύπτει τελικά η εξίσωση για το φορτίο της μήτρας στη Ζώνη 3:

$$P_3 = \int_{x_1}^{x_2} \bar{\sigma} (1 - (2m)^2 \left\{ \frac{(x_2 - x)}{h} + \frac{1}{\sin^2 \gamma} \ln \left| \frac{(x_3 - x)}{(x_3 - x_2)} \right| \right\}^2)^{1/2} (x_3 - x) \tan \gamma dx \quad (6)$$

Για την Ζώνη 2 από την στατική ισορροπία των δυνάμεων στους άξονες x και y εξαιτίας της δράσης των τάσεων που ασκούνται σε ένα στοιχειώδες τμήμα και την εφαρμογή του κριτηρίου τάσεων  $(\sigma_z - \sigma_x) = \bar{\sigma}$  όπως επίσης και των ανάλογων συνοριακών συνθηκών που δηλώνουν ότι οι αξονικές τάσεις στις Ζώνες 2 και 3 πρέπει να είναι ίσες, προκύπτει η αξονική τάση  $\sigma_{z_2}$  σε κάθε απόσταση  $x_1 < x < x_2$ :

$$\sigma_{z_2} = \bar{\sigma} \left( 1 + \frac{2}{\sqrt{3} \sin^2 \beta} \ln \left| \frac{x_1}{x} \right| + \frac{2m}{\sqrt{3}} \left\{ \frac{(x_2 - x_1)}{h} + \frac{1}{\sin^2 \gamma} \ln \left| \frac{(x_3 - x_1)}{(x_3 - x_2)} \right| \right\} \right) \quad (7)$$

Και το αξονικό φορτίο σφυρηλάτησης  $P_2$  που ασκείται από το υλικό στη μήτρα στη Ζώνη 2 είναι:

$$P_2 = \int_0^{x_1} \sigma_{z_2} x \tan \beta dx \quad (8)$$

και αντικαθιστώντας την τάση  $\sigma_{z_2}$  από την εξίσωση (7) προκύπτει:

$$P_2 = \frac{\bar{\sigma} x_1^2 \tan \beta}{\sqrt{3}} \left( \sqrt{3} + \frac{1}{\sin^2 \beta} + 2m \left\{ \frac{1}{\sin^2 \gamma} \ln \left| \frac{(x_3 - x_1)}{x_3 - x_2} \right| + \frac{3x_2 - 2x_1}{h} \right\} \right) \quad (9)$$

Για την εκτίμηση της αξονικής τάσης  $\sigma_{z_1}$  στη Ζώνη 1 χρησιμοποιείται η κατανομή των τάσεων σε μια στοιχειώδη λωρίδα της Ζώνης 1 που φαίνεται στο Σχήμα 3.2. Η έκφραση της τάσης  $\sigma_{z_1}$  σε κάθε ακτινική απόσταση r μετά την αντικατάσταση των απαραίτητων συνοριακών συνθηκών και του κριτηρίου τάσεων  $\sigma_z - \sigma_r = \bar{\sigma}$  είναι [18]:

$$\sigma_{z_1} = \frac{2\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} \left( 1 + \frac{mr(\theta - \beta)}{h} + \frac{1}{4(\alpha - \beta)} \{ (\alpha - \theta)^2 - (\alpha - \beta)^2 \} + R_r \{ \cos \beta + \sin \beta \} \right) \quad (10)$$

$$\text{Όπου : } R_r = \frac{m}{h} \{ x_2 - r \cos \beta \} + \frac{1}{\sin^2 \beta} \ln \left| \frac{r_0}{r} \right| + \frac{m}{\sin^2 \gamma} \ln \left| \frac{(x_3 - x_1)}{(x_3 - x_2)} \right| \quad (11)$$

Το αξονικό φορτίο σφυρηλάτησης  $P_1$  στη Ζώνη 1 είναι:

$$P_1 = \int_{\beta}^{\alpha} \int_0^{r_0} \sigma_{z_1} r dr d\theta \quad (12)$$

Και αντικαθιστώντας την τάση  $\sigma_{z_1}$  από την εξίσωση (11) προκύπτει τελικά:

$$P_1 = \frac{\bar{\sigma} r_o^2 (\alpha - \beta)}{\sqrt{3}} \left( 1 - \frac{(\alpha - \beta)}{6} + \frac{mr_o}{6} + \frac{mr_o}{3h} (\alpha - \beta) + \right. \\ \left. \left( \frac{m}{3h} \{ 3x_2 - 2x_1 \} + \frac{m}{\sin^2 \gamma} \ln \left| \frac{(x_3 - x_1)}{(x_3 - x_2)} \right| + \frac{1}{\sin^2 \beta} \right) \{ \cos \beta + \sin \beta \} \right) \quad (13)$$

Το συνολικό φορτίο σφυρηλάτησης  $P_t$  για το ισχύον ύψος  $h$  του συνολικού στοιχείου είναι:

$$P_t = 2 \cdot N_i \{ P_1 + P_2 + P_3 \} \quad (14)$$

Όπου  $N_i$  είναι ο αριθμός των οδόντων στην περιφέρεια του μετωπικού οδοντωτού τροχού και η μέση αδιάστατη πίεση είναι:

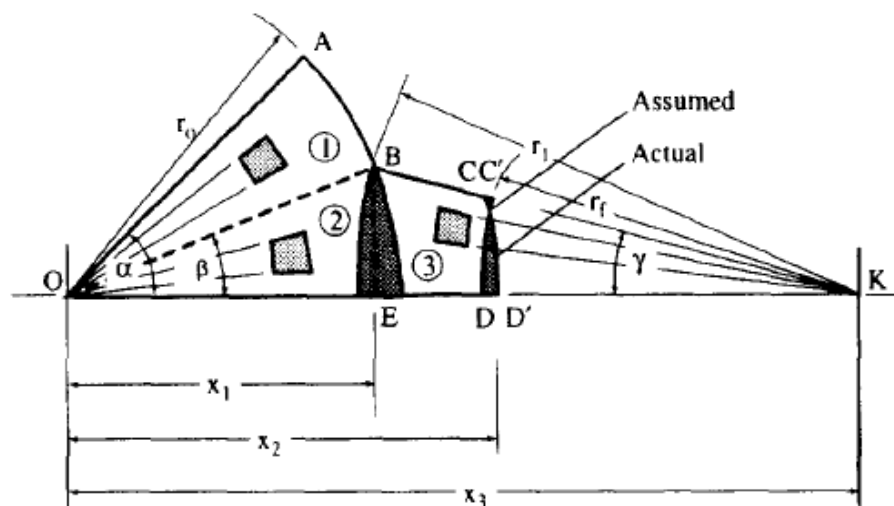
$$\frac{p_{av}}{\sigma} = \frac{P_t}{\sigma A} \quad (15)$$

Όπου  $A$  είναι η τρέχουσα προβαλλόμενη επιφάνεια του προϊόντος που βρίσκεται σε επαφή με το εργαλείο μέχρι το  $x=x_2$  όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3.

### 3.1.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΛΟΦΟΥ ΤΡΙΒΗΣ ΣΕ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΩΝ

Στην ανάλυση αυτή όλες οι τάσεις των στοιχείων αναλύονται και για τις τρεις Ζώνες σε κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων. Με βάση το Σχήμα 3.6 γίνονται οι ακόλουθες παραδοχές [18]:

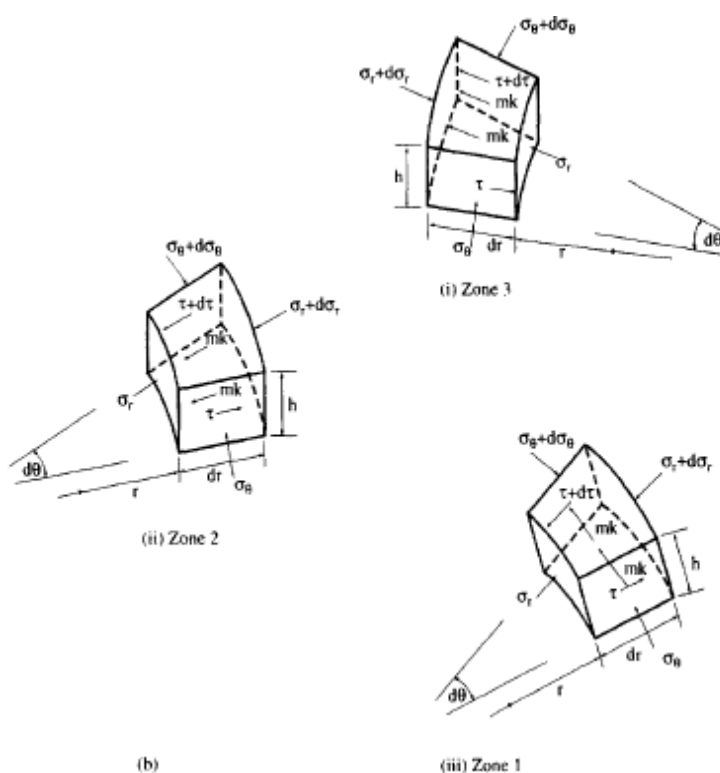
1. το υλικό στη Ζώνη 3 συγκεντρώνεται προς την κορυφή  $K$
- 2.η κορυφή  $K$  λαμβάνεται ως η αρχή της παραμόρφωσης της Ζώνης 3
- 3.το διακεκομμένο τμήμα στην άκρη της παραμορφωμένης μπιγιέτας στη Ζώνη 3 είναι ελεύθερο από τάσεις.
- 4.η μεταβατική περιοχή μεταξύ των Ζωνών 2 και 3 θεωρείται πως είναι η διασταυρούμενη επιφάνεια  $BE$ .
5. οι τάσεις στη μεταβατική περιοχή είναι ομοιόμορφες παντού.



Σχήμα 3.5: Υποδιαίρεση περιοχής σε ζώνες [18]

Θεωρώντας τη στατική ισορροπία των δυνάμεων κατά μήκος της ακτινικής διεύθυνσης εξαιτίας των τάσεων που ασκούνται σε μια στοιχειώδη λωρίδα της ζώνης 3 και φαίνονται στο Σχήμα 3.5 προκύπτει:

$$\sigma_r h r d\theta = (\sigma_r + d\sigma_r) h (r + dr) d\theta - d\tau h dr \cos \frac{d\theta}{2} - 2\sigma_\theta h dr \sin \frac{d\theta}{2} + 2mk r dr d\theta = 0 \quad (16)$$



Σχήμα 3.6: Μέθοδος ανάλυσης λόφου-τριβής σε κυλινδρικές συντεταγμένες [18].

Για να απλοποιηθεί η εξίσωση (16) θεωρούνται αμελητέα τα διαφορικά μεγαλύτερης τάξης και χρησιμοποιείται το γεγονός πως για μικρές γωνίες ισχύει:  $\sin d\theta/2=d\theta/2$  και  $\cos d\theta/2=d\theta/2=1$ . Στην επιφάνεια συμμετρίας ED ( $\theta=0$ ) θεωρείται μηδενική επαπτομενική ταχύτητα του υλικού. Οι διατμητικές τάσεις εξαιτίας της τριβής στη διεπιφάνεια εργαλείου/υλικού λαμβάνεται ίση με  $\tau=m \cdot k \cdot \theta/\gamma$  δηλαδή όταν  $\theta=0$  είναι  $\tau=0$  και επίσης η τάση  $\tau$  μεταβάλλεται γραμμικά με τη γωνία  $\theta$  γύρω από την κορυφή K. Μετά τις απαραίτητες αντικαταστάσεις, ολοκληρώσεις και την εισαγωγή του κριτηρίου τάσης  $\sigma_z-\sigma_r=\bar{\sigma}$  και των αναγκαίων οριακών συνθηκών όπου για παράδειγμα στο  $r=r_f$  δηλαδή στο CD είναι  $\sigma_r=0$  η εξίσωση (16) γράφεται [18]:

$$\sigma_{z_3} = \bar{\sigma} \left( 1 + \frac{2m}{\sqrt{3}} \left( \frac{r-r_f}{h} + \frac{1}{\gamma} \ln \left| \frac{r}{r_f} \right| \right) \right) \quad (17)$$

Το φορτίο σφυρηλάτησης στο λόφο είναι:

$$P_3 = \int_0^\gamma \int_r^{r_1 \cos \gamma / \cos \theta} \sigma_{z_3} r dr d\theta \quad (18)$$

ή

$$P_3 = \frac{\bar{\sigma} x_{31}^2}{2} \left( \tan \gamma \left( 1 + \frac{2m}{3\sqrt{3}} \{r_1 - 3r_f\} + \frac{m}{2\sqrt{3}\gamma} \{2 \ln \left| \frac{x_{31}}{\gamma} \right| - 1\} + \frac{2m x_{31}}{3\sqrt{3}h} \ln \left| \tan \left\{ \frac{\pi}{4} + \frac{\gamma}{2} \right\} \right| - \frac{m}{\sqrt{3}\gamma} \int_0^\gamma \frac{\ln(\cos \theta)}{\cos^2 \theta} d\theta \right) - \frac{\bar{\sigma} r_f^2}{2} \left( \gamma \left\{ 1 - \frac{2m r_f}{3\sqrt{3}h} \right\} - \frac{m}{2\sqrt{3}} \right) \right) \quad (19)$$

Για την ανάλυση της παραμόρφωσης στη Ζώνη 2 θεωρείται όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.5 ένας στοιχειώδης δίσκος με αναπτυσσόμενες τάσεις που εκφράζονται ως προς το κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων. Το ισοζύγιο των στατικών δυνάμεων στην ακτινική διεύθυνση θεωρώντας ότι  $\tau=k\theta/\beta$  μετά την ολοκλήρωση δίνει:

$$\sigma_{r_2} = \frac{k}{\beta} \ln \left| \frac{r_o}{r} \right| + \frac{2mk}{h} \{r_o + r_1 - r_f - r\} + \frac{mk}{\gamma} \ln \left| \frac{r_1}{r_f} \right| \quad (20)$$

Προκειμένου να εξαχθούν οι σχέσεις για το  $\sigma_{r_2}$  και το  $\sigma_{z_3}$  δηλαδή οι σχέσεις των τάσεων για τις Ζώνες 2 και 3 οι Chitkara και Bhutta (1996) μετράνε την ακτίνα  $r$  από τα σημεία O και K αντίστοιχα. Η εξίσωση (20) με τη χρήση του καταλλήλου κριτηρίου  $\sigma_z=\bar{\sigma}+\sigma_r$  γίνεται:

$$\sigma_{z_2} = \bar{\sigma} \left( 1 + \frac{1}{\sqrt{3}\beta} \ln \left| \frac{r_o}{r} \right| + \frac{2m}{\sqrt{3}} \left\{ \frac{(r_o + r_1 - r_f - r)}{h} + \frac{1}{2\gamma} \ln \left| \frac{r_1}{r_f} \right| \right\} \right) \quad (21)$$

Το φορτίο σφυρηλάτησης στη μήτρα στη Ζώνη 2 είναι:

$$P_2 = \int_0^{\beta} \int_0^{x_1/\cos\theta} \sigma_{z2} r dr d\theta \quad (22)$$

ή

$$P_2 = \frac{\bar{\sigma} x_1^2}{2} \left( \tan \beta \left( 1 + \frac{1}{2\sqrt{3}\beta} \{ 2 \ln | \frac{r_o}{x_1} | + 1 \} + \frac{2m}{\sqrt{3}h} \{ (r_o + r_1 - r_f) - \frac{r_o}{3} + \frac{h}{2\gamma} \ln(\frac{r_1}{r_f}) \} \right) \right. \\ \left. - \frac{2mx_1}{3\sqrt{3}h} \ln | \tan \{ \frac{\pi}{4} + \frac{\beta}{2} \} | + \frac{1}{\sqrt{3}\beta} \int_0^{\beta} \frac{\ln(\cos \theta)}{\cos^2 \theta} d\theta \right) \quad (23)$$

Η διαδικασία για τον υπολογισμό της αξονικής τάσης στη Ζώνη 1 για τη σφυρηλάτηση του μετωπικού οδοντωτού τροχού δίνει:

$$\sigma_{z1} = \frac{2\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} \left( 1 + \frac{1}{2} \left\{ \frac{(\alpha - \theta)^2 - (\alpha - \beta)^2}{2(\alpha - \beta)} + \frac{1}{\beta} \ln | \frac{r_o}{r} | \right\} + R_1 \right) \quad (24)$$

$$\text{Όπου } R_1 = \frac{m}{h} (r(\theta - \beta) + (r_o + r_1 - r_f - r) + \frac{h}{2\gamma} \ln | \frac{r_1}{r_f} |) \quad (25)$$

Το φορτίο σφυρηλάτησης στη μήτρα που βρίσκεται σε επαφή με τη Ζώνη 1 είναι:

$$P_1 = \int_{\beta}^{\alpha} \int_0^{r_o} \sigma_{z1} r dr d\theta \quad (26) \text{ ή}$$

$$P_1 = \frac{\bar{\sigma}(\alpha - \beta)r_o^2}{\sqrt{3}} \left( 1 - \frac{(\alpha - \beta)}{6} + \frac{1}{4\beta} + \frac{m}{2h} \{ 2(r_o + r_1 - r_f) + \frac{h}{\gamma} \ln | \frac{r_1}{r_f} | \} + \frac{mr_o}{3h} \{ (\alpha - \beta) - 2 \} \right) \quad (27)$$

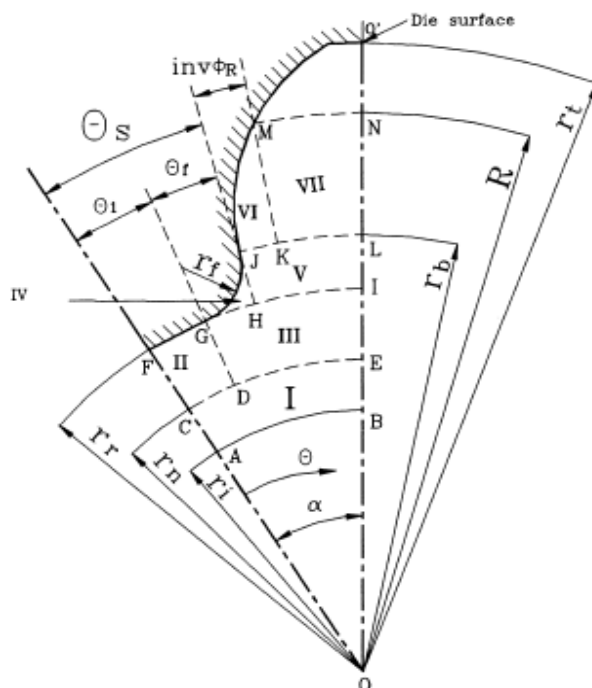
Το συνολικό φορτίο θα δίνεται από τη σχέση  $P_t = 2 \cdot N_t \{ P_1 + P_2 + P_3 \}$  και η μέση πίεση από τη

$$\text{σχέση } \frac{P_{av}}{\sigma} = \frac{P_t}{\sigma A}$$

### 3.2. ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΝΩ ΟΡΙΑΚΩΝ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ (UPPER BOUND METHOD)

Ο Choi και οι συνεργάτες του (2000) ανέπτυξαν μια μαθηματική μέθοδο βασιζόμενοι πάνω στη θεωρία των άνω οριακών φορτίσεων που επιτρέπει την προσομοίωση της σφυρηλάτησης των μετωπικών οδοντωτών τροχών χρησιμοποιώντας στερεές μπιγιέτες με επίπεδη πρέσα ή σφαιρικών μπιγιέτων με επίπεδες πρέσες ή πρέσα με έμβολο. Ειδικότερα, χρησιμοποίησαν την καμπύλη της εξελιγμένης για να αναπαραστήσουν τις πλευρές των οδόντων των τροχών και μια ουδέτερη επιφάνεια εισήχθη για τη σφυρηλάτηση με χρήση σφαιρικών μπιγιέτων με επίπεδη πρέσα. Από τον βασικό εσωτερικό κύκλο το προφίλ του οδόντα θεωρήθηκε ως τόξο όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.7.





Σχήμα 3.7: Ζώνες παραμόρφωσης για το μισό βήμα του μετωπικού οδοντωτού τροχού [19]

Στη συγκεκριμένη ανάλυση χρησιμοποιήθηκε το κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων  $(r, \theta, z)$ . Οι υποθέσεις που έγιναν για τη διεξαγωγή της ανάλυσης είναι [19]:

- Το σχήμα της ελεύθερης επιφάνειας ροής είναι ένας κύκλος με κέντρο το κέντρο του οδοντωτού τροχού O.
- Θεωρείται σταθερός ο συντελεστής τριβής στη διεπιφάνεια μήτρας τεμαχίου εργασίας.
- Η διάμετρος της μπιγιάτας ισούται με τη διάμετρο του οδηγού κύκλου
- Το υλικό θεωρείται ομογενές και επισκληρωμένο.

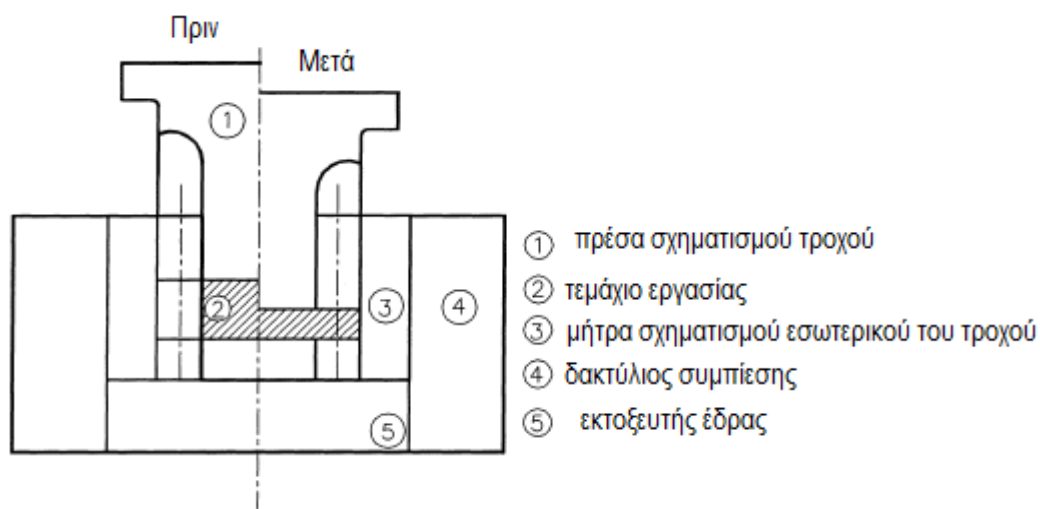
Η κινηματικά αποδεκτή ταχύτητα του αντικειμένου εργασίας θα πρέπει να ικανοποιεί τη σταθερότητα του όγκου και τις οριακές συνθήκες που εκφράζονται ως εξής:

$$\dot{\epsilon}_{rr} = \frac{\partial U_r}{\partial r}, \quad \dot{\epsilon}_{\theta\theta} = \frac{1}{r} \left( \frac{\partial U_\theta}{\partial r} + U_r \right), \quad \dot{\epsilon}_{zz} = \frac{\partial U_z}{\partial r} \quad (28)$$

$$\dot{\epsilon}_v = \dot{\epsilon}_{rr} + \dot{\epsilon}_{\theta\theta} + \dot{\epsilon}_{zz}$$

Όπου  $\dot{\epsilon}$  οι ρυθμοί παραμόρφωσης,  $\dot{\epsilon}_v$  ο ρυθμός ογκομετρικής παραμόρφωσης και  $U_r$ ,  $U_\theta$  και  $U_z$  οι συντεταγμένες της ταχύτητας στο  $(r, \theta, z)$  επίπεδο συντεταγμένων.

Η συνοριακή συνθήκη ορίζει ότι στην επιφάνεια του τεμαχίου εργασίας το υλικό δεν ρέει κατά μήκος της επιφάνειας της μήτρας. Η διαδικασία για τη σφυρηλάτηση ενός μετωπικού οδοντωτού τροχού παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.8.



**Σχήμα 3.8:** Σχηματική αναπαράσταση της σφυρηλάτησης μετωπικού οδοντωτού τροχού [19].

Για την ανάλυση της σφυρηλάτησης του μετωπικού οδοντωτού τροχού με  $N$  οδόντες ο τροχός χωρίζεται σε  $2N$  τμήματα παραμόρφωσης. Στο Σχήμα 3.8 φαίνεται ένα τμήμα παραμόρφωσης με δύο επίπεδα συμμετρίας με ρυθμιστικά τμήματα. Κατά μήκος του επιπέδου συμμετρίας δεν μπορεί να ρέει ούτε μέταλλο ούτε τάσεις ενώ το τμήμα παραμόρφωσης είναι αυτόνομο και αλληλεπιδρά με τα ρυθμιστικά τμήματα [19, 24] κατά τη διάρκεια της σφυρηλάτησης. Κάθε ένα από τα τμήματα παραμόρφωσης που φαίνονται στο Σχήμα 3.7 στη συνέχεια, υποδιαιρούνται βασικά σε επτά ζώνες παραμόρφωσης (I-VII) όπου θεωρείται ότι υπάρχει πλαστική ροή. Η ουδέτερη επιφάνεια θεωρείται πως είναι ένας κύκλος ακτίνας  $r_n$  και για κάθε βήμα καθορίστηκε θεωρώντας τη μέθοδο Golden [15]. Η επιλογή της ακτίνας της ουδέτερης επιφάνειας είναι σημαντική στην ανάλυση της σφυρηλάτησης των μετωπικών οδοντωτών τροχών. Για τη σφυρηλάτηση στερεών μπιγιετών η ακτίνα  $r_n$  μπορεί να επιλεγεί ως μηδενική και για τη σφυρηλάτηση σφαιρικών μπιγιετών και πρέσα με έμβολο επιλέγεται ίση με την ακτίνα του εμβόλου [19].

Αν η πρέσα κινείται προς τα κάτω με μοναδιαία ταχύτητα, η αξονική ταχύτητα  $U_r$  και ο ρυθμός παραμόρφωσης δίνεται από την εξίσωση:

$$U_r = -\frac{u}{t} Z \quad (29)$$

με  $u$  να είναι η ταχύτητα της πρέσας και  $t$  το ύψος του κομματιού που υφίσταται σφυρηλάτηση.

*Περιοχή παραμόρφωσης I: ( $0 \leq \theta \leq \alpha$ ,  $r_i \leq r \leq r_n$ )*

Η περιοχή αυτή οριοθετείται από την ουδέτερη επιφάνεια. Σε αυτήν την περιοχή θεωρείται ότι η περιφερειακή ταχύτητα είναι μηδενική και το πεδίο της ταχύτητας περιγράφεται από τις εξισώσεις:

$$U_r = \frac{u}{2t} \left( r - \frac{r_n^2}{r} \right), \quad U_\theta = 0 \quad (30)$$

*Περιοχή παραμόρφωσης II: ( $0 \leq \theta \leq \theta_i$ ,  $r_n \leq r \leq r_f$ )*

Η περιοχή αυτή εκτείνεται μέχρι την ακτίνα του γεμίσματος του τροχού  $r_f$ . Στην περιοχή αυτή το τεμάχιο εργασίας έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια της μήτρας FG και γι αυτό η ακτινική ταχύτητα είναι μηδέν και το πεδίο ταχύτητας περιγράφεται από τις εξισώσεις:

$$U_r = 0, \quad U_\theta = \frac{u}{t} r \theta \quad (31)$$

*Περιοχή παραμόρφωσης III: ( $\theta_i \leq \theta \leq \alpha$ ,  $r_n \leq r \leq r_r$ )*

Η γωνία  $\alpha$  είναι η γωνία μισού βήματος ενώ  $r_r$  η ακτίνα του οδηγού κύκλου του τροχού. Στα όρια αυτής της περιοχής για την περιφερειακή ταχύτητα ισχύει  $\theta_{II} = \theta_{III}$  όπου  $\theta = \theta_i$ ,  $U_{\theta_{III}} = 0$  με  $\theta = \alpha$  και η ακτινική ταχύτητα  $U_r = U_{r1} = 0$  με  $r = r_n$ . Το πεδίο ταχύτητας σε αυτήν την περιοχή περιγράφεται από τις εξισώσεις:

$$U_r = \frac{u}{2r} \left( r - \frac{r_n^2}{r} \right) \left( \frac{\alpha}{\alpha - \theta_i} \right), \quad U_\theta = \frac{ur}{t} \frac{\theta_i}{\alpha - \theta_i} (\alpha - \theta) \quad (32)$$

*Περιοχή παραμόρφωσης IV: ( $\theta_i \leq \theta \leq \theta_s$ ,  $r_s \leq r \leq r_b$ )*

$r_b$  είναι η ακτίνα του βασικού κύκλου του τροχού. Σε αυτήν την περιοχή η συνοριακή συνθήκη είναι πως η ταχύτητα στην επιφάνεια της μήτρας θα πρέπει να είναι μηδενική. Το πεδίο ταχύτητας στην περίπτωση αυτή είναι:

$$U_r = \frac{u}{2t} + \frac{C_{IV}}{r}, \quad U_\theta = \left( \frac{ur}{2t} + \frac{C_{IV}}{r} \right) \cot \varphi, \quad (33)$$

Όπου  $\cot \varphi = \frac{(r_r + r_f)^4 - (r^2 - r_f^2)^2 - (r^2 - r_r^2)^2 [(2r_f + r_r)^2 - r^2]}{2(r_r + r_f)^2 ((r - r_r)^2 [(2r_f + r_r)^2 - r^2])^{1/2}}$  (33α) και

$$C_{IV} = \frac{ur_r^2}{2t} \left( \frac{\theta_i}{\alpha - \theta_i} \right) + \frac{ur_n^2}{2r} \left( \frac{\alpha}{\alpha - \theta_i} \right) \quad (33β)$$

*Περιοχή παραμόρφωσης V: ( $\theta_s \leq \theta \leq \alpha$ ,  $r_r \leq r \leq r_b$ )*

Για αυτήν την περιοχή οι οριακές συνθήκες είναι:  $U_{\theta V} = U_{\theta IV}$  και  $U_\theta = 0$  για  $\theta = \theta_s$  και  $\theta = \alpha$  αντίστοιχα. Το πεδίο ταχύτητας είναι:

$$U_r = \frac{ur}{2t} + \frac{C_1}{2+r(\alpha-\theta)} + \frac{C_{IV}}{\alpha-\theta_s} \frac{C_{II}}{r} + \frac{C_v}{r} \quad (34) \text{ με}$$

$$U_\theta = \frac{\alpha-\theta}{\alpha-\theta_s} \left( \frac{ur}{2t} + \frac{C_{IV}}{r} \right) \cot \varphi$$

$$C_I = \frac{1}{2} \sqrt{(r^2 - r_r^2)[(2r_f + r_r)^2 - r^2]} + 2r_f^2 \sin^{-1} \left( \frac{\sqrt{(2r_f + r_r)^2 - r^2}}{2\sqrt{r_f(r_r + r_f)}} \right)$$

$$C_{II} = \frac{1}{2} (\tan^{-1} A + \tan^{-1} B) + \sin^{-1} \left( \frac{\sqrt{(2r_f + r_r)^2 - r^2}}{2\sqrt{r_f(r_r + r_f)}} \right) - \frac{1}{4(r_r + r_f)^2} \sqrt{(r^2 - r_r^2)[(2r_f + r_r)^2 - r^2]}$$

$$A = - \frac{(2r_f + r_r) \sqrt{(2r_f + r_r)^2 - r^2} + 4r_f(r_r + r_f)}{r_r(r^2 - r_r^2)}$$

$$B = - \frac{(2r_f + r_r) \sqrt{(2r_f + r_r)^2 - r^2} - 4r_f(r_r + r_f)}{r_r(r^2 - r_r^2)}$$

(34β)

*Περιοχή παραμόρφωσης VI: ( $\theta_s \leq \theta \leq (\theta_s + \text{inv} \varphi_{R_r})$   $r_b \leq r \leq R$ )*

Όπου  $\varphi$  είναι η γωνία ανάμεσα στο ακτινικό διάνυσμα της ταχύτητας και της κατεύθυνσης της επιφάνειας της μήτρας στο γέμισμα και  $R$  είναι η απόσταση ενός συγκεκριμένου σημείου της καμπύλης της εξελιγμένης από το κέντρο  $O$  του οδοντωτού τροχού. Στην περιοχή αυτή το υπό κατεργασία τεμάχιο έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια της μήτρας (JM) που έχει μια καμπύλη εξελιγμένης όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.7. Κατά συνέπεια η ταχύτητα στην επιφάνεια της μήτρας μπορεί να θεωρηθεί μηδενική  $U_\theta \cos \varphi_R - U_r \sin \varphi_R = 0$ .

Η γωνία  $\theta$  της καμπύλης της εξελιγμένης μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση της ακτίνας  $r$  με την ακόλουθη εξίσωση:

$$\theta = \theta_s + \frac{\sqrt{r^2 - r_b^2}}{r_b} - \tan^{-1} \frac{\sqrt{r^2 - r_b^2}}{r_b} \quad (35)$$

Κατά συνέπεια, μπορεί να θεωρηθεί ότι η περιφερειακή ταχύτητα στην καμπύλη εξελιγμένης είναι συνάρτηση της ακτίνας  $r$  μόνο και ότι η περιφερειακή ταχύτητα στην περιοχή παραμόρφωσης είναι συνάρτηση της ακτίνας  $r$  και της γωνίας  $\theta$ . Το πεδίο της ταχύτητας για αυτήν την περιοχή είναι:

$$U_r = \frac{ur}{3t} + \frac{C_{VI}}{r^2}, \quad U_\theta = \left( \frac{ur}{3t} + \frac{C_{VI}}{r^2} \right) (\theta - \theta_s + \varphi_r) \quad (36) \text{ με}$$

$$\varphi_r = \tan^{-1}((r^2 - r_b^2)^{1/2} / r_b)$$

$$C_{VI} = \frac{ur_b^3}{6t} + \frac{r_b}{\alpha - \theta_s} \frac{C_I''}{2t} + \frac{C_{IV}r_b}{\alpha - \theta_s} C_{II}'' + C_V r \quad (36\beta)$$

$$C_I' = C_I |_{r=r_b}, C_{II}'' = C_{II}'' |_{r=r_b}$$

Περιοχή παραμόρφωσης VII:  $\theta_s + \text{inv}\varphi_R \leq \theta \leq \alpha$ ,  $r_b \leq r \leq R$ )

Οι συνοριακές συνθήκες σε αυτήν την περιοχή παραμόρφωσης είναι:  $U_{\theta VII} = U_{\theta VI}$  για  $\theta = \theta_s + \text{inv}\varphi_R$  και για  $\theta = \alpha$  είναι  $U_\theta = 0$  ενώ σε κάθε περίπτωση η γωνία της εξελιγμένης  $\text{inv}\varphi_R$  είναι σταθερή. Κατά συνέπεια μπορεί να θεωρηθεί ότι η περιφερειακή ταχύτητα κατανέμεται ως γραμμική συνάρτηση της περιφερειακής συντεταγμένης  $\theta$ . Το πεδίο ταχύτητας για αυτήν την περιοχή περιγράφεται από τις σχέσεις:

$$U_r = \frac{ur}{2t} + C_R \left( \frac{ur}{6t} - \frac{C_{VI}}{r^2} \right) + C_R \left[ \frac{u}{3t} \left( \frac{r}{2} \tan^{-1} R_{con} - \frac{r_n}{2r} R_{con} \right) + C_{VI} \left( -\frac{1}{r} \tan^{-1} R_{con} + \frac{R_{con}}{r^2} \right) + \frac{C_{VII}}{r} \right] \quad (37)$$

$$U_\theta = \frac{\alpha - \theta}{\alpha - (\theta_s + \text{inv}\varphi_R)} \left( \frac{ur}{3t} + \frac{C_{VI}}{r^2} \right) (\text{inv}\varphi_R + \varphi_r)$$

$$R_{con} = \frac{\sqrt{r^2 - r_b^2}}{r_b}, \quad C_R = \frac{\text{inv}\varphi_R}{\alpha - (\theta_s + \text{inv}\varphi_R)}$$

$$\text{Όπου: } C_R' = \frac{1}{\alpha - (\theta_s + \text{inv}\varphi_R)}, \quad C_{VII} = \frac{1}{\alpha - \theta_s} \frac{C_I''}{2t} + \frac{C_{IV}C_{II}''}{\alpha - \theta_s} + C_V - C_R \left( \frac{ur_b^2}{6t} - \frac{C_{VI}}{r_b^2} \right) \quad (37\beta)$$

$$\text{inv}\varphi_R = \frac{\sqrt{R^2 - r_b^2}}{r_b} - \tan^{-1} \frac{\sqrt{R^2 - r_b^2}}{r_b}$$

Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις που βρέθηκαν για την κατανομή της ταχύτητας σε κάθε ζώνη με τη μέθοδο των άνω οριακών φορτίσεων μπορούν να υπολογιστούν α) η εσωτερική κατανάλωση ισχύος,  $\dot{E}_p$ , β) ο ρυθμός κατανάλωσης ισχύος λόγω της διάτμησης  $\dot{E}_s$ , και γ) ο ρυθμός κατανάλωσης ισχύος λόγω τριβής  $\dot{E}_F$ .

Εσωτερική κατανάλωση ισχύος,  $\dot{E}_p$ : Ο ρυθμός παραμόρφωσης για κάθε περιοχή υπολογίζεται από τις εξισώσεις:

$$\dot{\epsilon}_{r\theta} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial U_\theta}{\partial r} - \frac{\partial U_r}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial U_r}{\partial \theta} \right) \quad (38)$$

$$\dot{\epsilon}_{\theta z} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial U_\theta}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial U_z}{\partial \theta} \right) \quad (39)$$

$$\dot{\epsilon}_{rz} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial U_r}{\partial r} + \frac{\partial U_z}{\partial r} \right) \quad (40)$$

Χρησιμοποιώντας τον αποτελεσματικό ρυθμό παραμόρφωσης  $\bar{\dot{\epsilon}}$  προκύπτει

$$\bar{\dot{\epsilon}} = \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{\dot{\epsilon}_{rr}^2 + \dot{\epsilon}_{\theta\theta}^2 + 2\dot{\epsilon}_{r\theta}^2} \quad (41)$$

Επιπλέον, ο ρυθμός κατανάλωσης εσωτερικής ενέργειας μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση

$$\dot{E}_{\rho,i} = \int_V \sigma_o \bar{\dot{\epsilon}}_i dV \quad (42)$$

Ο δείκτης  $i$  αναφέρεται στις ζώνες I-VII. Η εσωτερική ενέργεια της παραμόρφωσης μπορεί να υπολογιστεί αριθμητικά.

*Ρυθμός κατανάλωσης ισχύος λόγω της διάτμησης  $\dot{E}_s$ : Η ισχύς κατανάλωσης λόγω διατμητικών τάσεων στην επιφάνεια όπου υπάρχουν ασυνέχειες ταχύτητας είναι:*

$$\dot{E}_s = \frac{\sigma_o}{\sqrt{3}} \int_S |\Delta V| dS \quad (43)$$

Όπου  $|\Delta V|$  είναι η ασυνέχεια της ταχύτητας και  $S$  η θεωρούμενη περιοχή της επιφάνειας.

*Ρυθμός κατανάλωσης ισχύος λόγω τριβής  $\dot{E}_F$* : η κατανάλωση ενέργειας λόγω τριβής σε κάθε διεπιφάνεια μήτρας –τεμαχίου εργασίας δίνεται από τη σχέση:

$$\dot{E}_F = \frac{m\sigma_o}{\sqrt{3}} \int_S |\Delta V| dA \quad (44)$$

Όπου  $m$  ο συντελεστής τριβής και  $dA$  η επιφάνεια της διεπιφάνειας της μήτρας και του τεμαχίου εργασίας και  $|\Delta V|$  η ασυνέχεια της ταχύτητας σε κάθε διεπιφάνεια.

### 3.3 ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ (FINITE ELEMENT ANALYSIS)

Στις κατεργασίες διαμόρφωσης μετάλλων ένα δεδομένο μέταλλο απλής γεωμετρίας όπως μπιγιέτα ή ράβδος μετασχηματίζεται κάτω από ελεγχόμενη εφαρμογή ενέργειας σε ένα χρήσιμο στοιχείο για περαιτέρω κατεργασία ή φινίρισμα πριν την τελική του χρήση. Αυτό το

στοιχείο συνήθως έχει σύνθετη γεωμετρία με καλά καθορισμένο σχήμα, μέγεθος, ακρίβεια και ανοχές, εμφάνιση και ιδιότητες. Σε γενικές γραμμές οι κατεργασίες παραμόρφωσης συνεπάγονται παραμόρφωση του υλικού και του τεμαχίου εργασίας μέσα από μια σειρά διαδοχικών κατεργασιών [25].

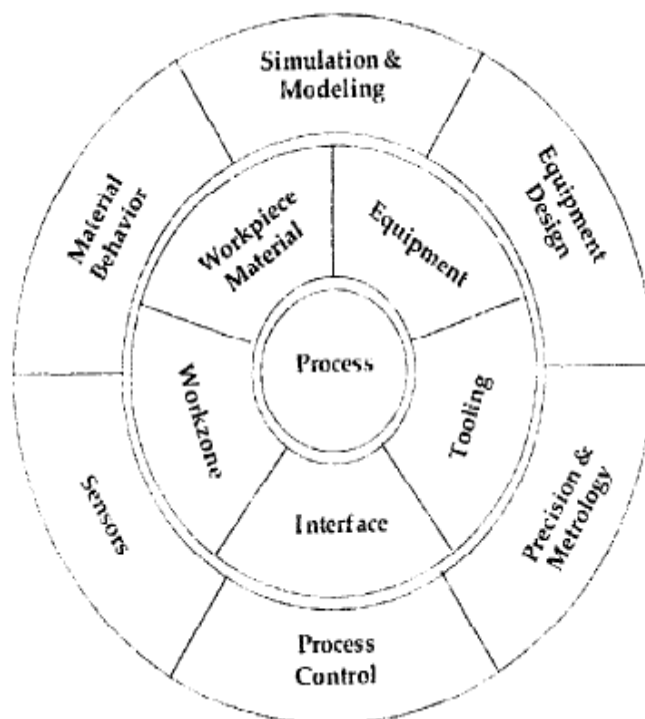
Κατά την κατασκευή διακριτών τμημάτων μέσω της διαμόρφωσης μετάλλων το τμήμα της γεωμετρίας «αποθηκεύεται» στις μήτρες ή στα εργαλεία και μεταδίδεται στο προϊόν μέσω της διεπιφάνειας μήτρας/τεμαχίου σε σχετικά μικρό χρόνο συνήθως με ένα απλό κτύπημα ή έναν κύκλο δεδομένου μηχανήματος. Κατά συνέπεια η μήτρα ή το εργαλείο σχεδιασμού και κατασκευής και οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ του τεμαχίου εργασίας και των μήτρων είναι τα βασικά στοιχεία, ενώ οι αδιάστατες ανοχές, το τελείωμα της επιφάνειας και η κατασκευαστική πληρότητα του τελικού κομματιού είναι οι βασικοί στόχοι μέσω του κύκλου σχηματισμού ανεξάρτητα του υλικού και της κατεργασίας [26].

Μια διαδικασία διαμόρφωσης όπως η σφυρηλάτηση συνδυάζει όλες τις μεταβλητές εισόδου όπως το τεμάχιο εργασίας, τις μήτρες και τις συνθήκες διεπιφάνειας μήτρας/τεμαχίου, το μηχανισμό της μεταβολής σχήματος στη ζώνη εργασίας και τα χαρακτηριστικά του εξοπλισμού της κατεργασίας.

Κατά συνέπεια στο σχεδιασμό και στην ανάπτυξη των κατεργασιών διαμόρφωσης οι κύριες τεχνολογικές προβληματικές περιοχές που αξίζει να σημειωθούν είναι [26]:

- *Το τεμάχιο εργασίας:* Το σχήμα και το μέγεθος, η χημική σύσταση και η μικροδομή, οι ιδιότητες ροής στις συνθήκες κατεργασίας, οι θερμικές και φυσικές του ιδιότητες.
- *Μήτρες ή εργαλεία:* γεωμετρία, επιφανειακές συνθήκες, υλικό και σκληρότητα, επικάλυψη επιφάνειας, θερμοκρασία, ακαμψία και ακρίβεια
- *Συνθήκες διεπιφάνειας:* φινίρισμα της επιφάνειας, λίπανση, τριβή, μεταφορά θερμότητας
- *Ζώνη εργασίας:* μηχανική της πλαστικής παραμόρφωσης, ροή υλικού, τάσεις, ταχύτητες και θερμοκρασίες
- *Χρησιμοποιούμενος εξοπλισμός:* ταχύτητα, ρυθμός παραγωγής, δύναμη, ακαμψία και ακρίβεια.

Η κατανόηση των παραπάνω μεταβλητών επιτρέπει την εξαγωγή των χαρακτηριστικών των διαμορφωμένων προϊόντων όπως της γεωμετρίας και των ανοχών της μικροδομής και των ιδιοτήτων τους.



Σχήμα 3.9: Μεταβλητές για τις κατεργασίες διαμόρφωσης [27]

Η αριθμητική προσομοίωση και η μοντελοποίηση των κατεργασιών διαμόρφωσης που βασίζονται στη γνώση της φυσικής κατεργασίας και πιστοποιούνται από πειραματικά αποτελέσματα αποτελούν ένα χρήσιμο εργαλείο για τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων των κατεργασιών. Σε πολλές κατεργασίες ανάπτυξης και σχεδιασμού οι προσομοιώσεις αντικαθιστούν τις πλήρη δοκιμές μειώνοντας τόσο το χρόνο όσο και το κόστος της κατεργασίας συγκριτικά με τις επαναληπτικές πειραματικές διαδικασίες [27].

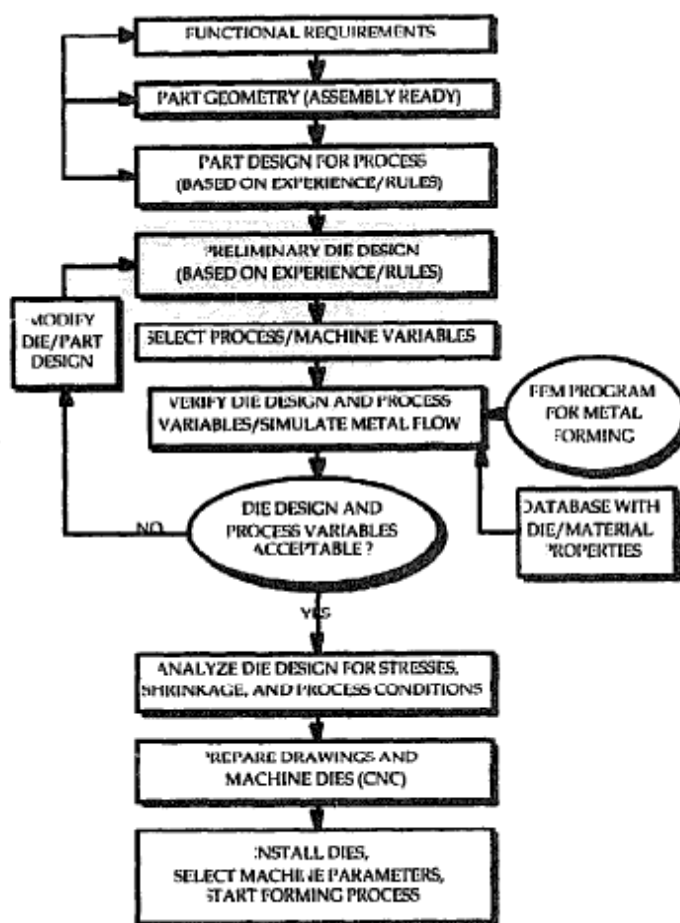
Στη σφυρηλάτηση των μετάλλων η μοντελοποίηση της κατεργασίας χρησιμοποιείται για την εξαγωγή της ροής του μετάλλου και των τάσεων καθώς και των δυνάμεων που ασκούνται στα εργαλεία και τις δυναμικές πηγές των αταξιών και των αστοχιών. Σε μερικές περιπτώσεις είναι πιθανό να εξαχθεί και η μικροδομή και οι ιδιότητες του υλικού όπως επίσης η ελαστική επαναφορά και οι εναπομένουσες τάσεις.

Η αριθμητική προσομοίωση συνήθως χρησιμοποιείται για ερευνητικούς σκοπούς αλλά και για βιομηχανικές εφαρμογές. Η προσομοίωση για δισδιάστατα προβλήματα όπως είναι η σφυρηλάτηση των οδοντωτών τροχών είναι συνηθισμένη με χρήση των πεπερασμένων στοιχείων. Η εφαρμογή σε τρισδιάστατα προβλήματα δεν είναι ευρέως διαδεδομένη αφού δεν είναι πάντα αποτελεσματική από πλευρά κόστους και απαιτεί σημαντικό χρόνο [28, 29].

Τα κύρια αντικείμενα της αριθμητικής διαδικασίας στη διαμόρφωση των μετάλλων είναι [26]: α) η ανάπτυξη ανάλογων σχεδιασμών μήτρας και η εγκαθίδρυση παραμέτρων της κατεργασίας με: i)προσομοίωση της κατεργασίας για διασφάλιση του γεμίσματος της μήτρας, ii)



αποτροπή των αταξιών που προκαλούνται από τη ροή όπως περιτυλίξεις και ψυχρά εγκλείσματα, iii) εξαγωγή των οριακών συνθηκών της κατεργασίας που πρέπει να ακολουθούνται προκειμένου να αποφεύγονται εσωτερικές και επιφανειακές αταξίες, iv) η εξαγωγή των κατάλληλων θερμοκρασιών ούτως ώστε να ελέγχονται οι ιδιότητες του τεμαχίου, οι συνθήκες τριβής και ο χρόνος ζωής της μήτρας. β) η βελτίωση της ποιότητας του τεμαχίου και η πολυπλοκότητά του και η μείωση του κόστους κατασκευής του με: i)εξαγωγή και βελτίωση της ροής κόκκων και της μικροδομής του, ii) μείωση των δοκιμών της μήτρας και του ανάλογου χρόνου, iii) μείωση του απορριπτόμενου υλικού και βελτίωση της απόδοσής του.



**Σχήμα 3.10:** Σχεδιασμός προϊόντος και διαδικασίας για τη διαμόρφωση καθαρού σχήματος (net shape manufacturing) [26].

Τα βήματα που περιλαμβάνονται στη διαδικασία ολοκληρωμένου προϊόντος και κατεργασίας φαίνονται στο Σχήμα 3.10. Με βάση τις λειτουργικές απαιτήσεις η γεωμετρία και το υλικό επιλέγονται για ένα τμήμα της διαδικασίας σχεδιασμού. Αφού το κομμάτι σχεδιαστεί για ειδική κατεργασία όπως π.χ. τη σφυρηλάτηση τα ακόλουθα βήματα πραγματοποιούνται για το σχεδιασμό της κατεργασίας [26]:

- Υιοθέτηση του σχεδιασμού της μήτρας και επιλογή των παραμέτρων σφυρηλάτησης με βάση την εμπειρία
- Πιστοποίηση του αρχικού σχεδιασμού και των συνθηκών σφυρηλάτησης χρησιμοποιώντας τη μοντελοποίηση της κατεργασίας. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται εμπορικά υπολογιστικά πακέτα.
- Διαμόρφωση του σχεδιασμού της μήτρας και της αρχικής επιλογής των μεταβλητών της κατεργασίας με βάση τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της κατεργασίας
- Πλήρης σχεδιασμός και κατασκευή της μήτρας
- Δοκιμές αντοχής της μήτρας στον εξοπλισμό παραγωγής.
- Διαμόρφωση του σχεδιασμού της μήτρας και των συνθηκών σφυρηλάτησης για την παραγωγή καλύτερης ποιότητας προϊόντων

Πρακτικές εφαρμογές στη διαδικασία της σφυρηλάτησης της αριθμητικής μοντελοποίησης είναι: ο σχεδιασμός των ακολουθιών σφυρηλάτησης στη ψυχρή και θερμή σφυρηλάτηση, η παραγωγή και βελτιστοποίηση της διαστασιολόγησης στη θερμή σφυρηλάτηση από μπιγιέτες, ο προσδιορισμός των τάσεων στη μήτρα, της κόπωσης και της φθοράς της μήτρας, η βελτιστοποίηση των μεταβλητών της σφυρηλάτησης και του σχεδιασμού της μήτρας έτσι ώστε να αποφεύγεται η αστοχία της μήτρας, η διερεύνηση της επίδρασης της τριβής στη ροή του μετάλλου και η διερεύνηση της ροής του μετάλλου στην πολλαπλή σφυρηλάτηση.

### **3.3.1 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗΣ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ**

Ανάλογα με τη γεωμετρική πολυπλοκότητα μια διαδικασία σφυρηλάτησης μπορεί να προσομοιωθεί είτε ως δισδιάστατο αξονοσυμμετρικό ή επίπεδων τάσεων είτε ως τρισδιάστατο πρόβλημα. Στα δισδιάστατα προβλήματα η γεωμετρία του τεμαχίου εργασίας και οι μήτρες αναπαρίστανται με αυθαίρετη γεωμετρία που σχηματίζονται με το συνδυασμό γραμμών, τόξων ή καμπυλών. Δεδομένου ότι η γεωμετρία του τεμαχίου εργασίας χρειάζεται τις διαδικασίες προσομοίωσης, η γεωμετρία του τεμαχίου εργασίας σχηματίζει πάντα ένα κλειστό όριο. Από την άλλη η γεωμετρία των μήτρων μπορεί είτε να θεωρηθεί είτε ως ανοικτό είτε ως κλειστό σύνορο. Ένα ανοικτό όριο χρειάζεται όταν μόνο η ροή του μετάλλου του τεμαχίου εργασίας είναι σημαντική, ενώ άλλες μεταβλητές όπως η θερμοκρασία και η ελαστική παραμόρφωση της μήτρας μπορεί να αγνοηθεί. Ένα κλειστό όριο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τις μήτρες αν η επίδραση της θερμοκρασίας της μήτρας ή η παραμόρφωσή της μπορεί να επιδράσει στη μεταλλική ροή του τεμαχίου εργασίας. Στα τρισδιάστατα προβλήματα η αναπαράσταση της γεωμετρίας είναι πιθανή χρησιμοποιώντας επιφάνειες εκτός από γραμμές και τόξα.

Γενικά προκειμένου να είναι αποτελεσματική η προσομοίωση θα πρέπει να απομακρυνθούν όλα τα ελάχιστα γεωμετρικά χαρακτηριστικά όπως οι μικρές ακτίνες σε δίσκους [30]. Αυτά τα χαρακτηριστικά δεν έχουν σημαντική επίδραση στη ροή του μετάλλου. Όμως σε μερικές ειδικές εφαρμογές, όπως οι κατεργασίες μικροσχηματισμού, η επίδραση του μεγέθους λαμβάνεται υπόψη στην προσομοίωση [31]. Οι επιδράσεις αυτές μπορεί να οφείλονται στη μικροδομή της μπιγιέτας, την τραχύτητα της επιφάνειας και τις συνθήκες της κατεργασίας στη διεπιφάνεια μπιγιέτας-μήτρας.

Στις διαδικασίες σφυρηλάτησης το τεμάχιο εργασίας γενικά υφίσταται μεγάλη πλαστική παραμόρφωση και η σχετική κίνηση ανάμεσα στη μήτρα και το παραμορφωμένο υλικό είναι σημαντική. Στην προσομοίωση αυτών των κατεργασιών το αρχικό πλέγμα είναι καλά ορισμένο και έχει την επιθυμητή κατανομή κόμβων. Καθώς η προσομοίωση συνεχίζει, η παραμόρφωση του πλέγματος του τεμαχίου εργασίας είναι σημαντική. Κατά συνέπεια είναι απαραίτητο να παράγεται ένα καινούριο πλέγμα και να παρεμβάλλονται τα δεδομένα του παλιού στο καινούριο πλέγμα για να επιτευχθεί μεγαλύτερη ακρίβεια. Η δημιουργία του πλέγματος γίνεται με τη βοήθεια υπολογιστικών πακέτων όπως το DEFORM 2D το DEFORM 3D και το AMG. Ειδικά για το AMG δύο είναι τα απαιτούμενα για προσδιορισμό σημεία: να καθοριστεί η βέλτιστη κατανομή της πυκνότητα πλέγματος και να δημιουργηθεί το πλέγμα για τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων που θα βασίζεται σε αυτήν την πυκνότητα [26].

Η πυκνότητα του πλέγματος θα πρέπει να είναι σε συμφωνία με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του τεμαχίου εργασίας για κάθε σημείο της παραμόρφωσης [32]. Προκειμένου η συμβατότητα με τη γεωμετρία να είναι μέγιστη λαμβάνονται υπόψη οι πυκνότητες του πλέγματος που υπολογίζονται με βάση τα όρια καμπυλότητας και το τοπικό πάχος. Για να επιτευχθεί η τελική κατανομή της πυκνότητας πλέγματος θα πρέπει να θεωρηθεί ο μέγιστος αριθμός πεπερασμένων στοιχείων καθώς και τα βάρη που σχετίζονται με την κάθε κατανομή πυκνότητας.

Αφού καθοριστεί η πυκνότητα του πλέγματος η διαδικασία παραγωγής του πλέγματος περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα [26]:

1. Αναπαράσταση της γεωμετρίας
2. Αναπαράσταση της πυκνότητας. Ο καθορισμός της πυκνότητας συσχετίζεται με τη γεωμετρία
3. Καθορισμός των κρίσιμων σημείων για την ακριβή αναπαράσταση της γεωμετρίας
4. Παραγωγή κόμβων. Ο αριθμός των κόμβων ανάμεσα στα κρίσιμα σημεία δημιουργείται και επανατοποθετείται βάση της κατανομής της πυκνότητας.
5. Διαχωρισμός. Η γεωμετρία χωρίζεται σε υποτομήματα

6. Ταύτιση προτύπων: ανάλογα με τη διευθέτηση των κόμβων στα όρια κάθε υποτομέα ένα σύνθετο πρότυπο που σχηματίζεται από τετραεδρικά στοιχεία ταυτίζεται με κάθε ένα από τα τρία βασικά υποπρότυπα.
7. Βελτίωση του σχήματος και ελαχιστοποίηση του εύρους ζώνης. Το σχήμα των στοιχείων μετά τη δημιουργία του πλέγματος πρέπει να ομαλοποιηθεί προκειμένου να επιτευχθεί ένα υπολογιστικά αποδοτικό πλέγμα.

Η δημιουργία του πλέγματος και ο επαναπροσδιορισμός του είναι πιο πολύπλοκη διαδικασία όταν πρόκειται για τρισδιάστατη εφαρμογή της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων. Το υπολογιστικό πακέτο Deform 3D [32] δίνει μια προσέγγιση χρησιμοποιώντας τετράεδρα στοιχεία για τη δημιουργία πλέγματος και τον επαναπροσδιορισμό του για το τεμάχιο εργασίας. Σε αυτήν την προσέγγιση το όριο του παραμορφωμένου πλέγματος προκύπτει από μια συλλογή επιφανειών και στη συνέχεια δημιουργείται μια τριγωνική επιφάνεια πλέγματος.

Η ροή της τάσης στο υλικό της μπιγιέτας μπορεί να επηρεαστεί σημαντικά από μεταβολές στο ρυθμό παραμόρφωσης, τη θερμοκρασία και τη μικροδομή κατά την κατεργασία της σφυρηλάτησης. Κατά συνέπεια προκειμένου να εκτιμηθεί με ακρίβεια η ροή του μετάλλου και τα φορτία σφυρηλάτησης είναι απαραίτητη η εισαγωγή αξιόπιστων δεδομένων. Οι σχέσεις του ρυθμού παραμόρφωσης ή οι καμπύλες ροής γενικά επιτυγχάνονται μέσω δοκιμών συμπίεσης. Όμως αυτές οι δοκιμές έχουν τους ακόλουθους περιορισμούς [26]:

α) το ποσό παραμόρφωσης που μπορεί να επιτευχθεί είναι περιορισμένο και κάτω από αυτό που παρατηρείται στη σφυρηλάτηση, β) μπορεί να υπάρχουν διαφοροποιήσεις στη συμπεριφορά της ροής για ένα υλικό που λαμβάνεται σε ισόθερμες ή σε μη ισοθερμικές συνθήκες και γ) για κάποια κράματα η ροή τάσεων μπορεί να επηρεαστεί από μεταβολές στη μικροδομή κατά τη σφυρηλάτηση.

Στις περισσότερες προσομοιώσεις τα εργαλεία θεωρούνται άκαμπτα με αποτέλεσμα οι τάσεις και οι παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στη μήτρα να μπορούν να αγνοηθούν. Όμως στη θερμή σφυρηλάτηση οι σχετικά μικρές ελαστικές παραμορφώσεις της μήτρας μπορούν να επηρεάσουν τις θερμικές και μηχανικές συνθήκες φόρτισης καθώς και την κατανομή των τάσεων επαφής στη διεπιφάνεια μήτρας/ τεμαχίου εργασίας [26].

Οι συνθήκες τριβής και μετάδοσης θερμότητας στη διεπιφάνεια μεταξύ της μήτρας και της μπιγιέτας που χρησιμοποιείται για τη σφυρηλάτηση των οδοντωτών τροχών επιδρούν σημαντικά τόσο στη ροή του μετάλλου όσο και στα απαιτούμενα φορτία για τη διαμόρφωση του κομματιού.

Ο πιο κοινός τρόπος καθορισμού του συντελεστή τριβής είναι η διεξαγωγή των δοκιμών συμπίεσης δακτυλίου. Όμως οι συντελεστές τριβής που καθορίζονται με αυτήν την μέθοδο δεν μπορούν να εφαρμοστούν στη σφυρηλάτηση ακριβείας όπου η πίεση στη

διεπιφάνεια είναι πολύ μεγάλη. Οι συνθήκες τριβής μεταβάλλονται κατά την κατεργασία εξαιτίας μεταβολών στη λίπανση και στη θερμοκρασία στη διεπιφάνεια μήτρας/ τεμαχίου.

### 3.3.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΤΗ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗ

Οι περισσότερες διαδικασίες σφυρηλάτησης θεωρούνται συνεχούς ροής. Αυτό σημαίνει ότι λαμβάνεται υπόψη η θεώρηση της πλαστικής παραμόρφωσης των μετάλλων με τη μορφή ιξώδους ρευστού. Ο τανυστής τάσεων Cauchy  $\sigma_{ij}$  είναι μια συνάρτηση του ρυθμού παραμόρφωσης  $\dot{\epsilon}_{ij}$  και ορίζεται σε όρους ιξωδοπλαστικού δυναμικού  $\varphi$  [33]:

$$\sigma_{ij} = \frac{\partial \varphi(\dot{\epsilon})}{\partial \dot{\epsilon}_{ij}} \quad (45)$$

Για ιστροπικά υλικά το  $\varphi$  είναι συνάρτηση του γενικού ρυθμού παραμόρφωσης  $\bar{\dot{\epsilon}}$  που οδηγεί στην ακόλουθη σχέση για τη γενικευμένη τάση:

$$\bar{\sigma} = \frac{\partial \varphi(\bar{\dot{\epsilon}})}{\partial \bar{\dot{\epsilon}}} \quad (46)$$

Η γενικευμένη τάση εκφράζεται συναρτήσει του γενικευμένου ρυθμού παραμόρφωσης μέσω του νόμου Norton-Hoff [33]:

$$\bar{\sigma} = K \bar{\dot{\epsilon}}^m \quad (47)$$

Η οποία είναι ισοδύναμη με τον ορισμό του ιξωδοπλαστικού δυναμικού:

$$\varphi = \frac{K}{m+1} \bar{\dot{\epsilon}}^{m+1} \quad (48)$$

για κάποιους συντελεστές  $K$  και  $m$ .

Οι κυρίαρχες εξισώσεις ορίζονται βάσει του όγκου παραμόρφωσης  $V$  και τη σχετική επιφάνεια, μέρος της οποίας ( $S_f$ ) βρίσκεται σε επαφή με τα εργαλεία και κατά συνέπεια, αναφέρεται στα φαινόμενα τριβής, και η υπόλοιπη επιφάνεια ( $S_i$ ) αναφέρεται στην εφαρμογή

της εξωτερικών δυνάμεων  $F_i$  και τη θεωρούμενη ταχύτητα  $\dot{u}_i$ . Κατά αναλογία με το ιξωδοπλαστικό δυναμικό ένα δυναμικό τριβής  $\varphi_f$  ορίζεται στην επιφάνεια  $S_f$  από τη σχέση:

$$f_i = \frac{\partial \varphi_f(v)}{\partial u_i} \quad (49)$$

όπου  $f_i$  είναι η δύναμη τριβής και  $u_i$  η σχετική ταχύτητα ανάμεσα στο τεμάχιο εργασίας και το εργαλείο της σφυρηλάτησης. Στο πρόβλημα της παραμόρφωσης αποδεκτά είναι τα πεδία ταχύτητας για τα οποία ο όγκος διατηρείται. Στην πράξη αυτό σημαίνει πως θα πρέπει να εισαχθεί μια ποσότητα που να ενισχύει τη σταθερότητα του όγκου. Αυτή η ποσότητα μπορεί να εκφραστεί με τη μορφή ενός πολλαπλασιαστή Langrange. Αν αγνοηθούν οι εσωτερικές επιδράσεις η λύση στο πρόβλημα παραμόρφωσης επιτυγχάνεται ως η σταθερή τιμή της συνάρτησης:

$$\Pi = \int_V \varphi(\bar{\varepsilon}) dV + \alpha \int_V \dot{\varepsilon}_v dV + \int_{S_f} \varphi_f(v) ds - \int_{S_f} F_i \dot{u}_i dS \quad (50)$$

Στην οποία το  $\dot{\varepsilon}_v$  είναι ο ογκομετρικός ρυθμός παραμόρφωσης και  $\alpha$  ο συντελεστής ατελειών που επιλέγεται να έχει μεγάλη τιμή. Μετά τη διακριτοποίηση του όγκου του τεμαχίου εργασίας σε πεπερασμένα στοιχεία οι ρυθμοί παραμόρφωσης μπορούν να εκφραστούν σε όρους ταχύτητας των κόμβων  $\dot{U}_{ik}$ .

$$\bar{\varepsilon}_{ij} = B_{ijk} \dot{U}_{ik} \quad (51)$$

Όπου ο τανυστής  $B_{ijk}$  ορίζεται με όρους μερικών παραγώγων των συναρτήσεων σχήματος για τα χρησιμοποιούμενα στοιχεία. Επιπλέον, οι δυνάμεις που ασκούνται στην  $S_f$  ορίζονται στους κόμβους του μοντέλου έτσι ώστε η μεταβολή πρώτης τάξης της συνάρτησης  $\Pi$  δίνει μια ομάδα εξισώσεων που μετατρέπει τις δυνάμεις στους κόμβους σε ταχύτητες στους κόμβους.

Οι σχέσεις που προαναφέρθηκαν είναι θεμελιώδεις και υπάρχουν διάφορες παραλλαγές ανάλογα με το πρόβλημα σφυρηλάτησης που εξετάζεται [33]. Οι σχέσεις που περιγράφουν τη ροή είναι εξαιρετικά απλές και μπορούν να εκφραστούν ως συναρτήσεις Euler αποδίδοντας τις λύσεις του προβλήματος. Παρά το γεγονός πως αυτές οι εξισώσεις αγνοούν την ελαστική συμπεριφορά οι ελαστικές τάσεις όπως οι εναπομένουσες τάσεις μπορούν να συμπεριληφθούν στους υπολογισμούς.

Εναλλακτικές σχέσεις που βασίζονται στην προσέγγιση της παραμόρφωσης μετάλλου περιλαμβάνουν την ελαστική συμπεριφορά μέσα στις σχέσεις. Παρά το γεγονός πως υπάρχουν διάφορες σχέσεις που μπορούν να περιγράψουν τη ροή μετάλλου το αρχικό σημείο εκκίνησης είναι η σχέση Prandtl- Reuss που προέρχεται από το διαχωρισμό του ρυθμού παραμόρφωσης σε ελαστικά και πλαστικά τμήματα σε συνδυασμό με το νόμο του Hooke και την αρχή κανονικοποίησης, που σχετίζεται με το επιλεγμένο κριτήριο (συνήθως του Von Misses). Η αντιστροφή της εξίσωσης Prandtl- Reuss οδηγεί στη σχέση:

$$\dot{\tau}_{ij} = D_{ijkl}^{ep} \dot{\epsilon}_{kl} \quad (52)$$

Όπου  $\dot{\tau}_{ij}$  είναι ο ρυθμός αμετάβλητης περιστροφής της τάσης Kirchhoff II και  $D_{ijkl}^{ep}$  ο τανυστής ελαστικών-πλαστικών τάσεων-παραμορφώσεων:

$$D_{ijkl}^{ep} = 2G \left[ \delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{ij} \delta_{kl} \frac{\nu}{1-2\nu} - \frac{3\sigma'_{ij} \sigma'_{kl}}{2\sigma'^2 \left(1 + \frac{\nu'}{3G}\right)} \right] \quad (53)$$

Όπου G είναι το μέτρο ελαστικότητας, ν ο λόγος Poisson,  $\delta_{ij}$  το δέλτα του Kronecker,  $\sigma'_{ij}$  ο τανυστής της τάσης εκτροπής και  $\nu'$  η κλίση της καμπύλης τάσεων στην περιοχή της πλαστικής παραμόρφωσης.

Τόσο οι σχέσεις για τη στερεά κατάσταση όσο και για την ελαστική-πλαστική παραμόρφωση συχνά εμπλέκουν μια προσέγγιση με χρήση των συντελεστών Langrange. Παράλληλα με τις εξισώσεις περιγραφής της ροής κατασκευάζονται εξισώσεις για το ρυθμό του ενεργειακού δυναμικού και εκφράζεται ο ρυθμός της ενέργειας παραμόρφωσης σε όρους του ρυθμού ονομαστικής τάσης  $\dot{s}_{ij}$  και της ταχύτητας  $\dot{u}_{ij}$  [33]. Με βάση αυτές τις θεωρήσεις ο ρυθμός μεταβολής της δύναμης στους κόμβους των στοιχείων δίνεται από τη σχέση:

$$\dot{F}_{im} = \int_V N_{i,\dot{u}} \dot{s}_{im} dV \quad (54)$$

Όπου η ολοκλήρωση διεξάγεται στον όγκο του στοιχείου για την οποία οι συναρτήσεις σχήματος είναι  $N_i(x_i)$ .

Η πολυπλοκότητα των σχέσεων ελαστικής πλαστικής παραμόρφωσης για τη διαδικασία της σφυρηλάτησης αναφέρονται στους διαφορετικούς ρυθμούς παραμόρφωσης. Αυτοί σχετίζονται με τη σχέση:

$$\dot{s}_{ij} = \dot{\tau}_{ij} - 2\sigma_{im}\dot{\epsilon}_{mj} + \sigma_{in}\dot{u}_{j,n} \quad (55)$$

Συνδυάζοντας τις σχέσεις (51)-(55) λαμβάνονται οι βασικές εξισώσεις για την ακαμψία του στοιχείου που είναι:

$$\Delta F_{lm} = \int_V [B_{ijlm}(D_{ijkl}^{sp} - 2\delta_{ij}\sigma_{ik})B_{kljn} + N_{l,i}\delta_{mn}\sigma_{ij}N_{j,i}]dVdU_{Jn} \quad (56)$$

Για αυτήν την βασική προσέγγιση βέβαια υπάρχουν πολλές διαφοροποιήσεις ανάλογα με το πρόβλημα της σφυρηλάτησης που αφορούν στην αντικειμενικότητα του καθορισμού της στοιχειώδους τάσης που καθορίζεται έμμεσα από τον τελεστή  $B_{ijlm}$  καθώς και στον προσδιορισμό των άνω ορίων και του όγκου που εξαρτάται από τη διακριτοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία που χρησιμοποιείται.

Ανεξάρτητα από την προσέγγιση που χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση πολλές φορές είναι απαραίτητο να καθορίζονται οι μεταβολές της θερμοκρασίας που πραγματοποιούνται κατά την κατεργασία της σφυρηλάτησης. Η θεωρητική βάση είναι σχετικά απλή και αφορά στην εφαρμογή της εξίσωσης Laplace και συσχετίζει τις χρονικές και χωρικές μεταβολές της θερμοκρασίας  $T$  του υλικού που σφυρηλατείται με θερμική χωρητικότητα  $c$ , θερμική αγωγιμότητα  $k$  και πυκνότητα  $\rho$  [33]:

$$\rho c \frac{dT}{dt} = k \frac{\partial^2 T}{(\partial x_i)^2} + \frac{dQ}{dt} \quad (57)$$

Στην εξίσωση αυτή  $x_i$  είναι οι συντεταγμένες ενός συγκεκριμένου σημείου και με  $Q$  συμβολίζεται η θερμική ενέργεια. Η θερμική ενέργεια θα εξαρτάται από το εσωτερικό έργο παραμόρφωσης και άλλους παράγοντες όπως τη θερμότητα λόγω τριβής, συναγωγής και ακτινοβολίας. Συνήθως οι υπολογισμοί της παραμόρφωσης και της θερμότητας γίνονται χωριστά και η εξίσωση (57) επιλύεται στο τέλος κάθε βήματος της σφυρηλάτησης χρησιμοποιώντας ένα σχήμα πεπερασμένων στοιχείων.

Στην κατεργασία της σφυρηλάτησης σημαντικό ρόλο έχει ο σχεδιασμός των εργαλείων και της μήτρας και το μεγαλύτερο μέρος της σχετικής βιβλιογραφίας αναφέρεται σε αυτό. Η σχετική με αυτά τα στοιχεία έρευνα περιλαμβάνει τη χρήση αντίστροφων τεχνικών συνδυαστικά με προσομοιώσεις με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για το σχεδιασμό ενδιάμεσων σχημάτων μήτρας για διαδικασίες σφυρηλάτησης δύο βημάτων [34] ή αναλύσεις ευαισθησίας σχήματος [35, 36].



Οι αντίστροφες τεχνικές επίσης χρησιμοποιούνται για τη μελέτη της αναπλήρωσης του προφίλ της μήτρας που απαιτείται για την παραμόρφωση κατά τη διάρκεια της σφυρηλάτησης [37, 38] και το βέλτιστο σχεδιασμό σχήματος στην σφυρηλάτηση με εξώθηση χρησιμοποιώντας γενετικούς αλγόριθμους[39].

### **3.3.3 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΟΥ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΤΗ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ**

Συγκεκριμένα για τη σφυρηλάτηση των οδοντωτών τροχών έχουν προταθεί τα τελευταία χρόνια πολλά εργαλεία και διαδικασίες σφυρηλάτησης προκειμένου να επιτευχθεί καλύτερη ακρίβεια και ποιότητα σε αυτούς [40]. Έχει αποδειχθεί ότι αν ο λόγος του πάχους του οδόντα προς τη διάμετρό του είναι αρκετά μεγάλος οι οδόντες μπορούν να σχηματιστούν με εξώθηση. Ένας από τους παράγοντες που επηρεάζουν τις διαστάσεις της μήτρας είναι η ελαστική διαστολή εξαιτίας των πιέσεων της σφυρηλάτησης και η ακρίβεια του σφυρήλατου τροχού που αυξάνει με τη μείωση των φορτίων σφυρηλάτησης. Για την επίτευξη της καλύτερης ακρίβειας και ποιότητας των σφυρήλατων οδοντωτών τροχών σε συνδυασμό με έναν καλό σχεδιασμό της χρησιμοποιούμενης μήτρας απαιτείται η ανάλυση της διαδικασίας σφυρηλάτησης και εκτίμηση της ροής του υλικού και των αναπτυσσόμενων αταξιών.

Ο Kang και οι συνεργάτες του [41] πρότειναν ένα απλοποιημένο μοντέλο τρισδιάστατο με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για τη σφυρηλάτηση ενός οδοντωτού τροχού με εσωτερικά έκκεντρα προφίλ. Προτάθηκε η χαρτογράφηση μιας ισοδύναμης επιφάνειας προκειμένου να απλοποιηθεί η προσομοίωση της διαδικασίας χρησιμοποιώντας ένα τόξο ισοδύναμης ακτίνας για να αντικατασταθούν τα άγνωστα ελεύθερα όρια της ροής του υλικού στα διάφορα βήματα σφυρηλάτησης. Τα εκ νέου πλέγματα επιτεύχθηκαν με τη χρήση του υπολογιστικού πακέτου DEFORM 3 για να αποφευχθούν οι συνθήκες διαστρέβλωσης των πλεγμάτων.

Ο Lee και οι συνεργάτες του [42] υιοθέτησαν ένα άκαμπτης πλαστικότητας πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων για να αναλύσουν τη σφυρηλάτηση ενός κωνικού οδοντωτού τροχού και πρότειναν έναν καλύτερο σχεδιασμό μήτρας που μπορεί να οδηγήσει στην αποφυγή των αταξιών λόγω μη γεμίσματος χρησιμοποιώντας ένα κεντρικό κοχλία στην χαμηλότερη μήτρα. Το κύριο στοιχείο αυτού του σχεδιασμού είναι η ώθηση του υλικού που ρέει έξω από τις γωνίες με την ώθηση του κεντρικού ήλου.

Ο Song και οι συνεργάτες του [43] ανέπτυξαν έναν κώδικα πεπερασμένων στοιχείων που ονομάζεται CAMPform 3D για τη διερεύνηση του γεμίσματος του οδόντα του τροχού στην κατεργασία της ψυχρής σφυρηλάτησης. Ο λόγος της επιφάνειας του γεμάτου οδόντα του οδοντωτού τροχού προς την επιφάνεια του συνολικού οδοντωτού τροχού εισάγεται για την εκτίμηση της κατεργασίας. Τα αποτελέσματα τους έδειξαν ότι οι τροχοί με ή χωρίς έμβολο

μπορούν να προσομοιαστούν με αξιοπιστία χρησιμοποιώντας διαφορετικούς συντελεστές τριβής.

Ο Petruska και οι συνεργάτες του [44] χρησιμοποίησαν δοκιμές συμπίεσης των κυλινδρικών ειδών με εγκοπή στην επιφάνεια για την εκτίμηση των διαφορετικών κριτηρίων όλκιμης θραύσης. Οι δοκιμές συμπίεσης πραγματοποιήθηκαν για το 50CrV4 και για την επίτευξη των κρίσιμων τιμών των παραπάνω κριτηρίων χρησιμοποίησαν τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων LS-DYNA3D.

Ο Cai και οι συνεργάτες του [45] πρότειναν τον εναλλακτικό σχεδιασμό της μήτρας για τη σφυρηλάτηση οδοντωτού τροχού σχεδόν καθαρού σχήματος και η ανάλυση της κατεργασίας έγινε με χρήση του πακέτου Explicit Abaqus. Τα σχήματα της διάτρησης και της τοποθέτησης της μήτρας επιλέγονται στις υπάρχουσες εναλλακτικές του σχεδιασμού των εργαλείων σύμφωνα με τη γεωμετρία των σφυρηλάτων τεμαχίων.

Ο Yeo και οι συνεργάτες του [46] σχεδίασαν μια μήτρα για ψυχρή σφυρηλάτηση με δακτύλιο τάσεων χρησιμοποιώντας τις μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων για την ακαμψία και την ελαστικότητα προκειμένου να αναλύσουν τη διαδικασία της σφυρηλάτησης και τις τάσεις που αναπτύσσονται στη μήτρα. Ένας προσιτός δακτύλιος προέντασης είναι επιθυμητός προκειμένου να μειωθεί η στεφάνη και οι ακτινικές τάσεις που αναπτύσσονται στη μήτρα. Μια προσέγγιση βασιζόμενη στην προσομοίωση του σχεδιασμού της μήτρας και αξιολόγησή του παρουσιάστηκε από τον Fu και τους συνεργάτες του (2008) θεωρώντας τι μεθόδους ανάλυσης του χρόνου ζωής των τάσεων και του χρόνου ζωής της παραμόρφωσης. Η σχέση μεταξύ της πλαστικής παραμόρφωσης και της ζωής κόπωσης που προτάθηκε από τον Coffin [47] και τον Manson [48] υιοθετήθηκε για την ανάλυση κόπωσης της διάρκειας ζωής της τάσης. Οι διαδικασίες σφυρηλάτησης προσομοιώθηκαν με το DEFORM για να επιτευχθούν οι τάσεις και οι παραμορφώσεις της μήτρας.

Για την εξοικονόμηση χρόνου στις διαδικασίες σφυρηλάτησης και ανάλυσης τους με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων υιοθετήθηκαν τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (Artificial Neural Networks, ANN) και οι γενετικοί αλγόριθμοι (GA) για την πρόβλεψη της επιστροφής του ελατηρίου ενός μεταλλικού φύλλου που υπόκειται σε κάμψη ή για την ανεύρεση του βέλτιστου σχεδιασμού μήτρας [39, 49]. Η ολοκλήρωση των τεχνητών νευρωνικών δικτύων και των γενετικών αλγορίθμων καθιστούν τη διαδικασία προσομοίωσης λιγότερο ακριβή και μεγιστοποιούν τη χρήση των δεδομένων ανάλυσης στη διαδικασία της σφυρηλάτησης.

Ο σχεδιασμός προδιαμόρφωσης μιας διαδικασίας σφυρηλάτησης πολλαπλών βημάτων αποτελεί ένα άλλο σημαντικό στοιχείο της ανάλυσης της σφυρηλάτησης. Ο σχεδιασμός της ενδιάμεσης προδιαμόρφωσης γενικά διεξάγεται με εμπειρικές σχέσεις. Ο Kang και οι συνεργάτες του [50] πρότειναν έναν επαναληπτικό αλγόριθμο για το σχεδιασμό της προδιαμόρφωσης των επίπεδων στοιχείων σχήματος Η με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Τα ορθογώνια κομμάτια με διαφορετικούς λόγους ύψους προς πάχος για το

σχεδιασμό μήτρων που αποτελούνται από γραμμικά και τοξοειδή προφίλ. Οι γεωμετρίες παραμόρφωσης και οι συνολικές αποτελεσματικές τάσεις εξετάστηκαν για την εκτίμηση της ικανότητας γεμίσματος της μήτρας και της σκοπιμότητας της ροής των υλικών. Η προτεινόμενη μέθοδος αποτελεί έναν ικανοποιητικό σχεδιασμό αλλά η βελτιστοποίηση αποτελεί ακόμα ένα ζητούμενο στη συγκεκριμένη μελέτη. Για τη βελτίωση της κατανάλωσης χρόνου στον αρχικό σχεδιασμό οι Chang και Bramley [51] πρότειναν μια αντιστρεπτή προσέγγιση προσομοίωσης με συνδυασμό των μεθόδων των άνω οριακών φορτίσεων και των πεπερασμένων στοιχείων. Συγκεκριμένα πρότειναν τη μέτρηση της κατανομής υλικού για την εκτίμηση της γεωμετρικής πολυπλοκότητας των ορθογώνιων και κυκλικών τμημάτων για τον αρχικό συνδυασμό δισδιάστατων στοιχείων. Ως μέτρο της γεωμετρικής πολυπλοκότητας ελήφθησαν πολλαπλάσια των δευτεροβάθμιων ροπών αδρανείας ως προς το x και ως προς τον y άξονα. Ο Tompon [5] πρότεινε ανέφερε το κριτήριο του συντελεστή πολυπλοκότητας σχήματος (Shape Complexity Factor SCF) για την αναγκαιότητα του αρχικού σχεδιασμού. Ο Συντελεστής πολυπλοκότητας σχήματος για το σφυρήλατο τμήμα του τροχού και για την μπιγιέτα δίνεται από τις σχέσεις [52]:

$$(SCF)_F = [(P^2/A)_F / (P^2/A)_C] \quad (58)$$

$$(SCF)_0 = [(P^2/A)_0 / (P^2/A)_{C0}] [2R_{c0} / R_0] \quad (59)$$

Όπου P, A και R είναι παράμετροι που αναφέρονται στις περιοχές των κάθετων τμημάτων των σφυρηλατημένων τροχών και οριοθετούνται από τον κύλινδρο και την ακτίνα των κέντρων βάρους του σφυρήλατου τμήματος (δείκτης GF) και τον οριοθετημένο κύλινδρο (δείκτης GF). Οι δείκτες F, C και 0 αναφέρονται στα σφυρήλατα στοιχεία τον οριοθετημένο κύλινδρο και τις διαστάσεις του αρχικού τεμαχίου αντίστοιχα. Αν ο λόγος  $(SCF)_F$  προς  $(SCF)_0$  είναι μεγαλύτερος της μονάδας απαιτείται προδιαμόρφωση της προεξοχής για τη διαδικασία της σφυρηλάτησης.

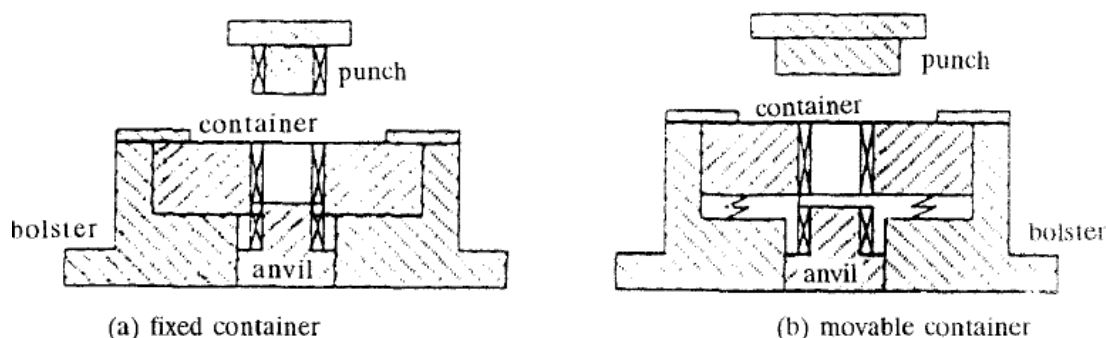
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ

### 4.1 ΑΠΕΥΘΕΙΑΣ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΓΙΑ ΕΛΙΚΟΕΙΔΕΙΣ ΚΑΙ ΜΕΤΩΠΙΚΟΥΣ ΟΔΟΝΤΩΤΟΥΣ ΤΡΟΧΟΥΣ

Όπως ήδη αναφέρθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια τα τελευταία χρόνια υπάρχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον στην παραγωγή οδοντωτών τροχών με τη διαδικασία της σφυρηλάτησης ακριβείας. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως η σφυρηλάτηση ακριβείας επιτρέπει την κατασκευή των οδόντων του τροχού με καθαρές ή σχεδόν καθαρές ανοχές με αποτέλεσμα την επίτευξη οικονομίας στο αρχικό υλικό και στο χρόνο παραγωγής συγκριτικά με τις συμβατικές μεθόδους κοπής. Επιπλέον η συγκεκριμένη κατεργασία αποδίδει βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες και καλύτερο φινίρισμα των επιφανειών. Παρά τα πλεονεκτήματα της συγκεκριμένης κατεργασίας υπάρχουν και προβλήματα που σχετίζονται με το σχεδιασμό της μήτρας, τον αρχικό όγκο και τη γεωμετρία, τον προσδιορισμό των φορτίων και της παραγόμενης ενέργειας καθώς επίσης και προβλήματα με την εκροή υλικού. Στη συνέχεια αναφέρεται η σφυρηλάτηση ακριβείας για μετωπικούς ελικοειδείς οδοντωτούς τροχούς.

#### 4.1.1 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΗΤΡΑΣ

Στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζονται δύο βασικές μήτρες για τη σφυρηλάτηση μετωπικών και ελικοειδών οδοντωτών τροχών.



**Σχήμα 4.1:** Μήτρες για τη σφυρηλάτηση α) μετωπικών και β) ελικοειδών οδοντωτών τροχών [53].

Στις δύο αυτές μήτρες οι οδόντες των οδοντωτών τροχών διαμορφώνονται στο σχετικό χώρο-δοχείο (container). Το αμόνι (anvil) έχει διαμορφωμένους οδόντες στην περιφέρειά του και είναι κλειστά προσαρμοσμένος στο χώρο σφυρηλάτησης. Με αυτόν τον τρόπο παραμένει καθαρή η μήτρα όταν το αμόνι κινείται προς τα πάνω σε κάθε κύκλο σφυρηλάτησης.

Στη μήτρα για τους μετωπικούς οδοντωτούς τροχούς (a) το μόνο κινούμενο μέρος είναι η πρέσα που εισέρχεται στο δοχείο για να διαμορφώσει το τεμάχιο εργασίας. Για την περίπτωση της σφυρηλάτησης με προεξοχή η περιφέρεια της πρέσας πρέπει να έχει την ίδια οδοντωτή περιφέρεια με το αμόνι.

Η πρέσα στο σχεδιασμό (b) δεν εισέρχεται στο δοχείο αλλά κλείνει την κοιλότητα πιέζοντας τα σχετικά ελατήρια ανάρτησης. Η πρέσα στην περίπτωση αυτή δεν χρειάζεται να είναι ακριβώς διαμορφωμένη για να προσαρμόζει στο δοχείο και γενικά η κατασκευή της είναι φθηνότερη από την περίπτωση (a) [53]. Γενικά ο τύπος γέμισματος της κοιλότητας στο σχεδιασμό (a) είναι ο αντίστροφος από το αντίστοιχο γέμισμα στο σχεδιασμό (b).

#### **4.1.2 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΟΥ ΑΡΧΙΚΟΥ ΟΓΚΟΥ ΚΑΙ ΤΗΣ ΑΡΧΙΚΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ**

Όπως σε όλες τις διαδικασίες σφυρηλάτησης ο ακριβής έλεγχος του όγκου της μπιγιέτας αποτελεί πρόβλημα στην σφυρηλάτηση ακριβείας. Το πρόβλημα αυτό έχει μελετηθεί από διάφορους μελετητές όπως ο Dean [54], ο Meyer [55] και ο Nediani [56].

Η βέλτιστη αρχική γεωμετρία είναι ένα άλλο πρόβλημα της ακριβούς σφυρηλάτησης των οδοντωτών τροχών. Προκειμένου να κατασκευαστούν οδοντωτοί τροχοί χωρίς ατέλειες με ανάλογα γεμισμένες γωνίες είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός της κατάλληλης γεωμετρίας. Επιπλέον, η αρχική γεωμετρία επηρεάζει τις απαιτήσεις για το γέμισμα της κοιλότητας της μήτρας. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν λίγες πληροφορίες για τον αρχικό σχεδιασμό της σφυρηλάτησης ακριβείας. Οι Sadeghi και Dean [53] βασιζόμενοι σε πειραματικά τους αποτελέσματα και βιβλιογραφικές αναφορές [57] προσδιόρισαν τις ακόλουθες προτάσεις σχεδιασμού για την ακριβή σφυρηλάτηση των ελικοειδών και μετωπικών οδοντωτών τροχών:

- Ο όγκος του αρχικού σχήματος θα πρέπει να είναι ίσος με τον όγκο του τελικού οδοντωτού τροχού και θα πρέπει να ελέγχεται ακριβώς προκειμένου να αποφεύγεται η υπερπλήρωση ή η υπερφόρτιση των εργαλείων.
- Η γεωμετρία του αρχικού σχήματος θα πρέπει να σχεδιάζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να κυριαρχεί η προς τα άνω ροή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα καλύτερο γέμισμα της μήτρας και μικρότερες απαιτήσεις φόρτισης [58].
- Σε μέσες θερμοκρασίες σφυρηλάτησης αν η επαφή με τα πλευρικά τοιχώματα της μήτρας πραγματοποιείται πριν την πλήρωση των γωνιών, ο συνδυασμός της αυξανόμενης αντίστασης στην τριβή και της αυξανόμενης τάσης λόγω ψύξης κάνει το γέμισμα των γωνιών ιδιαίτερα δύσκολο. Κατά συνέπεια, ο αρχικός σχεδιασμός της

γεωμετρίας πρέπει να είναι τέτοιος ώστε να καθυστερεί την επαφή με τα πλευρικά τοιχώματα.

- Για τη σφυρηλάτηση σφαιρικών τροχών η χρήση της προδιαμόρφωσης της κοιλότητας αποτελεί πλεονέκτημα. Η προδιαμόρφωση της κοιλότητας πρέπει να σχεδιάζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να ικανοποιείται η εξωτερική ροή και η ελάχιστη επαφή με τα πλευρικά τοιχώματα.
- Για το καλύτερο γέμισμα της μήτρας η προδιαμόρφωση της γεωμετρίας δεν πρέπει να παράγει πτερύγια μέχρι το τέλος της κατεργασίας σφυρηλάτησης.
- Στην περίπτωση της χρήσης κυλινδρικών προδιαμορφώσεων η μέγιστη εξωτερική διάμετρος της προδιαμόρφωσης πρέπει να είναι ίση με τη διάμετρο του μικρότερου οδοντωτού τροχού προκειμένου να ελαχιστοποιείται το ελεύθερο στάδιο και να ξεπερνιούνται τα πιθανά προβλήματα αναδίπλωσης.
- Αν η αρχική γεωμετρία σχεδιάζεται για ακτινική ροή στους οδόντες θα παράγονται οδόντες με μεγαλύτερη αντοχή. Αυτός ο τύπος ροής χρησιμοποιείται για τη μείωση της ολίσθησης στους οδόντες αφού μειώνει τη φθορά των οδόντων.
- Για τη σφυρηλάτηση σφαιρικών οδοντωτών τροχών η προδιαμόρφωση του δακτυλίου με τη μέγιστη εξωτερική διάμετρο και την ξεκάθαρη απόσταση μεταξύ της εσωτερικής διαμέτρου και του εμβόλου έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία πιο προσιτών τάσεων στην κορυφή των οδόντων. Αυτό βοηθάει στη μείωση των πιθανών επιφανειακών ρωγμών στην άκρη των οδόντων κατά την παραμόρφωση [59].

#### 4.1.3 ΑΚΡΙΒΕΙΑ ΣΤΗ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ

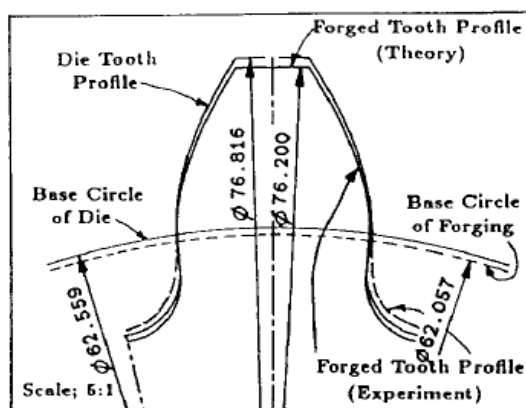
Στη σφυρηλάτηση ακριβείας των οδοντωτών τροχών ο βασικός στόχος είναι η παραγωγή οδοντωτών τροχών με ολοκληρωμένους οδόντες χωρίς να απαιτούνται περαιτέρω διαδικασίες σφυρηλάτησης. Αυτό όμως απαιτεί το σχεδιασμό και την κατασκευή μήτρων με μεγάλη ακρίβεια. Στη σφυρηλάτηση ακριβείας των οδοντωτών τροχών υπάρχουν μικρές αποκλίσεις ανάμεσα στις διαστάσεις των τροχών που σχηματίζονται, της κοιλότητας της μήτρας και του σφυρήλατου τροχού. Αυτό αντισταθμίζει τις ακόλουθες μεταβολές [53]:

1. Κάτω από τα φορτία σφυρηλάτησης οι κοιλότητες της μήτρας επεκτείνονται ελαστικά και για αυτό οι αρχικές τους διαμέτροι πρέπει να κατασκευάζονται μικρότερες.
2. Αν το τεμάχιο εργασίας είναι σε μέση θερμοκρασία οι μήτρες προθερμαίνονται και κατά συνέπεια επεκτείνονται και η κοιλότητα μπορεί να είναι μικρότερη.

3. Επειδή η σφυρηλάτηση συρρικνώνει τα τεμάχια σε μέσες θερμοκρασίες η κοιλότητα της μήτρας μπορεί να είναι μεγαλύτερη.
4. Στη σφυρηλάτηση ακριβείας των οδοντωτών τροχών οι μήτρες κατασκευάζονται με κατεργασίες ηλεκτροεναπόθεσης. Λόγω των ανοχών στο διάκενο του σπινθήρα το ηλεκτρόδιο που θα χρησιμοποιηθεί μπορεί να είναι μικρότερο.

Κατά συνέπεια για να επιτευχθούν με ακρίβεια σφυρήλατοι οδοντωτοί τροχοί η έκταση του καθένα από τους παραπάνω παράγοντες θα πρέπει να υπολογιστεί. Χρησιμοποιώντας τις τιμές των αλλαγών των διαστάσεων που έχουν εξαχθεί για στερεούς κυλίνδρους [60], οι παραπάνω παράγοντες επηρεάζουν τις τελικές διαστάσεις σφυρηλάτησης όπου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον καθορισμό της σχέσης ανάμεσα στην ακτίνα της μήτρας και της σφυρηλάτησης.

Θεωρώντας ότι κάθε σημείο στην ακτίνα της σφυρηλάτησης κινείται κατά μήκος της ακτίνας, βρέθηκε ότι το προφίλ του σφυρήλατου οδόντα στην εξελεγμένη καμπύλη της κοιλότητας της μήτρας του οδόντα παραμένει στην εξελεγμένη [61]. Στο Σχήμα 4.2 συγκρίνονται τα πειραματικά αποτελέσματα που επιτυγχάνονται από τα ίχνη των οδόντων στους 1000° C με τα θεωρητικά προφίλ της θεωρούμενης μήτρας και της τελικής σφυρηλάτησης.



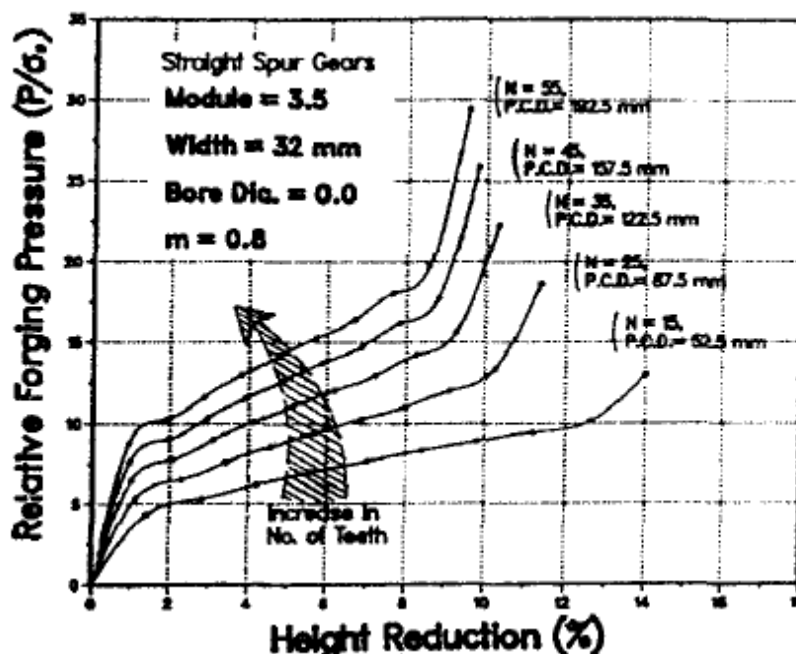
**Σχήμα 4.2:** Πειραματικό προφίλ ενός σφυρηλατημένου οδόντα συγκριτικά με το θεωρητικό προφίλ της θεωρούμενης μήτρας και της τελικής σφυρηλάτησης για τη σφυρηλάτηση στους 1000°C [53].

#### 4.1.4 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΦΟΡΤΙΩΝ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Για την σφυρηλάτηση ακριβείας των οδοντωτών τροχών υπάρχουν λίγες μέθοδοι ανεπτυγμένες για την εκτίμηση των φορτίων. Ένα θεωρητικό μοντέλο που βασίζεται στην ενεργειακή μέθοδο για την εκτίμηση των φορτίων σφυρηλάτησης και το προφίλ της

επιφάνειας του οδόντα στη σφυρηλάτηση επίπεδων μετωπικών τροχών ή ελικοειδών οδοντωτών τροχών [57]. Βρέθηκε ότι [53]:

- Η πίεση σφυρηλάτησης αυξάνει σημαντικά και ανάλογα με την παραμόρφωση καθώς αυξάνεται ο συντελεστής τριβής. Η αύξηση είναι σημαντικότερη μετά την επαφή του σχηματιζόμενου οδόντα με τα τοιχώματα της μήτρας.
- Για δεδομένο μοντούλ του οδοντωτού τροχού και πάχος η πίεση σφυρηλάτησης αυξάνει με την αύξηση του αριθμού των οδόντων.



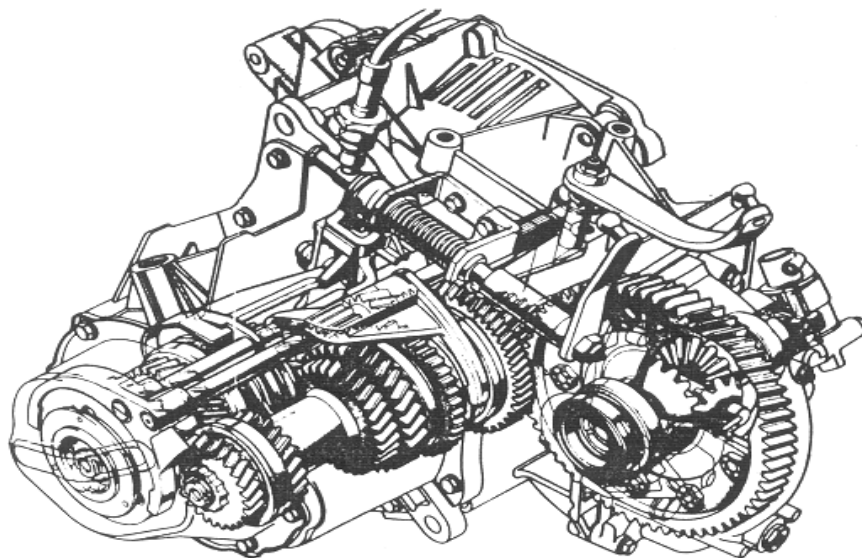
**Σχήμα 4.3:** Μεταβολή της σχετικής πίεσης σφυρηλάτησης με την παραμόρφωση για διαφορετικό αριθμό οδόντων στη σφυρηλάτηση επίπεδων μετωπικών τροχών [53].

- Η πίεση της σφυρηλάτησης μεταβάλλεται ελάχιστα με την αύξηση του μοντούλ του οδοντωτού τροχού κατά το πρώτο στάδιο της παραμόρφωσης και πριν ο σχηματιζόμενος οδόντας έρθει σε επαφή με το τοίχωμα της μήτρας. Κατά την πλήρωση των γωνιών η πίεση αυξάνεται σημαντικά καθώς αυξάνεται το μοντούλ των τροχών.
- Η πίεση της σφυρηλάτησης αυξάνει πολύ απότομα με την αύξηση της γωνίας ελίκωσης στο εσωτερικό πεδίο παραμόρφωσης.
- Για δεδομένο μέγεθος οδοντωτού τροχού όσο μεγαλύτερο πάχος έχει ο τροχός τόσο μεγαλύτερες είναι οι απαιτήσεις για φορτίο.
- Η πίεση σφυρηλάτησης αυξάνεται με αύξηση της διαμέτρου της οπής και αυτή η αύξηση είναι πιο σημαντική κατά το στάδιο πλήρωσης των γωνιών.



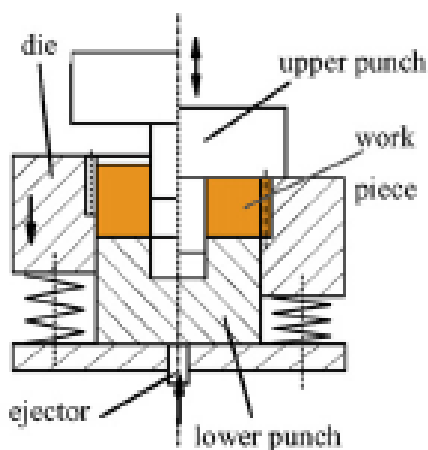
## 4.2. ΣΦΥΡΗΛΑΤΟΙ ΟΔΟΝΤΩΤΟΙ ΤΡΟΧΟΙ ΓΙΑ ΧΡΗΣΗ ΣΕ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΑ

Οι ελικοειδείς τροχοί χρησιμοποιούνται ευρέως στα αυτοκίνητα και όπως άλλα χαρακτηριστικά στοιχεία του αυτοκινήτου μπορούν να διαμορφωθούν με διαδικασίες ακριβής σφυρηλάτησης.



**Σχήμα 4.4:** Κιβώτιο ταχυτήτων (βασική χρήση σφυρηλατών οδοντωτών τροχών στο αυτοκίνητο) [63]

Οι διαδικασίες ακριβούς σφυρηλάτησης για τους ελικοειδή οδοντωτούς τροχούς έχουν μελετηθεί εκτενώς από το Ινστιτούτο για τη Διαμόρφωση των Μετάλλων και Εργαλείων Διαμόρφωσης (IFUM, Institute for Metal Forming and Metal Forming Machine Tools) [62].



**Σχήμα 4.5:** Εργαλείο για τη σφυρηλάτηση ακριβείας για τους ελικοειδή οδοντωτούς τροχούς [63]

Οι ελικοειδείς οδοντωτοί τροχοί που έχουν σφυρηλατηθεί με διαδικασίες ακριβείας φαίνονται στο Σχήμα 4.6 [62]. Για τους ελικοειδή οδοντωτούς τροχούς που χρησιμοποιούνται στα αυτοκίνητα απαιτούνται σχεδιασμοί που θα ελαχιστοποιούν το θόρυβο και θα κατέχουν ελαχιστοποιημένο χώρο [64]. Ειδικά για τη μείωση του θορύβου απαιτείται μια διαδικασία φινιρίσματος για τους ελικοειδείς τροχούς. Κατά συνέπεια, μια ανοχή του ελικοειδούς τροχού πρέπει να προωθείται από την κατεργασία ακριβής σφυρηλάτησης. Προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η κατεργασία φινιρίσματος η ανοχή πρέπει να είναι μικρή και πολύ ακριβής.



**Σχήμα 4.6:** Ελικοειδείς οδοντωτοί τροχοί από το IFUM [62]

Σε ανοχές της τάξης των 0.1-0.2mm θα πρέπει κατά τη διαδικασία σφυρηλάτησης να λαμβάνονται υπόψη η συρρίκνωση του υλικού που προέρχεται από τη θερμοκρασία σφυρηλάτησης καθώς και οι μεταβολές του ακατέργαστου υλικού. Στο Σχήμα 4.7 ένας ελικοειδής οδοντωτός τροχός χρησιμοποιείται ως σταθερό μοντέλο (καλούπι) από το Collaborative Research Center (SFB 489).

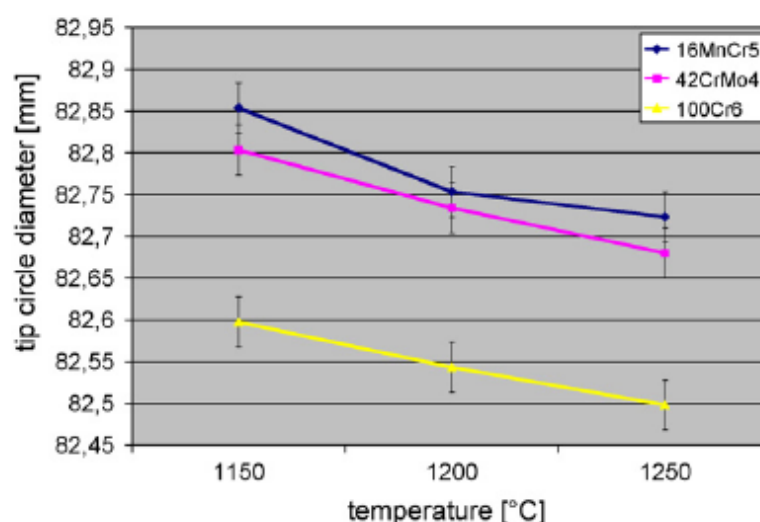


Teeth:	37
Module:	2
Helix angle:	20°
Pressure angle:	20°
Tip diameter:	87.75 mm
Root diameter:	73.3 mm

**Σχήμα 4.7:** Ελικοειδής οδοντωτοί τροχοί [62].

Για να επιτευχθούν οι ανοχές των 0.1-0.2mm θα πρέπει να επιτευχθούν μικρές αλλαγές στη διαδικασία ακριβούς σφυρηλάτησης. Ένα πλεονέκτημα από τη χρήση της συγκεκριμένης κατεργασίας είναι ότι η θερμότητα που παράγεται από τη συγκεκριμένη κατεργασία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ολοκληρωμένη θερμική κατεργασία. Για μια ολοκληρωμένη θερμική κατεργασία το υλικό που χρησιμοποιείται για την κατασκευή του τροχού θα πρέπει να έχει μεγάλη ποσότητα άνθρακα.

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται σήμερα για τους οδοντωτούς τροχούς είναι σκληρυμένοι χάλυβες που χρειάζονται ενανθράκωση πριν την ανόπτηση. Για να χρησιμοποιηθεί η θερμότητα από τη σφυρηλάτηση θα πρέπει το υλικό να είναι από θερμικά κατεργασμένο χάλυβα. Η εναλλακτική επιλογή του υλικού επηρεάζει σημαντικά το σχηματισμό αποκλίσεων του τεμαχίου και κατά συνέπεια των προκαθορισμένων ανοχών εξαιτίας της διαφορετικής συμπεριφοράς συρρίκνωσης [60, 65]. Στο Σχήμα 4.8 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της επίδρασης της θερμοκρασίας και της επιλογής του υλικού στις αποκλίσεις του τεμαχίου σε σχέση με τη διάμετρο του πρότυπου ελικοειδούς οδοντωτού τροχού.






**Σχήμα 4.8:** Επίδραση της θερμοκρασίας και του υλικού στη διάμετρο του ελικοειδούς οδοντωτού τροχού [62].

Οι δοκιμές που διεξήχθησαν στο IFUM έδειξαν ότι ο σκληρυμένος χάλυβας 16MnCr5 (1.7135) και του θερμικά κατεργασμένου χάλυβα (1.7225) παρουσιάζουν σχεδόν την ίδια συμπεριφορά συρρίκνωσης. Οι ελικοειδείς τροχοί που έχουν σφυρηλατηθεί από τον θερμαινόμενο χάλυβα 100Cr6 (1.3505) παρουσιάζει μικρότερες διαμέτρους από τις αντίστοιχες διαμέτρους των δύο άλλων χάλυβων. Οι συγκεκριμένες δοκιμές πραγματοποιήθηκαν με οδοντωτούς τροχούς διαφορετικών διαμέτρων με μεγαλύτερο ή μικρότερο μοντούλ σε σχέση με οδοντωτούς τροχούς που σφυρηλατήθηκαν σε

ευθύγραμμους σωλήνες ή με την απλή διαδικασία σφυρηλάτησης. Όλες οι δοκιμές έδειξαν συγκρίσιμα αποτελέσματα με τους τροχούς από 16MnCr5 να έχουν τη μεγαλύτερη εσωτερική και εξωτερική διάμετρο και τους τροχούς από 100Cr6 τις μικρότερες.

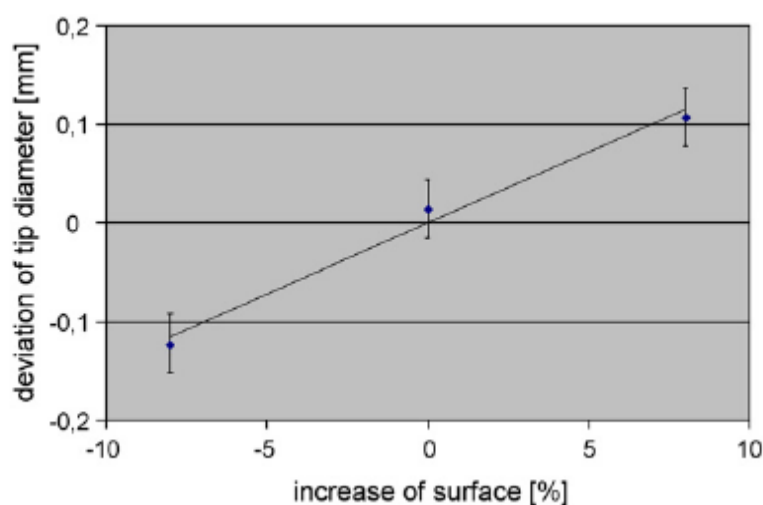
Η συμπεριφορά συρρίκνωσης του τεμαχίου δεν επηρεάζεται μόνο από το επιλεγμένο υλικό αλλά επίσης από το λόγο επιφάνειας προς τη μάζα. Για να διερευνηθεί η επίδραση της επιφάνειας ο ελικοειδής τροχός θα πρέπει να σφυρηλατηθεί χρησιμοποιώντας διαφορετικές παραλλαγές της άνω και κάτω μήτρας. Συνδυασμός των παραλλαγών της χρησιμοποιούμενης μήτρας προκύπτουν τέσσερις διαφορετικές γεωμετρίες για το κομμάτι με αυξανόμενη επιφάνεια και με χρήση του ίδιου συστήματος οδόντων.

geometry	1	2/3	4
cross section			
surface area [mm <sup>2</sup> ]	19087	20537	22080

**Σχήμα 4.9:** Γεωμετρίες που χρησιμοποιήθηκαν για τη διερεύνηση της επίδρασης της επιφάνειας [62].

Οι δύο από τις τέσσερις γεωμετρίες ήταν πανομοιότυπες ανεξάρτητα με το αν άλλαζε η γεωμετρία της μήτρας. Οι σφυρηλατήσεις πραγματοποιήθηκαν κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες χρησιμοποιώντας την ίδια μάζα για όλα τα τεμάχια.

Οι μετρήσεις έδειξαν ότι το μεγαλύτερο τμήμα της επιφάνειας οδηγεί σε μεγαλύτερη διάχυση θερμότητας στο εργαλείο. Εξαιτίας αυτού η συρρίκνωση του τεμαχίου μετά τη σφυρηλάτηση μειώνεται.

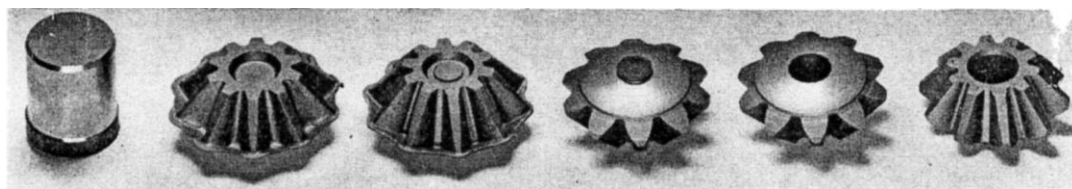


**Σχήμα 4.10:** Η επίδραση της επιφάνειας του τεμαχίου στη διάμετρο του πρότυπου ελικοειδούς τροχού [62].

Ο Dean [40] αναφέρει ότι η γεωμετρία των οδοντωτών τροχών που χρησιμοποιούνται στα κιβώτια ταχυτήτων των αυτοκινήτων εμποδίζει την εξώθηση για αυτό και η καλύτερη μέθοδος κατασκευής τους είναι η σφυρηλάτηση κλειστή μήτρας. Εξαιτίας του μεγάλου λόγου διαμέτρου προς ύψος, προκειμένου να διευκολυνθεί η μήτρα στο γέμισμα χρησιμοποιώντας αποδεκτές πιέσεις τα τεμάχια εργασίας θα πρέπει να θερμανθούν γεγονός που προωθεί την παραγωγή οδοντωτών τροχών σχεδόν καθαρού σχήματος με οδόντες υψηλής ποιότητας.

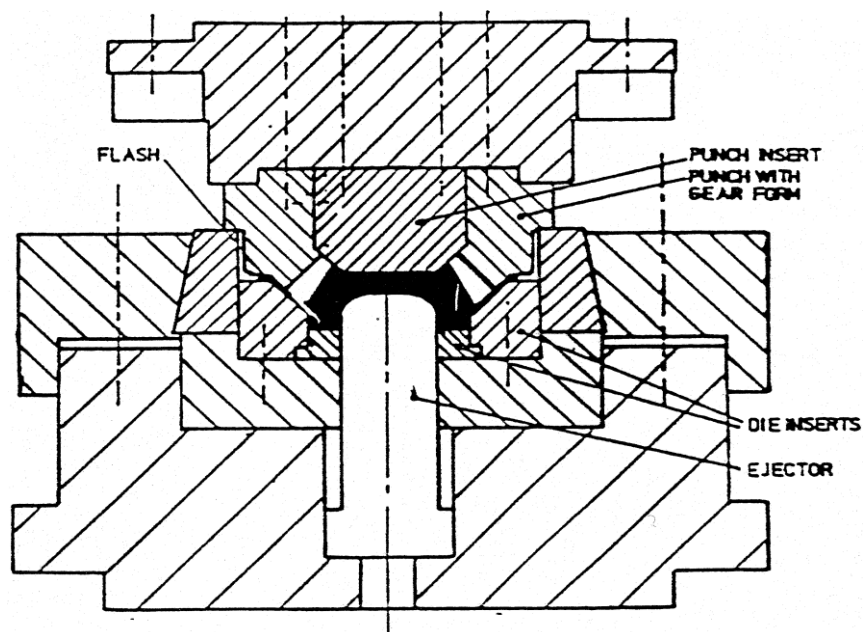
#### 4.2.1 ΚΩΝΙΚΟΙ ΟΔΟΝΤΩΤΟΙ ΤΡΟΧΟΙ

Η ακολουθία των λειτουργιών που ακολουθούνται για την αρχική διαδικασία σφυρηλάτησης των εμπορικών κωνικών οδοντωτών τροχών φαίνεται στο Σχήμα 4.11. Από τα 6 στάδια που απεικονίζονται, για την προετοιμασία του μετάλλου στον τελικό οδοντωτό τροχό μόνο τα δύο αφορούν στη σφυρηλάτηση.



Σχήμα 4.11: Κωνικοί οδοντωτοί τροχοί [40]

Η μπιγιέτα στρέφεται από τη ράβδο έλασης για να απομακρυνθεί κάθε ελαττωματικό υλικό που μπορεί να υπάρχει. Στο Σχήμα 4.12 φαίνεται η μήτρα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή των κωνικών οδοντωτών τροχών και η προεξοχή που είναι αναπόφευκτη στο πίσω μέρος του τεμαχίου. Αυτή συχνά απομακρύνεται με διαμόρφωση. Παρά το γεγονός ότι προσδίδει σκλήρυνση στους τελικούς τροχούς οι σχεδιαστές τη λαμβάνουν υπόψη στην παραγωγή σφυρηλάτων οδοντωτών τροχών μεγάλης απόδοσης.

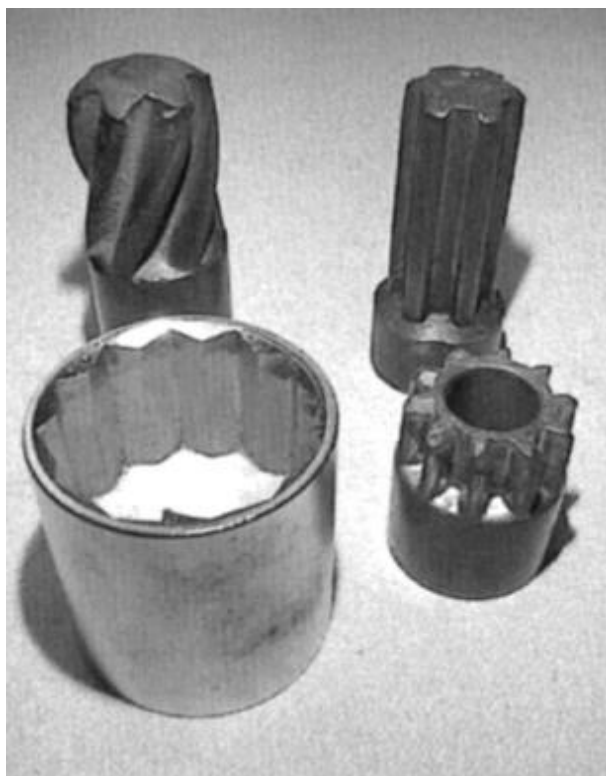


Σχήμα 4.12: Η μήτρα για την κατασκευή κωνικών οδοντωτών τροχών [40]

Η τροχιακή ψυχρή σφυρηλάτηση στην οποία η κορυφή του εργαλείου έχει κλίση από τον κάθετο άξονα και περιστρέφεται μπορεί να χρησιμοποιηθεί επίσης για τους κωνικούς οδοντωτούς τροχούς. Τα μικρότερα εργαλεία για την περιοχή επαφής του τεμαχίου εργασίας που χρησιμοποιούνται σε αυτήν την κατεργασία δίνουν πλεονέκτημα στις μικρές μηχανές διαμόρφωσης σε σχέση με τις συμβατικές για το σχηματισμό οδοντωτών τροχών ενός ειδικού μεγέθους.

#### 4.2.2 ΚΕΝΑ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ

Σε αντίθεση με τους κωνικούς οδοντωτούς τροχούς οι άκρες των οδόντων των μετωπικών και των ελικοειδών τροχών είναι παράλληλες προς τους άξονές τους. Στους οδοντωτούς τροχούς όπου ο λόγος του πάχους των οδόντων προς την διάμετρο του τροχού είναι μεγάλος οι οδόντες συχνά μπορούν να σχηματιστούν με εξώθηση. Παραδείγματα αυτών των τροχών φαίνονται στο Σχήμα 4.13.



**Σχήμα 4.13:** Οδοντωτοί τροχοί κατασκευασμένοι με ψυχρή σφυρηλάτηση [40]

Αν οι οδόντες προεκτείνονται στο συνολικό πάχος του οδοντωτού τροχού μπορεί να χρησιμοποιηθεί συνεχής εξώθηση στην οποία το στοιχείο εξωθείται μέσα από τη μήτρα από τη μπιγιέτα. Η κίνηση στη μήτρα είναι μονοδιάστατη και μπορεί να επιτευχθεί μεγάλη ποσότητα παραγωγής. Στο Σχήμα 4.14 παρουσιάζεται ένας τροχός που έχει κατασκευαστεί με αυτόν τον τρόπο και στον οποίο η στρέβλωση στην επιφάνεια προκαλείται από τη μη ομοιόμορφη ροή μετάλλου [40].



**Σχήμα 4.14:** Οδοντωτός τροχός κατασκευασμένος με συνεχή εξώθηση και στρέβλωση της μετωπικής επιφάνειας [40].

Οι οδοντωτοί τροχοί που χρησιμοποιούνται στα κιβώτια ταχυτήτων έχουν πολύ μικρό πάχος σε σχέση με τις διαμέτρους τους και συχνά παρουσιάζουν άλλα χαρακτηριστικά όπως αυλακώσεις και κώνους συγχρονισμού που δεν ενδείκνυνται για εξώθηση. Αυτός είναι και ο λόγος που για τους συγκεκριμένους σφυρήλατους οδοντωτούς τροχούς η κατεργασία που χρησιμοποιείται συνήθως είναι η θερμή σφυρηλάτηση κλειστής μήτρας. Επιπλέον, η σφυρηλάτηση της εξελιγμένης των οδόντων δεν είναι μια προσιτή εμπορική κατεργασία γιατί με αυτήν είναι αδύνατη η κατασκευή οδόντων συγκεκριμένων διαστάσεων.

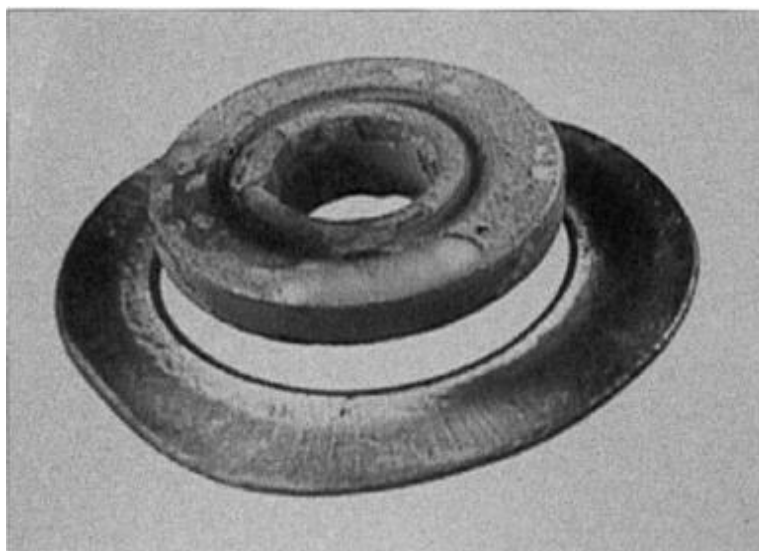
Τα προβλήματα που σχετίζονται με το χειρισμό και την τοποθέτηση των οδοντωτών τροχών και αφορούν κυρίως στις λειτουργίες φινιρίσματος καθιστούν τη συνολική κατεργασία ιδιαίτερα ακριβή συγκριτικά με τη συμβατική μέθοδο κατασκευής. Κυρίως αυτός είναι ο λόγος που οι σφυρήλατοι οδοντωτοί τροχοί σχεδόν καθαρού σχήματος για την αυτοκινητοβιομηχανία έχουν πλήρως σχηματισμένους τους μεγάλους κωνικούς οδόντες στις τελικές διαστάσεις ενώ η περιοχή των λειτουργικών οδόντων παραμένει κενή και κατεργάζεται με τη συμβατική μέθοδο. Αυτοί οι οδοντωτοί τροχοί απεικονίζονται στο Σχήμα 4.15.



**Σχήμα 4.15:** Σφυρήλατοι οδοντωτοί τροχοί με κενά και μεγάλους κωνικούς οδόντες [40]

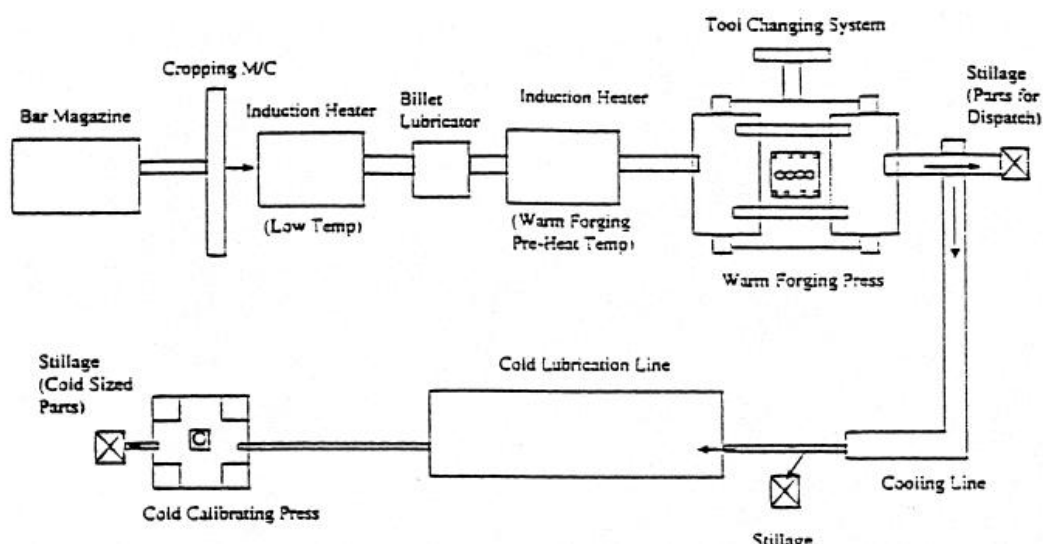
Το συγκεκριμένο χαρακτηριστικό αφορά κυρίως τους μετωπικούς τροχούς που εύκολα σφυρηλατούνται εν ψυχρώ στο τελικό μέγεθος. Ένας τυπικός οδοντωτός τροχός με κενό παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.16. Η εξοχή και το μικρής ποιότητας φινιρίσμα είναι εμφανή όπως επίσης και η έλλειψη ακριβείας στη διαστασιολόγηση. Αντίθετα οι τροχοί του σχήματος 4.15 έχουν καλή τελική επιφάνεια, ακριβείς διαστάσεις και για αυτό μπορούν να υποστούν μηχανική κατεργασία πολύ εύκολα.





Σχήμα 4.16: Κενός οδοντωτός τροχός [40]

Το εύρος της τυπικής γραμμής σφυρηλάτησης για την παραγωγή αυτού του τύπου κενού οδοντωτού τροχού φαίνεται στο Σχήμα 4.17. Το ακατέργαστο υλικό που χρησιμοποιείται είναι συνήθως ράβδοι από χάλυβα που διασφαλίζουν την ακρίβεια της διαστασιολόγησης και την απώλεια επιφανειακών αταξιών. Αυτό αντισταθμίζει το μήκος και το βάρος. Τυπικά κυμαίνεται στο 0.5% του ονομαστικού βάρους για τη σφυρηλάτηση σε εντελώς κλειστές μήτρες.



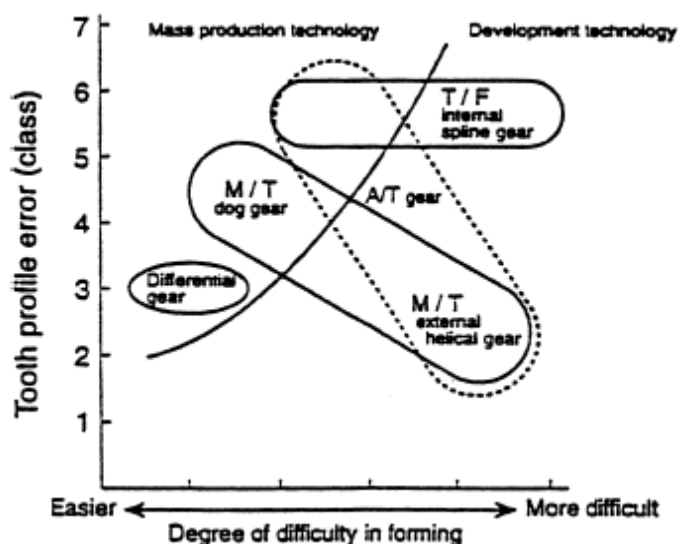
Σχήμα 4.17: Τυπική γραμμή σφυρηλάτησης οδοντωτών τροχών με κενά [52].

Οι μπιγιέτες ταξινομούνται με βάση το βάρος τους και οι βαρύτερες χρησιμοποιούνται στο τέλος της κατεργασίας όπου η φθορά των εργαλείων έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη της κοιλότητας. Για μεγαλύτερη παραγωγικότητα, η θέρμανση, η λίπανση και η σφυρηλάτηση διεξάγονται διαδοχικά και αυτόματα στη γραμμή. Η θέρμανση πραγματοποιείται με αγωγή και

σε δύο στάδια. Ένας μικρός θερμαντήρας χρησιμοποιείται για να ανεβάσει τη θερμοκρασία από τις μπιγιέτες στους 1208-1508° C. Οι μπιγιέτες στη συνέχεια ψεκάζονται ή εμβαπτίζονται στο λιπαντικό που τις επικαλύπτει καθώς το φέρον αέριο εξατμίζεται. Οι επικαλυμμένες μπιγιέτες στη συνέχεια μεταφέρονται στον βασικό θερμαντήρα που τις θερμαίνει στη θερμοκρασία σφυρηλάτησης. Στη συνέχεια, θα χρησιμοποιηθούν τουλάχιστον τρεις διαδικασίες σφυρηλάτησης. Η πρώτη αφορά στην τετραγωνοποίηση και διαστασιολόγηση του τήγματος, η δεύτερη στη διάνοιξη της οπής και η τρίτη για την παραγωγή του τελικού κομματιού. Μετά τη σφυρηλάτηση τα τεμάχια ψύχονται κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες πριν οι κύριοι οδόντες διαστασιολογηθούν. Απαιτείται αυστηρός έλεγχος των μεταβλητών κατεργασίας σε όλα τα στάδια: η θερμοκρασία της μπιγιέτας πρέπει να είναι έως 158° C, η θερμοκρασία της μήτρας 108° C, θα πρέπει να υπάρχει ακριβής χρήση του λιπαντικού επικάλυψης που χρειάζεται για την απαιτούμενη ακρίβεια των σφυρηλάτων τεμαχίων.

### 4.2.3 ΜΕΤΩΠΙΚΟΙ ΚΑΙ ΕΛΙΚΟΕΙΔΕΙΣ ΤΡΟΧΟΙ

Η εξέλιξη της τεχνολογίας και η στρατηγική ανάπτυξης για την ακριβή σφυρηλάτηση των οδοντωτών τροχών στην αυτοκινητοβιομηχανία της Ιαπωνίας παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.18 (Hayashi M, 1993).



**Σχήμα 4.18:** Εξέλιξη της τεχνολογίας ανάπτυξης οδοντωτών τροχών για την αυτοκινητοβιομηχανία [66],

Από το σχήμα είναι προφανές ότι οι διαφορετικοί κωνικοί οδοντωτοί τροχοί επιτυγχάνονται στη μαζική παραγωγή με τεχνολογίες διαμόρφωσης. Οι οδοντωτοί τροχοί εσωτερικής οδόντωσης που χρησιμοποιούνται στα οχήματα τεσσάρων τροχών, στα

αυτόματα κιβώτια ταχυτήτων και στα χειροκίνητα κιβώτια ταχυτήτων βρίσκονται ακόμα στο στάδιο της ανάπτυξης.

Για την παραγωγή ελικοειδών ή μετωπικών οδοντωτών τροχών έχει ήδη παρουσιαστεί η μήτρα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Ένα σφαιρικό τεμάχιο εργασίας παραμορφώνεται στο εργαλείο διάνοιξης οπών σε μια πλήρως κλειστή κοιλότητα μήτρας. Περιορίζεται καθώς η οπή μέσω του εμβόλου εφάπτεται στο εργαλείο και η περιφερειακή του επιφάνεια ρέει στα τοιχώματα του οδόντα. Κατά από την επίδραση του εργαλείου το δοχείο κινείται προς τα κάτω. Επειδή το καλούπι είναι εντελώς κλειστό δεν σχηματίζεται εξοχή αλλά επειδή τα τεμάχια εργασίας θερμαίνονται προκειμένου να διευκολυνθεί η ροή τους στην κοιλότητα της μήτρας οι οδόντες δεν σχηματίζονται με τη μορφή σχεδόν καθαρού σχήματος. Ένας οδοντωτός τροχός που χρησιμοποιείται στην αυτοκινητοβιομηχανία και κατασκευάζεται με αυτήν την μήτρα παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.19.



**Σχήμα 4.19:** Σφυρήλατος οδοντωτός τροχός για αυτοκίνητα με διαδικασία σφυρηλάτησης κλειστής μήτρας [40].

Η διαίρεση της ροής του μετάλλου για το σχηματισμό τόσο των οδόντων όσο και του κώνου συγχρονισμού αυτού του τροχού κάνει το γέμισμα της μήτρας ευκολότερο σε σχέση με τον απλό ελικοειδή τροχό που φαίνεται στο Σχήμα 4.20.



**Σχήμα 4.20:** Σφυρήλατος ελικοειδής οδοντωτός τροχός με τη διαδικασία της κλειστής μήτρας [40].

### 4.3. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ ΜΕ ΚΟΝΙΟΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑ

Η κονιομεταλλουργία είναι γνωστή ως κατεργασία σχεδόν καθαρού σχήματος (near net shape) και η χρήση της στην παραγωγή των οδοντωτών τροχών είναι ευρέως διαδεδομένη [67].

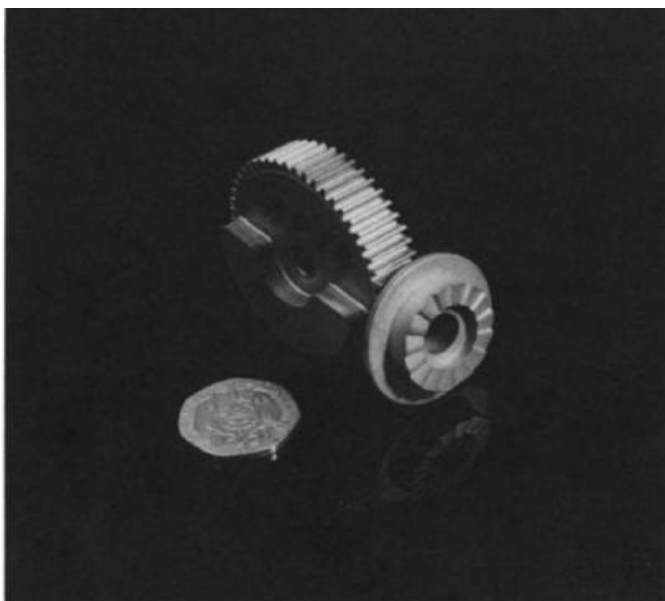
Σε όρους σχήματος και πολυπλοκότητας οι επίπεδοι μετωπικοί οδοντωτοί τροχοί και άλλα οδοντωτά στοιχεία αποτελούν τους ιδανικούς υποψήφιους για συμβατική κατεργασία κονιομεταλλουργίας σε μία άκαμπτη μήτρα.



**Σχήμα 4.21:** Οδοντωτοί τροχοί κατασκευασμένοι με τη μέθοδο near net shape [67]

Οι εφαρμογές των σφυρήλατων οδοντωτών τροχών που χρησιμοποιούνται στην αυτοκινητοβιομηχανία είναι κυρίως [67]:

- Αντλίες λαδιού των αυτοκινήτων (συμβατικοί μετωπικοί οδοντωτοί τροχοί).
- Μικροί οδοντωτοί τροχοί για βιομηχανικές εφαρμογές
- Οδοντωτοί τροχοί για μικρά εργαλεία ισχύος
- Σε κιβώτια ταχυτήτων και συστήματα της μηχανής αυτοκινήτων

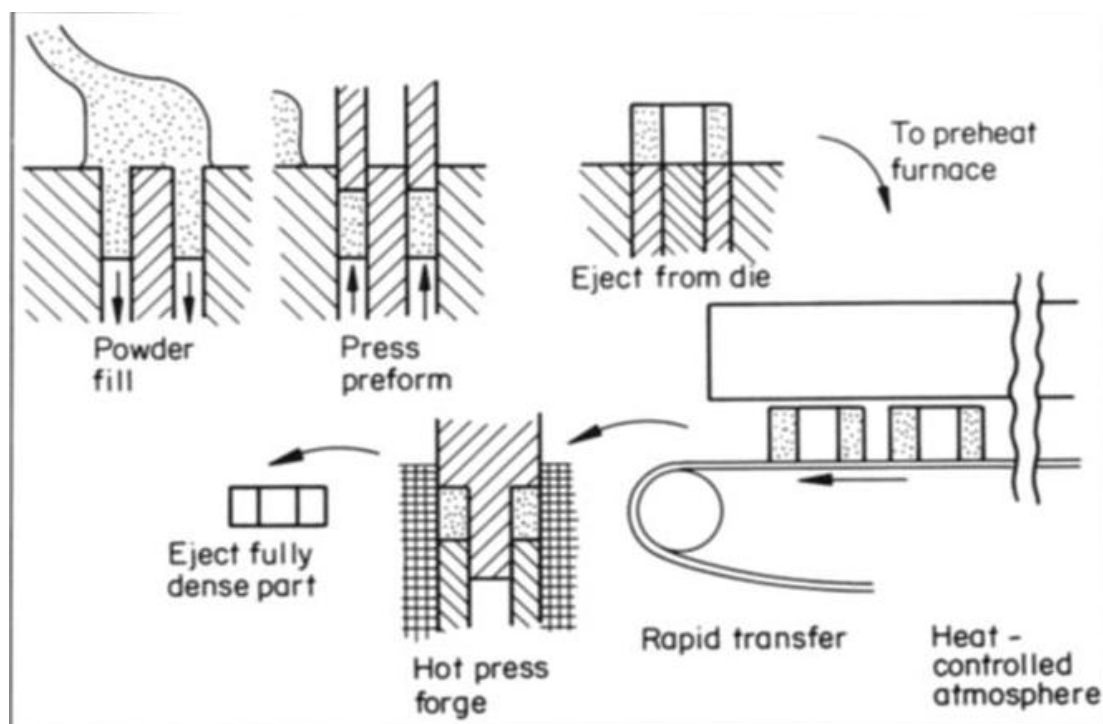


**Σχήμα 4.22:** Οδοντωτοί τροχοί κονιομεταλλουργίας για εφαρμογές σε μικρά συστήματα ισχύος [67]

Παρά τις εφαρμογές σε συστήματα του αυτοκινήτου οι ελικοειδείς οδοντωτοί τροχοί κονιομεταλλουργίας χρησιμοποιούνται σε βιομηχανικές εφαρμογές και σε μικρά εργαλεία. Οι συγκεκριμένοι τροχοί με γωνία ελίκωσης έως  $35^\circ$  βρίσκονται σε μαζική παραγωγή ενώ αυτοί με γωνία ελίκωσης πάνω από  $50^\circ$  βρίσκονται υπό ανάπτυξη. Ο κύριος περιορισμός στις εφαρμογές των συγκεκριμένων τροχών σχετίζεται με τη δυνατότητα μεταφοράς φορτίου.

Το εναπομένον πορώδες στα προϊόντα σφυρηλάτησης και κονιομεταλλουργίας επηρεάζει σημαντικά τις μηχανικές ιδιότητες του τεμαχίου. Τα συνήθη προϊόντα έχουν 10% εναπομείναν πορώδες και χαρακτηρίζονται ως χαμηλής αντοχής. Η παραδοχή αυτή οδήγησε στην ανάπτυξη οδοντωτών τροχών μεγαλύτερης αντοχής με μεθόδους κονιομεταλλουργίας. Η πιο συνηθισμένη μέθοδος αυτής της κατηγορίας είναι η σφυρηλάτηση σκόνης (powder forging).

Στη συγκεκριμένη κατεργασία χρησιμοποιείται η θερμή σφυρηλάτηση κλειστής μήτρας για την τελική ενοποίηση του τεμαχίου μετά τη συσσωμάτωση προκειμένου να επιτευχθεί μηδενικό πορώδες στο τελικό προϊόν.



Σχήμα 4.23: Σχηματική αναπαράσταση της κατεργασίας σφυρηλάτησης σκόνης [67].

Η σφυρηλάτηση σκόνης θεωρείται ιδιαίτερα επιτυχής μέθοδος γιατί επιτυγχάνει υψηλά επίπεδα απόδοσης σε σχέση με τα απλά σφυρήλατα χαλύβδινα τεμάχια. Όμως παρουσιάζει περιορισμούς σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους κonioμεταλλουργίας σε όρους ελέγχου της αντοχής και κόστους.

Ξεπερνώντας αυτούς τους περιορισμούς η συγκεκριμένη τεχνολογία κερδίζει σημαντικό μερίδιο στην αγορά των οδοντωτών τροχών με τους κωνικούς ελικοειδείς οδοντωτούς τροχούς να αναφέρονται εκτενώς στη βιβλιογραφία [67].

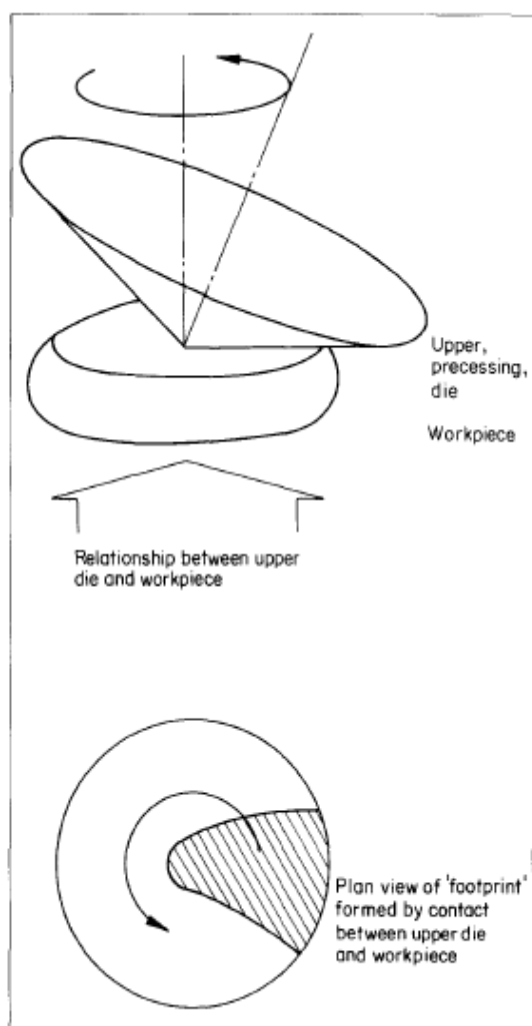
Μια κατεργασία που υπόσχεται την ενίσχυση της αντοχής των οδοντωτών τροχών χωρίς τις διαστασιολογικές ανοχές και τους περιορισμούς κόστους της σφυρηλάτησης σκόνης είναι η ψυχρή κύλιση των συσσωματωμένων οδοντωτών τροχών. Αυτή είναι μια κατεργασία φινιρίσματος κατά την οποία το πορώδες μπορεί να μειωθεί στα ελάχιστα επίπεδα στην επιφάνεια του προϊόντος όπου εφαρμόζονται οι μεγαλύτερες τάσεις. Η συγκεκριμένη κατεργασία εκτός του ότι μεταφέρει τις διαστάσεις και τα πλεονεκτήματα του φινιρίσματος της επιφάνειας σχετίζεται με τους χαλύβδινους οδοντωτούς τροχούς ψυχρής έλασης και μπορεί να διαμορφωθεί κατάλληλα δίνοντας σημαντικά βελτιωμένες παραμέτρους απόδοσης. Η συγκεκριμένη κατεργασία μπορεί να εφαρμοστεί εξίσου ικανοποιητικά στους επίπεδους μετωπικούς και ελικοειδείς τροχούς και συνήθως αποδίδει σφυρήλατους οδοντωτούς τροχούς για εφαρμογές της αυτοκινητοβιομηχανίας.



**Σχήμα 4.24:** Κωνικοί οδοντωτοί τροχοί κατασκευασμένοι με σφυρηλάτηση σκόνης [67]

Ανεξάρτητα με ποια μορφή χρησιμοποιούνται οι σφυρήλατοι οδοντωτοί τροχοί κονιομεταλλουργίας αρχικά σχηματίζονται σε πιέσεις που ξεπερνούν τα  $600\text{N/mm}^2$ . Δεδομένου ότι η μέγιστη χωρητικότητα των πρέσων κονιομεταλλουργίας είναι γύρω στους 1000 τόνους η μέγιστη εφικτή επιτεύξιμη επιφάνεια στο σχηματισμένο στοιχείο είναι γύρω στα  $16500\text{mm}^2$ . Γενικά είναι ιδιαίτερα δύσκολο να επιτευχθεί με τη συγκεκριμένη μέθοδο επιφάνεια μεγαλύτερης επιφάνειας από αυτό το όριο.

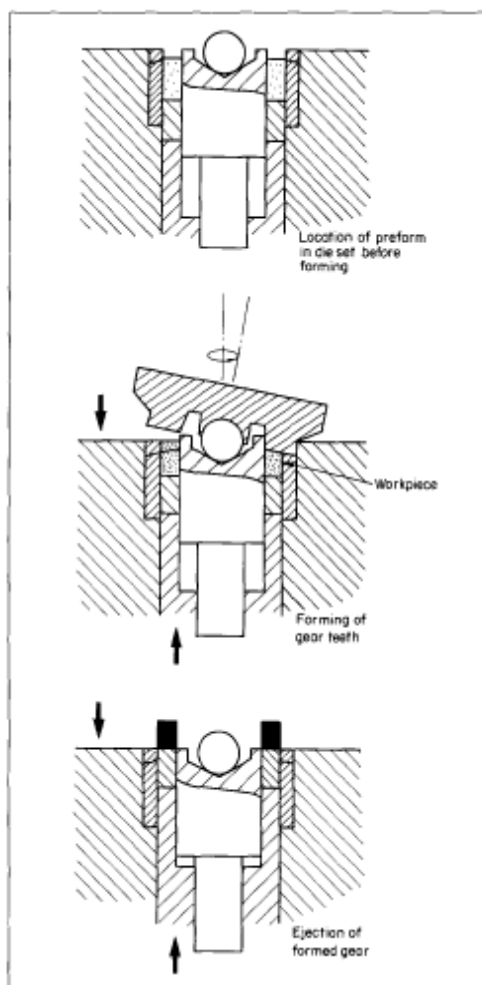
Μια σημαντική βελτίωση στην πιθανότητα κατασκευής σφυρήλατων τεμαχίων μεγαλύτερης επιφάνειας θα μπορούσε να επιτευχθεί με τη χρήση της περιστροφικής ή της τροχιακής σφυρηλάτησης ως μέθοδο απευθείας συμπίεσης σκόνης.



**Σχήμα 4.25:** Σχηματική αναπαράσταση της περιστροφικής σφυρηλάτησης [68].

Η περιστροφική σφυρηλάτηση είναι μια διαδικασία διαμόρφωσης στην οποία ένα μόνο τμήμα του τεμαχίου εργασίας είναι σε επαφή με το εργαλείο διαμόρφωσης. αυτή η επιφάνεια επαφής που είναι γνωστή ως «βηματικό αποτύπωμα» (foot print) στη συνέχεια περιστρέφεται γύρω από την κάτοψη του τεμαχίου εργασίας με τη χρήση ασταθών μήτρων και εργαλείων για να επιτευχθεί η βαθμιαία παραμόρφωσή του .





**Σχήμα 4.26:** Σχηματισμός ενός κωνικού οδοντωτού τροχού με χρήση της περιστροφικής σφυρηλάτησης [67]

Οι μέθοδοι που αναπτύσσονται για τη χρήση της τεχνολογίας άμεσης συμπίεσης σκόνης. Είναι προφανής η χρήση του δυναμικού συμπίεσης που πρέπει να είναι μέσα στα αποδεκτά χαμηλά όρια της συνολικής κατεργασίας διαμόρφωσης. Εξαιτίας της φύσης της κατεργασίας και της ανάγκης για τη διατήρηση μικρών κύκλων λειτουργίας θα πρέπει να υπάρχει ανάγκη περιορισμού στα συστατικά με μεγάλους βαθμούς αξονικής συμμετρίας [67].

#### 4.4 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΘΕΩΡΗΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΤΩΝ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ ΒΑΣΕΙ ΤΩΝ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΟΥΣ ΜΕ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΚΑΙ ΤΡΙΣΔΙΑΤΑΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του She και Yu [52] σχετικά με τις μεθόδους κατασκευής της τελικής μήτρας της σφυρηλάτησης για μετωπικούς

οδοντωτούς τροχούς και τα χαρακτηριστικά των κυλινδρικών καττακιών. Συγκεκριμένα προτείνονται διαδικασίες ενός και δύο βημάτων σφυρηλάτησης οι οποίες εκτιμήθηκαν με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Για τη σφυρηλάτηση ενός βήματος οι διάμετροι και τα ύψη εκτιμήθηκαν στη συγκεκριμένη εργασία θεωρώντας τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του τροχού. Για τη διαδικασία δύο βημάτων οι αρχικοί σχεδιασμοί πραγματοποιήθηκαν με βάση τον όγκο του προϊόντος και τον χαρακτηριστικό λόγο των όγκων του καττακιού προς τον όγκο του οδοντωτού τροχού. Οι περιοχές στις γωνίες και των τόξων ελήφθησαν υπόψη για τη διαμόρφωση του προφίλ του οδόντα και τον έλεγχο της ροής του υλικού στην τελική μήτρα. Οι διαδικασίες διαμόρφωσης του αρχικού σχεδιασμού αναλύθηκαν χρησιμοποιώντας τη δισδιάστατη και τρισδιάστατη ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων προκειμένου να εξαχθούν τα ακριβή χαρακτηριστικά της τμηματικής ροής υλικού και τα πλήρη τρισδιάστατα χαρακτηριστικά παραμόρφωσης αντίστοιχα.

#### **4.4.1 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ ΚΑΙ ΑΡΧΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ**

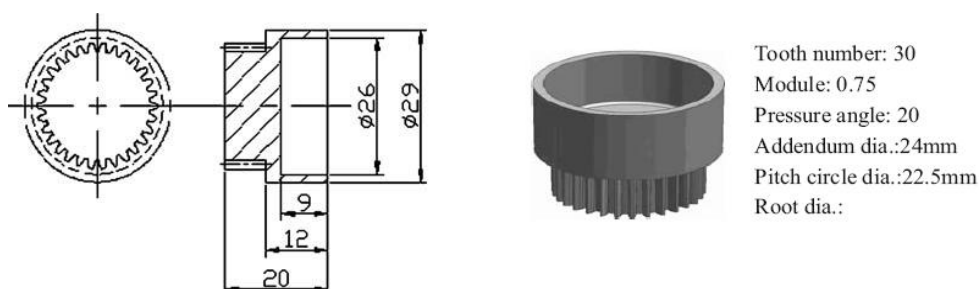
Οι κατεργασίες σφυρηλάτησης κλειστής μήτρας χωρίς προεξοχή χρησιμοποιήθηκαν στη συγκεκριμένη εργασία για το σχεδιασμό της τελικής μήτρας και την παραγωγή ενός ζεύγους οδοντωτών τροχών [52].

Οι αρχικοί σχεδιασμοί προτάθηκαν προκειμένου να επιτευχθεί καλύτερη κατανομή του υλικού και γέμισμα της μήτρας στην τελική κατεργασία σφυρηλάτησης. Οι διαδικασίες σφυρηλάτησης και οι αρχικοί σχεδιασμοί βασίζονται στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του προϊόντος και την παρατήρηση της ροής του υλικού. Ο συντελεστής πολυπλοκότητας σχήματος [5, 69] του σφυρήλατου τεμαχίου υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας τα απλοποιημένα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του προϊόντος στις κάθετα διασταυρωμένες επιφάνειες. Οι συντελεστές πολυπλοκότητας υπολογίστηκαν ως ακραίες τιμές για τα χαρακτηριστικά του προϊόντος και στη συνέχεια υπολογίστηκε η μέση τιμή τους. Η απότομη γεωμετρική αλλαγή στη ζώνη διεπιφάνειας αυξάνει τη σύνθετη ροή του υλικού κατά τη διάρκεια της κατεργασίας σχηματισμού.

#### **4.4.2 ΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΤΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ**

Στη μελέτη των She και Yu,[52] μελετήθηκε ως υλικό το AISI -4115. Μια πλήρη θερμική κατεργασία ανόπτησης διεξήχθη μετά από τη δημιουργία του αρχικού σχήματος. Τα ανοπτημένα αρχικά προϊόντα σφυρηλατήθηκαν εν ψυχρώ για την κατασκευή προϊόντων χρησιμοποιώντας ως λιπαντικό ειδικό λάδι και εργαλεία SKD-11. Τα γεωμετρικά

χαρακτηριστικά, οι κύριες διαστάσεις και τα ειδικά χαρακτηριστικά του προϊόντος που παρήχθη φαίνονται στο Σχήμα 4.27.

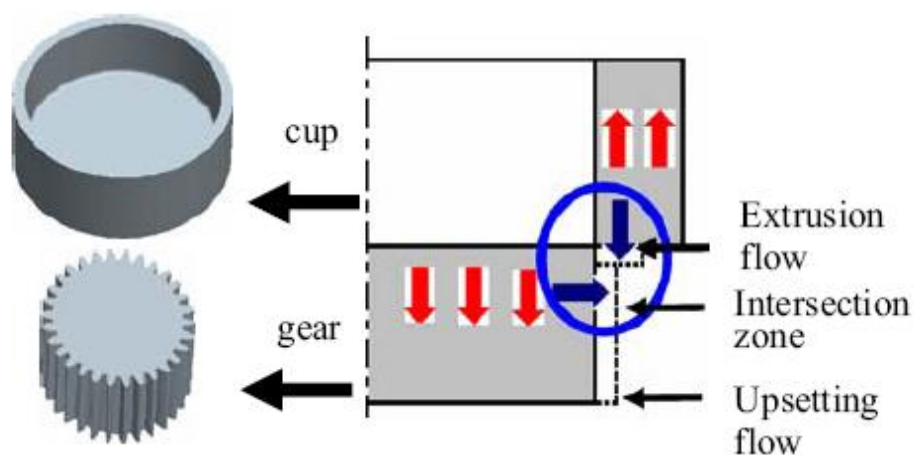


**Σχήμα 4.27:** Γεωμετρία και διαστάσεις του σφυρήλατου οδοντωτού τροχού [52]

Τα βασικά χαρακτηριστικά του οδοντωτού τροχού είναι το τμήμα του καπακιού και το τμήμα της οδόντωσης. Οι θεωρούμενες διάμετροι της μπιγιέτας των χαρακτηριστικών τμημάτων θεωρήθηκαν ίσες με αυτές του οδοντωτού τμήματος και την εξωτερική διάμετρο του καπακιού. Οι συντελεστές πολυπλοκότητας του σχήματος υπολογίστηκαν ίσες με 1 και 2.1 για το τμήμα οδόντωσης και το καπάκι αντίστοιχα. Ο μέσος συντελεστής πολυπλοκότητας σχήματος ήταν 1.55 και θεωρείται αρκετά υψηλός υποδηλώνοντας την ανάγκη για αρχικό σχεδιασμό.

#### 4.4.3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΥΛΙΚΟΥ ΣΤΟ ΣΤΑΔΙΟ ΦΙΝΙΡΙΣΜΑΤΟΣ

Για να εξηγηθούν τα χαρακτηριστικά της προς τα πίσω και προς τα μπρος ροής του υλικού για τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του προϊόντος θεωρήθηκαν οι τανυστές ταχύτητας στις αξονικές και στις πλευρικές κατευθύνσεις που φαίνονται στο ακόλουθο σχήμα.

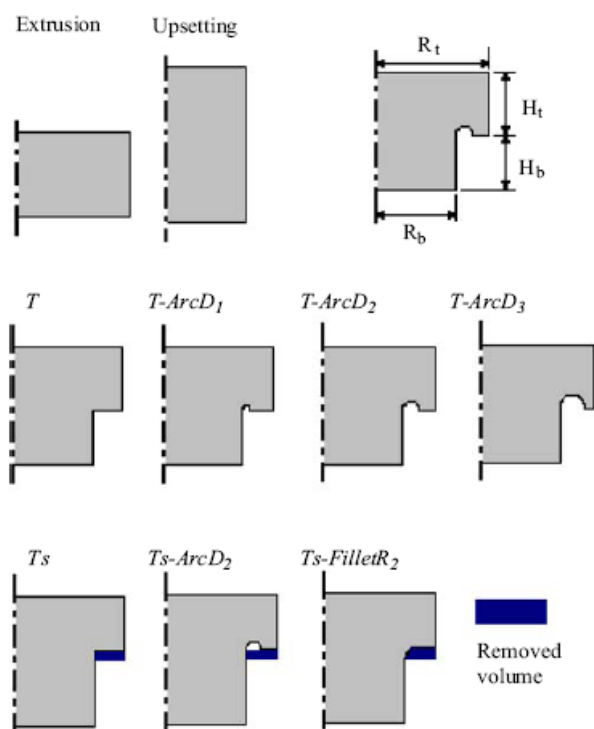


**Σχήμα 4.28:** Απεικόνιση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών και τα πεδία ροής [52]

Οι διαφορετικοί σχεδιασμοί των αρχικών σχεδίων θα επιδρούν στις σχέσεις των διαφορετικών ροών του υλικού. Αν η ροή εξώθησης γίνεται προς τα κάτω στο καπάκι συναντά την προς τα άνω ροή στο τμήμα οδόντωσης στη ζώνη διεπιφάνειας η επαφή των ελεύθερων επαφών στο τεμάχιο εργασίας θα προκαλεί ατέλειες. Μια συστηματική μέθοδος σχεδιασμού των προσχηματισμένων προϊόντων βασίζεται στα χαρακτηριστικά της γεωμετρίας του προϊόντος και η ροή του υλικού αναπτύχθηκε. Η ροή του υλικού μπορεί να ελεγχθεί κυρίως από τις γεωμετρίες των προδιαμορφωμένων προϊόντων που προτείνονται από τους She και Yu, [52].

#### 4.4.4 ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΠΡΟΔΙΑΜΟΡΦΩΜΕΝΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ

Για τον καθορισμό των πεδίων ροής των υλικών είναι προσιτές οι διαδικασίες ενός βήματος εξώθησης με διαφορετικές διαστάσεις κυλινδρικών μπιγιετών. Η διασταυρούμενη επιφάνεια των σφυρηλάτων τεμαχίων είναι παρόμοια με αυτή του μεγάλου οδόντα και το προδιαμορφωμένο τεμάχιο σχήματος T είναι ο πιο συνηθισμένος σχεδιασμός. Για την διεργασία διπλού βήματος προτάθηκαν επτά σχεδιασμοί προδιαμόρφωσης και κατηγοριοποιήθηκαν σε ομάδες σχήματος T και Ts. Ο τύπος προδιαμόρφωσης Ts έχει μικρότερο όγκο και μικρότερη εξώθηση υλικού.



**Σχήμα 4.29:** Απεικόνιση μπιγιέτας ενός βήματος (πάνω) και αρχικού σχεδιασμού δύο βημάτων (μέσο και κάτω) [52].

Για τον καθορισμό της ακτίνας και το ύψος της μπιγιέτας και των προδιαμορφωμένων τεμαχίων ο λόγος του όγκου της μπιγιέτας προς τον όγκο του προϊόντος.

Για την εξώθηση ενός βήματος η ακτίνα της μπιγιέτας υπολογίζεται θεωρώντας τις διαστάσεις του καπακιού και τα χαρακτηριστικά των τροχών όπως φαίνεται από τις ακόλουθες εξισώσεις [52].

$$R_t = \text{INT}(\text{εξωτερική ακτίνα του κυπέλου} + \text{εσωτερική ακτίνα του κυπέλου})/2 = 14 \quad (60)$$

$$R_t = \text{INT}(\text{εξωτερική διάμετρος του οδοντωτού τροχού}/2) = 10 \quad (61)$$

Όπου INT() είναι μια συνάρτηση αποκοπής για την εύρεση του μικρότερου ακέραιου αριθμού μεταβλητών εισόδου που διασφαλίζει ότι η μπιγιέτα μπορεί να εισέλθει στην κοιλότητα της μήτρας εύκολα και ομοιόμορφα. Το ύψος των μπιγιετών ενός βήματος  $H_t$ , υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τον όγκο του προϊόντος  $V_{\text{product}}$  και τον ογκομετρικό λόγο της εξώθησης η:

$$H_t = \text{INT}(V_{\text{product}} \times (1 + \eta) \div (\pi \times R_t^2)) \quad (62)$$

Για τις προσεγγίσεις σφυρηλάτησης δύο βημάτων ο προτεινόμενος αλγόριθμος του σχεδιασμού προδιαμορφωμένου σχήματος T προϊόντος είναι ο ακόλουθος [52]:

Βήμα 1: Καθορισμός της μεγάλης και της μικρής ακτίνας  $R_t$  και  $R_b$  από τις εξισώσεις που προαναφέρθηκαν

Βήμα 2: Επιλογή του ογκομετρικού λόγου εξώθησης 14% για τον τύπο T και 5% για τον Ts.

Βήμα 3: Εκτίμηση του αρχικού ογκομετρικού λόγου των ανώτερων και των κατώτερων τμημάτων της προδιαμόρφωσης T χρησιμοποιώντας τους όγκους του καπακιού και των τμημάτων.

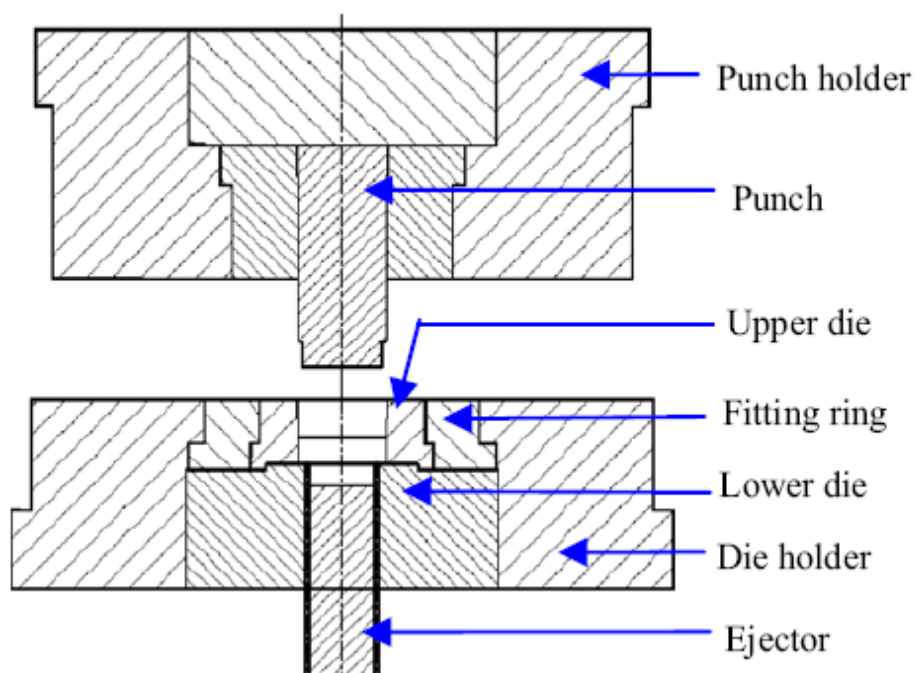
Βήμα 4: Υπολογίζονται οι θεωρούμενες τιμές  $H_t$  και  $H_b$

Βήμα 5: Ρύθμιση των  $H_t$  και  $H_b$  στον πλησιέστερο ακέραιο με τον περιορισμό της κατεργασίας σφυρηλάτησης.

#### 4.4.5 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΗΣ ΜΗΤΡΑΣ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ ΚΑΙ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Στο Σχήμα 4.30 αναπαρίσταται το τμήμα της συναρμολόγησης των εργαλείων για την τελική σφυρηλάτηση. Οι οδόντες των τροχών κατασκευάστηκαν στην χαμηλότερη κοιλότητα της μήτρας. Ένας εξωθητής σχήματος του οδοντωτού τροχού εισάγεται στη χαμηλότερη μήτρα που ρυθμίζεται για να ελέγξει το μήκος εξώθησης του οδοντωτού τροχού. Ένας

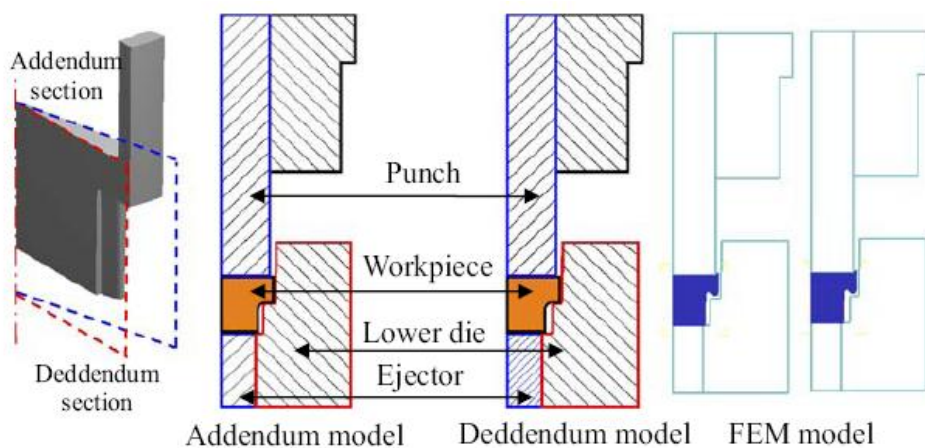
προσαρμοστικός δακτύλιος επίσης σχεδιάστηκε για την αρχική συμπίεση του εσωτερικού της μήτρας και τη μείωση της τάσης στη μήτρα κατά την κατεργασία της σφυρηλάτησης.



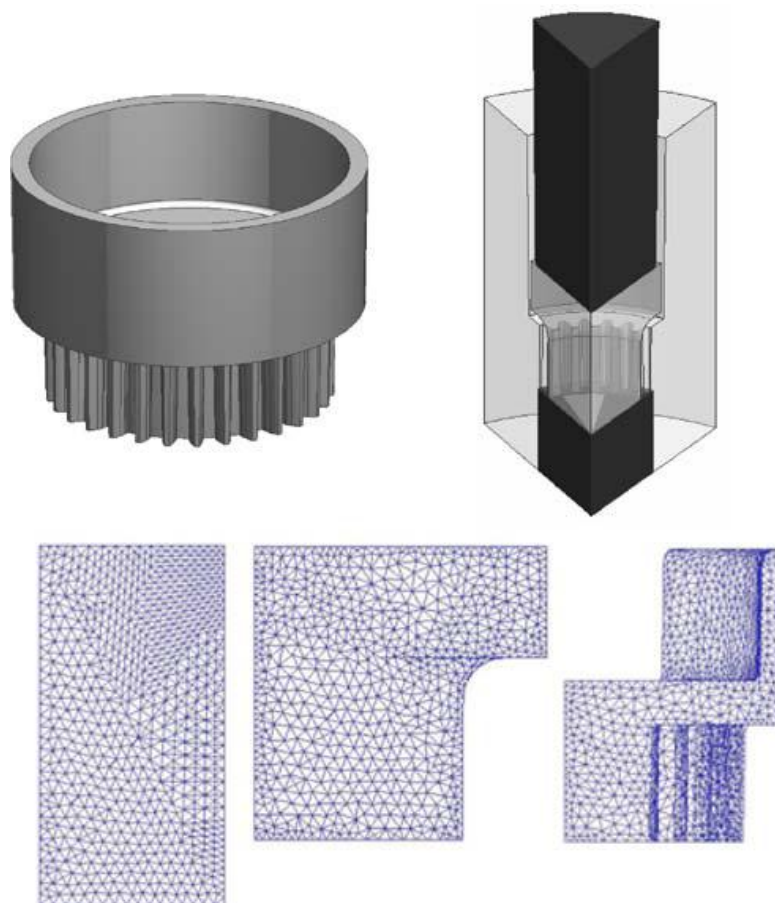
Σχήμα 4.30: Τελική μήτρα σφυρηλάτησης [52].

#### 4.4.6 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ

Οι She και Yu [52] χρησιμοποίησαν τα προγράμματα DEFORM 2D και DEFORM 3D για την παραγωγή των τμημάτων της ροής του υλικού και τη τρισδιάστατη συμπεριφορά της παραμόρφωσης. Τα δισδιάστατα και τρισδιάστατα μοντέλα υπολογιστικού σχεδιασμού (CAD) και των πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν φαίνονται στα Σχήματα 4.31 και 4.32.



Σχήμα 4.31: Δισδιάστατα μοντέλα CAD και πεπερασμένων στοιχείων [52].



Σχήμα 4.32: Τρισδιάστατα πλέγματα CAD και πεπερασμένων στοιχείων για τη μπιγιέτα, την προδιαμόρφωση και το σφυρήλατο τεμάχιο [52].

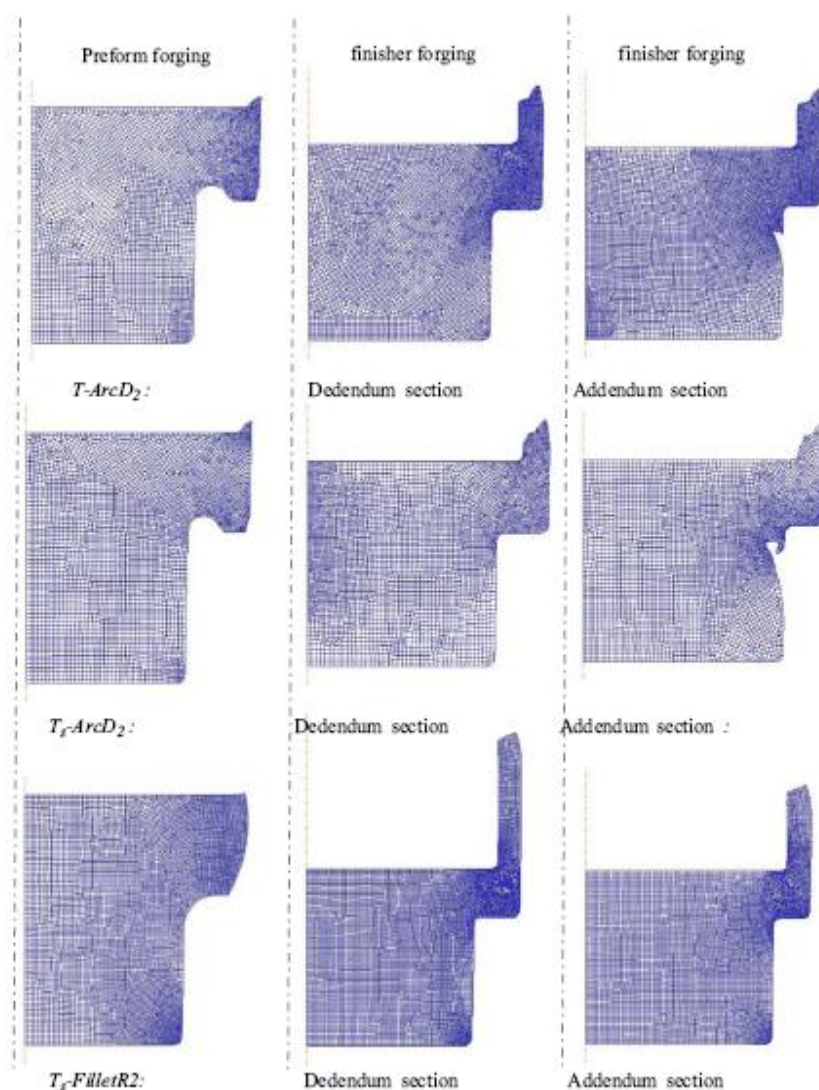
Οι τομές στη 2D ανάλυση έγινε στα χαρακτηριστικά προσθήκης και εξώθησης των οδοντωτών τροχών. Ο αριθμός στοιχείων του πλέγματος της μπιγιέτας ήταν 5000 για τη δισδιάστατη προσομοίωση κατά την προδιαμόρφωση και αυξήθηκε στις 10000 για το τέλος της σφυρηλάτησης εξαιτίας της αυτόματης αναδιαμόρφωσης πλέγματος. Οι δισδιάστατες προδιαμορφώσεις με ανακατάταξη πλέγματος μεταφέρθηκαν στην τελική μήτρα για την προσομοίωση της τελικής σφυρηλάτησης ενώ οι καταστάσεις των τάσεων και των παραμορφώσεων του πλέγματος τέθηκαν ίσες με μηδέν για την αντανάκλαση της πλήρους κατεργασίας της θερμικής ανόπτησης.

Για τις τρισδιάστατες προσομοιώσεις πεπερασμένων στοιχείων τα μοντέλα CAD των προδιαμορφωμένων προϊόντων μοιράστηκαν σε πλέγμα 26000 και 30000 στοιχείων άμεσα για την προσομοίωση της τελικής σφυρηλάτησης. Εξαιτίας της θερμικής ανόπτησης εφαρμόστηκε πριν από την τελική σφυρηλάτηση για τη προδιαμόρφωση καμία προσομοίωση δεν πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.



#### 4.4.7 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΑΠΟ ΤΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Οι πλήρεις δισδιάστατες προσομοιώσεις των κατεργασιών σφυρηλάτησης δύο βημάτων διήρκεσαν 6 ώρες με το μέγεθος των πεπερασμένων στοιχείων να κυμαίνεται από 0.3 έως 0.5mm. Οι τρισδιάστατες προσομοιώσεις απαίτησαν τον διπλάσιο χρόνο με παρόμοιο μέγεθος στοιχείων και τα δεδομένα των τάσεων και των παραμορφώσεων ήταν κοινά για τα δύο είδη προσομοίωσης. Στην περίπτωση που το μέγεθος του στοιχείου γίνει από 0.05 έως 0.1 mm στο δισδιάστατο πρόγραμμα και από 0.3 έως 0.5 στο τρισδιάστατο μοντέλο παρατηρείται εξομοίωση των χρόνων προσομοίωσης. Στο Σχήμα 65 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα ροής που προέκυψαν από τη δισδιάστατη προσομοίωση [52].

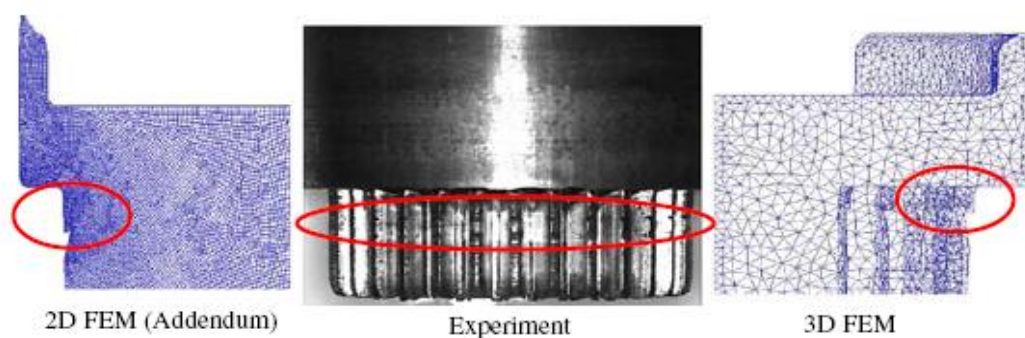


Σχήμα 4.33: Τα δισδιάστατα πλέγματα ροής της προδιαμόρφωσης και της τελικής σφυρηλάτησης [52].

Τα πλέγματα της μπιγιέτας μετά τη σφυρηλάτηση προδιαμόρφωσης ήταν ομαλά και μόνο μερικά σημεία πύκνωσης στοιχείων παρουσιάστηκαν. Τα εκλεπτυσμένα πλέγματα παραμόρφωσης παρουσιάστηκαν κυρίως στο πάνω δεξιό τμήμα των χαρακτηριστικών του καπακιού στο τελικό στάδιο σφυρηλάτησης. Δεν παρατηρήθηκαν ατέλειες για τους οδοντωτούς τροχούς για όλους τους σχεδιασμούς προδιαμόρφωσης ούτε στο στάδιο γεμίσματος ούτε στο τελικό στάδιο σφυρηλάτησης.

Η παρατήρηση των τμηματικών ρωών του υλικού καταλήγει σε δυο συμπεράσματα. Πρώτον η παραμόρφωση της σφυρηλάτησης προδιαμόρφωσης δεν είναι σημαντική και χαρακτηρίζεται από ομαλά πλέγματα. Δεύτερον, οι διαφορετικοί σχεδιασμοί προδιαμόρφωσης δείχνουν ισχυρή εξάρτηση από την ύπαρξη ατελειών διαμόρφωσης ειδικά όταν απαιτείται μεγαλύτερο εύρος παραμόρφωσης.

Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνονται τα πλέγματα παραμόρφωσης για τη δισδιάστατη και τρισδιάστατη ανάλυση που πραγματοποιήθηκε από τους She και Yu, (2009).

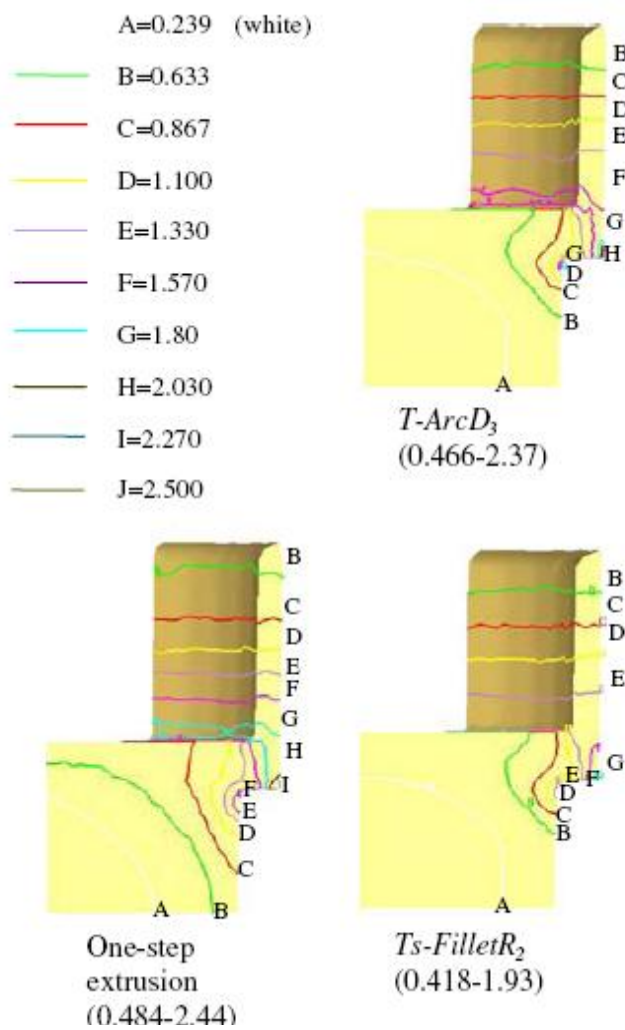


**Σχήμα 4.34:** Παρατηρούμενες ατέλειες με τις αριθμητικές ανάλυσης για το σχεδιασμό προδιαμόρφωσης [52].

Η ύπαρξη ατελειών που διαπιστώθηκε από τη διαδικασία προσομοίωσης επιβεβαιώθηκε και από πειραματικά αποτελέσματα. Οι παρατηρούμενες ατέλειες οφείλονται στο γεγονός πως η ροή του υλικού κατά την εξώθηση συσσωρεύεται στη διεπιφάνεια του καπακιού και του οδοντωτού τροχού κατά το γέμισμα της μήτρας. ως αποτέλεσμα οι ελεύθερες επιφάνειες έρχονται σε επαφή και σχηματίζουν ατέλειες στο μέτωπο του οδοντωτού τροχού.

Επιπλέον, από τις αναφερόμενες προσομοιώσεις μπορούν να καθοριστούν οι κατανομές των αποτελεσματικών τάσεων για τις κατεργασίες ενός ή δύο βημάτων για διαφορετικούς σχηματισμούς.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ



Σχήμα 4.35: Κατανομή των τάσεων για σχεδιασμούς σφυρηλάτησης ενός και δύο βημάτων [52].

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στη συγκεκριμένη εργασία μελετήθηκε η σφυρηλάτηση ως μέθοδος κατεργασίας των οδοντωτών τροχών. Παρουσιάστηκαν οι βασικές μέθοδοι σφυρηλάτησης και τα εργαλεία με τα οποία πραγματοποιείται αυτή.

Στη συνέχεια παρατέθηκαν τα βασικά χαρακτηριστικά των σφυρήλατων οδοντωτών τροχών και τα είδη αυτών που μπορούν να κατασκευαστούν με τη βοήθεια της κατεργασίας σφυρηλάτησης.

Οι σφυρήλατοι οδοντωτοί τροχοί σχεδόν καθαρού σχήματος και καθαρού σχήματος παρουσιάζουν πλήθος πλεονεκτημάτων συγκριτικά με τους οδοντωτούς τροχούς που κατασκευάζονται από κατεργασίες κοπής. Αρχικά υπάρχει εξοικονόμηση υλικού στους σφυρήλατους οδοντωτούς τροχούς και οι οδοντωτοί τροχοί κοπής μπορεί να έχουν έως και 30% μεγαλύτερο βάρος ανάλογα με το μέγεθος του οδοντωτού τροχού. Επιπλέον, με τους οδοντωτούς τροχούς σχεδόν καθαρού σχήματος απαιτούνται ελάχιστες διαβαθμίσεις ή κατεργασίες φινιρίσματος. Για τους οδόντες των σφυρήλατων οδοντωτών τροχών χρησιμοποιούνται σχεδιασμοί προδιαμόρφωσης και κατεργασίες τελικής διαμόρφωσης απαιτούνται μόνο στο πίσω μέτωπο των τροχών.

Το μεγαλύτερο όμως πλεονέκτημα των οδοντωτών τροχών έναντι των τροχών κοπής και των τροχών που κατασκευάζονται με άλλες μεθόδους διαμόρφωσης είναι η υπερβολική τους αντοχή. Εξαιτίας της θερμής κατεργασίας του υλικού με την κατεργασία σφυρηλάτησης καθορίζει τη ροή των κόκκων και οριοθετεί το σχήμα του κομματιού και ελέγχεται η αντίσταση στην κόπωση. Επιπλέον στους σφυρήλατους οδοντωτούς τροχούς δεν υπάρχουν μεταλλουργικές ατέλειες που συχνά βρίσκονται στα προϊόντα των υπολοίπων κατεργασιών διαμόρφωσης.

Στη συνέχεια παρουσιάστηκαν οι βασικές μέθοδοι ανάλυσης των σφυρήλατων οδοντωτών τροχών και ειδικότερα η μέθοδος λόφου τριβής, η μέθοδος των άνω οριακών φορτίσεων και η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων.

Συγκεκριμένα παρουσιάστηκαν δυο μέθοδοι ανάλυσης λόφου τριβής μία σε μικτό σύστημα συντεταγμένων (SMAI) και μια σε κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων (SMA II). Και από τις δύο μεθόδους μπορεί να εξαχθούν τα φορτία που ασκούνται στη μήτρα. Τα συγκεκριμένα μοντέλα ανάλυσης παράγουν ειδικές πιέσεις που αυξάνουν σχεδόν γραμμικά με την αύξηση των οδόντων όπως επίσης και με την αύξηση του συντελεστή τριβής.

Στη συνέχεια παρουσιάστηκε η μέθοδος των άνω οριακών επιφανειών για μετωπικούς οδοντωτούς τροχούς. Από την συγκεκριμένη μέθοδο αριθμητικής προσομοίωσης καθορίζεται το κινηματικό πεδίο ταχυτήτων για την κατεργασία. Στη συγκεκριμένη εργασία παρουσιάστηκε ένα γενικευμένο μοντέλο που θεωρεί μια ουδέτερη επιφάνεια για τη σφυρηλάτηση σφαιρικών οδοντωτών τροχών από σφαιρικές μπιγιέτες με επίπεδο εργαλείο διαμόρφωσης. Επιπλέον με

τη συγκεκριμένη μέθοδο μπορούν να υπολογιστούν ικανοποιητικά οι απαιτήσεις της σφυρηλάτησης των μετωπικών οδοντωτών τροχών σε φορτία. Σύμφωνα με το συγκεκριμένο μοντέλο η πίεση σφυρηλάτησης αυξάνει με την αύξηση των οδόντων και μειώνεται με το ύψος για συγκεκριμένο μοντούλ των οδοντωτών τροχών. Ο κατάλληλος αριθμός οδόντων για τη σφυρηλάτηση μετωπικών οδοντωτών τροχών είναι 15-20 για μοντούλ 1-2. Η ακτίνα της ουδέτερης επιφάνειας και η εσωτερική ακτίνα προσεγγίζουν το μηδέν καθώς μειώνεται το ύψος. Γενικά για τη μείωση του φορτίου σφυρηλάτησης ενδείκνυται η χρήση των σφαιρικών μπιγιετών παρά των στερεών.

Τέλος μελετήθηκε η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων για τη σφυρηλάτηση οδοντωτών τροχών για την οποία παρουσιάζεται στο τελευταίο κεφάλαιο και ένα παράδειγμα δισδιάστατης και τρισδιάστατης προσομοίωσης από τους She και Yu, (2009).

Η αριθμητική προσομοίωση των σφυρηλάτων οδοντωτών τροχών με βάση έναν κώδικα πεπερασμένων στοιχείων βοηθάει στον προσδιορισμό τόσο των παραμέτρων της κατεργασίας όσο και στο σχεδιασμό της αντίστοιχης μήτρας σφυρηλάτησης. Η δισδιάστατη και τρισδιάστατη μέθοδος που παρουσιάζεται στα παραδείγματα χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της ροής του υλικού και της παραμόρφωσης. Το μικρότερο μέγεθος πεπερασμένων στοιχείων μπορεί να χρησιμοποιηθεί ικανοποιητικά στις δισδιάστατες προσομοιώσεις επιτυγχάνοντας ικανοποιητικούς χρόνους προσομοίωσης.

Γενικά οι τρεις μέθοδοι ανάλυσης επιλέγονται ανάλογα με την εφαρμογή που πρόκειται να μελετηθεί. Οι μέθοδοι λόφου τριβής και άνω οριακών επιφανειών δεν περιλαμβάνουν τη θερμοκρασία στην οποία πραγματοποιείται η σφυρηλάτηση και κατά συνέπεια οι θερμικές επιδράσεις ή η ατέλειες που μπορεί αυτές να προκαλέσουν δεν μπορούν να προβλεφθούν. Αντίθετα στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων λαμβάνεται υπόψη και η θερμοκρασία οπότε μπορεί να θεωρηθεί πιο πλήρης μέθοδος αφού ταυτόχρονα μπορεί να δώσει και μια πρώτη εικόνα του σφυρηλάτου προϊόντος όταν το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων συνδυάζεται με λογισμικά τρισδιάστατης απεικόνισης (CAD). Όμως η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή όσον αφορά στο χρόνο προσομοίωσης προκειμένου αυτός να μην είναι μειονέκτημα σε σχέση με τις άλλες μεθόδους.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. *Handbook of Engineering Materials*. Fifth Edition, 2003  
<http://www.scribd.com/doc/6732653/Forging>.
2. Πετρόπουλος, Π., *Μηχανουργική Τεχνολογία*. Εκδόσεις Ζήτη, 1998.
3. Mangukia, P., *Cold and Warm Forging, Chapter 2 in Cold and Hot Forging: Fundamentals and Applications*. ASM International, 2004.
4. Κεχαγιάς, *Σημειώσεις του μαθήματος «Εισαγωγή στις μηχανουργικές τεχνολογίες»*.  
[http://www.mie.uth.gr/n\\_ekp\\_yliko.asp?id=4](http://www.mie.uth.gr/n_ekp_yliko.asp?id=4)
5. Tomov, B., *Hot closed die forging—state-of-art and future development*. J Achievements Mater Manuf Eng 2007. **24**: p. 443-449.
6. Shigraokar, M., *Presses and Hammers for Cold and Hot Forging*. Chapter 11, in *Cold and Hot Forging: Fundamentals and Applications*, ASM International, 2004.
7. *Motion System Design*. Gears and Gearing Drives, 2001.
8. Στεργίου, Ι.Κ., Στεργίου, Κ.Ι., *Στοιχεία Μηχανών ΙΙ*. Σύγχρονη Εκδοτική, 2002.
9. Miloud, S., *EME 2026, Engineering Design*. Gears I, 2011.
10. *AN OVERVIEW OF GEAR MANUFACTURING PROCESSES*.  
<http://drishtikona.com/books/automobile-manufacturing/ch4.pdf>.
11. *Casting, Forming, and Forging*. ASM International, Chapter 6 in *Gear Materials Properties and Manufacture*, 2005.
12. Behrens, B.A., Odening, D., *PROCESS AND TOOL DESIGN FOR PRECISION FORGING OF GEARED COMPONENTS*.
13. Kuhlmann, D.J., Raghupathi, P.S., *Manufacturing of Forged and Extruded Gears*. Gear Technol, 1990: p. 36-45.
14. Degarmo, E.P.B., J T.; Kohser, Ronald A., *Materials and Processes in Manufacturing* (9th ed.), 2003.
15. Vanderplaats, *Numerical Optimization Techniques for Engineering Design*. McGraw-Hill, New York <http://www.esi-group.com/products/casting/Etips/e-tips/eTip16.pdf>, 1981. **41**: p. 41.
16. Tomov, B.I., Gagov, V.I., *Modelling and description of the near-net-shape forging of cylindrical spur gears*. Journal of Materials Processing Technology 1999. **92-93**: p. 444-449.
17. Gagov, V., *Problems of Metal Forming*. Varna, 1990: p. 39-43.
18. Chitkara, N.R., Bhutta, M.A., *Computer simulation to predict stresses working pressures and deformation modes in incremental forging of spur gear forms*. Int. d. Mech. Sci, 1996. **38**(8-9): p. 871-889.
19. Choi, J., Cho, H.Y., Jo, C.Y., *An upper-bound analysis for the forging of spur gears*. Journal of Materials Processing Technology 2000. **104**: p. 67-73.
20. Altan, T., *Computer simulation to predict load, stress and metal flow in an axi-symmetric closed-die forging*. Metal Formin 9 (edited by H. Hoffman), Plenner Press 1971.
21. Bocharov, Y., Kobayashi, S., Thomsen, E. G., *The mechanics of coining process*. Trans. ASME J. Engng, Indust., 1962. **84**: p. 491.

22. Chitkara, N.R., Bhutta, M. A, *Near-net shape forging of spur gear forms: an analysis and some experiments*. Int. J. Mech. Set, 1996.
23. Chitkara, N.R., Bhutta, M. A., *Computer simulation to predict stresses and die loads during metal flow in incremental heading of shaped heads from cylindrical rods and some experiments*. Int. J. Mech. Sci. , 1995. **37**: p. 1223.
24. Choi, J.C., Choi, Y *A study on the forging of external spur gears: upper-bound analyses and experiments*. International Journal of Machine Tools & Manufacture 1998. **38**: p. 1193-1208.
25. Altan, T., Oh, S.I., Gegel, I.E., , *Metal Forming Fundamentals and applications*. Metal Forming Fundamentals and applications, 1983.
26. Altan, T., Vasquez, V., , *Status of process simulation using 2D and 3D finite element method. What is practical today? What can we expect in the future?* Journal of Material Processing Technology, 1997. **71**: p. 49-63.
27. NRC (National Research Council), *Unit manufacturing Processes, Issues and Opportunities in Research*. Manufacturing Process Research Committee, I Finie Chair, National Press Academy, 1995.
28. Bay, N., Wanherm, T., Arentofi, M., Andersen, C.B., Bernani, B., *An approval of Numerical and Physical Modelling for Prediction of Metal forming Processes*. Proc.4th Int. Conference on Computational Plasticity, Barcelona, Spain, 1995: p. 1343.
29. Bay, N., Wanherm, T., Danckert, J., Nielsen, K.B., *Modelling and Prediction of metal forming*. Proc. Of the Riso Int.Symposium on Material Sciences Numerical prediction of deformation processes and behavior of real materials, Spain, 1994: p. 1.
30. Arentoft, M., Oh, S.I. , *Application of FEM to 2D Metal Flow simulation: practical examples*. Adv. Technol. Pldst. , 1990. **4**: p. 1779.
31. Messner, A., Engel, U., Kals, R., Vollertsen, F., *Size effect in the FE simulation of microforming processes*. J. Mater. Process. Technol, 1994. **45**: p. 374.
32. Wu, W.T., Oh, S.I., Altan, T., Miller, R.A., *Optimal mesh density determination for the FEM simulation of forming processes*. NUMIFORM '92, September 14-18, France, 1992.
33. Hartley, P., Pillinger, I., , *Numerical simulation of the forging process*. Comput. Methods Appl. Mech. Engrg., 2006. **195**: p. 6676-6690.
34. Antonio, C.A.C., Ce'sar de Sa', J.M.A., Castro, C.F, Costa Sousa., L., *An efficient algorithm to estimate optimal preform die shape parameters in forging*. Engrg. Comput, 2001. **18**: p. 1057-1077.
35. Vieilledent, D., Fourment, L. , *Shape optimization of axisymmetric preform tools in forging using a direct differentiation method*. Int. J. Numer. Methods Engrg, 2001. **52**: p. 1301-1321.
36. Laroussi, M., Fourment, L., *The adjoint state method for sensitivity analysis of non-steady problems application to 3D forging*. Int. J. Form. Process, 2004. **7**(1-2): p. 35-64.
37. Ou, H., Armstrong, C.G., Price, M.A. , *Die shape optimisation in forging of aerofoil sections*. J. Mater. Process. Technol, 2003. **132**: p. 21-27.
38. Lu, X., Balendra, R., *Finite element simulation for die-cavity compensation*. J. Mater. Process. Technol. , 2001. **115**: p. 227-232.



39. Wu, C., Hsu, YC *Optimal shape design of an extrusion forging die using a polynomial network and a genetic algorithm*. Int J Adv Manuf Technol 2002. **20**: p. 128-137.
40. Dean, T., *The net-shape forming of gears*. Mater Des 2000. **21**: p. 271-278.
41. Kang, G., Song, WJ, Kim, J, Kang, BS, Park, HJ *Numerical approach to forging process of a gear with inner cam profile using FEM*. J Mater Process Technol 2005. **164-165**: p. 1212-1217.
42. Lee, Y., Lee, SR, Lee, CH, Yang, DY *Process modification of bevel gear forging using three-dimensional finite element analysis*. J Mater Process Technol 2001. **113**: p. 59-63.
43. Song, J., Im, YT *Determination of a major design parameter for forward extrusion of spur gears*. J Manuf Sci Eng, 2004. **126**(255-263).
44. Petruska, J., Janicek, L *Computationally-experimental workability determination of compressed cylindrical specimen with surface defect*. J Mater Process Technol 1998. **80-81**: p. 572-578.
45. Cai, J., Dean, TA, Hu, ZM *Alternative die designs in netshape forging of gears*. J Mater Process Technol, 2004. **150**(48-55).
46. Yeo, H., Choi, Y, Hur, KD *Analysis and design of the prestressed cold extrusion die*. Int J Adv Manuf Technol, 2001. **18**: p. 54-61.
47. Coffin, L., *A study of the effects of cyclic thermal stresses on a ductile metal*. Trans ASME 1954. **76**: p. 931-950.
48. Mansion, S., *Behavior of materials under conditions of thermal stress*. Heat Transfer Symposium, University of Michigan Engineering Research Institute, 1953. **9-75**.
49. Lin, J., Tai, CC *The application of neural networks in the prediction of spring-back in an L-shaped bend*. Int J Adv Manuf Technol 1999. **15**: p. 163-170.
50. Kang, R., Lee, JH, Kim, BM, Choi, JC *Process design in flashless forging of rib/web-shaped plane-strain components by the finite element method*. J Mater Process Technol 1995. **47**: p. 291-309.
51. Chang, C., Bramley, AN *Forging preform design using a reverse simulation approach with the upper bound finite element procedure*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C. J Mech Eng Sci 2000. **214**(1): p. 127-136.
52. Sheu, J.J., Yu, C.H., *Preform and forging process designs based on geometrical features using 2D and 3D FEM simulations*. Int J Adv Manuf Technol 2009. **44**: p. 244-254.
53. Sadeghi, M.H., Dean, T.A., *Precision Forging Straight and Helical Spur Gears*. J. Mater. Process. Technol. , 1994. **45**: p. 25-30.
54. Dean, T.A., *The Feasibility of Flashless Forging* Metallurgia and Metal Forming, 1977. **44**(11-12): p. 488-498.
55. Meyer-Nolkemper, H., *Tools for flashless forging*. Industrie Anzeiger, 1979. **73**.
56. Nedian, G., *An Introduction to flashless forging of long shapes* Ph.D. Thesis, 1982. **Birmingham University**.
57. Sadeghi, M.H., *Precision Forging Axisymmetric Shapes, Straight and Helical Spur Gears* Ph.D. Thesis, Birmingham University, 1989.
58. Biswas, S.K., Knigh, W.A., *Computer Aided Design of Axisymmetric Hot Forging*. Dies Proc.15th Int. M.T.D.R. Conf., 1974.



59. Robinson, M., *A Workability Analysis of the Cold Forging of Gear with Integral Teeth*. J.of Mech. Working Tech. , 1977. **1**.
60. Sadeghi, M.H., Dean T.A. , *Analysis of Dimensional Accuracy of Precision Forged Axisymmetric Components*. J.Mech. Eng.London, 1991.
61. Sadeghi, M.H., Dean,T.A., *Analysis of Tooth Profile Accuracy in Precision Forged Spur Gears with Involute Teeth*. Proc. Conf.of SME/NAMRC, 1993. **21**.
62. Behrens, B.-A., Doege,E., Reinsch, S., Telkamp,K., Daehndel, H., Specker,A., *Precision forging processes for high-duty automotive components*. Journal of Materials Processing Technology 2007. **185**: p. 139-146.
63. Doege, E., Bohnsack,R., Romanowski, C., *Tool technologies for near net shape forgings*. International Conference on Forging and Related Technology ICFT'98, ImechE, Birmingham, 1998: p. 311-321.
64. Klocke, F., Toenshoff,H.K., Brinksmeier, E., Evans, C.,Howes,T., Inasaki, I.,Minke,E., Webster,J.A., *High speed grinding—fundamentals and state-of-the-art in Europe, Japan and the USA*. Annu. CIRP 1997. **46**(2): p. 715-724.
65. Bohnsack, R., *Untersuchungen zum Praezisionsschmieden von Laufverzahnungen*. Dissertation, University of Hannover, 1999.
66. Hayashi, M., *Current trends in automotive forging industry*. Communication at 26th ICFG Plenary Meeting, Osaka, 1993.
67. Whittaker, D., *Powder metallurgy for gear production: current status and potential future trends*. Materials and design, 1991. **12**.
68. Moon, L., Standring, Powder Metallurgy, 1983. **26**(3): p. 29.
69. Teterin, G., Tarnovskij, IJ, Chechik, AA *A shape complexity criterion*. Kuznecno – shtampovochnoe, proizvodstvo 1966. **7**: p. 6-9.