



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΙΚΡΟΚΟΠΗΣ & ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

## ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ, ΣΥΜΠΑΓΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΕΠΙΠΕΔΩΝ ΕΛΑΣΜΑΤΩΝ



**ΜΑΘΙΟΥΛΑΚΗ  
ΚΥΡΙΑΚΗ-ΕΥΑΓΓΕΛΙΑ**

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΑΡΙΣΤΟΜΕΝΗΣ ΑΝΤΩΝΙΑΔΗΣ  
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΑΡ. ΔΙΠΛ. : 72

ΧΑΝΙΑ 2018





*Στο Φάνη ,τη Μαρία, το Φάνη και τη Χριστίνα*

Για την ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής θα ήθελα να ευχαριστήσω αρχικά τον καθηγητή μου, κ. Αριστομένη Αντωνιάδη για τη συνεχή βοήθεια και τη παρουσία του σε οποιαδήποτε στιγμή τον χρειάστηκα. Έπειτα, γονείς, συγγενείς και φίλοι δε θα μπορούσαν από το να αποτελέσουν αναπόσπαστο κομμάτι στην ολοκλήρωση της καθώς με το κουράγιο και τη στήριξη τους μου έδιναν ενέργεια καθ' όλη τη πορεία της συγγραφής του κειμένου.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

|           |                                    |          |
|-----------|------------------------------------|----------|
| <b>1.</b> | <b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....</b>              | <b>7</b> |
| 1.1       | Ιστορική αναδρομή .....            | 7        |
| 1.2       | Αντικείμενο της διπλωματικής ..... | 8        |
| <b>2.</b> | <b>ΣΤΑΘΜΗ ΤΩΝ ΓΝΩΣΕΩΝ .....</b>    | <b>9</b> |
| 2.1       | Μηχανουργικές Κατεργασίες .....    | 9        |
| 2.2       | Πλαστική παραμόρφωση .....         | 9        |

|           |  |           |
|-----------|--|-----------|
| 2.3       | Επίδραση της θερμοκρασίας.....               | 10        |
| <b>3.</b> | <b>ΣΦΥΡΗΛΑΣΙΑ .....</b>                      | <b>11</b> |
| 3.1       | Γενικά για τη Σφυρηλασία .....               | 11        |
| 3.2       | Σφυρηλασία με ανοικτές μήτρες.....           | 11        |
| 3.2.1     | Ασκήσεις.....                                | 14        |
| 3.3       | Σφυρηλασία με κλειστές μήτρες.....           | 20        |
| 3.3.1     | Ασκήσεις.....                                | 26        |
| <b>4.</b> | <b>ΈΛΑΣΗ .....</b>                           | <b>30</b> |
| 4.1       | Γενικά για την Έλαση.....                    | 30        |
| 4.2       | Μηχανές έλασης .....                         | 30        |
| 4.3       | Είδη Έλασης .....                            | 31        |
| 4.4       | Μηχανική της έλασης .....                    | 32        |
| 4.5       | Ασκήσεις.....                                | 36        |
| <b>5.</b> | <b>ΕΞΩΘΗΣΗ.....</b>                          | <b>39</b> |
| 5.1       | Εισαγωγή.....                                | 39        |
| 5.2       | Μηχανική της εξώθησης .....                  | 40        |
| 5.2.1     | Μηχανική της θερμής εξώθησης .....           | 40        |
| 5.2.2     | Μηχανική της ψυχρής εξώθησης .....           | 44        |
| 5.3       | Ασκήσεις.....                                | 46        |
| <b>6.</b> | <b>ΑΠΟΤΜΗΣΗ .....</b>                        | <b>53</b> |
| 6.1       | Εισαγωγή στην Απότμηση.....                  | 53        |
| 6.2       | Διαδικασία της απότμησης .....               | 53        |
| 6.3       | Χάρη της απότμησης .....                     | 54        |
| 6.4       | Μηχανική της απότμησης .....                 | 55        |
| 6.5       | Σημείο εφαρμογής της δύναμης απότμησης ..... | 57        |
| 6.6       | Συντελεστής εκμετάλλευσης .....              | 58        |
| 6.7       | Δύναμη εξόλκευσης.....                       | 61        |

|           |  |            |
|-----------|--|------------|
| 6.8       | Ασκήσεις.....                                    | 61         |
| <b>7.</b> | <b>ΒΑΘΕΙΑ ΚΟΙΛΑΝΣΗ.....</b>                      | <b>71</b>  |
| 7.1       | Γενικά για τη βαθεία κοίλανση.....               | 71         |
| 7.2       | Διαδικασία βαθείας κοίλανσης .....               | 71         |
| 7.3       | Λόγος κοίλανσης και οριακός λόγος κοίλανσης..... | 73         |
| 7.4       | Ανάπτυγμα ελάσματος.....                         | 75         |
| 7.5       | Δύναμη Κοίλανσης .....                           | 77         |
| 7.6       | Δύναμη Συγκράτησης .....                         | 79         |
| 7.7       | Έργο κοίλανσης.....                              | 81         |
| 7.8       | Πρέσες.....                                      | 82         |
| 7.9       | Ταχύτητα κοίλανσης.....                          | 83         |
| 7.10      | Λίπανση.....                                     | 83         |
| 7.11      | Ασκήσεις .....                                   | 85         |
| <b>8.</b> | <b>ΚΑΜΨΗ .....</b>                               | <b>90</b>  |
| 8.1       | Γενικά για τη κάμψη.....                         | 90         |
| 8.2       | Διαδικασία και μηχανική της κάμψης.....          | 91         |
| 8.3       | Ελαστική επαναφορά (Springback).....             | 94         |
| 8.4       | Ανάπτυγμα ελάσματος.....                         | 96         |
| 8.5       | Είδη κάμψης.....                                 | 97         |
| 8.6       | Δύναμη και εργαλεία κάμψης .....                 | 98         |
| 8.7       | Έργο.....  | 103        |
| 8.8       | Ασκήσεις.....                                    | 104        |
| <b>9.</b> | <b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>                         | <b>106</b> |
| <b>1.</b> | <b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>                        | <b>106</b> |

## **1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

### **1.1 Ιστορική αναδρομή**

Η μεταλλουργία είναι μία από τις τρεις μεγαλύτερες τεχνολογίες για τη κατασκευή μεταλλικών προϊόντων μαζί με τη χύτευση και την κονεομεταλλουργία. Η μεταλλουργία θεωρείται ίσως η πιο παλαιά μέθοδος και από τις τρεις. Οι πρώτες καταγραφές μεταλλουργίας στην πιο απλή μορφή της είναι η επεξεργασία με σφύρα χρυσού και χαλκού σε διάφορες περιοχές της Μέσης Ανατολής γύρω στα 8000 π.Χ. Η διαμόρφωση των μετάλλων αυτών ήταν πολύ πρόχειρη μιας η τέχνη του εξευγενισμού μέσω τήξης ήταν ακόμα άγνωστη και η δυνατότητα επεξεργασίας του υλικού ήταν πολύ περιορισμένες καθώς μετά την απομάκρυνση του μετάλλου από το αρχικό μετάλλευμα, οι ακαθαρσίες παρέμεναν πάνω στο υλικό. Με την έλευση της τήξης του χαλκού κατά το 4000 π.Χ, άρχισε να χρησιμοποιείται η μέθοδος εκκαθάρισης του μετάλλου μέσω χημικών αντιδράσεων στην υγρή κατάσταση.

Έπειτα, στην εποχή του χαλκού διαπιστώθηκε ότι, η σφυρηλάτηση του μετάλλου μπορούσε να επιφέρει επιθυμητή αύξηση της αντοχής του υλικού (κατεργασία εν ψυχρώ). Η αναζήτηση για δύναμη ώθησε στην αναζήτηση κραμάτων τα οποία ήταν εγγενώς δυνατά και αυτό οδήγησε στην αξιοποίηση των κραμάτων χαλκού και κασσίτερου (Εποχή του Χαλκού) καθώς και σιδήρου και άνθρακα (εποχή του Σιδήρου). Η εποχή του Σιδήρου χρονολογείται κατά το 1200 π.Χ ακολούθησε την εποχή του Χαλκού κατά 1300 χρόνια. Ο λόγος αυτής της καθυστέρησης, ήταν η έλλειψη μεθόδων για την επίτευξη υψηλών θερμοκρασιών, απαραίτητες για τη τήξη και την τελειοποίηση του μεταλλεύματος σιδήρου. Οι περισσότερες κατεργασίες μετάλλου γινόταν χειρωνακτικά μέχρι το 13<sup>ο</sup> αιώνα, όπου και εμφανίστηκε η βαριά μηχανική σφύρα και χρησιμοποιήθηκε κυρίως για τη σφυρηλάτηση μπάρας και πλάκας. Η μηχανή αυτή αξιοποίησε την ισχύ του νερού και χρησιμοποιήθηκε για αρκετούς αιώνες. Έπειτα ακολούθησε η ανάπτυξη των μηχανών έλασης σε πρώιμα στάδια και χρειάστηκαν διακόσια χρόνια για την χρήση μεγάλων μηχανών έλασης ικανών να θερμάνουν σιδηρούχα υλικά. Μόλις το 18<sup>ο</sup> αιώνα, κατά τη Βιομηχανική Επανάσταση, αναπτύχθηκαν διαδικασίες κατασκευής σιδήρου και χάλυβα σε μεγάλες ποσότητες ικανές να ικανοποιήσουν την ανάγκη για προϊόντα μετάλλου, ανάγκη που προέκυψε για τη σφυρηλάτηση μετάλλου με μεγάλη χωρητικότητα. Με την εφεύρεση της σφύρας ατμού υψηλών ταχυτήτων, όπου η δύναμη παρέχεται μέσω υδραυλικής πίεσης, ικανοποιήθηκε αυτή η ανάγκη.

Η ανακάλυψη της ατμομηχανής ώθησε τις εξελίξεις στην έλαση και ήδη τον 19<sup>ο</sup> αιώνα ποικιλία προϊόντων παρασκευάζονται μέσω έλασης σε μεγάλες ποσότητες. Τα τελευταία 100 χρόνια η εξέλιξη νέων τύπων κατεργασίας μετάλλου καθώς και νέων υλικών με ειδικές ιδιότητες και εφαρμογές είναι ραγδαία. Αυτοί οι νέοι τύποι κατεργασίες περιλαμβάνουν βιδωτές και μηχανικές πρέσες καθώς και μηχανές έλασης πολλαπλών ελάστρων.

Τα τελευταία 20 χρόνια με την εξέλιξη των μεθόδων, οι κατεργασίες διαμόρφωσης συμπαγούς υλικού έχουν εξελιχθεί αρκετά. Η αξιοποίηση των υπολογιστών με προγράμματα φιλικά προς το χρήστη, σε κώδικες οδήγησε σε επανάσταση και την επιλογή ανάμεσα σε πληθώρα μεθόδων για τη κατασκευή συμπαγών υλικών, παράλληλα με την υψηλή ποιότητα και αυξημένη απόδοση εργασίας.

## **1.2 Αντικείμενο της διπλωματικής**

Οι κατεργασίες αποτελούν το σύνολο των ενεργειών ή εργασιών με τη βοήθεια των οποίων ένα υλικό μορφοποιείται και είναι έτοιμο για χρήση. Υπάρχουν πολλοί τρόποι για να μορφοποιηθεί τελικά το προϊόν. Οι κυριότεροι από αυτούς είναι : η χύτευση, η προσθήκη υλικού, η αφαίρεση υλικού και η παραμόρφωση υλικού.

Η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζει στη μηχανικές κατεργασίες παραμόρφωσης κατά τις οποίες, λαμβάνοντας υπόψιν το χαρακτηριστικό των υλικών, την πλαστική παραμόρφωση, κάτω από συγκεκριμένες θερμοκρασίες, ταχύτητες και φορτίσεις, να μεταλλάσσουν το σχήμα και τις ιδιότητες των υλικών χωρίς απώλεια υλικού.

## 2. Στάθμη των γνώσεων

### 2.1 Μηχανουργικές Κατεργασίες

Οι μηχανουργικές κατεργασίες για τη μορφοποίηση μετάλλων με παραμόρφωση υλικού βασίζονται στο χαρακτηριστικό του υλικού να παραμορφώνεται πλαστικά καθώς όμως διατηρεί την αρχική του μάζα. Η ενέργεια αυτή πραγματοποιείται κυρίως με την άσκηση δύναμης έναντι του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Η δύναμη αυτή μπορεί να επιβληθεί με τη βοήθεια εργαλείων όπως πρέσες, έλαστρα, εξολκείς, σε συνδυασμό την επίδραση της θερμοκρασίας.

Η μορφοποίηση μετάλλων με παραμόρφωση υλικού χωρίζεται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, στις διαμορφώσεις συμπαγούς υλικού και στις διαμορφώσεις επίπεδων ελασμάτων.

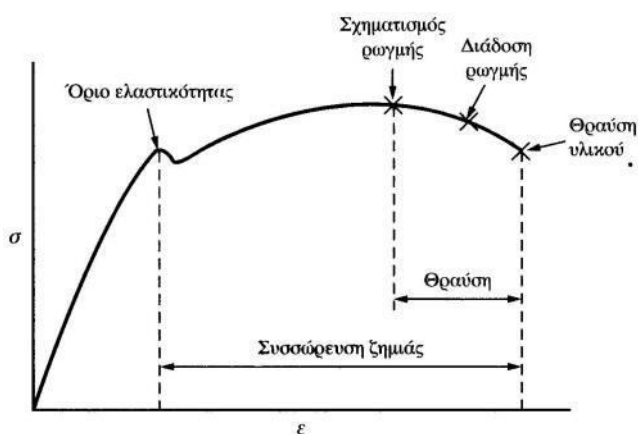
Οι διαμορφώσεις συμπαγούς υλικού αναφέρονται σε διαδικασίες κατά τις οποίες η διατομή του τεμαχίου ή το πάχος του τροποποιούνται ουσιαστικά σε αντίθεση με τις διαμορφώσεις επίπεδων ελασμάτων. Στη πρώτη κατηγορίες εντάσσονται οι εξής κατεργασίες: έλαση, απότμηση, εξώθηση ενώ στη δεύτερη ανήκουν οι : απότμηση, βαθεία κοίλανση, κάμψη, περιώθηση.

### 2.2 Πλαστική παραμόρφωση

Σε αντίθεση με την ελαστική παραμόρφωση, όπου μία ράβδος επανέρχεται στο αρχικό της μήκος υπό την επίδραση εφελκυστικών τάσεων, στη πλαστική παραμόρφωση το σώμα αλλάζει τις μηχανικές του ιδιότητες καθώς μετά την αφαίρεση των τάσεων η δύναμη που προσδόθηκε στο σώμα ήταν μεγαλύτερη από το όριο ελαστικότητας του και η κρυσταλλική δομή του μετάλλου άλλαξε.

Συνεπώς είναι απαραίτητη η ανάλυση των τάσεων και παραμορφώσεων. Τάση είναι η δύναμη ανά μονάδα επιφάνειας. Μπορεί να είναι ορθή ή διατμητική

Η παραμόρφωση είναι το σύνολο των μετατοπίσεων όλων των σημείων ενός σώματος τέτοιων ώστε η γεωμετρία του σώματος να αλλάζει. Τα δύο μεγέθη είναι άρρηκτα συνδεδεμένα καθώς ανάλογα με το είδος των τάσεων που ασκείται στο σώμα οι παραμορφώσεις χωρίζονται σε ορθές και διατμητικές. Η σχέση τάσεων παραμορφώσεων φαίνεται στο σχήμα 2.1 για παραμόρφωση κοινού χάλυβα σε ένα πείραμα εφελκυσμού.



Σχήμα 2.1 διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης

Το υλικό φορτίζεται εφελκυστικά μέχρι το σημείο θραύσης. Στο σχήμα παρατηρούνται οι ελαστική και η ελαστοπλαστική περιοχή. Στην πρώτη οι παραμορφώσεις είναι ανάλογες των τάσεων με συντελεστή αναλογίας το μέτρο ελαστικότητας του κάθε υλικού και για αυτή τη περιοχή ισχύει ο νόμος του Hooke:

όπου:

$\sigma$  (N/m<sup>2</sup>) τάση

$E$  (N/m<sup>2</sup>) μέτρο ελαστικότητας του υλικού

$\varepsilon$  παραμόρφωση

Στη δεύτερη περιοχή όπου οι παραμορφώσεις είναι μεγαλύτερες το υλικό δεν επιστρέφει στην αρχική του θέση και οι παραμόρφωση που υπόκεινται το υλικό είναι μόνιμη. Το υλικό μπαίνει σε αυτή τη περιοχή εφόσον η τιμή της παραμόρφωσης είναι μεγαλύτερη του 0.2 . Κατά τις κατεργασίες παραμόρφωσης που εξετάζονται παρακάτω επιδιώκεται το υλικό να βρεθεί στη δεύτερη περιοχή, τη πλαστική έτσι ώστε η μεταβολή της παραμόρφωσης του να είναι μόνιμη.

### 2.3 Επίδραση της θερμοκρασίας

Η επίδραση της θερμοκρασίας αποτελεί σημαντικό παράγοντα στην διαμόρφωση του τεμαχίου κατά την πλαστική παραμόρφωση. Το κάθε υλικό προς κατεργασία έχει μία μοναδική θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης κατά την οποία μεταβάλλεται η κρυσταλλική του δομή. Κατά τη παραμόρφωση του υλικού σε θερμοκρασία υψηλότερη από το σημείο ανακρυστάλλωσης του , η κατεργασία θεωρείται παραμόρφωση εν θερμώ. Αντίστοιχα παραμόρφωση του υλικού σε θερμοκρασία χαμηλότερη από το σημείο ανακρυστάλλωσης του, η κατεργασία θεωρείται ότι πραγματοποιήθηκε εν ψυχρώ.

Η παραμόρφωση εν ψυχρώ πραγματοποιείται συνήθως σε θερμοκρασία δωματίου και λαμβάνει χώρα όταν το μέταλλο παραμορφώνεται σε θερμοκρασίες μικρότερες από το 30% της θερμοκρασίας τήξης του μετάλλου στην απόλυτη κλίμακα. Κατά τη διάρκεια της ψυχρής κατεργασίας οι παραμορφώσεις που του πλέγματος κρυσταλλικού πλέγματος είναι ισχυρές χωρίς όμως να συνοδεύονται από την αναδημιουργία κρυστάλλου.

Χαρακτηριστικά γνωρίσματα της παραπάνω διεργασίας είναι : το υψηλό όριο διαρροής, για την επιπλέον παραμόρφωση του υλικού έπειτα από εν ψυχρώ παραμόρφωση απαιτείται ανόπτηση, βελτίωση της αντοχής και ελάττωση της επιμήκυνσης. Τέλος το μέγεθος της δύναμης διαμόρφωσης είναι αρκετά μεγάλο.

Η παραμόρφωση εν θερμώ πραγματοποιείται σε θερμοκρασίες που ξεπερνούν το 60% της θερμοκρασίας τήξης του μετάλλου στην απόλυτη κλίμακα. Καθώς όσο αυξάνεται η θερμοκρασία η αντοχή του μετάλλου μειώνεται και συνεπώς απαιτείται μικρότερη δύναμη παραμόρφωσης. Η ανακρυστάλλωση γίνεται εύκολα και το όριο διαρροής του υλικού είναι αρκετά χαμηλό.

### 3. Σφυρηλασία

#### 3.1 Γενικά για τη Σφυρηλασία

Η σφυρηλασία είναι μια διαδικασία που χρησιμοποιείται για τη παραγωγή μεγάλης ποικιλίας μετάλλων. Τα σφυρηλατημένα τεμάχια παράγονται σε μεγέθη που οι διαστάσεις τους κυμαίνονται από ελάχιστα χιλιοστά μέχρι τρία μέτρα, ακόμα και περισσότερο σε συγκεκριμένες περιπτώσεις. Η βασική διαδικασία για τη θερμή σφυρηλάτηση είναι σχετικά απλή. Ένα ακατέργαστο τεμάχιο σε μορφή ράβδου ή μπιγέτα θερμαίνεται αρχικά και αυξάνεται η ολκιμότητά του. Έπειτα το τεμάχιο συμπιέζεται ή σφυρηλατείται σε χαλύβδινες μήτρες με αποτέλεσμα τη μετατροπή του ακατέργαστου στο τελικό τεμάχιο. Το κατεργαζόμενο τεμάχιο υπόκειται σε πλαστική παραμόρφωση καθώς πάνω σε αυτό εφαρμόζεται πίεση είτε κρούση.

Η διαδικασία σφυρηλασίας μπορεί να παράγει εξαρτήματα με εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες και ελάχιστα απόβλητα. Η βασική ιδέα είναι ότι το αρχικό μέταλλο παραμορφώνεται πλαστικά στο επιθυμητό γεωμετρικό σχήμα δίνοντάς του μεγαλύτερη αντίσταση στην κόπωση και αντοχή. Η διαδικασία είναι παράλληλα οικονομική ενώ δίνει τη δυνατότητα μαζικής παραγωγής τεμαχίων και την επίτευξη συγκεκριμένων μηχανικών ιδιοτήτων στο τελικό προϊόν.

Η σφυρηλασία πραγματοποιείται με τη μέθοδο ανοικτών μητρών, είτε με τη μέθοδο κλειστών μητρών.

#### 3.2 Σφυρηλασία με ανοικτές μήτρες

Στη σφυρηλασία σε ανοικτές μήτρες το κατεργαζόμενο τεμάχιο δεν εσωκλείεται από τις μήτρες, επιτρέποντας του να απλώνεται, πέρα από τα σημεία επαφής με αυτές και κατά τη διάρκεια της σφυρηλασίας κινείται σε πλευρική κατεύθυνση.

Η σφυρηλασία με ανοικτές μήτρες εξυπηρετεί διάφορους σκοπούς, εκτός από το απλό σχηματισμό του μετάλλου. Η σφυρηλασία του μετάλλου ευθυγραμμίζει και βελτιώνει τον κόκκο του μετάλλου, πράγμα που αυξάνει την αντοχή καθώς και τη μείωση του πορώδους, το οποίο είναι η παρουσία οποιωνδήποτε φυσαλίδων αέρα, ακόμα και εκείνων που δεν είναι ορατές με γυμνό μάτι. Επίσης βελτιώνει την ικανότητα του μετάλλου να ανταποκρίνεται στη μηχανική κατεργασία. Τα σφυρηλάτα μεταλλικά μέρη έχουν βελτιωμένη αντοχή στη φθορά και άλλες μηχανικές ιδιότητες σε σχέση με παρόμοια κατεργασμένα ή χυτά μέρη. Χρησιμοποιείται κυρίως για κατασκευή μεγάλων τεμαχίων.

Η απλούστερη περίπτωση σφυρηλασίας με ανοικτές μήτρες αφορά τη συμπίεση τεμαχίου κυλινδρικής διατομής ανάμεσα σε δύο επίπεδες μήτρες κατά τη διάρκεια της οποίας το ύψος του τεμαχίου μειώνεται ενώ αυξάνεται η διάμετρος του.

Στη περίπτωση που η σφυρηλασία πραγματοποιείται κάτω από ιδανικές συνθήκες, χωρίς την επίδραση της τριβής ανάμεσα στο τεμάχιο και στις επιφάνειες των μητρών, οι παραμόρφωση θεωρείται ομογενής και η ακτινική ροή του υλικού παραμένει σταθερή σε όλο του το ύψος:

$$e = \ln\left(\frac{h_0}{h}\right) \quad (\text{Εξίσωση 3.1})$$

όπου:

$e$  (mm): η πραγματική παραμόρφωση

$h_0$  (mm): το αρχικό ύψος του τεμαχίου

$h$  (mm) : το ύψος του τεμαχίου σε κάποιο ενδιάμεσο σημείο

Στο τέλος της συμπίεσης,  $h$  είναι η τελική τιμή του ύψους και η πραγματική παραμόρφωση παίρνει τη μέγιστη τιμή της.

Η πραγματική παραμόρφωση  $\varphi_p$  της σφυρηλασίας υπολογίζεται ως εξής:

$$\varphi_p = \frac{h_1}{h_0} \quad (\text{Εξίσωση 3.2})$$

Ο λόγος σφυρηλασίας  $s$  ουσιαστικά θέτει τα όρια των αρχικών διαστάσεων του ακατέργαστου τεμαχίου όσον αφορά τον κίνδυνο λυγισμού κατά τη διάρκεια της κάθετης σφυρηλασίας και ορίζεται ως ο λόγος του αρχικού μήκους του ακατέργαστου, προς την αρχική του διάμετρο. Αρχικό μήκος θεωρείται το ελεύθερο τμήμα που δεν εσωκλείεται στη μήτρα

Υπολογίζεται ως εξής:

$$s = \frac{h_0}{d_0} = \frac{h_{0hd}}{d_0} \quad (\text{Εξίσωση 3.3})$$

όπου:

$h_0$  (mm) το ύψος του ακατέργαστου

$d_0$  (mm) η αρχική διάμετρος

$h_{0hd}$  (mm) το ελεύθερο μήκος του ακατέργαστου/ύψος της κεφαλής

Ο επιτρεπτός λόγος σφυρηλάτησης για να κατασκευαστεί το τεμάχιο με μία διαδικασία είναι  $S \cong 2.6$ , ενώ αν  $s \leq 4.5$  θα κατασκευαστεί σε δύο διαδικασίες

Σε περίπτωση που ξεπεραστεί η τιμή του επιτρεπτού λόγου, τότε το τεμάχιο λυγίζει.

Όταν ο όγκος του τελικού τεμαχίου είναι γνωστός και έχει υπολογιστεί και ο λόγος σφυρηλάτησης, υπολογίζεται με το παρακάτω τύπο η αρχική διάμετρος.

$$d_0 = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot V}{\pi \cdot s}} \quad (\text{Εξίσωση 3.4})$$

όπου:

$d_0$  (mm) η αρχική διάμετρος

$V$  (mm<sup>3</sup>) όγκος του τελικού τεμαχίου

$s$  λόγος σφυρηλάτησης

Η δύναμη κατά τη σφυρηλασία που απαιτείται για να συνεχίσει τη συμπίεση σε οποιοδήποτε ύψος υπολογίζεται από τη παρακάτω εξίσωση:

$$F = k_{str} \cdot A \quad (\text{Εξίσωση 3.5})$$

όπου:

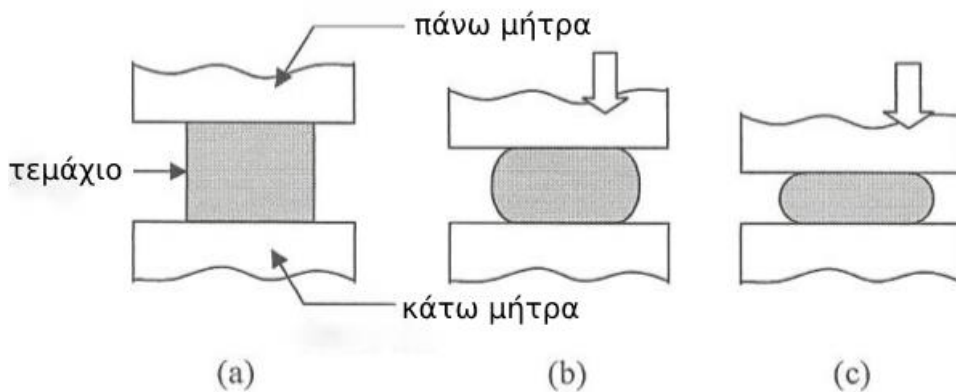
$F$ (N): η δύναμη σφυρηλασίας

$A$ (mm<sup>2</sup>): η διατομή του τεμαχίου

$k_{str}$ (N/ mm<sup>2</sup>) τάση ροής του υλικού που προκύπτει από τη καμπύλη τάσης παραμόρφωσης.

Η επιφάνεια  $A$  συνεχώς αυξάνεται κατά τη διάρκεια της παραμόρφωσης καθώς το ύψος μειώνεται. Η τάση ροής επίσης αυξάνεται καθώς το τεμάχιο σκληραίνει (εκτός της διαδικασίας που εκτελούνται εν θερμώ, όπου ο συντελεστής ενδοσκληρυνσης ισούται με 0 και η τάση ροής ισούται με το όριο θραύσης του μετάλλου). Η δύναμη φτάνει στη μέγιστη τιμή της στο τέλος της σφυρηλασίας, όταν τόσο η επιφάνεια όσο και τάση ροής έχουν λάβει

τη μέγιστη τιμή τους. Όταν το κατεργαζόμενο τεμάχιο είναι κρύο και οι μήτρες ζεστές το φαινόμενο της βαρελοειδούς παραμόρφωσης είναι πιο έντονο. Στη πραγματικότητα, κατά τη διάρκεια της σφυρηλασίας υπάρχει τριβή η οποία αντισταθεί στη ροή του μετάλλου στις επιφάνειες των μητρών. Αυτό δημιουργεί και το φαινόμενο του βαρελισμού όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 3.1.



**Σχήμα 3.1** Φαινόμενο βαρελισμού σε σφυρηλασία με ανοικτές μήτρες

Για τεμάχια συμμετρικά εκ περιστροφής η σχέση δύναμης δίνεται από το παρακάτω τύπο:

$$F = A_1 \cdot k_{str1} \cdot \left(1 + \frac{\mu \cdot d_1}{3 \cdot h_1}\right)$$

(Εξίσωση 3.6)

όπου:

$F$  (N) η δύναμη σφυρηλασίας

$A_1$  (mm<sup>2</sup>) η διατομή του τεμαχίου μετά τη σφυρηλασία

$k_{str1}$  (N/mm<sup>2</sup>) η τάση ροής του υλικού στο τέλος της σφυρηλασίας όπως προκύπτει από τις καμπύλες παραμόρφωσης στο τέλος της εργασίας

$\mu$  συντελεστής τριβής

$d_1$  (mm) η τελική διάμετρος του τεμαχίου

$h_1$  (mm) το τελικό ύψος του τεμαχίου

Το έργο της σφυρηλασίας με ανοικτές μήτρες υπολογίζεται από το παρακάτω τύπο:

$$W = \frac{V \cdot k_{strm} \cdot \phi_p}{\eta_F}$$

(Εξίσωση 3.7)

όπου:

$W$  (N/mm), το έργο στο τέλος της σφυρηλασίας

$V$  (mm<sup>3</sup>), ο τελικός όγκος του διαμορφωμένου τεμαχίου

$k_{strm}$  (N/mm<sup>2</sup>), η μέση πραγματική τάση του υλικού

$\eta_F$  (-) ο συντελεστής απόδοσης της σφυρηλασίας

$\phi_p$  (-) η πραγματική παραμόρφωση

Η αρχική τάση ροής  $k_{str0}$  υπολογίζεται ανάλογα με το υλικό, από τη καμπύλη τάσης παραμόρφωσης στην αρχή της σφυρηλασίας όταν η τιμή της πραγματικής παραμόρφωσης είναι 0. Η τελική τάση ροής  $k_{str1}$  υπολογίζεται επίσης από τη καμπύλη τάσης παραμόρφωσης

του υλικού στο τέλος της διαδικασίας για πραγματική παραμόρφωση  $\varphi_p$ . Τέλος υπολογίζεται η μέση πραγματική τάση ροής ως το ημιάθροισμα της αρχικής και τελικής τιμής της ροής.

$$k_{strm} = \frac{k_{str0} + k_{str1}}{2} \quad (\text{Εξίσωση 3.8})$$

### 3.2.1 Ασκήσεις

#### Ασκηση 1

Σκοπός της άσκησης είναι η κατασκευή σφαιριδίων διαμέτρου 30mm από 42CrMo4. Η αρχική διάμετρος πρέπει να διαμορφωθεί με τρόπο ώστε ο λόγος σφυρηλάτησης να ισούται με  $s=2.6$ . Δίνεται ο συντελεστής απόδοσης της σφυρηλασίας  $\eta_F=0.8$  και η τριβή  $\mu=0.15$ . Ζητείται να υπολογιστούν: α) ο όγκος της σφαίρας, β) η διάμετρος του ακατέργαστου τεμαχίου  $d_0$  για  $s=2.6$ , γ) οι διαστάσεις του ακατέργαστου τεμαχίου, δ) ο πραγματικός λόγος σφυρηλάτησης, ε) η δύναμη της σφυρηλάτησης με συμπίεση, στ) το έργο της σφυρηλάτησης με συμπίεση.

#### Λύση

Όγκος της σφαίρας

Το τελικό τεμάχιο είναι σφαίρα, συνεπώς ο όγκος του υπολογίζεται:

$$V = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot (15)^3 = 14130 \text{ mm}^3$$

Υπολογισμός αρχικής διαμέτρου του ακατέργαστου τεμαχίου  $d_0$  για  $s=2.6$

Για δοσμένη τιμή του λόγου σφυρηλάτησης και του τελικού όγκου του τεμαχίου, υπολογίζεται η αρχική διάμετρος  $d_0$ . Λαμβάνεται επίσης υπόψιν η ισότητα των όγκων, καθώς κατά τη σφυρηλάτηση σε ανοικτές μήτρες ο όγκος δε μεταβάλλεται. Το αρχικό τεμάχιο είναι κυλινδρικό.

$$\frac{\pi \cdot d_0^2}{4} \cdot h_0 = V \quad \text{διαίρεση κατά μέλη} \Rightarrow \frac{\pi \cdot d_0^3}{4} = V \Rightarrow d_0 = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot V}{\pi \cdot s}}$$

$$\frac{h_0}{d_0} = 2.6$$

$$d_0 = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot V}{\pi \cdot s}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 14130}{3.14 \cdot 2.6}} = 19.0028 \text{ mm}$$

Επειδή δεν υπάρχει εμπορική διαθεσιμότητα σε αυτό το μέγεθος για το συγκεκριμένο υλικό, επιλέγεται διάμετρος  $d_0=20 \text{ mm}$ . Ταυτόχρονα, αυτή η επιλογή σημαίνει ότι ο δείκτης είναι στην επιθυμητή στάθμη, καθώς πέφτει κάτω από τη τιμή του 2.6.

Διαστάσεις ακατέργαστου τεμαχίου

Όπως αναφέρθηκε, ο όγκος του τεμαχίου δε μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της σφυρηλασίας, συνεπώς ισχύει  $V_{\text{τελ}} = V_{\text{αρχ}} = 14130 \text{ mm}^3$

Η διατομή του αρχικού τεμαχίου :

$$A_0 = \frac{\pi \cdot d_0^2}{4} = \frac{3.14 \cdot (20 \text{ mm})^2}{4}$$

$$\text{Μήκος ακατέργαστου τεμαχίου: } h_0 = \frac{V_0}{A_0} = \frac{14130 \text{ mm}^3}{\frac{3.14 \cdot (20 \text{ mm})^2}{4}} = 45 \text{ mm}$$

Λόγος σφυρηλάτησης

Έχοντας υπολογίσει το αρχικό μήκος τεμαχίου καθώς και την αρχική διάμετρο, υπολογίζεται ο πραγματικός λόγος σφυρηλασίας :

$$s_{act} = \frac{h_0}{d_0} = \frac{45\text{mm}}{20\text{mm}} = 2.25$$

Επειδή  $s_{act} < s_{per}$  δηλαδή  $2.25 < 2.6$  η σφαίρα μπορεί να παραχθεί από το συγκεκριμένο ακατέργαστο τεμάχιο χωρίς τον κίνδυνο λυγισμού και πραγματοποιείται σε μία φάση.

Δύναμη της σφυρηλάτησης

Υπολογίζεται η δύναμη στο τέλος της σφυρηλασίας για τεμάχιο συμμετρικό εκ περιστροφής:

$$F = A_1 \cdot k_{str1} \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \mu \cdot \frac{d_1}{h_1}\right)$$

Για τον υπολογισμό της τάσης ροής του υλικού  $k_{str1}$  :

1° Βήμα υπολογισμού

υπολογίζεται η πραγματική παραμόρφωση :

$$\varphi_p = \ln\left(\frac{h_0}{h_1}\right) = \ln\left(\frac{45}{30}\right) = 0.4 \rightarrow 40\%$$

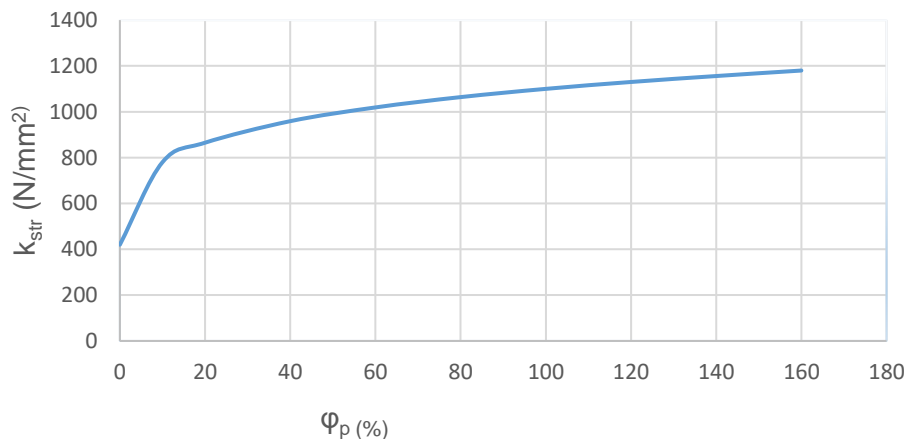
Για το συγκεκριμένο υλικό 42 CrMo 4 ο επιτρεπτός βαθμός παραμόρφωσης είναι 0.7-0.8.

2° Βήμα υπολογισμού

Από την καμπύλη παραμόρφωσης, όπως αυτή φαίνεται στο **διάγραμμα 3.1** για το υλικό 42 CrMo 4 προκύπτει η τάση ροής του υλικού στο τέλος της διαμόρφωσης.

Για  $\varphi_p=0$ , η τάση ροής στην αρχή της διαμόρφωσης είναι  $k_{str0}=420 \text{ N/mm}^2$ , ενώ για  $\varphi_p=0.4$ , στο τέλος της διαμόρφωσης,  $k_{str1}=959 \text{ N/mm}^2$

$$k_{str0}=420 \text{ N/mm}^2, k_{str100\%}=1100 \text{ N/mm}^2$$



**διάγραμμα 3.1** καμπύλη παραμόρφωσης για το υλικό 42 CrMo4 όπου

$$k_{str} = k_{str100\%} \cdot \varphi_p^n = 1100 \cdot \varphi_p^{0.149}$$

3° Βήμα υπολογισμού

Υπολογισμός της διατομής του υλικού για  $D=30\text{mm}$  :  $A = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{3.14 \cdot (30\text{mm})^2}{4} = 706.5 \text{ mm}^2$

#### 4<sup>ο</sup> Βήμα υπολογισμού

Υπολογίζεται η δύναμη στο τέλος της σφυρηλασίας χρησιμοποιώντας των τύπο για συμμετρικά εκ περιστροφής τεμάχια

$$F = A_1 \cdot k_{str1} \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \mu \cdot \frac{d_1}{h_1}\right) = \pi \cdot \frac{d_1^2}{4} \cdot k_{str1} \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \mu \cdot \frac{d_1}{h_1}\right)$$

$$F = 706,5 \cdot 959 \left(1 + \frac{1}{3} \cdot 0,15 \cdot \frac{30}{30}\right) = 711410,175 \text{ N} = 711 \text{ kN}$$

Έργο της σφυρηλασίας σε ανοικτές μήτρες

Υπολογίζεται αρχικά η πραγματική τάσης ροής κατά την διαδικασία της σφυρηλασίας.

$$k_{strm} = \frac{k_{stro} + k_{str1}}{2} = \frac{420 + 959}{2} = 689,5 \text{ N/mm}^2$$

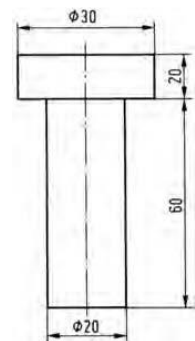
Υπολογισμός του έργου σφυρηλασίας:

$$W = \frac{V \cdot k_{strm} \cdot \phi_p}{\eta_F \cdot 10^6} = \frac{14130 \cdot 689,5 \cdot 0,4}{0,8 \cdot 10^3} = 4871,3 \text{ N}\cdot\text{m} = 4,5 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

#### Άσκηση 2

Σκοπός είναι η παραγωγή κεφαλών μπουλονίων όπως στο σχήμα 3.2 από Ck 35. Δίνεται ο συντελεστής απόδοσης  $\eta_F = 0,8$  και ο συντελεστής τριβής  $\mu = 0,15$ .

Ζητείται να υπολογιστούν: α) οι διαστάσεις του αρχικού τεμαχίου, β) το πλήθος των ενεργειών διαμόρφωσης, γ) η δύναμη σφυρηλασίας, δ) το έργο σφυρηλασίας



#### Λύση:

Διαστάσεις του αρχικού τεμαχίου

Υπολογίζεται αρχικά ο όγκος της κεφαλής του τεμαχίου καθώς είναι γνωστή η τελική του διάμετρος και το τελικό ύψος λαμβάνεται από το σχήμα.

$$V_{κεφ} = \frac{4 \cdot \pi \cdot r^3}{3} \cdot h = \frac{4 \cdot 3,14 \cdot 15^3}{4} \cdot 20 = 14137,16 \text{ mm}^3$$

Ο όγκος στη σφυρηλασία με ανοικτές μήτρες παραμένει σταθερός. Συνεπώς προσδιορίζεται με τα παραπάνω δεδομένα η αρχική διάμετρος του τεμαχίου. Η διάμετρος του στελέχους όπως φαίνεται από το σχήμα είναι  $d = 20 \text{ mm}$  συνεπώς και η αρχική διάμετρος επιλέγεται  $d_0 = 20 \text{ mm}$

Η αρχική επιφάνεια διατομής υπολογίζεται :

$$A = \frac{\pi \cdot d_0^2}{4} = \frac{3,14 \cdot (20 \text{ mm})^2}{4} = 314,2 \text{ mm}^2$$

Το απαιτούμενο ύψος  $h_{ok}$  της ράβδου με διάμετρο  $d_0 = 20 \text{ mm}$  για την κατασκευή της κεφαλής υπολογίζεται από την όγκο της κεφαλής.

$$V_{\text{κεφ}} = A \cdot h_{0k} \Rightarrow h_{0k} = \frac{V_{\text{κεφ}}}{A} = \frac{14137,16}{314,2} \approx 45 \text{ mm}$$

Άρα, το συνολικό μήκος του ακατέργαστου κομματιού είναι:

$$L = h_{0hd} + h_{sh} = 45 \text{ mm} + 60 \text{ mm} = 105 \text{ mm}.$$

και οι διαστάσεις του αρχικού τεμαχίου :  $\varnothing 20 \times 105$

### Πλήθος των ενεργειών διαμόρφωσης

Στον υπολογισμό του λόγου σφυρηλάτησης,  $h_0$  είναι το ελεύθερο μήκος του αρχικού τεμαχίου, το τμήμα δηλαδή του τεμαχίου που δεν εφαρμόζει ανάμεσα στις μήτρες.

$$s = \frac{h_{0k}}{d_0} = \frac{45 \text{ mm}}{20 \text{ mm}} = 2.25$$

Αφού το  $s$  που υπολογίστηκε είναι μικρότερο από την μεγαλύτερη επιτρεπτή τιμή, 2.6, το τεμάχιο μπορεί να παραχθεί χωρίς κίνδυνο λυγισμού

Επιπλέον υπολογίζεται η πραγματική παραμόρφωση :

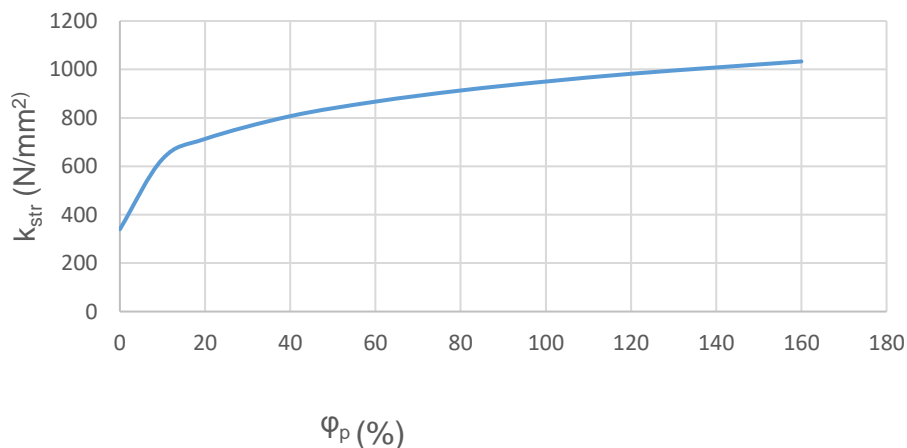
$$\varphi_p = \ln\left(\frac{h_{0hd}}{h_1}\right) = \ln\left(\frac{45}{20}\right) = 0.8$$

Η επιτρεπτή παραμόρφωση για το υλικό Ck35 σύμφωνα με το **πίνακα 3.1** είναι 1.2-1.4. Συνεπώς αφού ο βαθμός παραμόρφωσης είναι μικρότερος από τον επιτρεπτό βαθμό παραμόρφωσης, η ενέργεια θα πραγματοποιηθεί με μία μόνο διαδικασία.

### Δύναμη σφυρηλασίας

Από την καμπύλη παραμόρφωσης του διαγράμματος 4.2 για το υλικό Ck35 προκύπτει η τάση ροής του υλικού στο τέλος της παραμόρφωσης.

$$k_{str0} = 340 \text{ N/mm}^2, k_{str100\%} = 950 \text{ N/mm}^2$$



**διάγραμμα 3.2** καμπύλη παραμόρφωσης για το υλικό Ck35, Cq35

για  $\varphi_p = 0$ , η τάση ροής στην αρχή της διαμόρφωσης είναι  $k_{str0} = 340 \text{ N/mm}^2$ , ενώ για  $\varphi_p = 0.8$ , στο τέλος της διαμόρφωσης  $k_{str1} = 915 \text{ N/mm}^2$ .

Υπολογίζεται η δύναμη στο τέλος της σφυρηλασίας:

$$F = A_1 \cdot k_{str1} \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \mu \cdot \frac{d_1}{h_1}\right)$$

$$F = A_1 \cdot k_{str1} \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \mu \cdot \frac{d_1}{h_1}\right) = \pi \cdot \frac{d_1^2}{4} \cdot k_{str1} \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \mu \cdot \frac{d_1}{h_1}\right)$$

$$F = 3.14 \cdot \frac{30^2}{4} \cdot 915 \left(1 + \frac{1}{3} \cdot 0.15 \cdot \frac{30}{20}\right) = 706.5 \text{ mm}^2 \cdot 915 \text{ N/mm}^2 \cdot 1.075 = 694.931,0625 \text{ N} = 694 \text{ kN}$$

### Έργο της σφυρηλασίας

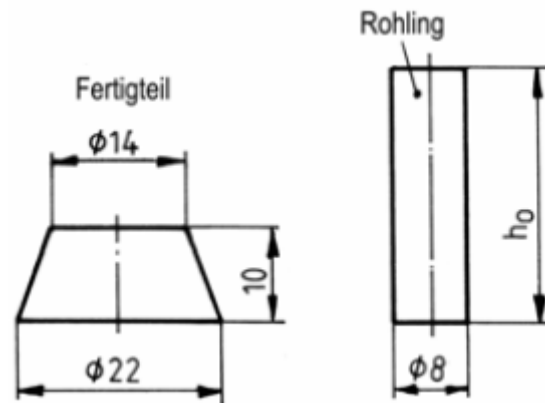
Υπολογισμός της μέσης πραγματικής τάσης πλαστικοποίησης κατά την διαδικασία της σφυρηλασίας

$$k_{strm} = \frac{k_{str0} + k_{str1}}{2} = \frac{340 + 915}{2} = 627.5 \text{ N/mm}^2$$

$$W = \frac{V \cdot k_{strm} \cdot \varphi_p}{\eta_F} = \frac{14130 \cdot 627.5 \cdot 0.8}{0.8} = 8866 \text{ Nmm}$$

### Άσκηση 3

Ο κόλινος κώνος του σχήματος Cq35 κατασκευάζεται μέσω σφυρηλασίας με ανοικτές μήτρες. Δοσμένου του συντελεστή τριβής  $\mu=0.15$  και του συντελεστή απόδοσης  $\eta=80\%$ , ζητείται να υπολογιστούν: α) το αρχικό ύψος του ακατέργαστου τεμαχίου, β) η πραγματική παραμόρφωση, γ) η μείωση του ύψους, δ) ο λόγος σφυρηλασίας, ε) η δύναμη σφυρηλασίας, στ) το έργο σφυρηλασίας.



### Λύση:

Αρχικό ύψος

Το αρχικό ύψος του ακατέργαστου τεμαχίου υπολογίζεται από την ισότητα των όγκων. Όπως φαίνεται από το σχήμα το αρχικό, ακατέργαστο τεμάχιο είναι ένας κύλινδρος, ενώ μετά τη κατεργασία σφυρηλατείται σε κόλινος κώνος.

$$V_{\text{αρχ}} = V_{\text{τελ}}$$

$$V_{\text{τελ}} = \frac{1}{3} \cdot 3.14 \cdot 10 \cdot (7^2 + 11^2 + 7 \cdot 11) \approx 2.586.57 \text{ mm}^3 \text{ (όγκος του κόλινου κώνου)}$$

$$\text{Συνεπώς } \frac{\pi \cdot d_0^2 \cdot h_0}{4} = 2.586.57 \text{ mm}^3 \Rightarrow h_0 = 52 \text{ mm}$$

Πραγματική παραμόρφωση

Δεδομένου του αρχικού ύψους του τεμαχίου, υπολογίζεται η πραγματική παραμόρφωση που εκείνο έχει υποστεί:

$$\varphi_p = \ln\left(\frac{h_1}{h_0}\right) = \ln\left(\frac{10}{52}\right) = -1.64 \text{ Η απόλυτη τιμή είναι } \varphi_p = 1.64 \text{ . Άρα } \varphi_p = 164\%$$

Μείωση του ύψους

Για τη σφυρηλασία με ανοικτές μήτρες υπολογίζεται η μείωση του ύψους:

$$\varepsilon = \frac{h_0 - h_1}{h_0} \cdot 100\%$$

$$\varepsilon = \frac{h_0 - h_1}{h_0} \cdot 100\% \Rightarrow \varepsilon = \frac{52 - 10}{52} \cdot 100\% = 80.76 \quad \text{Συνεπώς το ύψος μειώνεται κατά 80.76 \%}$$

Λόγος σφυρηλασίας

Υπολογίζεται ο λόγος σφυρηλασίας. Από τη τιμή που προκύπτει, μπορεί να αντληθεί το συμπέρασμα εάν το τεμάχιο μπορεί να υποστεί σφυρηλάτηση χωρίς το κίνδυνο λυγισμού, καθώς επίσης και πόσες ενέργειες απαιτούνται για το τελικό αποτέλεσμα.

$$s = \frac{h_0}{d_0} = \frac{52}{8} = 6.5 \quad \text{Καθώς ο δείκτης } s = 6.5 > 4.5 \text{ η διαδικασία πραγματοποιείται σε τρεις φάσεις.}$$

Δύναμη σφυρηλασίας

Η δύναμη σφυρηλασίας υπολογίζεται στο τέλος της διαδικασίας. Για τον υπολογισμό της δύναμης σφυρηλασίας πρέπει να υπολογιστεί η αρχική τάση ροής  $k_{str0}$  όπως και η τάση ροής στο τέλος της διαδικασίας  $k_{str1}$ .

Η τάση ροής  $k_{str0}$  υπολογίζεται από τη καμπύλη παραμόρφωσης του διαγράμματος 3.2 για το υλικό Cq35.

$k_{str0} = 340 \text{ N/mm}^2$  στην αρχή της διαδικασίας όταν η πραγματική παραμόρφωση  $\varphi_p = 0$

$k_{str1} = 950 \text{ N/mm}^2$  στο τέλος της διαδικασίας όπου η πραγματική παραμόρφωση  $\varphi_p = 100\%$  (εφόσον βρέθηκε ότι  $\varphi_p = 1.64$ ).

Υπολογίζεται η δύναμη σφυρηλασίας για τεμάχια εκ περιστροφής συμμετρικά σε διαμόρφωση με ανοικτή μήτρα

$$F = A_1 \cdot k_{str1} \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \mu \cdot \frac{d_1}{h_1}\right) = \pi \cdot \frac{d_1^2}{4} \cdot k_{str1} \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \mu \cdot \frac{d_1}{h_1}\right)$$

όπου  $A_1$  η επιφάνεια διατομής του τελικού παραμορφωμένου τμήματος.

$$A_1 = \pi \cdot \frac{D^2}{4} = 3.14 \cdot \frac{22^2}{4} = 379.94 \text{ mm}^2$$

$$F = 151.976 \cdot 950 \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot 0.15 \cdot \frac{22}{10}\right) = 877.6614 \cong 877 \text{ N}$$

Έργο σφυρηλασίας

Για τον εύρεση του έργου σφυρηλασίας υπολογίζεται αρχικά η μέση πραγματική τάση ροής.

$$k_{strm} = \frac{k_{str0} + k_{str1}}{2} = \frac{340 + 950}{2} = 645 \text{ N/mm}^2$$

Κατόπιν υπολογίζεται το έργο:

$$W = \frac{V_1 \cdot k_{strm} \cdot \varphi_p}{\eta_F} = \frac{2.586.57 \cdot 645 \cdot 1.64}{0.8} = 3.420.0192 \text{ N/mm}$$

$$W = 3.42 \text{ kNm}$$

| Υλικό                           | $\Phi_{per}$ |
|---------------------------------|--------------|
| Al 99.88                        | 2.5          |
| Al MgSil                        | 1.5-2.0      |
| Ms 63-85<br>CuZn 37-<br>CuZn 15 | 1.2-1.4      |
| Ck10–Ck 22<br>St 42–St 50       | 1.3-1.5      |
| Ck 35–Ck 45<br>St 60–St 70      | 1.2-1.4      |
| Cf 53                           | 1.3          |
| 16 MnCr 5<br>34 CrMo 4          | 0.8-0.9      |
| 15 CrNi 6<br>42 CrMo 4          | 0.7-0.       |

**Πίνακας 3.3** Επιτρεπτή Παραμόρφωση

### 3.3 Σφυρηλασία με κλειστές μήτρες

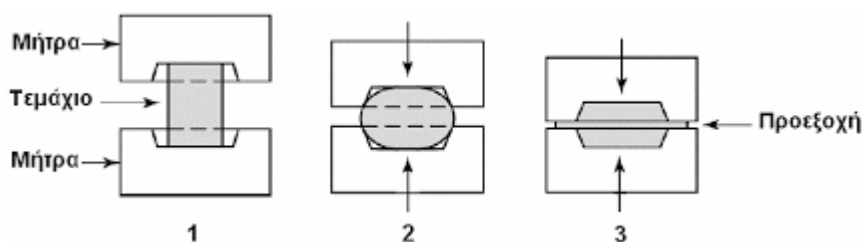
Είναι μία διαδικασία στην οποία δημιουργείται πίεση από διαμορφωμένες μήτρες οι οποίες κατευθύνονται η μία προς την άλλη με τρόπο ώστε να εξαναγκάζει την κίνηση του κατεργαζόμενου υλικού προς ορισμένη κατεύθυνση, ενώ εκείνο παίρνει το σχήμα της κοιλότητας της μήτρας. Ειδική περίπτωση στη σφυρηλάτηση με κλειστές μήτρες είναι εκείνη στην οποία κατά τη κατεργασία αποβάλλεται υλικό από τις μήτρες (σφυρηλάτηση με απολήξεις). Το υλικό αυτό στη συνέχεια αφαιρείται με κάποια άλλη κατεργασία διαμόρφωσης. Παρόλαυτα ο ρόλος του υλικού που αποβάλλεται είναι πολύ σημαντικός. Καθώς αυτό αρχίζει και δημιουργείται στα κενά των μητρών, η τριβή αντιστέκεται στη συνεχόμενη ροή του μετάλλου στο κενό τμήμα, περιορίζοντας έτσι την εσωτερική μάζα του υλικού με αποτέλεσμα να παραμένει μέσα στη κοιλότητα.

Στη σφυρηλάτηση εν θερμώ, η ροή του μετάλλου είναι ακόμα πιο περιορισμένη καθώς το περίσσειμα του υλικού ψύχεται γρήγορα ανάμεσα στις μήτρες και ως εκ τούτου αυξάνεται η αντίσταση στη παραμόρφωση. Ο περιορισμός της ροής του μετάλλου στο διάκενο προκαλεί σημαντική αύξηση στις πιέσεις συμπίεσης. Με τη πίεση αυτή επιτυγχάνεται ο εξαναγκασμός του μετάλλου να γεμίσει περίτεχνες λεπτομέρειες της κοιλότητας της μήτρας, εξασφαλίζοντας με αυτό το τρόπο υψηλής ποιότητας προϊόν.

Αρκετά βήματα σχηματισμού απαιτούνται συχνά στην σφυρηλασία για να μετασχηματιστεί το αρχικό τεμάχιο στην επιθυμητή τελική γεωμετρία. Για κάθε βήμα χρησιμοποιούνται διαφορετικά τμήματα των μητρών. Τα πρώτα βήματα έχουν σχεδιαστεί για να αναδιανείμουν το μέταλλο στο τμήμα εργασίας με σκοπό να επιτευχθεί ομοιόμορφη παραμόρφωση και η επιθυμητή μεταλλουργική δομή στα μετέπειτα βήματα. Τα επόμενα βήματα φέρνουν το τεμάχιο στην τελική του γεωμετρία.

Η απαιτούμενη μάζα υλικού εξαρτάται από το προς κατεργασία τεμάχιο και τη μάζα του. Υπάρχουν τυποποιημένες τιμές έτσι ώστε να μην υπολογίζεται κάθε φορά η απαιτούμενη μάζα και η προεξοχή ενός καινούργιου κατεργαζόμενου υλικού. Σε αυτές τις τιμές ο συντελεστής αναλογίας μάζας  $W$  υποδηλώνει πόσες φορές μεγαλύτερη είναι η αρχική απαιτούμενη μάζα  $m_{req}$  από τη μάζα του τελικού προϊόντος. Παρόλο που το σχήμα της προεξοχής ενδέχεται να διαφέρει ανάλογα με το σχήμα της σφυρηλάτησης, ο συντελεστής  $W$  λαμβάνει υπόψιν και το σχήμα σφυρηλάτησης καθώς και τη τελική μάζα. Κάποια

χαρακτηριστικά μεγέθη από τα οποία προκύπτουν παρόμοια προβλήματα κατά τη διάρκεια κατασκευής του κατηγοριοποιούνται σε ομάδες.



**Σχήμα 3.2** Σφυρηλασία σε κλειστές μήτρες με δημιουργία απολήξεων

Έχουν συγκεντρωθεί αριθμητικοί πίνακες για το συντελεστή  $W$  ταξινομημένοι ανάλογα με το σχήμα καθώς και τη τελική μάζα του τεμαχίου που έχει υποστεί σφυρηλάτηση σε κλειστές μήτρες. Με τη βοήθεια των πινάκων αυτών προσδιορίζεται εύκολα η απαιτούμενη μάζα  $m_{req}$ .

$$m_{req} = W \cdot m_f \quad (\text{Εξίσωση 3.9})$$

| $m_f$ (kg)<br>$W$<br>ανάλογα<br>με τη<br>μορφή<br>τελικού<br>τεμαχίου |   | 1.0  | 2.5  | 4.0  | 6.3  | 20   | 100  |
|---|---|------|------|------|------|------|------|
| 1   | 1 | 1.1  | 1.08 | 1.07 | 1.06 | 1.05 | 1.03 |
| 2   | 2 | 1.25 | 1.19 | 1.17 | 1.15 | 1.08 | 1.06 |
| 3   | 3 | 1.5  | 1.46 | 1.41 | 1.35 | 1.20 | -    |

**Πίνακας 3.4** Συντελεστής μάζας σφυρηλασίας

Η προεξοχή που δημιουργείται στην ειδική περίπτωση, αποτελείται από την περιοχή της προεξοχής και την υδρορροή (gutter). Είναι απαραίτητη καθώς ελέγχει το γέμισμα της μήτρας και δημιουργεί τη κατάλληλη πίεση στη κοιλότητα της. Το περίσσιο υλικό συνήθως χρησιμοποιείται για να αντισταθμίσει τις διακυμάνσεις στον όγκο της μπιγέτας αλλά και στο μέγεθος της κοιλότητας της μήτρας, που προκαλούνται λόγω φθοράς. Το κενό ανάμεσα στις μήτρες ονομάζεται flash gap και υπολογίζεται ως εξής:

$$s = 0.0015 \sqrt{A_s} \quad (\text{Εξίσωση 3.10})$$

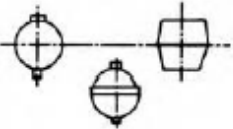
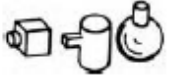
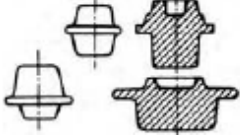

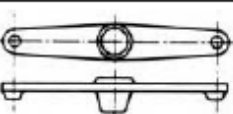

όπου:

$s$  (mm) το ύψος του κενού,  $A_s$  (mm<sup>2</sup>) είναι η προβαλλόμενη περιοχή του τεμαχίου χωρίς τη προεξοχή.

Ανάλογα με το είδος της σφυρηλάτησης που υπόκεινται το τεμάχιο, εντάσσεται σε μία από τις τέσσερις κατηγορίες που παρατίθενται στον πίνακα 3.5.

Αφού έχει ταιριάξει με κάποια από τις διαδικασίες, σε κάθε κατηγορία αντιστοιχούν τυποποιημένες τιμές. Από το πίνακα, λαμβάνονται οι τιμές του συντελεστή διαμόρφωσης  $\gamma$ , ο οποίος εξαρτάται από το σχήμα του κατεργαζόμενου τεμαχίου, του συντελεστή απόδοσης της σφυρηλάτησης καθώς και του λόγου πλάτους-ύψους της προεξοχής.

**Table 13.3** Shape classification table (excerpt from Billigmann & Feldmann, *Stauchen und Pressen*)

| Examples of application  | Shape group | Explanation  |
|--|-------------|--|
|   | 1.1         | Roughly spherical and cube-shaped parts, solid hubs with small flanges, cylinders and parts with no secondary elements.  |
|   | 1.2         | Roughly spherical and cube-shaped parts, cylinders with secondary elements on one side.  |
|   | 2.1         | Hubs with small flanges; formed partly by the vertical flow of material in the upper die, partly by vertical flow in the lower die.  |
|   | 2.2         | Rotationally symmetric forgings with hole in the hub and an outside rim. Hub with hole and outside rim are connected by thin webs.   |
|   | 3.1         | Two-armed lever with solid cross-section, thicker at the centre and at both ends; parts must be pre-shaped, e.g. foot pedals and clutch levers.  |
|  | 3.2         | Very long forgings with several large changes in cross-section where the material has to flow a great deal vertically; crankshafts with forged counterweights and more than six throws. Very high amount of flash due to repeated intermediate trimming. |

### Πίνακας 3.5 Ταξινόμηση ανά σχήμα

#### Υπολογισμός Δύναμης

Η διαδικασία της παραμόρφωσης εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως η θερμοκρασία της σφυρηλασίας, ο ρυθμός παραμόρφωσης, το σχήμα του κατεργαζόμενου τεμαχίου, το είδος του υλικού αλλά και το είδος του μηχανισμού που χρησιμοποιείται για τη σφυρηλασία. Για αυτό το λόγο ο πιο ακριβής προσδιορισμός της δύναμης της σφυρηλασίας πραγματοποιείται προσεγγιστικά μέσω της παρακάτω διαδικασίας:

υπολογισμός ρυθμού παραμόρφωσης:

$$\dot{\phi} = \frac{u}{h_0} \quad (\text{Εξίσωση 3.11})$$

όπου:

$\dot{\phi}$  (s<sup>-1</sup>) ο ρυθμός παραμόρφωσης

$u$  (m/s) η ταχύτητα του εμβόλου

$h_0$  (m) το αρχικό ύψος του ακατέργαστου

υπολογισμός ορίου ελαστικότητας:

$$k_{str} = k_{str1} \cdot \dot{\phi}^m \quad (\text{Εξίσωση 3.12})$$

όπου:

$k_{str}$  (N/mm<sup>2</sup>) η τάση ροής για το ρυθμό παραμόρφωσης  $\dot{\phi}$  και θερμοκρασία σφυρηλασίας T,  $k_{str1}$  (N/mm<sup>2</sup>) η τάση ροής για  $\dot{\phi}=1$  (s<sup>-1</sup>) σε θερμοκρασία T.

Η τάση σφυρηλασίας  $k_{str1}$  υπολογίζεται από το πίνακα 3.6 ,  $\dot{\phi}$  (s<sup>-1</sup>) ο ρυθμός παραμόρφωσης ( για  $\dot{\phi}$  από 1 μέχρι 300 s<sup>-1</sup> , η τιμή του  $k_{str}$  μπορεί να υπολογιστεί και από το πίνακα 3.8

#### Υπολογισμός ορίου θραύσης στο τέλος της σφυρηλασίας

$$k_{re} = \gamma \cdot k_{str} \quad (\text{Εξίσωση 3.13})$$

όπου:

$k_{re}$  (N/mm<sup>2</sup>) όριο θραύσης στο τέλος της σφυρηλασίας. Ο συντελεστής διαμόρφωσης  $\gamma$  όπου καθορίζεται από το σχήμα του κατεργαζόμενου υλικού), βρίσκεται από το πίνακα 3.9

#### Υπολογισμός Μέγιστης Δύναμης

$$F = A_d \cdot k_{re} \quad (\text{Εξίσωση 3.14})$$

F (N) η μέγιστη δύναμη,  $A_d$  (mm<sup>2</sup>) η προβαλλόμενη επιφάνεια σφυρηλασίας συμπεριλαμβανομένου της περιοχής προεξοχής.

#### Έργο σφυρηλασίας

Για να υπολογιστεί το έργο σφυρηλασίας απαιτείται προηγουμένως να βρεθεί η μέση πραγματική παραμόρφωση.

Υπολογισμός μέσης πραγματικής παραμόρφωσης.

Το τελικό ύψος  $h_1$  της σφυρηλάτησης δε μπορεί να προσδιοριστεί ακριβώς, οπότε χρησιμοποιείται το ύψος  $h_{1m}$ , το οποίο υπολογίζεται μέσω του όγκου και της προβαλλόμενης επιφάνειας της σφυρηλάτησης.

$h_{1m} = \frac{V}{A_d}$  ,  $\phi_p = \ln \frac{h_{1m}}{h_0}$  , Άρα τελικά η μέση πραγματική παραμόρφωση υπολογίζεται :

$$\phi_{pm} = \ln \frac{V}{A_d \cdot h_0} \quad (\text{Εξίσωση 3.15})$$

όπου:

$h_{1m}$  (mm) το ύψος μετά τη σφυρηλασία,

$h_0$  (mm) το ύψος του ακατέργαστου,

V (mm<sup>3</sup>) όγκος της σφυρηλασίας,

$\phi_{pm}$  - μέση πραγματική παραμόρφωση

#### Υπολογισμός έργου:

$$W = \frac{V \cdot \phi_{pm} \cdot k_{str}}{\eta_F} \quad (\text{Εξίσωση 3.16})$$

όπου:

W (Nmm) έργο παραμόρφωσης

$k_{str}$  (N/mm<sup>2</sup>) μέση πραγματική τάση,

V (mm<sup>3</sup>) όγκος σφυρηλασίας,

$\phi_{pm}$  - μέση πραγματική παραμόρφωση

| Υλικό |                 | m     | $k_{str1}$ όπου<br>$\dot{\phi}_1 = 1s^{-1}$<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | T<br>(°C)     |
|-------|-----------------|-------|---|---------------|
| St    | C 15            | 0.154 | 99/84   | 1100/<br>1200 |
|       | C 35            | 0.144 | 89/72   |               |
|       | C45             | 0.163 | 90/70   |               |
|       | C60             | 0.167 | 85/68   |               |
|       | X 10 Cr 13      | 0.091 | 105/88  | 1100/<br>1250 |
|       | X 5 CrNi 18 9   | 0.094 | 137/116   |               |
|       | X 5 CrNiTi 18 9 | 0.176 | 100/74  |               |
| Cu    | E-Cu            | 0.127 | 56  | 800           |
|       | Cu Zn 28        | 0.212 | 51  | 800           |
|       | CuZn 37         | 0.201 | 44  | 750           |
|       | CuZn 40 Pb 2    | 0.218 | 35  | 650           |
|       | CuZn 20 Al      | 0.180 | 70  | 800           |
|       | CuZn 28 Sn      | 0.162 | 68  | 800           |
|       | CuAl 5          | 0.163 | 102   | 800           |
|       |                 |       |   |               |
| Al    | Al 99.5         | 0.159 | 24  | 450           |
|       | AlMn            | 0.135 | 36  | 480           |
|       | AlCuMg 1        | 0.122 | 72  | 450           |
|       | AlCuMg 2        | 0.131 | 77  | 450           |
|       | AlMgSi 1        | 0.108 | 48  | 450           |
|       | AlMgMn          | 0.194 | 70  | 480           |
|       | AlMg 3          | 0.091 | 80  | 450           |
|       | AlMg 5          | 0.110 | 102   | 450           |
|       | AlZnMgCu 1.5    | 0.134 | 81  | 450           |



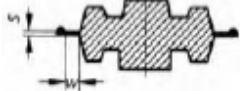

**Πίνακας 3.6** Βασικές τιμές  $k_{str1}$  για  $\dot{\phi} = 1 s^{-1}$  για παραμόρφωση σε θερμοκρασία που δίνεται και εκθέτη υλικού m για τον υπολογισμό της συνάρτησης  $k_{str} = f(\dot{\phi})$

18-19-20-21-22-23-24-25-26-27-28-29-30-32-33-34-35-  
36-37-38-39-40-42-43-44-45-46-47-48-49-50-51-52-53-  
54-55-56-57-58-60-61-62-63-65-67-68-70-72-73-75-78-  
80-82-83-85-88-90-93-95-95-100-103-105-110-115-120-  
125-130-140-150-160

**Πίνακας 3.7** Τυποποιημένοι διάμετροι χαλύβδινων ράβδων

| Υλικό |                 | T<br>(°C) | k <sub>str</sub> =f(φ) για T=σταθ k <sub>str</sub> (N/mm <sup>2</sup> ) |                           |                           |                           |                            |                                |                                |                                |                                |
|-------|-----------------|-----------|---|---------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
|       |                 |           | φ=1<br>(s <sup>-1</sup> )   | φ=2<br>(s <sup>-1</sup> ) | φ=4<br>(s <sup>-1</sup> ) | φ=6<br>(s <sup>-1</sup> ) | φ=10<br>(s <sup>-1</sup> ) | φ<br>=20<br>(s <sup>-1</sup> ) | φ<br>=30<br>(s <sup>-1</sup> ) | φ<br>=40<br>(s <sup>-1</sup> ) | φ<br>=60<br>(s <sup>-1</sup> ) |
| St    | C 15            | 1200      | 84  | 93                        | 104                       | 110                       | 120                        | 133                            | 141                            | 145                            | 153                            |
|       | C 35            | 1200      | 72  | 80                        | 88                        | 93                        | 100                        | 111                            | 118                            | 122                            | 12                             |
|       | C45             | 1200      | 70  | 78                        | 88                        | 94                        | 102                        | 114                            | 122                            | 128                            | 132                            |
|       | C60             | 1200      | 68  | 76                        | 86                        | 92                        | 100                        | 112                            | 120                            | 126                            | 131                            |
|       | X 10 Cr 13      | 1250      | 88  | 94                        | 100                       | 104                       | 109                        | 116                            | 120                            | 123                            | 126                            |
|       | X 5 CrNi 18 9   | 1250      | 116   | 124                       | 132                       | 137                       | 144                        | 154                            | 160                            | 164                            | 168                            |
|       | X 5 CrNiTi 18 9 | 1250      | 74  | 84                        | 94                        | 101                       | 111                        | 125                            | 135                            | 142                            | 147                            |
| Cu    | E-Cu            | 800       | 56  | 61                        | 67                        | 70                        | 75                         | 82                             | 86                             | 89                             | 92                             |
|       | Cu Zn 28        | 800       | 51  | 59                        | 68                        | 75                        | 83                         | 96                             | 105                            | 111                            | 117                            |
|       | CuZn 37         | 750       | 44  | 51                        | 58                        | 63                        | 70                         | 80                             | 87                             | 92                             | 97                             |
|       | CuZn 40 Pb 2    | 650       | 35  | 41                        | 47                        | 51                        | 58                         | 67                             | 73                             | 78                             | 82                             |
|       | CuZn 20 Al      | 800       | 70  | 79                        | 90                        | 97                        | 106                        | 120                            | 129                            | 136                            | 142                            |
|       | CuZn 28 Sn      | 800       | 68  | 76                        | 85                        | 91                        | 99                         | 110                            | 118                            | 124                            | 128                            |
|       | CuAl 5          | 800       | 102   | 114                       | 128                       | 137                       | 148                        | 166                            | 178                            | 186                            | 193                            |
| Al    | Al 99.5         | 450       | 24  | 27                        | 30                        | 32                        | 35                         | 39                             | 41                             | 43                             | 45                             |
|       | AlMn            | 480       | 36  | 40                        | 44                        | 46                        | 49                         | 54                             | 57                             | 59                             | 61                             |
|       | AlCuMg 1        | 450       | 72  | 78                        | 85                        | 90                        | 95                         | 104                            | 109                            | 113                            | 116                            |
|       | AlCuMg 2        | 450       | 77  | 84                        | 92                        | 97                        | 104                        | 114                            | 120                            | 125                            | 129                            |
|       | AlMgSi 1        | 450       | 48  | 52                        | 56                        | 58                        | 62                         | 66                             | 69                             | 71                             | 73                             |
|       | AlMgMn          | 480       | 70  | 80                        | 92                        | 99                        | 109                        | 125                            | 135                            | 143                            | 150                            |
|       | AlMg 3          | 450       | 80  | 85                        | 91                        | 94                        | 99                         | 105                            | 109                            | 112                            | 114                            |
|       | AlMg 5          | 450       | 102   | 110                       | 119                       | 124                       | 131                        | 141                            | 148                            | 153                            | 157                            |
|       | AlZnMgCu 1.5    | 450       | 81  | 89                        | 98                        | 103                       | 110                        | 121                            | 128                            | 133                            | 137                            |

**Πίνακας 3.8** Υπολογισμός ρυθμού παραμόρφωσης

| Table 13.8 Shape factor $y$ , deformation efficiency $\eta_F$ , and flash land ratio $w/s$ depending upon the shape of the forging. |   |     |          |       |
|---|---|-----|----------|-------|
| Shape   | Workpiece   | $y$ | $\eta_F$ | $w/s$ |
| 1   | Upsetting in the die without formation of flash<br>                | 4   | 0.5      | 3     |
| 2   | Upsetting in the die with slight formation of flash<br>            | 5.5 | 0.45     | 4     |
| 3   | Impression-die forging of simple parts with formation of flash<br> | 7.5 | 0.4      | 6–8   |
| 4   | Impression-die forging of complicated parts with flash<br>         | 9   | 0.35     | 9–12  |

$$k_{re} = y \cdot k_{str}$$

Πίνακας 3.9 Υπολογισμός του συντελεστή  $y$

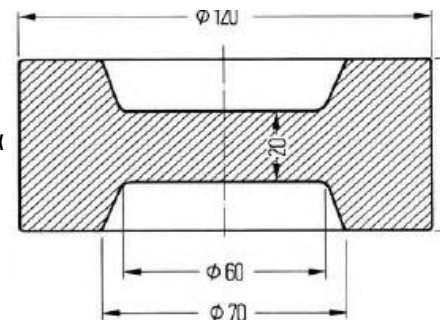
### 3.3.1 Ασκήσεις

#### Άσκηση

Σκοπός της άσκησης είναι η κατασκευή τροχαλίας από C45, όπως στο παρακάτω σχήμα. Σε αυτή τη περίπτωση χρησιμοποιείται μία στροφαλοφόρος πρέσα ως μηχανή παραμόρφωσης. Η ταχύτητα του εμβόλου δίνεται 600 mm/s, η πυκνότητα του υλικού 7,85 kg/dm<sup>3</sup> και η θερμοκρασία παραμόρφωσης στους 1200 °C. Δίνεται η αρχική διάμετρος  $D_0 = 110$  mm.

Ζητείται να υπολογιστούν: α) η απαιτούμενη μάζα υλικού που πρέπει να χρησιμοποιηθεί β) οι διαστάσεις (πάχος και το πλάτος των απολήξεων, γ) η δύναμη διαμόρφωσης, δ) το έργο διαμόρφωσης

Σχήμα: Τροχαλία



### Λύση:

#### Απαιτούμενη μάζα υλικού

$$m_{\text{req}} = W \cdot m_{\text{fin}}$$

Ο δείκτης αναλογίας μάζας, υποδηλώνει πόσες φορές μεγαλύτερη είναι η απαιτούμενη μάζα από τη τελική μάζα σώματος. Καθώς το σχήμα της προεξοχής μπορεί να διαφέρει ανάλογα με το σχήμα της του σφυρηλατούμενου υλικού, ο δείκτης αναλογίας μάζας εξαρτάται από το σχήμα της σφυρηλασίας καθώς και τη τελική μάζα. Για αυτό το λόγο έχουν κατηγοριοποιηθεί διάφορα είδη και σχέδια σφυρηλασίας σύμφωνα με κοινά προβλήματα και ιδιαιτερότητες που εμφανίζονται κατά τη διάρκεια της σφυρηλασίας.

Η τιμή του  $W$  υπολογίζεται από τον πίνακα 3.4 λαμβάνοντας υπόψιν τη τελική μάζα του σώματος μετά τη σφυρηλασία.

#### Υπολογισμός τελικής μάζας

Εφόσον στα δεδομένα δίνεται η πυκνότητα, η τελική μάζα του προϊόντος υπολογίζεται από τη σχέση που συνδέει τον όγκο με τη μάζα και την πυκνότητα

$$\rho = \frac{m_{\text{fin}}}{V_1} \Rightarrow m_{\text{fin}} = \rho \cdot V_1$$

όπου  $V_1$  είναι ο όγκος του αρχικού κυλίνδρου από τον οποίο αφαιρείται ο όγκος των δύο κόλπουρων κώνων που δημιουργούνται κατά την σφυρηλασία

$$V_1 = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot h_0 - 2 \cdot \left( \frac{1}{3} \cdot \pi (r^2 + R^2 + r \cdot R) \cdot h_1 \right)$$

$$V_1 = \frac{3.14 \cdot 120^2}{4} \cdot 50 - 2 \cdot \left( \frac{1}{3} \cdot \pi (30^2 + 35^2 + 30 \cdot 35) \cdot \frac{(50-20)}{2} \right)$$

$$m_{\text{fin}} = \rho \cdot V_1 \Rightarrow m_{\text{fin}} = 7.85 \cdot 470215 = 3672379.15 = 3.69 \text{ kg}$$

#### Υπολογισμός δείκτη αναλογίας μάζας

Από το πίνακα 3.5 επιλέγεται η δεύτερη κατηγορία διαμόρφωσης (2.2), η οποία είναι πιο κοντά στα χαρακτηριστικά της σφυρηλάτησης που εξετάζει η άσκηση. Έπειτα από το πίνακα 3.4 υπολογίζεται με γραμμική παρεμβολή η τιμή του δείκτη αναλογίας μάζας

$$W = 1.18$$

$$\text{Συνεπώς η απαιτούμενη μάζα : } m_{\text{req}} = W \cdot m_F = 1.18 \cdot 3.69 = 4.35 \text{ kg}$$

#### Υπολογισμός του πάχους και πλάτους των απολήξεων

Υπολογισμός αρχικού Όγκου( ακατέργαστου):

$$V_0 = \frac{m_{\text{req}}}{\rho} = \frac{4.35 \text{ kg}}{7.85 \text{ kg/dm}^3} = 0.55414012 \text{ dm}^3 = 554140.127 \text{ mm}^3$$

#### Υπολογισμός ύψους ακατέργαστου:

Επιλέγεται από το πίνακα 3.6 με τις τυποποιημένες τιμές διαμέτρων  $d_0 = 110 \text{ mm}$

$$h_0 = \frac{V_0}{A_0} = \frac{554140.127 \text{ mm}^3}{\frac{\pi \cdot (110 \text{ mm})^2}{4}} = 58.34 \text{ mm}, \text{ Επιλέγεται } h_0 = 60 \text{ mm}$$

#### Υπολογισμός ύψους της προεξοχής( flash)

Το ύψος του κενού ανάμεσα στις μήτρες μέσα στο οποίο καταλήγουν οι απολήξεις, υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$s = 0.015 \cdot \sqrt{A_s}$$

όπου  $A_s$  προβαλλόμενη επιφάνεια χωρίς τη προεξοχή. Η προβαλλόμενη επιφάνεια από το σχήμα έχει διάμετρο 120mm.

$$A_s = 120^2 \cdot \frac{\pi}{4} = 11304 \text{ mm}^2, \text{ Συνεπώς } s=1.57\text{mm}, \text{ Επιλέγεται } s=1.6\text{mm}$$

Ο πίνακας 3.9 ανάλογα με το είδος της σφυρηλάτησης που υπόκεινται το υλικό, δίνει κάποια δεδομένα, όπως αυτά παρουσιάζονται παρακάτω. Το συντελεστή διαμόρφωσης  $y$ , το λόγο της προεξοχής  $w/s$  ( $w$  το πλάτος της προεξοχής) καθώς και την απόδοση της παραμόρφωσης  $\eta_F$ . Από το πίνακα 3.9 το κατεργαζόμενο τεμάχιο αντιστοιχεί στο σχήμα 2. (σφυρηλάτηση με ελαφρύ σχηματισμό απολήξεων). Από αυτό προκύπτει :

$$\frac{w}{s} = 4, y=4, \eta_F = 0.5$$

Υπολογισμός πλάτους :

Εφόσον ο λόγος  $w/s$  από το πίνακα προκύπτει 4, και το ύψος έχει υπολογιστεί 1.6:

$$w=4 \cdot 1.6=6.4\text{mm}, \text{ Επιλέγεται } w=6.0$$

Με γνώση των παραπάνω δεδομένων καθώς και της τελικής διαμέτρου του κομματιού, υπολογίζεται αρχικά η προβαλλόμενη διάμετρος του τελικού σχήματος και έπειτα η τελική προβαλλόμενη επιφάνεια διατομής συμπεριλαμβανομένης της προεξοχής.

$$D_d = D + 2w = 120 + 2 \cdot 6 = 132\text{mm}$$

προβαλλόμενη επιφάνεια διατομής:

$$A_d = D_d^2 \cdot \frac{\pi}{4} = \frac{132^2 \cdot \pi}{4} = 13677.84\text{mm}^2$$

Υπολογισμός δύναμης Διαμόρφωσης

Ο υπολογισμός της δύναμης διαμόρφωσης και του μηχανικού έργου στη σφυρηλάτηση κλειστής διατομής είναι πολύπλοκη διαδικασία καθώς επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες όπως η θερμοκρασία σφυρηλάτησης, το μέγεθος του κατεργαζόμενου υλικού, το ρυθμό παραμόρφωσης, το είδος του υλικού προς κατεργασία καθώς και το μηχάνημα που εκτελεί τη παραμόρφωση. Ως εκ τούτου η δύναμη και το έργο υπολογίζονται κατά προσέγγιση ακολουθώντας τη παρακάτω διαδικασία.

Υπολογισμός ταχύτητας παραμόρφωσης

$$\dot{\phi} = \frac{u}{h_0} = \frac{600\text{mm/s}}{60\text{mm}} 10\text{s}^{-1}$$

Υπολογισμός τάσης ροής

$$k_{str} = k_{str1} \cdot \dot{\phi}^m$$

$k_{str1}$  η τάση τάσης ροής στο τέλος της διαμόρφωσης για  $\dot{\phi}=1 \text{ s}^{-1}$  και θερμοκρασία  $1200^\circ\text{C}$  διαμόρφωσης. Η τιμή του  $k_{str1}$  καθώς και ο εκθέτης υλικού υπολογίζεται από το πίνακα 3.6 για δοσμένη θερμοκρασία.

$$k_{str} = k_{str1} \cdot \dot{\phi}^m$$

$$\text{Επιλέγεται } m=0.163$$

$$m=0.163 \text{ και } k_{str1} = 70 \text{ N/mm}^2 \text{ για } T=1200^\circ\text{C}$$

$$\text{Συνεπάγεται: } k_{str} = k_{str1} \cdot \dot{\phi}^m \Rightarrow k_{str} = 70\text{N/mm}^2 (10)^{0.163}$$

$$k_{str} = 102\text{N/mm}^2$$

Υπολογισμός αντοχής διαρροής στο τέλος της σφυρηλάτησης

Η τιμή του  $y$  λαμβάνεται από το πίνακα 3.9 με βάση τη πολυπλοκότητα του σχήματος.

$$k_{re} = y \cdot k_{str} \Rightarrow k_{re} = 5.5 \cdot 102\text{N/mm}^2 = 561 \text{ N/mm}^2$$

Τέλος υπολογίζεται η δύναμη Διαμόρφωσης.

$$F = A_d \cdot k_{re} \Rightarrow F = 13677.8 \text{ mm}^2 \cdot 561 \text{ N/mm}^2 = 7673245 \text{ N} = 7673 \text{ kN}$$

Η παραπάνω εξίσωση εφαρμόζεται για τη μέγιστη δύναμη κατά τη διάρκεια της διαμόρφωσης, καθώς αυτό είναι το φορτίο που θα καθορίσει την απαιτούμενη χωρητικότητα του εργαλείου που θα χρησιμοποιηθεί. Η μέγιστη δύναμη επιτυγχάνεται στο τέλος του χτυπήματος του εργαλείου (forging stroke).

Υπολογισμός Έργου Διαμόρφωσης

$$W = \frac{V \cdot \varphi_{pm} \cdot k_{str}}{\eta_F}$$

$\varphi_{pm}$  η μέση παραμόρφωση, χρειάζεται να υπολογιστεί.

Υπολογισμός Μέσης Παραμόρφωσης

$$\varphi_{pm} = \ln \frac{h_{1m}}{h_0}$$

Καθώς το τελικό ύψος του τεμαχίου δε μπορεί να υπολογιστεί με ακρίβεια, υπολογίζεται ένα μέσο τελικό ύψος με τη χρήση του τελικού όγκου του κομματιού και της προβαλλόμενης επιφάνειας με απολήξεις.

μέσο τελικό ύψος (για διάμετρο 110mm)

$$h_{1m} = \frac{V_0}{A_d} = \frac{A_0 \cdot h_0}{A_d}$$

Αντικαθιστώντας στο τύπο της μέσης παραμόρφωσης προκύπτει:

$$\varphi_{pm} = \ln \frac{A_0}{A_d} = \frac{(110^2 \cdot \pi) / 4}{13678} = -0.36 \triangleq 0.36$$

$$\text{Άρα } W = \frac{V \cdot \varphi_{pm} \cdot k_{str}}{\eta_F} = \frac{569910 \text{ mm}^3 \cdot 0.36 \cdot 102 \text{ N/mm}^2}{0.45 \cdot 10^6} = 46.5 \text{ kN}$$

$\eta_F$  υπολογίζεται από το πίνακα 3.9,  $10^6$  συντελεστής μετατροπής σε kNm

## 4. Έλαση

### 4.1 Γενικά για την Έλαση

Η διαδικασία κατά την οποία το μέταλλο παραμορφώνεται πλαστικά καθώς διέρχεται μέσα από το άνοιγμα ραούλων. Είναι η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη διαδικασία μεταλλουργίας καθώς επιτρέπει την υψηλή παραγωγή καθώς και τον στενό έλεγχο του τελικού προϊόντος.

Το τεμάχιο υποβάλλεται σε υψηλές θλιπτικές τάσεις κατά τη συμπίεση του ανάμεσα στα ράουλα αλλά και σε επιφανειακές διατμητικές τάσεις ως αποτέλεσμα της τριβής ανάμεσα στο μέταλλο και τα ράουλα. Οι δυνάμεις που αναπτύσσονται λόγω τριβών είναι επίσης εκείνες που οδηγούν το μέταλλο προς τα ράουλα.

Η αρχική διάσπαση του ακατέργαστου τεμαχίου, γνωστό ως πλίνθωμα γίνεται με χύτευση. Σε πρώτη φάση έλασης προκύπτουν προϊόντα τα οποία είναι ημιτελή και θα υποβληθούν σε περαιτέρω κατεργασία. Αυτά είναι: μπιγέτα πρώτης έλασης (bloom) με τετραγωνική διατομή και εμβαδό  $A \geq 15 \times 15 \text{ cm}^2$ , οι οποίες με περαιτέρω μείωση πάχους μετατρέπονται σε τετραγωνικές διατομές (billet) με εμβαδό  $A \geq 4 \times 4 \text{ cm}^2$  ή σε πλάκες ορθογωνικής διατομής (slab) με εμβαδό  $A \geq 100 \text{ cm}^2$  και πλάτος διπλάσιο του πάχους τους. Τα τελικά προϊόντα της έλασης που υπόκεινται σε επιπλέον διεργασία είναι είτε επιμήκη προϊόντα μορφής από την έλαση μπιγέτων όπως μορφοδοκοί, ήλοι με σπείρωμα, δακτύλιοι κτλ, είτε πλατιά προϊόντα από την έλαση πλακών τα οποία ανάλογα με το πλάτος τους διαχωρίζονται σε ελάσματα (plates) με πάχος μεγαλύτερο των 6mm ή λεπτά ελάσματα με πάχος μικρότερο των 6mm και πλάτος μεγαλύτερο των 600mm.

Η έλαση πραγματοποιείται είτε σε υψηλές θερμοκρασίες είτε σε χαμηλές συνεπώς διακρίνεται σε θερμή και ψυχρή έλαση όπου καθοριστικό παράγοντα παίζει η θερμοκρασία αναक्रυστάλλωσης της οποίας το χαμηλότερο σημείο είναι το απόλυτο μηδέν ενώ το υψηλότερο είναι το σημείο τήξης του μετάλλου που πρόκειται να παραμορφωθεί. Όταν η θερμοκρασία η θερμοκρασία της έλασης είναι χαμηλότερη από το μισό της θερμοκρασίας τήξης η έλαση είναι ψυχρή. Κατά τη θερμή έλαση το υλικό είναι πιο μαλακό και για μία συγκεκριμένη μείωση πάχους απαιτείται λιγότερη δύναμη. Στη θερμή έλαση αποδίδεται το πρώτο και μεγαλύτερο κομμάτι της παραμόρφωσης Μειονέκτημα της θερμής έλασης, αποτελεί παρόλαυτα η ανάπτυξη ενός στρώματος οξειδωσης στην επιφάνεια καθώς αυτό επιδρά στη κατεργασία αλλά και στη ποιότητα του τελικού προϊόντος. Η ψυχρή έλαση χρησιμοποιείται για την παραγωγή λεπτών ελασμάτων και λωρίδων με πολύ καλύτερο τελείωμα στην επιφάνεια καθώς και διαστασιακές αντοχές σε σχέση με τη θερμή έλαση. Επιπλέον η σκλήρυνση του υλικού μέσω ψυχρής κατεργασίας προσθέτει στο υλικό περισσότερη αντοχή.

### 4.2 Μηχανές έλασης

Η μηχανή στην οποία πραγματοποιείται η έλαση είναι γνωστή με την ονομασία έλαστρο. Το έλαστρο αποτελείται από τα ράουλα, τα οποία περιστρέφονται σε άξονες οι οποίοι βρίσκονται στα τα κουζινέτα (bearings). Όλα τα παραπάνω είναι εγκατεστημένα σε ένα ειδικό περίβλημα (housing).

Οι εργαλειομηχανές της έλασης μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα με τον αριθμό και τις διατάξεις των ελάστρων. Η πιο απλή και πιο διαδεδομένη διάταξη είναι το έλαστρο με δύο ράουλα, στην οποία δύο ράουλα ίσου μεγέθους περιστρέφονται στην ίδια κατεύθυνση (συνεχή έλαστρα). Εμφανώς μεγαλύτερη ταχύτητα παρουσιάζουν τα έλαστρα 2 ραούλων τα οποία έχουν δυνατότητα αλλαγής κατεύθυνσης τους (ανατρέψιμα έλαστρα).

Στα έλαστρα τριών ραούλων περιστρέφονται τα πάνω και κάτω ράουλα ενώ το μεσαίο περιστρέφεται λόγω της αναπτυσσόμενης τριβής. Με τη χρήση ραούλων μικρής διαμέτρου σημειώνεται τεράστια μείωση της ισχύος άλλα παράλληλα παρουσιάζουν μικρότερη αντοχή και ακαμψία σε σχέση με τα ράουλα μεγαλύτερης διαμέτρου για αυτό είναι απαραίτητη η ενίσχυση τους από εφεδρικά μεγαλύτερα ράουλα. Στη περίπτωση αυτή η διάταξη αποτελείται από έλαστρο με τέσσερα ράουλα. Τέλος, στη διάταξη τύπου cluster, κάθε ράουλο το υποστηρίζεται από δύο ράουλα αντιστήριξης και κάθε ένα από αυτά στηρίζεται σε άλλα δύο ράουλα μεγαλύτερης διαμέτρου

### 4.3 Είδη Έλασης

Η έλαση ανάλογα με το τρόπο που πραγματοποιείται διαχωρίζεται και κατηγοριοποιείται σε διάφορα είδη. Παρακάτω περιγράφονται τα βασικότερα.

Επίπεδη έλαση: Είναι η έλαση κατά την οποία μειώνεται το πάχος του τεμαχίου και διαμορφώνεται τεμάχιο πιο λεπτό καθώς διέρχεται από τα ράουλα. Μπορεί να πραγματοποιηθεί σε πολύ υψηλές ταχύτητες παρέχοντας υψηλής ποιότητας τελικά τεμάχια.

Έλαση μορφής: Κατά την έλαση μορφής διαμορφώνονται ευθύγραμμα δομικά τεμάχια διαφόρων διατομών καθώς μέσα από διαδοχικές διαδικασίες περνάνε από ειδικά διαμορφωμένα έλαστρα. Το τεμάχιο επιμηκύνεται καθώς μειώνεται η διατομή του. Καθώς όμως το τεμάχιο διαμορφώνεται με διαδοχικές διαδικασίες σε διαφορετικά σημεία του υπάρχει κίνδυνος η επιμήκυνση να μην είναι ομοιόμορφη κάτι που μπορεί να προκαλέσει στρέβλωση ή ρωγμή στο προϊόν.

Δακτυλιοειδής έλαση: Σε αυτή τη διαδικασία, τεμάχιο σχήματος δακτυλιδιού μικρής διαμέτρου, με παχύ επεκτείνεται σε μεγαλύτερης διαμέτρου και μικρότερης διατομής δακτυλίδι. Η διαδικασία επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση του δακτυλιδιού ανάμεσα στα ράουλα, ένα εκ των οποίων είναι καθοδηγούμενα. Το πάχος μειώνεται καθώς τα ράουλα πλησιάζουν μεταξύ τους καθώς περιστρέφονται.

Πλάγια έλαση: Η διαδικασία πραγματοποιείται με ένα τεμάχιο τοποθετημένο ανάμεσα σε ράουλα με αντίστροφη περιστροφή με τον άξονα του τεμαχίου παράλληλο στον άξονα των ραούλων. Το τεμάχιο υφίσταται πλαστική παραμόρφωση κατά τη διάρκεια της περιστροφής του. Ανάλογα με το σχήμα και τη γωνιακή ευθυγράμμιση του τεμαχίου υπολογίζεται και η παραμόρφωση του.

Έλαση σπειρώματος: Πρόκειται για τη παραγωγή σπειρωμάτων από κυλινδρικές ράβδους ή τεμάχια τα οποία διαμορφώνονται καθώς διέρχονται ανάμεσα από περιστρεφόμενες μήτρες ή ανάμεσα από παλινδρομικής κίνησης μήτρες. Η κατεργασία πραγματοποιείται σε χαμηλές θερμοκρασίες κάτι το οποίο εξασφαλίζει τη δημιουργία σπειρωμάτων υψηλής αντοχής χωρίς απώλεια υλικού. Η τελική επιφάνεια του τεμαχίου είναι λεία. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας ασκούνται θλιπτικές υπολειμματικές τάσεις, κάτι το οποίο αυξάνει την αντοχή σε καταπόνηση.

Περιστροφική έλαση: Είναι μία κατεργασία που πραγματοποιείται εν θερμώ. Χρησιμοποιείται για τη παραγωγή μεγάλου μήκους με χοντρά τοιχώματα και χωρίς ραφές σωληνώσεων. Χρησιμοποιούνται δύο ράουλα αντίθετα τοποθετημένα. Μετά από παρατηρήσεις έχει αποδειχθεί ότι όταν μια στέρεη κυκλική ράβδος υποβάλλεται σε ακτινική συμπίεση, στη περιφέρεια της, δημιουργούνται εφελκυστικές τάσεις στο κέντρο της. Όταν ασκούνται σε αυτό κυκλικά εφελκυστικές τάσεις τότε αρχίζει να δημιουργείται μια κοιλότητα στο κέντρο της ράβδου.

#### 4.4 Μηχανική της έλασης

Έλασμα πάχους  $h_0$  εισέρχεται στο διάκενο μεταξύ των ελαστρων με αρχική ταχύτητα  $u_0$  και αρχικό όγκο  $V_0$ , ενώ εξέρχεται με μειωμένο τελικό πάχος  $h_1$ , τελική ταχύτητα  $u_1$  και όγκο  $V_1$ . Καθώς κατά τη διάρκεια της έλασης η ύλη διατηρείται, παρόλο που το πάχος του τεμαχίου μειώνεται, ο όγκος του τεμαχίου διατηρείται και ισχύει η εξίσωση συνέχειας. Συνεπώς ισχύει η σχέση:

$$V_0 = V_1 \Rightarrow$$

$$h_0 \cdot w_0 \cdot L_0 = h_1 \cdot w_1 \cdot L_1 \quad (\text{Εξίσωση 4.1})$$

όπου:

$h_0, h_1$  (mm), το αρχικό και τελικό πάχος του τεμαχίου,  
 $w_0, w_1$  (mm) το αρχικό και τελικό πλάτος του τεμαχίου  
 $L_0, L_1$  (mm) το αρχικό και τελικό μήκος του τεμαχίου

Αντίστοιχα, η αρχική και η τελική αναλογία όγκου της ροής της ύλης διατηρούνται, οπότε ομοίως ισχύει:

$$h_0 \cdot w_0 \cdot u_0 = h_1 \cdot w_1 \cdot u_1 \quad (\text{Εξίσωση 4.2})$$

όπου:

$u_0, u_1$ , (mm/sec), ταχύτητες εισόδου και εξόδου αντίστοιχα, του τεμαχίου

Καθώς ισχύει ότι  $h_0 > h > h_1$  (h ενδιάμεσο πάχος), αφού κατά την έλαση το πάχος του τεμαχίου μειώνεται, τότε εξάγεται το συμπέρασμα ότι  $u_0 < u < u_1$  (u ενδιάμεση ταχύτητα).

Κάθε ράουλο έχει ακτίνα R και μία ταχύτητα  $u_r$ . Η ταχύτητα του ραούλου είναι μεγαλύτερη από την αρχική ταχύτητα του τεμαχίου  $u_0$  έτσι ώστε το τεμάχιο να εισαχθεί στη πλαστική ζώνη. Σταδιακά η ταχύτητα του τεμαχίου αυξάνεται και σε ένα συγκεκριμένο σημείο, γνωστό ως ουδέτερο σημείο, η ταχύτητα του τεμαχίου ισούται με τη ταχύτητα του ραούλου. Στη συνέχεια, μέχρι την έξοδο του η ταχύτητα του ξεπερνάει τη γραμμική ταχύτητα του ραούλου.

Στα υπόλοιπα σημεία εκτός του ουδέτερου, ανάμεσα στο τεμάχιο και το κύλινδρο, παρουσιάζεται τριβή και ολίσθηση. Από τα παραπάνω εξάγεται το συμπέρασμα ότι υπάρχει ροή του υλικού προς την είσοδο και έξοδο.

Το μέγεθος της ολίσθησης ανάμεσα στο τεμάχιο και το ράουλο υπολογίζεται από τη σχέση (forward slip):

$$s = \frac{u_1 - u_r}{u_r} \quad (\text{Εξίσωση 4.3})$$

όπου:

$A_0, A_1$  (mm<sup>2</sup>) η διατομή του αρχικού και τελικού τεμαχίου

Η δύναμη διαμόρφωσης της έλασης προκύπτει από τη σχέση:

$$F = \frac{A_1}{2} \cdot \frac{k_{fm}}{\eta_F} \cdot \varphi \quad (\text{Εξίσωση 4.4})$$

όπου:

F (N) δύναμη διαμόρφωσης έλασης

A<sub>1</sub> (mm<sup>2</sup>) η διατομή του τελικού τεμαχίου

k<sub>fm</sub> (N/mm<sup>2</sup>) αντίσταση στη παραμόρφωση

η<sub>F</sub> (-) συντελεστής απόδοσης της παραμόρφωσης

φ (-) πραγματική παραμόρφωση

Η ενέργεια παραμόρφωσης, εξαρτάται από το λόγο της ενέργειας παραμόρφωσης ανά μονάδα όγκου του υλικού (υπολογίζεται από καμπύλες παραμόρφωσης), καθώς και τη πραγματική παραμόρφωση του υλικού. Υπολογίζεται ως εξής :

$$k_{fm} = \frac{a}{\varphi} \quad (\text{Εξίσωση 4.4})$$

Οι δυνάμεις που ασκούνται στο τεμάχιο κατά τη διάρκεια της παραμόρφωσης είναι το ακτινικό φορτίο έλασης F<sub>N</sub> και η τριβή F<sub>R</sub>. Το ακτινικό φορτίο έλασης είναι η δύναμη με την οποία τα ράουλα πιέζουν το τεμάχιο. Καθώς το φορτίο είναι ίσο με τη δύναμη που ασκείται από το τεμάχιο προς τα ράουλα σαν να προσπαθεί να τα διαχωρίσει, ονομάζεται και δύναμη διαχωρισμού.

Η γωνία μεταξύ του σημείου που ξεκινάει η επαφή του τεμαχίου με τα ράουλα και τη κεντρική γραμμή των ραούλων ονομάζεται γωνία επαφής α.

Η οριζόντια συνιστώσα της ακτινικής δύναμης δίνεται από τη σχέση:

$$F_{NW} = F_N \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \quad (\text{Εξίσωση 4.5})$$

Η οριζόντια συνιστώσα της ακτινικής τριβής δίνεται από τη σχέση:

$$F_{RW} = F_R \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \quad (\text{Εξίσωση 4.6})$$

Η τριβή και το ακτινικό φορτίο συνδέονται μεταξύ τους από την εξής σχέση:

$$F_R = \mu \cdot F_N \quad (\text{Εξίσωση 4.7})$$

μ, ο συντελεστής τριβής μεταξύ τεμαχίου και ραούλων.

Στη θερμή έλαση, ο συντελεστής τριβής δίνεται από τη σχέση (θερμοκρασίες 700°-1200 °):

$$\mu = 1.05 - 0.5 \cdot 10^{-3} T - 0.056 \cdot u \quad (\text{Εξίσωση 4.8})$$

όπου:

T (°) θερμοκρασία

u (m/sec) ταχύτητα έλασης

Η επιφάνεια επαφής μεταξύ του τεμαχίου και των ραούλων ισούται με το γινόμενο του πλάτους του τεμαχίου και του προβαλλόμενου μήκους  $L_p$  του τόξου επαφής.

$$L_p = [R \cdot (h_0 - h_1) - \frac{(h_0 - h_1)^2}{4}]^{1/2} \approx [R(h_0 - h_1)]^{1/2} \quad (\text{Εξίσωση 4.9})$$

όπου:

R (mm) η ακτίνα ελάστρου

$h, h_1$  (mm) αρχικό, τελικό ύψος τεμαχίου

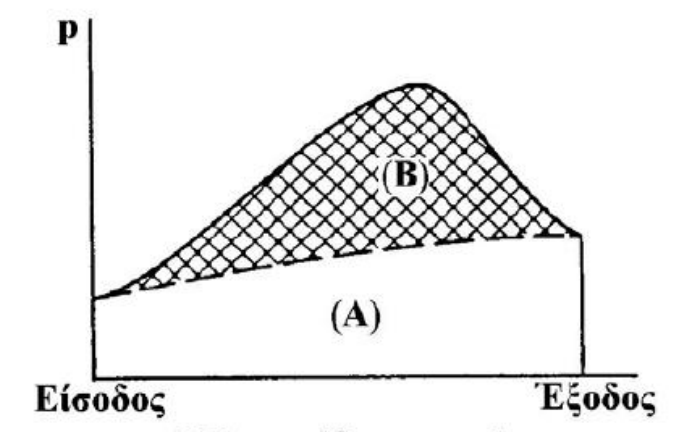
Η μέγιστη μείωση του πάχους του ελάσματος κατά τη διάρκεια της έλασης είναι η εξής:

$$\Delta h = h_0 - h_1 = 4 \cdot r \cdot \sin^2 \frac{\alpha}{2}$$

(Εξίσωση 4.10)

Όσον αφορά την κατανομή της πίεσης κατά μήκος του τόξου επαφής, αυτή αυξάνει σταδιακά μέχρι που φτάνει στη μέγιστη τιμή της, στο ουδέτερο σημείο και έπειτα ξανά μειώνεται. Η περιοχή κάτω από την καμπύλη αντιπροσωπεύει το πλαστικό έργο που απαιτείται για την ομογενή παραμόρφωση του τεμαχίου ενώ η σκιαγραφημένη περιοχή αντιπροσωπεύει την δύναμη που απαιτείται για την υπερνίκηση των δυνάμεων τριβής.

Η τριβή μεταξύ των ραούλων και την επιφάνεια του μετάλλου έχει πολύ μεγάλη σημασία καθώς εκτός του ότι η δύναμη τριβής ωθεί το μέταλλο μέσα στο διάκενο ανάμεσα στα ράουλα αλλά παράλληλα επηρεάζει το μέγεθος και τη κατανομή την πίεσης των ραούλων. Σύμφωνα με το σχήμα 4.1, όσο μεγαλύτερες οι δυνάμεις τριβής τόσο μεγαλύτερο το φορτίο έλασης ενώ τόσο πιο απότομα συγκεντρώνεται η πίεση σε μία συγκεκριμένη μέγιστη τιμή στο ουδέτερο σημείο. Καθώς η κατανομή της πίεσης εξαρτάται άμεσα από τη τριβή, στο σχήμα 4.1 η κατανομή πίεσης είναι γνωστή με την ονομασία friction hill. Υψηλές τιμές τριβής οδηγούν σε μεγάλη πλευρική εξάπλωση και σε ράγισμα των ακμών, ενώ οι χαμηλές τιμές τριβής που παρατηρούνται στη ψυχρή έλαση με χρήση λιπαντικού, μπορεί να οδηγήσουν σε δυσκολίες στην οδήγηση του τεμαχίου στο διάκενο μεταξύ των ραούλων.



Σχήμα 4.1 Κατανομή πίεσης κατά μήκος του τόξου επαφής

Για να ξεκινήσει η διαδικασία της έλασης, δηλαδή να εισαχθεί το τεμάχιο στο άνοιγμα των ραούλων, η συνολική οριζόντια συνιστώσα στην είσοδο να είναι θετική, πιο συγκεκριμένα:

$$F_R \cdot \cos \frac{\alpha}{2} - F_N \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \geq 0 .$$

Καθώς όπως αναφέρθηκε ισχύει η σχέση  $F_R = \mu \cdot F_N$  άρα συνεπάγεται ότι για να ξεκινήσει η διαδικασία της έλασης  $\mu \geq \tan \frac{\alpha}{2}$ , Οριακή συνθήκη  $\mu = \tan \frac{\alpha}{2}$ .

Η ροπή στέψης των ραούλων δίνεται από τη σχέση:

$$M = F \cdot r \quad (\text{Εξίσωση 4.11})$$

όπου:

M (kNm) η ροπή στρέψης για ένα ράουλο

F (N) δύναμη παραμόρφωσης

r (mm) η ακτίνα ραούλου

Το έργο που καταναλώνεται κατά τη διάρκεια της έλασης:

$$W = 2 \cdot F \cdot l_1 \quad (\text{Εξίσωση 4.12})$$

όπου:

F (N) δύναμη παραμόρφωσης

$l_1$  (mm) μήκος του τελικού τεμαχίου

Τέλος, η ισχύς της κατεργασίας:

$$P_a = \frac{2 \cdot F \cdot u}{60 \cdot 10^3} \quad (\text{Εξίσωση 4.13})$$

όπου:

F (N) δύναμη παραμόρφωσης

u (m/sec) η γραμμική ταχύτητα της έλασης .

Λόγο του ότι ισχυεί στη κυκλική κίνηση  $u = \omega \cdot r$ , ( $\omega$  (rad/sec) η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής), και :

$$P_a = \frac{2 \cdot F \cdot \omega \cdot r}{60 \cdot 10^3} , \text{ όμως } F \cdot r = M \text{ συνεπάγεται ότι}$$

$$P_a = 2 \cdot M \cdot \omega \quad (\text{Εξίσωση 4.14})$$

$$1 \text{ W} = 1 \frac{\text{Nm}}{\text{s}}; P_a \text{ σε kW}$$

Συνθήκη λειτουργίας ραούλων:  $\alpha_0 < 2 \cdot \rho$

όπου  $\rho$  ( $^\circ$ ) γωνία τριβής

## 4.5 Ασκήσεις

### Άσκηση 1

Να υπολογιστεί η δύναμη και η ισχύς κατά την έλαση ενός κυλινδρικού τεμαχίου από χάλυβα Ck 35, διαμέτρου 25mm σε διάμετρο 25mm και μήκους 10mm. Ο συντελεστής της απόδοσης της παραμόρφωσης λαμβάνεται 0.55

### Λύση

Η δύναμη παραμόρφωσης κατά την έλαση εκφράζεται από τη σχέση:

$$F = \frac{1000 \cdot 8}{1000 \cdot 4} \cdot \frac{681.1}{0.55} \cdot 0.44$$

Η τιμή της μέσης αντίστασης στη παραμόρφωση  $k_{fm}$  υπολογίζεται βάση της καμπύλης της ενέργειας παραμόρφωσης  $a$ , σε σχέση με τη τιμή της πραγματικής παραμόρφωσης. Συνεπώς υπολογίζονται αρχικά αυτά τα μεγέθη:

$$\text{Η πραγματική παραμόρφωση } \varphi_p \text{ ισούται με : } \varphi_p = \ln \frac{A_0}{A_1} = \varphi_p = \ln \frac{\pi \cdot \frac{D_0^2}{4}}{\pi \cdot \frac{D_1^2}{4}} = \ln \frac{25^2}{20^2} = 0.44.$$

Άρα  $\varphi_p = 44\%$

$$\text{Η μέση τάσης αντίστασης } k_{fm} = \frac{300}{0.44} = 681.81 = \frac{300}{0.44} = 681.81 \text{ N/mm}^2$$

Από τη καμπύλη παραμόρφωσής για το υλικό Ck 35 για πραγματική παραμόρφωση  $\varphi_p = 44\%$  προκύπτει η ενέργεια παραμόρφωσης  $a = 300 \text{ Nmm/mm}^3$

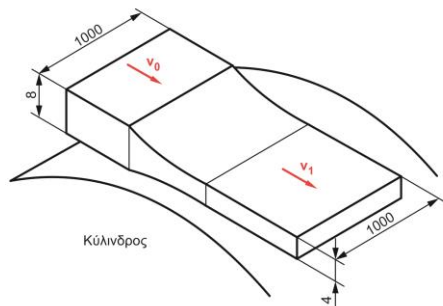
Άρα υπολογίζεται η δύναμη:

$$F = \frac{\pi \cdot \frac{20^2}{4}}{2} \cdot \frac{681.1}{0.55} \cdot 0.44 = 85635.336 \text{ N}$$

Και τέλος η ισχύς:  $W = 2 \cdot F \cdot l_1 = 2 \cdot 85635.336 \cdot 10 = 1712706.72 = 1712.7 \text{ kNm}$

### Άσκηση 2

Για την έλαση που παρουσιάζεται στο σχήμα, να υπολογισθεί η δύναμη και η ισχύς λαμβάνοντας υπόψιν ότι το υλικό είναι χάλυβας Ck 35 και το μήκος του τεμαχίου 20m. Ο συντελεστής απόδοσης λαμβάνεται 0.55



### Λύση

Η εικόνα απεικονίζει τα χαρακτηριστικά του τεμαχίου πριν και μετά την έλαση. Όπως φαίνεται λοιπόν το αρχικό ύψος  $h_0 = 8 \text{ mm}$ , αρχικό πλάτος  $w_0 = 1000 \text{ mm}$ , τελικό ύψος  $h_1 = 4 \text{ mm}$ , τελικό πλάτος  $w_1 = 1000 \text{ mm}$ .

Υπολογίζεται αρχικά η πραγματική παραμόρφωση :

$$\varphi_p = \ln \frac{A_0}{A_1} = \ln \frac{1000 \cdot 8}{1000 \cdot 4} = \ln 2 = 0.69, \text{ Άρα } \varphi_p = 69\%$$

Από τη καμπύλη παραμόρφωσής για το υλικό Ck 35 για πραγματική παραμόρφωση  $\varphi_p = 69\%$  προκύπτει η ενέργεια παραμόρφωσης  $a = 590 \text{ Nmm/mm}^3$

$$\text{Η μέση τάσης αντίστασης } k_{fm} \frac{a}{\varphi_p} = \frac{590}{0.69} = 855 \text{ N/mm}^2$$

Άρα υπολογίζεται η δύναμη:

$$F = \frac{4 \cdot 1000}{2} \cdot \frac{855}{0.55} \cdot 0.69 = 2145272.72 \text{ N}$$

$$\text{Και τέλος η ισχύς: } W = 2 \cdot F \cdot l_1 = 2 \cdot 2145272.72 \cdot 20 = 85810.9 \text{ kNm}$$

### Άσκηση 3

Έλασμα παραμορφώνεται με διαδικασία ψυχρής έλασης. Το πλάτος του τεμαχίου είναι 200 mm και το πάχος του 22 mm. Η διαδικασία ξεκινάει σε θερμοκρασία 50° C με ταχύτητα 1.5 m/min. Η ακτίνα των στρεφόμενων ραούλων δίνεται 40 mm και ο συντελεστής απόδοσης της διαμόρφωσης 60%. Ζητείται να προσδιοριστούν η δύναμη διαμόρφωσης, η ροπή έλασης, η ισχύς όταν τα ράουλα έχουν τη μέγιστη δυνατή γωνία. Τέλος ζητείται να ευρεθεί η αλλαγή στα δεδομένα όταν η θερμοκρασία έλασης γίνει 1000° σε έλασμα πάχους 6mm

### Λύση

Προκειμένου να ξεκινήσει η διαδικασία της έλασης θα πρέπει η οριζόντια συνιστώσα στην είσοδο να είναι θετική. Πρακτικά, από συνθήκη ισορροπίας, αυτό σημαίνει ότι:

$$F_{RW} \geq F_{NW} \Rightarrow F_{RW} - F_{NW} \geq 0$$

$$\text{Η οριζόντια συνιστώσα της ακτινικής δύναμης ισούται με : } F_{NW} = F_N \cdot \sin \frac{\alpha}{2}$$

$$\text{Η οριζόντια συνιστώσα της δύναμης τριβής ισούται με : } F_{RW} = F_R \cdot \cos \frac{\alpha}{2}$$

$$\text{Αντικαθιστώντας στη πρώτη σχέση: } F_R \cdot \cos \frac{\alpha}{2} - F_N \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \geq 0 \Rightarrow \frac{F_R}{F_N} \geq \frac{\sin \frac{\alpha}{2}}{\cos \frac{\alpha}{2}} = \tan \frac{\alpha}{2}$$

Όμως η κάθετη δύναμη συνδέεται με τη τριβή με τη σχέση  $F_R = \mu \cdot F_N$ , άρα ο λόγος τους ισούται με το συντελεστή τριβής. Αντικαθιστώντας πάλι στη συνθήκη ισορροπίας προκύπτει

$$\text{ότι : } \mu \geq \tan \frac{\alpha}{2}, \text{ οριακά } \mu = \tan \frac{\alpha}{2}$$

Για τη μείωση του πάχους του τεμαχίου κατά τη διάρκεια της έλασης ισχύει η σχέση:

$$\Delta h = h_0 - h_1 = 4 \cdot r \cdot \sin^2 \frac{\alpha_0}{2}$$

$$\text{Συνθήκη } \alpha_0 < 2\rho \text{ Έστω } \rho = 43.3^\circ,$$

$$\text{Οριακά } \alpha_0 = 2\rho = 20 \cdot 43.3 = 86.6^\circ$$

$$\Delta h = h_0 - h_1 = 4 \cdot r \cdot \sin^2 \frac{\alpha_0}{2} = 4 \cdot 40 \cdot \sin^2 \frac{86.6}{2} = 75.25 \text{ mm}, \text{ Άρα λοιπόν } \Delta h = h_0 - h_1 = 75.25$$

$$\Rightarrow h_0 = \Delta h + h_1 = 75.25 + 22 = 97.25 \text{ mm}$$

$$\text{Υπολογισμός πραγματικής παραμόρφωσης: } \varphi = \ln \frac{h_0}{h_1} = \ln \frac{97.25}{22} = 1.48, \text{ άρα } \varphi = 148\%$$

Η ενέργεια παραμόρφωσης για το υλικό St 42-2 και πραγματική παραμόρφωση  $\varphi=148\%$  υπολογίζεται από τις καμπύλες παραμόρφωσης  $a=1150 \text{ Nmm/mm}^3$

Συνεπώς υπολογίζεται μέση αντίσταση παραμόρφωσης:  $k_{fm} = \frac{a}{\varphi} = \frac{1150}{1.48} = 777 \text{ N/mm}^2$

Έχοντας υπολογίσει τις παραπάνω μεταβλητές είναι πλέον δυνατό να υπολογιστεί η δύναμη παραμόρφωσης:  $F = \frac{A_1}{2} \cdot \frac{k_{fm}}{\eta_F} \cdot \varphi = \frac{200 \cdot 22}{2} \cdot \frac{777}{0.6} \cdot 1.48 = 4216520 \text{ N} \approx 4217 \text{ kN}$

Η ροπή έλασης:  $M = F \cdot r = 4217 \cdot 40 = \frac{2 \cdot 4217000 \cdot 1.5}{60 \cdot 10^3} = 211 \text{ kW}$

Όταν η θερμοκρασία φτάσει τους  $1000^\circ\text{C}$  ο συντελεστής τριβής  $\mu$  παίρνει τιμές:

$$\mu = 1.05 - 0.5 \cdot 10^{-3} T - 0.056 \cdot u = 1.05 - 0.5 \cdot 10^{-3} 1000 - 0.056 \cdot 1.5 = 0.466$$

Από την οριακή συνθήκη έναρξης της έλασης  $\mu = \tan \frac{\alpha}{2} \Rightarrow \tan \frac{\alpha}{2} = 0.46$ , άρα η γωνία ισούται με  $24.99^\circ$ . Επίσης  $2 \cdot \rho = 2 \cdot 24.99^\circ = 49.98^\circ$

Η μείωση του πάχους:  $\Delta h = h_0 - h_1 = 40 \cdot 40 \cdot \sin^2 \frac{49.98}{2} = 28.55 \text{ mm}$

Άρα το αρχικό πάχος:  $h_0 = \Delta h + h_1 = 28.55 + 6 = 34.5 \text{ mm}$

Η πραγματική παραμόρφωση:  $\varphi = \ln \frac{h_0}{h_1} = \ln \frac{34.5}{6} = 1.75$ , άρα η πραγματική παραμόρφωση  $\varphi = 175\%$

Για συνθήκες θερμής έλασης η μέση αντίσταση υπολογίζεται από της καμπύλες παραμόρφωσης για το υλικό St 42-2

$k_{f0} = 380 \text{ N/mm}^2$  για  $\varphi = 0$  και  $k_{f1} = 890 \text{ N/mm}^2$  για  $\varphi = 175\%$

Μέση αντίσταση:  $k_{fm} = \frac{k_{f0} + k_{f1}}{2} = \frac{380 + 890}{2} = 635 \text{ N/mm}^2$

Η δύναμη διαμόρφωσης:  $F = \frac{A_1}{2} \cdot \frac{k_{fm}}{\eta_F} \cdot \varphi = \frac{200 \cdot 6}{2} \cdot \frac{6.35}{0.6} \cdot 1.75 = 1111250 \text{ N} \approx 1111.3 \text{ kN}$

Η ροπή:  $M = F \cdot r = 1111.3 \cdot 40 = 44452 \text{ kNmm} \approx 44.5 \text{ kNm}$

Η ισχύς:  $P = \frac{2 \cdot F \cdot u}{60 \cdot 10^3} = \frac{2 \cdot 1111250 \cdot 1.5}{60 \cdot 10^3} = 55.6 \text{ kW}$

## 5. Εξώθηση

### 5.1 Εισαγωγή

Η εξώθηση είναι μία διαδικασία συμπίεσης στην οποία το κατεργαζόμενο μέταλλο εξαναγκάζεται να διέλθει από το άνοιγμα μήτρας με σκοπό να παραχθεί σχήμα συγκεκριμένης διατομής. Πλεονεκτήματα της διαδικασίας είναι : α) κατασκευή διαφόρων σχημάτων ειδικά με τη θερμή εξώθηση, β) αρκετά υψηλές αντοχές ειδικά στη ψυχρή εξώθηση, γ) η δομή των κόκκων και οι ιδιότητες αντοχής είναι ενισχυμένες στη ψυχρή και τη θερμή έλαση, δ) σε ορισμένες λειτουργίες εξώθησης δαπανάται ελάχιστο η καθόλου υλικό. Υπάρχει βέβαια ο περιορισμός ότι η διατομή του εξωθούμενου τεμαχίου πρέπει να είναι ομοιόμορφη σε όλο το μήκος της.

Η εξώθηση πραγματοποιείται με διάφορες μεθόδους. Μία σημαντική διάκριση στις μεθόδους είναι η άμεση και η έμμεση εξώθηση. Άλλου είδους κατηγοριοποίηση έχει να κάνει με τη θερμοκρασία, όπου διακρίνεται σε ψυχρή και θερμή εξώθηση.

Στην άμεση εξώθηση ή αλλιώς εμπρόσθια εξώθηση, μεταλλική μπιγέτα εισάγεται σε θάλαμο και με ένα έμβολο πιέζει το υλικό εξαναγκάζοντας τη ροή του μετάλλου να διέλθει από ένα η παραπάνω ανοίγματα της μήτρας και να εξέλθει από την αντίθετη πλευρά του θαλάμου. Ένα πρόβλημα που παρουσιάζεται κατά την άμεση εξώθηση είναι η παρουσία τριβής ανάμεσα στην επιφάνεια του τεμαχίου και τα τοιχώματα του θαλάμου καθώς η μπιγέτα ωθείται να περάσει από το άνοιγμα της μήτρας. Η τριβή προκαλεί σημαντική αύξηση στη δύναμη του εμβόλου που απαιτείται για την εμπρόσθια εξώθηση. Κατά την θερμή εξώθηση το πρόβλημα της τριβής επιδεινώνεται με τη παρουσία στρώματος οξειδίου στην επιφάνεια της μπιγέτας κάτι το οποίο ενδέχεται να προκαλέσει ελαττώματα στο τελικό τεμάχιο.

Η αρχική μορφή της μπιγέτας στην άμεση εξώθηση είναι κυκλικής διατομής ενώ το τελική μορφή καθορίζεται από τη μορφή του ανοίγματος της μήτρας. Προφανώς το μεγαλύτερο το άνοιγμα της μήτρας πρέπει να είναι μικρότερο από τη μικρότερη διάμετρο της μπιγέτας.

Στην έμμεση εξώθηση, η μήτρα είναι τοποθετημένη στο έμβολο αντί στο αντίθετο άκρο του θαλάμου. Καθώς το έμβολο εισχωρεί μέσα στο τεμάχιο, η ροή του μετάλλου εξωθείται στο διάκενο με κατεύθυνση αντίθετη από τη κίνηση του εμβόλου. Καθώς δεν υφίσταται εξαναγκασμένη κίνηση της μπιγέτας προς το θάλαμο, δεν δημιουργείται τριβή στα τοιχώματα και ως εκ τούτου η δύναμη του εμβόλου είναι μικρότερη από την άμεση εξώθηση. Οι περιορισμοί της έμμεσης εξώθησης επιβάλλονται από τη χαμηλή ακαμψία στη κοιλότητα του εμβόλου και τη δυσκολία υποστήριξης του κατεργαζόμενο τεμαχίου καθώς εξέρχεται από τη μήτρα.

Μέσω της έμμεσης εξώθησης είναι δυνατό να παραχθούν σωληνοειδείς διατομές. Με αυτή τη μέθοδο το έμβολο ωθείται προς τη μπιγέτα, εξαναγκάζοντας τη ροή του τεμαχίου γύρω από το έμβολο παίρνοντας σχήμα κυπέλου. Υπάρχουν βέβαια περιορισμοί και στο μήκος του παραγμένου τεμαχίου που πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν για αυτή τη λειτουργία, καθώς όσο αυξάνεται το μέγεθος τόσο δυσκολεύεται η υποστήριξη του εμβόλου.

#### Ψυχρή και θερμή έλαση

Όπως αναφέρθηκε η εξώθηση πραγματοποιείται εν θερμώ και εν ψυχρώ. Αυτό συνήθως εξαρτάται από το κατεργαζόμενο μέταλλο αλλά και από τη ποσότητα της τάσης στην οποία υποβάλλεται το μέταλλο κατά τη διάρκεια της παραμόρφωσης.

Στη θερμή έλαση η μπιγέτα προθερμαίνεται μέχρι να ξεπεράσει η θερμοκρασία της, τη θερμοκρασία αναक्रυστάλλωσης της, εμποδίζοντας έτσι την εργοσκληρυνση του τεμαχίου. Αυτό μειώνει την αντοχή και αυξάνει την ολκιμότητα του μετάλλου , επιτρέποντας με αυτό

το τρόπο πιο απότομες μειώσεις μεγέθους αλλά και πιο περίπλοκες κατασκευές σχημάτων. Επιπλέον πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η μείωση της δύναμης του εμβόλου, αύξηση της ταχύτητας του και μείωση της ροής των κόκκων στο τελικό προϊόν.

Η ψυχρή εξώθηση πραγματοποιούνται σε πρώτες ύλες ή μπιγέτες, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Καθώς το κατεργαζόμενο προϊόν βρίσκεται σε χαμηλότερη θερμοκρασία, δεν παρουσιάζονται μικρο-δομικές αλλαγές κατά τη διάρκεια της διαδικασίας. Μέσω της της ψυχρής έλασης αυξάνεται η αντοχή και η σκληρότητα του υλικού. Τα πιο κατάλληλα μέταλλα για ψυχρή έλαση είναι εκείνα που παρουσιάζουν μεγαλύτερη ολκιμότητα. Πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι το τελικό προϊόν δεν οξυγονώνεται και παρουσιάζει άριστες μηχανικές ιδιότητες.

## 5.2 Μηχανική της εξώθησης

### 5.2.1 Μηχανική της θερμής εξώθησης

Η πραγματική παραμόρφωση κατά την άμεση ή έμμεση εξώθηση δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\varphi_p = \ln \frac{A_0}{A_1} \quad (\text{Εξίσωση 5.1})$$

όπου:

$\varphi_p$  η πραγματική παραμόρφωση

$A_0, A_1$  ( $\text{mm}^2$ ), η επιφάνεια διατομής του κομματιού πριν και μετά την εξώθηση

Ο βαθμός εξώθησης, δηλαδή το ποσό της μείωσης της διατομής του κατεργαζόμενου υλικού, για άμεση και έμμεση εξώθηση δίνεται από τη παρακάτω σχέση:

$$\lambda = \frac{A_0}{A_1} \quad (\text{Εξίσωση 5.2})$$

όπου:

$A_0, A_1$  ( $\text{mm}^2$ ), η επιφάνεια διατομής του κομματιού πριν και μετά την εξώθηση

Στη περίπτωση που η εξώθηση πραγματοποιείται εν θερμώ η τάση ροής  $k_{str}$  είναι ανεξάρτητη από τη πραγματική παραμόρφωση. Εξαρτάται από το ρυθμό παραμόρφωσης, τη θερμοκρασία παραμόρφωσης και το υλικό προς κατεργασία. Για τον υπολογισμό της τάσης ροής υλικού σε συγκεκριμένη θερμοκρασία, ακολουθείται η εξής διαδικασία:

υπολογισμός ρυθμού παραμόρφωσης:

$$\dot{\varphi} \cong \frac{6 \cdot v_p \cdot \varphi_p}{D} \quad (\text{Εξίσωση 5.3})$$

είτε:

$$\dot{\varphi} \cong \frac{2 \cdot v_p}{D_1} \quad (\text{Εξίσωση 5.4})$$

όπου:

$\dot{\varphi}$  ( $\text{s}^{-1}$ ) ο ρυθμός παραμόρφωσης

$v_p$  ( $\text{m/sec}$ ) ταχύτητα εμβόλου

$\varphi_p$  πραγματική παραμόρφωση

$D$  ( $\text{mm}$ ), η διάμετρος του δοχείου

$D_1$  ( $\text{mm}$ ) τελική διάμετρος του τεμαχίου

Για την ταχύτητα του εμβόλου:

$$v_p = \frac{10^3 \cdot v_{ex} \cdot A_1}{60 \cdot A_0} \quad (\text{Εξίσωση 5.5})$$

Για τη ταχύτητα εξόδου:

$$v_{ex} = \frac{60 \cdot v_p \cdot A_0}{10^3 \cdot A_1} \quad (\text{Εξίσωση 5.6})$$

όπου:

$v_p$  (mm/sec) η ταχύτητα του εμβόλου

$v_{ex}$  (m/min) η ταχύτητα του υλικού στην έξοδο

$A_0$  (mm<sup>2</sup>) η επιφάνεια διατομής του αρχικού τεμαχίου

$A_1$  (mm<sup>2</sup>) η επιφάνεια διατομής του τελικού τεμαχίου

Ο παρακάτω πίνακας 5.1 παρουσιάζει τις επιτρεπτές παραμορφώσεις, τις θερμοκρασίες εξώθησης, τις ταχύτητες και τη δυνατότητα εξώθησης για χάλυβα, κράμα χαλκού, αλουμίνιο και τιτάνιο.

| Υλικό |                          | Μέση<br>Θερμοκρασία<br>Εξώθησης (°C) | $\lambda_{\max}$ | $\phi_{\text{επ}}$ | Ταχύτητα                              |  | Δυνατότητα εξώθησης<br>(παραμορφωσιμότητα) |        |      |
|-------|--------------------------|--------------------------------------|------------------|--------------------|---------------------------------------|--|--|--------|------|
|       |                          |                                      |                  |                    | εξώθηση<br>$v_{\text{ex}}$<br>(m/min) | έμβολο<br>$v_p$ (m/s<br>για $\lambda_{\max}$ | καλή                                       | μέτρια | κακή |
| Al    | Al 99.5                  | 430                                  | 1000             | 6.9                | 50-100                                | 1.6  | x  |        |      |
|       | AlMg 1                   | 440                                  | 150              | 5.0                | 30-75                                 | 8.3  | x  |        |      |
|       | AlMgSi 1                 | 460                                  | 250              | 5.5                | 5-30                                  | 2  |  | x      |      |
|       | AlCuMg 1                 | 430                                  | 45               | 3.8                | 1.5-3                                 | 1.1  |  |        | x    |
| Cu    | E-Cu                     | 850                                  | 400              | 6.0                | 300                                   | 12.5   |  | x      |      |
|       | CuZn 10<br>(Ms 90)       | 850                                  | 50               | 3.9                | 50-100                                | 33   |  |        | x    |
|       | CuZn 28<br>(Ms 72)       | 800                                  | 100              | 4.6                | 50-100                                | 16.6   |  | x      |      |
|       | CuZn 37<br>(Ms 63)       | 775                                  | 250              | 5.5                | 150-200                               | 13.3   |  | x      |      |
|       | CuSn 8                   | 800                                  | 80               | 4.4                | 30                                    | 6.2  |  |        | x    |
| St    | C15<br>C35<br>C45<br>C60 | 1200                                 | 90               | 4.5                | 360                                   | 66   | x  |        |      |
|       | 100Cr6                   | 1200                                 | 50               | 3.9                | 360                                   | 120  | x  |        |      |
|       | 50CrMo4                  | 1250                                 | 50               | 3.9                | 360                                   | 120  | x  |        |      |
| Ti    | TiA 15 Sn<br>2.5         | 950                                  | 100              | 4.6                | 360                                   | 60   |  |        | x    |

**Πίνακας 5.1** Επιτρεπτές τιμές των θερμοκρασιών και ταχυτήτων κατά την εξώθηση Δοσμένου του ρυθμού παραμόρφωσης υπολογίζεται η τιμή της τάσης ροής για συγκεκριμένη θερμοκρασία :

$$k_{\text{str}} = k_{\text{str1}} \cdot \left( \frac{\dot{\phi}}{\dot{\phi}_1} \right)^m \quad (\text{Εξίσωση 5.7})$$

όπου:

$k_{\text{str}}$  (N/mm<sup>2</sup>), η τάση ροής για το ρυθμό παραμόρφωσης  $\dot{\phi}$

$k_{\text{str1}}$  (N/mm<sup>2</sup>) η τάση ροής στη βέλτιστη θερμοκρασία εξώθησης. Η τιμή της υπολογίζεται από το πίνακα 5.2 για  $\dot{\phi} = 1 \text{ s}^{-1}$ , σε θερμοκρασία T

$\dot{\phi}$  (s<sup>-1</sup>) η βασική ταχύτητα

m εκθέτης του υλικού, λαμβάνεται από πίνακα 5.2

Όταν η βασική ταχύτητα  $\dot{\phi} = 1 \text{ s}^{-1}$ , η εξίσωση 5.7 απλοποιείται στην εξής μορφή:

$$k_{\text{str}} = k_{\text{str1}} \cdot \dot{\phi}^m \quad (\text{Εξίσωση 5.8})$$

### Δύναμη εξώθησης

Στην άμεση εξώθηση παρουσιάζεται τριβή ανάμεσα στα τοιχώματα του θαλάμου υποδοχής και το κατεργαζόμενο υλικό. Αυτό συνεπάγεται αύξηση της δύναμης στο έμβολο για την επίτευξη της διαδικασίας. Η δύναμη παραμόρφωσης στην άμεση εξώθηση υπολογίζεται ως εξής :

$$F = \frac{A_0 \cdot k_{str} \cdot \phi_p}{\eta_F} + d_0 \cdot \pi \cdot l \cdot \mu \cdot k_{str} \quad (\text{Εξίσωση 5.9})$$

όπου:

F(N) δύναμη εξώθησης

A<sub>0</sub> (mm<sup>2</sup>) επιφάνεια διατομής αρχικού τεμαχίου

k<sub>str</sub> (N/mm<sup>2</sup>) τάση ροής του υλικού

φ<sub>p</sub> πραγματική παραμόρφωση

η<sub>F</sub> συντελεστής απόδοσης της εξώθησης (η<sub>F</sub>= 0.4-0.6)

μ συντελεστής τριβής (μ=0.15-0.2 με καλή λίπανση)

l (mm)

Στην έμμεση εξώθηση δεν παρουσιάζεται τριβή ανάμεσα στα τοιχώματα του θαλάμου υποδοχής και το κατεργαζόμενο υλικό.

$$F = \frac{A_0 \cdot k_{str} \cdot \phi_p}{\eta_F} \quad (\text{Εξίσωση 5.10})$$

όπου:

F(N) δύναμη εξώθησης

A<sub>0</sub> (mm<sup>2</sup>) επιφάνεια διατομής αρχικού τεμαχίου

k<sub>str</sub> (N/mm<sup>2</sup>) τάση ροής του υλικού

φ<sub>p</sub> πραγματική παραμόρφωση

η<sub>F</sub> συντελεστής απόδοσης της εξώθησης

μ συντελεστής τριβής

l (mm)

### Έργο Εξώθησης

Το έργο της εξώθησης υπολογίζεται από τη παρακάτω σχέση:

$$W = \frac{V_0 \cdot k_{str} \cdot \phi_p}{10^6 \cdot \eta_F} \quad (\text{Εξίσωση 5.11})$$

όπου:

W(kNm) έργο παραμόρφωσης

k<sub>str</sub> (N/mm<sup>2</sup>) τάση ροής του υλικού

V (mm<sup>3</sup>) τελικός όγκος τεμαχίου

10<sup>6</sup> συντελεστής μετατροπής από Nmm σε kNm

| Υλικό |                 | m     | $k_{str1}$<br>$\dot{\phi}_1 = 1s^{-1}$<br>(N/mm <sup>2</sup> ) όπου | T (°C)        |
|-------|-----------------|-------|---|---------------|
| St    | C 15            | 0.154 | 99/84   | 1100/<br>1200 |
|       | C 35            | 0.144 | 89/72   |               |
|       | C45             | 0.163 | 90/70   |               |
|       | C60             | 0.167 | 85/68   |               |
|       | X 10 Cr 13      | 0.091 | 105/88  | 1100/<br>1250 |
|       | X 5 CrNi 18 9   | 0.094 | 137/116   |               |
|       | X 5 CrNiTi 18 9 | 0.176 | 100/74  |               |
| Cu    | E-Cu            | 0.127 | 56  | 800           |
|       | Cu Zn 28        | 0.212 | 51  | 800           |
|       | CuZn 37         | 0.201 | 44  | 750           |
|       | CuZn 40 Pb 2    | 0.218 | 35  | 650           |
|       | CuZn 20 Al      | 0.180 | 70  | 800           |
|       | CuZn 28 Sn      | 0.162 | 68  | 800           |
|       | CuAl 5          | 0.163 | 102   | 800           |
|       |                 |       |   |               |
| Al    | Al 99.5         | 0.159 | 24  | 450           |
|       | AlMn            | 0.135 | 36  | 480           |
|       | AlCuMg 1        | 0.122 | 72  | 450           |
|       | AlCuMg 2        | 0.131 | 77  | 450           |
|       | AlMgSi 1        | 0.108 | 48  | 450           |
|       | AlMgMn          | 0.194 | 70  | 480           |
|       | AlMg 3          | 0.091 | 80  | 450           |
|       | AlMg 5          | 0.110 | 102   | 450           |
|       | AlZnMgCu 1.5    | 0.134 | 81  | 450           |

**Πίνακας 5.2** Βασικές τιμές  $k_{str1}$  για  $\dot{\phi}_1 = 1 s^{-1}$  για παραμόρφωση σε θερμοκρασία που δίνεται και εκθέτη υλικού m για τον υπολογισμό της συνάρτησης  $k_{str} = f(\dot{\phi})$

### 5.2.2 Μηχανική της ψυχρής εξώθησης

Στην άμεση και έμμεση εξώθηση η πραγματική παραμόρφωση όπως και στη θερμή εξώθηση από την εξίσωση 5.1:

$$\varphi_p = \ln \frac{A_0}{A_1} \quad (\text{Εξίσωση 5.12})$$

όπου:

$\varphi_p$  η πραγματική παραμόρφωση

$A_0, A_1$  (mm<sup>2</sup>), η επιφάνεια διατομής του κομματιού πριν και μετά την εξώθηση

Στην έμμεση εξώθηση και για τμήματα με λεπτά τοιχώματα χρησιμοποιείται συνήθως ο παρακάτω τύπος:

$$\varphi_p = \ln \frac{D_0}{D_0 - d} - 0.16 \quad (\text{Εξίσωση 5.13})$$

όπου:

$\varphi_p$  η πραγματική παραμόρφωση

$D_0$ (mm), η αρχική διάμετρος

$d$ (mm) , εσωτερική, τελική διάμετρος

Ο πίνακας 5.3 παρουσιάζει το μέγιστο βαθμό εξώθησης για κάποια υλικά σε θερμοκρασία περιβάλλοντος

| Υλικό  | Άμεση<br>Εξώθηση<br>$\Phi_p$ per | Έμμεση<br>Εξώθηση<br>$\Phi_p$ per |
|--|----------------------------------|-----------------------------------|
| Al 99.5-99.8                                 | 3.9                              | 4.5                               |
| AlMgSi 0.5; AlMgSi 1; AlMg 2; AlCuMg 1       | 3.0                              | 3.5                               |
| CuZn 15-CuZn 37 (Ms 63); CuZn 38 Pb 1        | 1.2                              | 1.1                               |
| Mbk 6; Ma 8; and steels with a low C content | 1.4                              | 1.2                               |
| Ck10; Ck15; Cq10; Cq15                       | 1.2                              | 1.1                               |
| Cq 22; Cq 35; 15 Cr3                         | 0.9                              | 1.1                               |
| Ck45; Cq45; 34 Cr 4; 16 MnCr 5               | 0.8                              | 0.9                               |
| 42 CrMO 4; 15 CrNi 6                         | 0.7                              | 0.8                               |

**Πίνακας 5.3** Μέγιστος επιτρεπτός βαθμός εξώθησης σε θερμοκρασία περιβάλλοντος

#### Δύναμη εξώθησης

Κατά τη ψυχρή εξώθηση, η οποία πραγματοποιείται κυρίως σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, η δύναμη προκύπτει από τη παρακάτω σχέση, όπως αντίστοιχα και σε άλλες κατεργασίες παραμόρφωσης, χωρίς την επίδραση της θερμοκρασίας

Για άμεση εξώθηση:

$$F = \frac{A_0 \cdot k_{strm} \cdot \Phi_p}{\eta_F} \quad (\text{Εξίσωση 5.14})$$

όπου:

$F(N)$  δύναμη εξώθησης

$A_0 (mm^2)$  διατομή αρχικού τεμαχίου

$k_{strm} (N/mm^2)$  μέση τάση ροής του υλικού

$\Phi_p$  - πραγματική παραμόρφωση

$\eta_F$  συντελεστής απόδοσης ( $\eta_F=0.6-0.8$ ),

Στην έμμεση εξώθηση σε περιπτώσεις όπου τα τοιχώματα είναι παχιά ( $D_0/s \leq 10$ ) η δύναμη υπολογίζεται όπως στην εξίσωση 5.14 :

$$F = \frac{A_0 \cdot k_{strm} \cdot \Phi_p}{\eta_F} \quad (\text{Εξίσωση 5.15})$$

συντελεστής απόδοσης ( $\eta_F \approx 0.5-0.7$ )

Στην έμμεση εξώθηση σε περιπτώσεις όπου τα τοιχώματα είναι λεπτά ( $D_0/s \geq 10$ ) η δύναμη υπολογίζεται από τη παρακάτω εξίσωση:

$$F = A_p \cdot \frac{k_{strm}}{\eta_F} \left( 2 + 0.25 \frac{h_0}{s} \right) \quad (\text{Εξίσωση 5.16})$$

όπου:

$A_p (mm^2)$  επιφάνεια εγκάρσιας διατομής εμβόλου

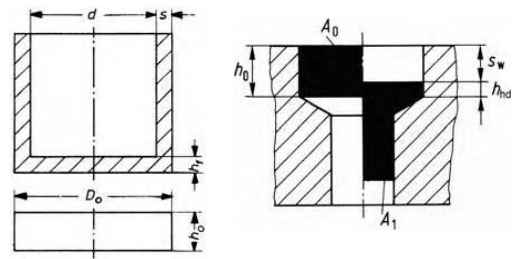
$h_0 (mm)$  ύψος ακατέργαστου

$s (mm)$  πάχος τοιχώματος

$$W = F \cdot s_w \cdot x$$

(Εξίσωση 5.17)

x παράγοντας διεργασίας (x=1)

 $s_w$  (mm) μετατόπισηΣτην άμεση εξώθηση  $s_w = h_0 - h_{hd}$  $h_{hd}$  (mm) ύψος κεφαλής)Στην έμμεση εξώθηση  $s_w = h_0 - h_1$  $h_1$  (mm) πάχος του πυθμένα

### 5.3 Ασκήσεις

#### Θερμή εξώθηση

##### Άσκηση 3

Σκοπός της άσκησης είναι η παρασκευή κυκλικών ράβδων με διάμετρο  $d=15\text{mm}$  από AlMgSi1. Δίνονται τα εξής δεδομένα: ταχύτητα εμβόλου  $2\text{mm/sec}$ , πυκνότητα AlMgSi1  $\rho=2.7\text{kg/dm}^3$ , διάμετρος μπιγέτας  $180\text{mm}$ , μήκος  $100\text{mm}$ , θερμοκρασία παραμόρφωσης  $450^\circ\text{C}$ . Ζητείται να υπολογιστεί η δύναμη εξώθησης. Δίνεται  $\eta_f=0.5$  και  $\mu=0.15$

##### Λύση

Από τη θερμοκρασία διαμόρφωσης φαίνεται ότι η εξώθηση πραγματοποιείται εν θερμώ. Η κατασκευή ράβδου από συμπαγή μπιγέτα πραγματοποιείται με άμεση εξώθηση. Για τον υπολογισμό της δύναμης εξώθησης ακολουθείται η διαδικασία που περιεγράφηκε παραπάνω:

Αρχικά υπολογίζεται η πραγματική παραμόρφωση:

$$\varphi_p = \ln \frac{A_0}{A_1} = \ln \frac{180^2 \cdot \pi/4}{15^2 \cdot \pi/4} = 4.96$$

Ο επιτρεπτός βαθμός παραμόρφωσης του AlMgSi 1 όπως φαίνεται στο πίνακα 5.1 για άμεση εξώθηση είναι ίσος με 5.5. Συνεπώς αφού  $\varphi_p < \varphi_{per}$  η διαδικασία της εξώθησης μπορεί να πραγματοποιηθεί χωρίς κίνδυνο, με μία μόνο διαδικασία.

Υπολογισμός ταχύτητας εξόδου

$$v_{ex} = \frac{60 \cdot v_p \cdot A_0}{10^3 \cdot A_1} = \frac{60 \cdot 2 \cdot 180^2 \cdot \pi/4}{10^3 \cdot 15 \cdot \pi/4} = 17.28 \text{ m/min}$$

Εφόσον πλέον είναι γνωστά η πραγματική παραμόρφωση και η ταχύτητα εξόδου, μπορεί να υπολογιστεί ο ρυθμός παραμόρφωσης για αρχική διάμετρο  $d_0=180\text{mm}$

$$\dot{\varphi} = \frac{6 \cdot v_p \cdot \varphi_p}{d_0} = \frac{6 \cdot 2 \cdot 4.96}{180} = 0.33 \text{ s}^{-1}$$

Στη θερμή παραμόρφωση η τάση ροής εξαρτάται από ρυθμό παραμόρφωσης, τη θερμοκρασία και το υλικό που χρησιμοποιείται.

$$k_{str} = k_{str1} \cdot \left( \frac{\dot{\varphi}}{\dot{\varphi}_1} \right)^m \text{ και για } \dot{\varphi}_1 = 1 \text{ η εξίσωση απλοποιείται σε}$$

$k_{str1}$  ( $\text{N/mm}^2$ ) τάση ροής στο τέλος της διαδικασίας με τη βέλτιστη θερμοκρασία παραμόρφωσης και βασική ταχύτητα  $\dot{\varphi} = 1 \text{ s}^{-1}$ . Υπολογίζεται από το πίνακα 5.2 για AlMgSi στους  $450^\circ\text{C}$ .

$m$ , εκθέτης του υλικού, λαμβάνεται εξίσου από πίνακα 5.2  
 Συνεπώς για AlMgSi στους 450°C  $m=0.108$ ,  $k_{str1}=48\text{N/mm}^2$   
 $k_{str}=k_{str1}\cdot\dot{\phi}^m \Rightarrow k_{str}=48\cdot0.33^{0.108}=42.58\text{ N/mm}^2$

Υπολογισμός Δύναμης

Η δύναμη στην άμεση εξώθηση ισούται με το άθροισμα της δύναμης παραμόρφωσης συν τη δύναμη λόγω τριβής.

$$F = \frac{A_0 \cdot k_{str} \cdot \phi_p}{\eta_F} + d_0 \cdot \pi \cdot l \cdot \mu \cdot k_{str} \Rightarrow F = \frac{180^2 \cdot \pi / 4 \cdot 42.57 \cdot 4.96}{0.5} + 180 \cdot \pi \cdot 475 \cdot 0.15 \cdot 42.57$$

$$F=12470\text{kN}$$

## Άσκηση 2

Για την κατασκευή τετραγωνικών διατομών διαστάσεων 20mm x 20mm με άμεση εξώθηση από Al99.5, δίνονται τα εξής δεδομένα: ταχύτητα εμβόλου 1.6mm/sec, πυκνότητα του υλικού 2.7kg/dm<sup>3</sup>, διάμετρος αρχικού τεμαχίου 200mm, μήκος αρχικού τεμαχίου 800mm, θερμοκρασία εξώθησης 450 °C, συντελεστής απόδοσης της παραμόρφωσης 0.4, συντελεστής τριβής 0.15. Ζητείται να υπολογιστούν: η ταχύτητα εξόδου της εξώθησης, η τάση ροής του υλικού στη συγκεκριμένη θερμοκρασία, η δύναμη εξώθησης, το έργο εξώθησης.

## Λύση

Λόγω της υψηλής θερμοκρασίας, συμπεραίνεται ότι η διαδικασία είναι θερμή, ενώ δίνεται από την άσκηση ως δεδομένο ότι πραγματοποιείται με άμεση εξώθηση.

Υπολογίζεται αρχικά η πραγματική παραμόρφωση

Το αρχικό τεμάχιο είναι μια ράβδος κυκλικής διατομής ενώ το τελικό προϊόν εξώθησης είναι ράβδος τετραγωνικής διατομής:

$$\phi_p = \ln \frac{A_0}{A_1} = \ln \frac{200^2 \cdot \pi / 4}{20 \cdot 20} = 4.36$$

Ο επιτρεπτός βαθμός παραμόρφωσης του Al99.5 όπως φαίνεται στο πίνακα 5.1 για άμεση εξώθηση είναι ίσος με 6.9. Συνεπώς αφού  $\phi_p < \phi_{per}$  η διαδικασία της εξώθησης μπορεί να πραγματοποιηθεί χωρίς κίνδυνο, με μία μόνο διαδικασία

Υπολογισμός ταχύτητας εξόδου

Η ταχύτητα του εμβόλου δίνεται  $v_p=1.6\text{mm/sec}$  συνεπώς, άμεσα υπολογίζεται και η ταχύτητα εξόδου της εξώθησης.

$$v_{ex} = \frac{60 \cdot v_p \cdot A_0}{10^3 \cdot A_1} = \frac{60 \cdot 1.6 \cdot 200^2 \cdot \pi / 4}{10^3 \cdot 20 \cdot 20} = 7.54\text{m/min}$$

Στη θερμή παραμόρφωση η τάση ροής εξαρτάται από ρυθμό παραμόρφωσης, τη θερμοκρασία και το υλικό που χρησιμοποιείται.

$$k_{str} = k_{str1} \cdot \left( \frac{\dot{\phi}}{\dot{\phi}_1} \right)^m \text{ και για } \dot{\phi}_1 = 1 \text{ η εξίσωση απλοποιείται σε } k_{str} = k_{str1} \cdot \dot{\phi}^m$$

$k_{str1}$  (N/mm<sup>2</sup>) τάση ροής στο τέλος της διαδικασίας με τη βέλτιστη θερμοκρασία παραμόρφωσης και βασική ταχύτητα  $\dot{\phi} = 1\text{ s}^{-1}$ . Υπολογίζεται από το πίνακα 5.3 για

Al99.5 στους 450°C.

$m$ , εκθέτης του υλικού, λαμβάνεται εξίσου από πίνακα 5.3

Για τον υπολογισμό λοιπόν της τάσης ροής είναι απαραίτητος ο ρυθμός παραμόρφωσης, ο οποίος υπολογίζεται ως εξής :

$$\dot{\phi} = \frac{6 \cdot v_p \cdot \phi_p}{d_0} = \frac{6 \cdot 1.6 \cdot 4.36}{200} = 0.21 \text{ s}^{-1}$$

Συνεπώς για Al99.5 στους 450°C  $m=0.159$ ,  $k_{str1}=24 \text{ N/mm}^2$

$$k_{str} = k_{str1} \cdot \dot{\phi}^m \Rightarrow k_{str} = 24 \cdot 0.21^{0.159} = 18.73 \text{ N/mm}^2$$

Η δύναμη στην άμεση εξώθηση ισούται με το άθροισμα της δύναμης παραμόρφωσης συν τη δύναμη λόγω τριβής

$$F = \frac{A_0 \cdot k_{str} \cdot \phi_p}{\eta_F} + d_0 \cdot \pi \cdot l \cdot \mu \cdot k_{str} \Rightarrow F = \frac{200^2 \cdot \pi / 4 \cdot 18.73 \cdot 4.36}{0.4} + 200 \cdot \pi \cdot 800 \cdot 0.15 \cdot 18.73 = 7825990$$

$$\approx 7826 \text{ kN}$$

Υπολογισμός Έργου Εξώθησης

Το έργο στην εξώθηση υπολογίζεται ως εξής

$$W = \frac{V_0 \cdot k_{str} \cdot \phi_p}{10^6 \cdot \eta_F} = \frac{200^2 \cdot \pi / 4 \cdot 800 \cdot 18.73 \cdot 4.36}{0.4} = 5131 \text{ kNm}$$

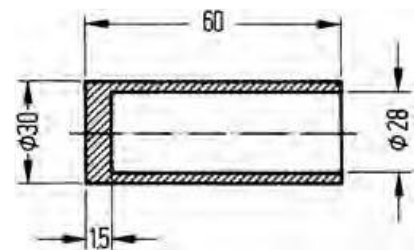
## Ψυχρή Εξώθηση

### Άσκηση 3

Σκοπός της άσκησης είναι η παραγωγή περιβλημάτων από Al 99.5 όπως φαίνεται στο σχήμα. Δίνεται  $\eta_F=0.7$ . Ζητείται να υπολογιστούν: οι διαστάσεις του αρχικού τεμαχίου, η δύναμη εξώθησης, το έργο εξώθησης.

### Λύση

Από την εικόνα του τελικού τεμαχίου διαπιστώνεται ότι η μέθοδος που χρησιμοποιείται για την κατασκευή των περιβλημάτων είναι εξώθηση προς τα πίσω, στην οποία το έμβολο είναι μικρότερης διαμέτρου από αυτή του θαλάμου.



Υπολογισμός αρχικού όγκου

Υπολογίζεται αρχικά ο όγκος του τελικού τεμαχίου, δοσμένων των διαστάσεων του από το σχήμα.

Για τον υπολογισμό του όγκου, το σχήμα μπορεί να θεωρηθεί σαν δύο τμήματα, ένας κοίλος κύλινδρος εκ περιστροφής με εξωτερική διάμετρο  $D_0=30 \text{ mm}$ , εσωτερική  $d=28 \text{ mm}$ , ύψος  $(60-1.5) \text{ mm}$  και ένας κύλινδρος διαμέτρου  $D=30 \text{ mm}$ , ύψους  $h_1=1.5 \text{ mm}$

$$V_{fin} = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot h_1}{4} + \frac{\pi \cdot (h - h_1) \cdot (D^2 - d^2)}{4}$$

$$V_{fin} = \frac{3.14 \cdot 30^2 \cdot 1.5}{4} + \frac{3.14 \cdot (60 - 1.5) \cdot (30^2 - 28^2)}{4} = 6386.7 \text{ mm}^3$$

Για την παραγωγή του τεμαχίου ο όγκος προσ αυξάνεται κατά 1% για αντιστάθμιση των απωλειών κατά τη διαμόρφωση (συγκολλήσεις ή διαρροές)

$$V' = \frac{1}{100} \cdot 6336 \text{ mm}^3 \cong 64 \text{ mm}^3$$

Υπολογίζεται ο αρχικός όγκος:

$$V_0 = V' + V_{\text{fin}} = 6386.7 + 64 = 6451 \text{ mm}^3$$

Υπολογισμός αρχικού ύψους

Το ακατέργαστο τεμάχιο έχει αρχική διάμετρο  $D_0 = 30 \text{ mm}$ . Συνεπώς το αρχικό του ύψος υπολογίζεται από τη σχέση

$$V_0 = A_0 \cdot h_0 \Rightarrow h_0 = \frac{V_0}{A_0} = \frac{6451}{\frac{\pi}{4} \cdot 30^2} = 9.13 \text{ mm}$$

### Δύναμη

Για να υπολογιστεί η δύναμη εξώθησης υπολογίζεται όπως και στις υπόλοιπες διαδικασίες ψυχρής παραμόρφωσης η πραγματική παραμόρφωση και η τάση ροής

Για την εξώθηση λεπτών τμημάτων μετάλλου η πραγματική παραμόρφωση υπολογίζεται ως εξής:

$$\varphi_p = \ln \frac{D_0}{D_0 - d} - 0.16 = \ln \frac{30}{30 - 28} - 0.16 = 2.70 - 0.16 = 2.54 \quad \varphi_p = 254\%$$

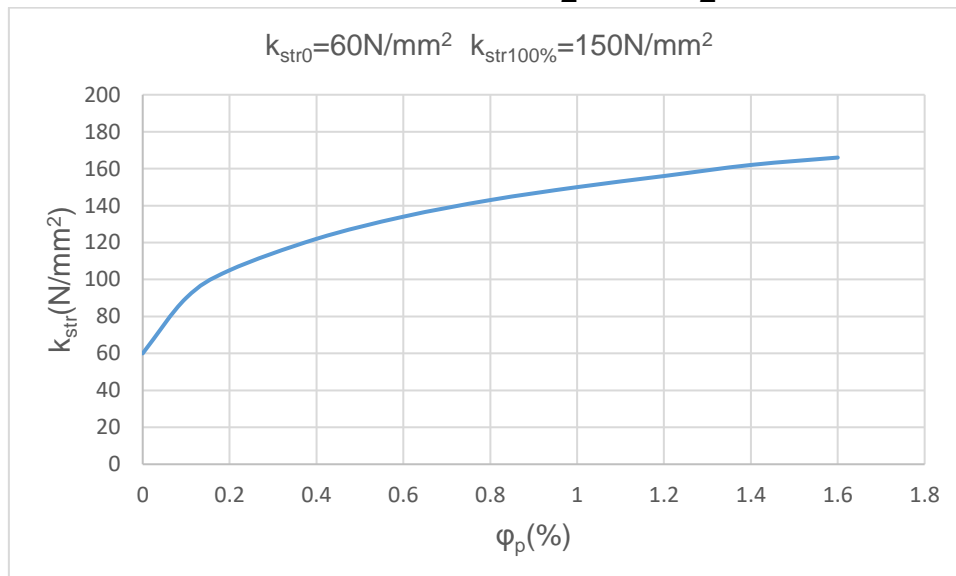
όπου  $D_0$  η αρχική διάμετρος ακατέργαστου τεμαχίου,  $d$  εσωτερική τελική διάμετρος.

Από πίνακα 5.3 φαίνεται ότι για ψυχρή εξώθηση προς τα πίσω η επιτρεπτή παραμόρφωση είναι ίση με  $\varphi_{\text{επ}} = 4.5$ . Συνεπώς αφού  $\varphi_p < \varphi_{\text{επ}}$ , η εξώθηση μπορεί να πραγματοποιηθεί με ασφάλεια.

Η τάση ροής του υλικού στο τέλος της διαμόρφωσης υπολογίζεται από τη καμπύλη εργοσκήρυσης για το υλικό Al 99.5.

για  $\varphi_p = 0$  η τάση ροής στην αρχή της διαμόρφωσης είναι ίση με  $k_{\text{str}0} = 60 \text{ N/mm}^2$ , ενώ για  $\varphi_p = 254\%$  από καμπύλη εργοσκήρυσης η τάση ροής υπολογίζεται  $k_{\text{str}1} = 184 \text{ N/mm}^2$ .

Υπολογίζεται η μέση τάση ροής  $k_{\text{strm}} = \frac{k_{\text{str}0} + k_{\text{str}1}}{2} = \frac{60 + 184}{2} = 122 \text{ N/mm}^2$



**διάγραμμα 5.1** Καμπύλη παραμόρφωσης για το υλικό Al 99.5 όπου  $k_{\text{str}} = k_{\text{str}100\%} \cdot \varphi_p^n = 150 \cdot \varphi_p^{0.222}$

Η δύναμη εξώθησης στην έμμεση εξώθηση για λεπτά τοιχώματα όπου  $D_0/s \geq 10$  υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$F = A_p \cdot \frac{k_{strm}}{\eta_F} (2 + 0.25 \cdot \frac{h_0}{s})$$

$A_p$  (mm<sup>2</sup>), το εμβαδόν της εγκάρσιας τομής της εσωτερικής κοιλότητας του τελικού τεμαχίου.  
 $D_0/s = 30/1 = 30$ mm (s το πάχος του τοιχώματος  $2s = D_0 - d = 30 - 28 = 2$ mm,  $s = 1$ mm)

$$F = \frac{28^2 \pi}{4} \cdot \frac{122}{0.7} (2 + 0.25 \cdot \frac{9.13}{1}) = 456 \text{ kN}$$

### Έργο

Κατά τη διαμόρφωση το έμβολο κινείται από το αρχικό ύψος του κομματιού  $h_0$  μέχρι το τελικό πάχος του πυθμένα του διαμορφωμένου τεμαχίου  $h_1$ . Συνεπώς η διαδρομή του εμβόλου είναι η :

$$s_w = h_0 - h_1 = 9.13 - 1.5 = 7.63 \text{ mm} = 0.00763 \text{ m}, h_1 = 1.5 \text{ mm λαμβάνεται η τιμή από την εικόνα}$$

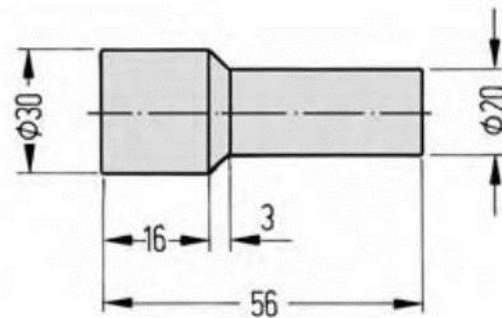
Υπολογίζεται το έργο

$$W = F \cdot s_w \cdot x, (x=1, \text{ συντελεστής διεργασίας})$$

$$W = 456 \cdot 0.00763 \cdot 1 = 3.47 \text{ kNm}$$

### Άσκηση 4

Σκοπός της άσκησης είναι η κατασκευή μπουλονιών από 42 CrMo4, όπως αυτό φαίνεται στο σχήμα. Ζητείται να προσδιοριστούν: η μέθοδος παραμόρφωσης, οι αρχικές διαστάσεις τεμαχίου, η δύναμη παραμόρφωσης, το έργο παραμόρφωσης. Δίνεται  $\eta_F = 0.7$



### Λύση

Αρχικός όγκος

Το προϊόν της παραμόρφωσης της εικόνας είναι κατασκευασμένο με τη μέθοδο ψυχρής άμεσης εξώθησης.

Οι διαστάσεις που προκύπτουν από την εικόνα είναι η διάμετρος της κεφαλής  $D_0 = 30$ mm, διάμετρος σώματος  $d = 20$ mm, ύψος κεφαλής  $h_{hd} = 3$ mm, συνολικό ύψος  $h = 56$ mm και το ύψος πάνω τμήματος  $h_k = 16$ mm.

Ο όγκος του κατεργασμένου τεμαχίου:

$$V_F = \frac{D_0^2 \cdot \pi}{4} \cdot h_k + \frac{\pi}{12} \cdot h_{hd} (D_0^2 + D_0 \cdot d + d^2) + \frac{d^2 \pi}{4} (h - (h_k + h_{hd})) =$$

$$= \frac{\pi}{4} [(D_0^2 h_k + \frac{h_{hd}}{3} (D_0^2 + D_0 \cdot d + d^2) + d^2 (h - (h_k + h_{hd}))]$$

$$0.785 [(30 \text{ mm})^2 \cdot 16 \text{ mm} + \frac{3 \text{ mm}}{3} (900 \text{ mm}^2 + 30 \text{ mm} \cdot 20 \text{ mm} + 400 \text{ mm}^2 + (20 \text{ mm})^2 \cdot 37 \text{ mm}]$$

$$V_F = 24413 \text{ mm}^3$$

Συνήθως στον όγκο  $V_F$  που υπολογίστηκε προστίθεται ένα ποσοστό  $V'$  ίσο με  $(1-2)\% \cdot V_F$  για να εξισορροπηθούν τυχόν απώλειες κατά την αποσκωρίωση και την τήξη. Έτσι ο συνολικός/αρχικός όγκος  $V_0$  του τεμαχίου προς παραμόρφωση υπολογίζεται ως εξής:

$$V_0 = V' + V_F = 24413 \cdot 2/100 + 24413 = 24901.26 \text{ mm}^3$$

Διαστάσεις αρχικού τεμαχίου

$$A_0 = \frac{(30\text{mm})^2 \pi}{4} = 706.5\text{mm}^2, h_0 = \frac{V_B}{A_0} = \frac{24901\text{mm}^3}{706.5\text{mm}^2} = 35.24\text{mm}$$

Επιλέγεται  $h_0 = 35\text{mm}$

Δύναμη

Για τον υπολογισμό της δύναμης σε ομογενής παραμόρφωση χωρίς τριβές υπολογίζεται αρχικά ο βαθμός παραμόρφωσης.

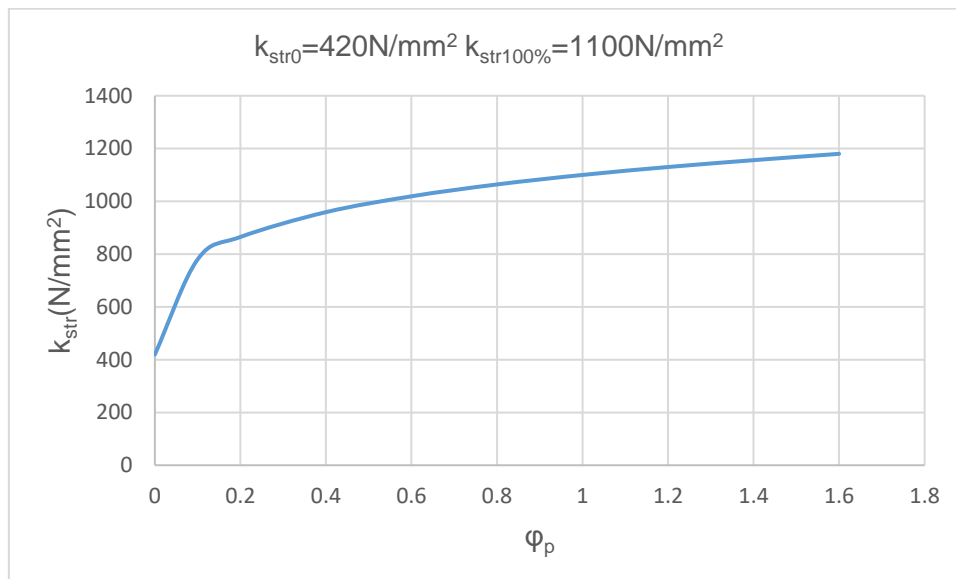
$$\phi_p = \ln \frac{A_0}{A_1} = \ln \frac{706.5\text{mm}^2}{314\text{mm}^2} = \ln 2.25 = 0.81, \phi_p = 81\%$$

$A_0$ , όπως υπολογίστηκε η αρχική επιφάνεια διατομής,

$$A_1 = \frac{\pi \cdot 20^2}{4} = 314\text{mm}^2, \text{ η τελική επιφάνεια διατομής τεμαχίου}$$

Από πίνακα 5.3 για άμεση εξώθηση  $\phi_p > \phi_{per}$  που σημαίνει ότι η εξώθηση θα πραγματοποιηθεί σε παραπάνω από μία διαδικασίες.

Για το βαθμό παραμόρφωσης που υπολογίστηκε, από την καμπύλη παραμόρφωσης του υλικού 42CrMo4, υπολογίζεται η αρχική τάση ροής  $k_{str0}$  στην αρχή της παραμόρφωσης για  $\phi_p = 0$  και η τελική τάση ροής  $k_{str1}$  στο τέλος της παραμόρφωσης για  $\phi_p = 81\%$ .



**διάγραμμα 3.** Καμπύλη παραμόρφωσης για το υλικό 42 CrMo4 όπου  $k_{str} = k_{str100\%} \cdot \phi_p^n = 1100 \cdot \phi_p^{0.149}$

Από τη καμπύλη παραμόρφωσης προκύπτει λοιπόν ότι για  $\phi_p = 0$   $k_{str0} = 420\text{ N/mm}^2$  και για  $\phi_p = 0.81$   $k_{str1} = 1080\text{ N/mm}^2$ . Υπολογίζεται η μέση τάση ροής

$$k_{strm} = \frac{k_{str0} + k_{str1}}{2} = \frac{420 + 1080}{2} = 750\text{N/mm}^2$$

Δύναμη εξώθησης

$$F = \frac{A_0 \cdot k_{strm} \cdot \phi_p}{\eta_F} = \frac{706.5 \cdot 750 \cdot 0.81}{0.7} = 6313141\text{N}, F = 613\text{kN}$$

Έργο εξώθησης

Το έργο εξώθησης υπολογίζεται από τη παρακάτω εξίσωση

$$W = F \cdot s_w \cdot x = 613 \cdot 0.019 \cdot 1 = 11.6 \text{ kNm}$$

για  $x=1$

η μετατόπιση της παραμόρφωσης  $s_w = h_0 - h_K = 35 - 16 = 19 \text{ mm} = 0.019 \text{ m}$

## 6. Απότμηση

### 6.1 Εισαγωγή στην Απότμηση

Η απότμηση είναι μία διαδικασία κοπής ελάσματος ή λωρίδας μετάλλου σε συγκεκριμένα μεγέθη, χωρίς τη δημιουργία αποβλήτου. Η κοπή τεμαχίου κατά μήκος μίας γραμμής, φέρει και το όνομα της διαδικασίας, δηλαδή απότμηση. Ανάλογα με το αν η κοπή πραγματοποιείται κατά μήκος κλειστής ή ανοικτής γραμμής υπάρχουν διάφοροι μέθοδοι απότμησης.

#### Απότμηση κατά μήκος ανοικτής γραμμής

Η απότμηση λωρίδας σε πιο στενό πλάτος μεταξύ περιστρεφόμενων λεπίδων ονομάζεται διαχωρισμός. Η μερική περικοπή κατά μήκος της γραμμής του ελάσματος, χωρίς την αφαίρεση υλικού είναι η τοπική διάτμηση (lancing). Η αποκοπή τμήματος της άκρης του ελάσματος ονομάζεται notching.

#### Απότμηση κατά μήκος κλειστής γραμμής

Η τομή είναι μια κλειστή γραμμή (π.χ. κύκλος, έλλειψη ή σύνθετη κλειστή γραμμή αποτελούμενη από ευθύγραμμα τμήματα και κυκλικά τόξα). Στην περίπτωση αυτή, η κοπή γίνεται πάντα σε πρέσες με ειδικά κοπτικά καλούπια. Το τελικό προϊόν μπορεί να είναι είτε το αποχωριζόμενο τεμάχιο (απότμηση), είτε το απομένον έλασμα. Στη πρώτη περίπτωση χαρακτηρίζεται ως blanking ενώ στη δεύτερη περίπτωση ως punching.

### 6.2 Διαδικασία της απότμησης

Η απότμηση χωρίζεται ουσιαστικά σε τρεις φάσεις. Στη πρώτη φάση κατά τη διάρκεια της οποίας, το κατεργαζόμενο μέταλλο συμπιέζεται και ελαφρώς παραμορφώνεται ανάμεσα στο έμβολο και τη μήτρα. Παρόλαυτα η τάση και η παραμόρφωση δεν υπερβαίνουν το όριο ελαστικότητας.

Στην επόμενη φάση, γνωστή ως ελαστική φάση, το λυγισμένο μέταλλο, πιέζεται περισσότερο προς το άνοιγμα της μήτρας από το έμβολο. Σε αυτό το σημείο της διαδικασίας το τεμάχιο προφανώς έχει παραμορφωθεί στο χείλος του, μεταξύ των κοπτικών άκρων του εμβόλου και της μήτρας. Αυτή η συγκέντρωση εξωτερικών δυνάμεων προκαλεί πλαστική παραμόρφωση στο χείλος του τεμαχίου. Στο τέλος αυτής της φάσης, η τάση στο κατεργαζόμενο υλικό, κοντά στις κοπτικές άκρες, φτάνει σε μία τιμή που ανταποκρίνεται στην αντοχή διάτμησης του υλικού, αν και το υλικό αντιστέκεται στη θραύση.

Κατά τη διάρκεια της τρίτης φάσης το τεμάχιο φτάνει στο όριο θραύσης του. Αρχικά εμφανίζονται μικρό ρωγμές οι οποίες μεγαλώνουν και έπεται ο διαχωρισμός των τμημάτων του τεμαχίου. Οι ρωγμές στο τεμάχιο ξεκινούν από την κοπτική άκρη του εμβόλου στην επάνω πλευρά του κατεργαζόμενου τεμαχίου, καθώς και από την άκρη της μήτρας στη κάτω πλευρά του τεμαχίου. Κάτω από αυτές τις συνθήκες οι ρωγμές εξαπλώνονται κατά μήκος των επιφανειών ολίσθησης μέχρι τον ολοκληρωτικό διαχωρισμό του τεμαχίου από το έλασμα.

Λαμβάνοντας υπόψιν τη διάτμηση του τεμαχίου, στην επάνω επιφάνεια του ελάσματος, όπου το έμβολο έρχεται σε επαφή με το προς κατεργασία τεμάχιο, δημιουργείται μια μικρή στρογγυλεμένη προεξοχή. Η δημιουργία αυτής της περιοχής ωφελείται στη συμπίεση που υπόκεινται το έλασμα από το έμβολο. Κάτω από αυτή τη περιοχή, βρίσκεται μία λειασμένη επιφάνεια η οποία έχει προέλθει από λόγω της τριβής της επιφάνειας διάτμησης με τα τοιχώματα της μήτρας και του εμβόλου. Στο τεμάχιο η λεία περιοχή βρίσκεται κάτω από τη στρογγυλεμένη περιοχή, ενώ σε σχέση με το αποκοπτόμενο έλασμα, εντοπίζεται στην πάνω του πλευρά. Κάτω από τη λεία περιοχή, βρίσκεται η ζώνη θραύσης και κάτω από

αυτή μία περιοχή με αιχμηρή ακμή, η οποία δημιουργείται στο τέλος της διαδικασίας λόγω της επιμήκυνσης του υλικού λίγο πριν αποκοπεί από το έλασμα. Το βάθος της ζώνης παραμόρφωσης εξαρτάται από την ολκιμότητα του ελάσματος. Μικρή ολκιμότητα συνεπάγεται μικρό βάθος της ζώνης. Το βάθος της διάτρησης του εμβόλου στο έλασμα είναι το άθροισμα του ύψους της καμπύλης περιοχής συν της λειασμένης περιοχής. Καθοριστικός παράγοντα του σχήματος και της ποιότητας του τελικού τεμαχίου αποτελεί η χάρη.

### 6.3 Χάρη της απότμησης

Χάρη ονομάζουμε το διάκενο που υπάρχει μεταξύ του εμβόλου και της μήτρας. Η χάρη είναι η σημαντικότερη παράμετρος της κοπής και αυτό γιατί επηρεάζει άμεσα τόσο το μέγεθος των κοπτικών δυνάμεων, όσο και το ποιοτικό αποτέλεσμα. Στις συνηθισμένες κατεργασίες κοπής, η κανονική τιμή

της χάρης (δηλαδή της διαφοράς μήτρας και εμβόλου) κυμαίνεται μεταξύ 5% και 15% του πάχους της λαμαρίνας. Οι μικρότερες τιμές ισχύουν για μαλακά μέταλλα (π.χ. αλουμίνιο, χαλκός) και για μικρά πάχη λαμαρίνας και οι μεγαλύτερες τιμές της χάρης για σκληρά μέταλλα και μεγάλα πάχη.

Το άνοιγμα της μήτρας πρέπει να είναι αρκετά μεγαλύτερο από το έμβολο για να δημιουργηθεί η κατάλληλη ρωγμή στο μέταλλο.

Όταν χρησιμοποιείται σωστή χάρη δημιουργείται ξεκάθαρη θραύση ως αποτέλεσμα της συνένωσης της θραύσης που δημιουργείται στο επάνω και κάτω τμήμα του μετάλλου.

Η χάρη αποτελεί το πιο βασικό παράγοντα που καθορίζει το σχήμα και τη ποιότητα της άκρης της αποτμημένης περιοχής (punched or blanked). Με την αύξηση της χάρης οι άκρες γίνονται τραχύτερες και η περιοχή παραμόρφωσης αυξάνεται. Το υλικό ωθείται προς τη περιοχή της χάρης και οι άκρες της ζώνης απότμησης (punched or blanked) στρογγυλεύουν. Παρόλαυτα, υπερβολικά μεγάλη τιμή της χάρης, υποβάλουν το έλασμα μετάλλου σε εφελκυστικές τάσεις αντί να υποβάλλεται σε παραμόρφωση απότμησης.

Χρήση σωστής χάρης ανάμεσα στις γωνίες κοπής μεταξύ των ακρών κοπής επιτρέπει στις θραύσεις να ξεκινήσουν ακριβώς από τη κοπτική ακμή του εμβόλου και της μήτρας. Οι θραύσεις προχωρούν η μία προς την άλλη στο τεμάχιο, μέχρι που τελικά συναντώνται και ως εκ τούτου η το σπασμένο τμήμα στην άκρη της απότμησης έχει ξεκάθαρη εμφάνιση.

Χάρη μεγαλύτερη από τη κανονική (μεταξύ 15-50% του πάχους του ελάσματος). Επιφέρει μεγάλη κάμψη του ελάσματος/ λαμαρίνας και αυτή μπορεί να σκιστεί στην καμπυλότητα της κάμψης, λόγω της ανάπτυξης εφελκυστικών τάσεων που ξεπερνούν το όριο αντοχής του υλικού σε εφελκυσμό. Παράλληλα με μεγάλη χάρη και μαλακό μέταλλο ευνοείται η δημιουργία γρεζιού.

Τιμή της χάρης ανεπαρκής. (μεταξύ 3-5% του πάχους του ελάσματος) Πρέπει να κοπούν επιπλέον στρώματα από το υλικό πριν πραγματοποιηθεί ολόκληρος ο διαχωρισμός και να συναντηθούν οι ρωγμές.

Η χάρη συνήθως εκφράζεται ως ποσοστό του πάχους του υλικού, αλλά συνήθως εκφράζεται με απόλυτες τιμές.

Υπάρχουν αναλυτικές μέθοδοι για το προσδιορισμό της χάρης διάτμησης, όπως για παράδειγμα η θεωρητική μέθοδος παρουσιάζει τη διάτμηση σαν συνάρτηση του πάχους του υλικού και της διατμητικής δύναμης του υλικού

|  |                     |               |
|--|---------------------|---------------|
| $u=0.007 \cdot s \cdot \sqrt{T_a}$             | $s \leq 3\text{mm}$ |               |
| $u = (0.007 \cdot s - 0.005) \cdot \sqrt{T_a}$ | $s \geq 3\text{mm}$ | (Εξίσωση 6.1) |

όπου:

$s$  (mm) πάχος του υλικού

$\tau_{\alpha}$  (N/mm<sup>2</sup>) αντοχή διάτμησης

#### 6.4 Μηχανική της απότμησης

Η δύναμη απότμησης κατά μήκος κλειστής γραμμής δίνεται από τη σχέση

$$F = A \cdot \tau_{\alpha}$$

(Εξίσωση 6.2)

όπου:

$A$  (mm<sup>2</sup>) επιφάνεια διάτμησης

$\tau_{\alpha}$  (N/mm<sup>2</sup>) αντοχή απότμησης

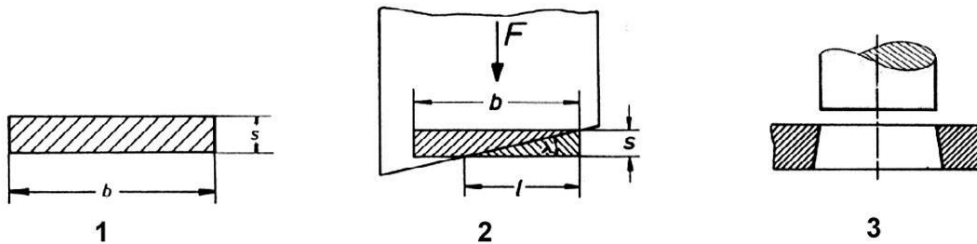
Υπολογισμός της επιφάνειας απότμησης  $A$ :

1: Για κοπή με οριζόντιο κοπτικό εργαλείο:  $A = b \cdot s$

2: Για κοπή με κεκλιμένο κοπτικό εργαλείο:  $A = \frac{l \cdot s}{2} = \frac{s^2}{2 \cdot \tan \lambda}$ ,

Η γωνία  $\lambda^\circ$  κυμαίνεται μεταξύ  $2^\circ$  και  $10^\circ$ ,  $\tan \lambda = s/l \Rightarrow s = l \cdot \tan \lambda$ , το ύψος της κλίσης του εμβόλου

3: Για κοπή κλειστού περιγράμματος:  $A = U \cdot s$ , όπου  $U$  (mm) το μήκος του περιγράμματος



Αν ο λόγος της διαμέτρου του εμβόλου με το πάχος του ελάσματος ξεπερνάει το 2, ( $d/s \geq 2$ ) η αντοχή διάτμησης υπολογίζεται από το όριο τάσης σε εφελκυσμού  $\sigma_B$  :

$$\tau_{\alpha} = 0.6 \dots 0.9 \cdot \sigma_B \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

μεταλλικά ελάσματα με υψηλή δυσθραυστότητα  $\tau_{\alpha} = 0.7 \cdot \sigma_B$  (N/mm<sup>2</sup>)

μεταλλικά ελάσματα με χαμηλή δυσθραυστότητα  $\tau_{\alpha} = 0.9 \cdot \sigma_B$  (N/mm<sup>2</sup>)

κατά προσέγγιση χρησιμοποιείται συνήθως  $\tau_{\alpha} = 0.8 \cdot \sigma_B$  (N/mm<sup>2</sup>)

Εναλλακτικά η αντοχή απότμησης για διάφορα υλικά λαμβάνεται και από το πίνακα 6.1

| Υλικό        | Αντοχή<br>Απότμησης<br>(N/mm <sup>2</sup> ) |        | T <sub>α</sub> |
|--------------|---|--------|----------------|
|              | μαλακό                                      | σκληρό |                |
| St12         | 240   | 300    |                |
| St13         | 240   | 300    |                |
| St14         | 250   | 320    |                |
| St37         | 310   | -      |                |
| St42         | 400   | -      |                |
| C10          | 280   |        |                |
| C20          | 320   | 380    |                |
| C30          | 400   | 500    |                |
| C60          | 550   | 720    |                |
| Ανοξ.Χάλυβας | 400   | 600    |                |
| Al99.5       | 70  | 150    |                |
| AlMgSi 1     | 200   | 250    |                |

Πίνακας 6.1 Αντοχή απότμησης για διάφορα υλικά

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται τυπικό διάγραμμα μεταβολής του φορτίου απότμησης συναρτήσει της

διαδρομής του εμβόλου. Στο διάγραμμα αυτό εντοπίζονται οι ακόλουθες περιοχές:

Περιοχή Ο-Α: Ελαστική παραμόρφωση

Περιοχή Α-Β: Έναρξη πλαστικής παραμόρφωσης με κράτυνση. Μέγιστη τιμή φορτίου στο σημείο Β.

Περιοχή Β-Γ: Μείωση του φορτίου λόγω ελάττωσης της επιφάνειας διάτμησης (η κράτυνση μπορεί να συνεχίζεται).

Περιοχή Γ-Δ: Εμφάνιση και ανάπτυξη ρωγμών. Ταχύτατη μείωση του φορτίου.

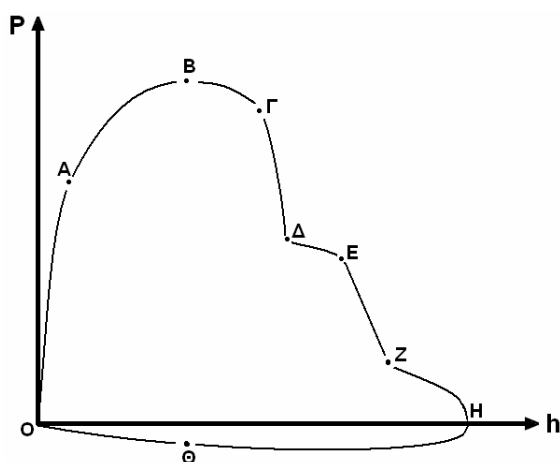
Περιοχή Δ-Ε: Υφίσταται αντίσταση τριβής μεταξύ τεμαχίου/μήτρας και εμβόλου/μήτρας.

Περιοχή Ε-Ζ: Υφίσταται τριβής κυρίως μεταξύ τεμαχίου/μήτρας. Αποχωρισμός του τεμαχίου στο σημείο Ζ.

Περιοχή Ζ-Η: Υφίσταται μόνο αντίσταση τριβής μεταξύ εμβόλου/μήτρας.

Περιοχή Η-Θ-Ο: Νεκρή διαδρομή κατά την επιστροφή του εμβόλου. Ανάπτυξη φορτίου για την

έξοδο του εμβόλου από το έλασμα



Σχήμα 6.1 Μεταβολή του φορτίου απότμησης με τη διαδρομή του εμβόλου

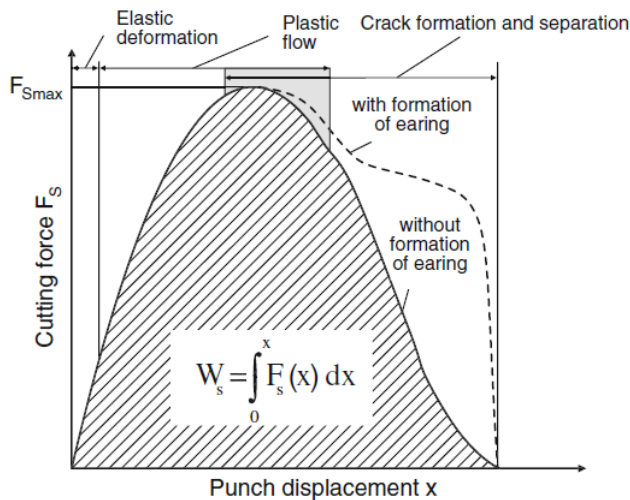
Το έργο της απότμησης εκφράζεται ως ένα ολοκλήρωμα :

$$W = \int_0^{x_g} F \cdot (x) dx \quad (\text{Εξίσωση 6.3α})$$

όπου:

$x_g$ , συντελεστής της διαδικασίας, προκύπτει από το διάγραμμα μετατόπισης της δύναμης. Στην απότμηση παίρνει συνήθως τη τιμή 0,6. Θεωρώντας ευθεία κοπή, η διαδρομή κοπής αντιστοιχεί περίπου στο πάχος ελάσματος  $s$ . Η παραπάνω εξίσωση μπορεί να γραφτεί και ως εξής:

$$W = s \cdot x_g \cdot F_a \quad (\text{Εξίσωση 6.3β})$$



**Σχήμα 6.2** Μετατόπιση του εμβόλου

## 6.5 Σημείο εφαρμογής της δύναμης απότμησης

Η μεταφορά δύναμης από το έμβολο στο τεμάχιο πρέπει να πραγματοποιείται χωρίς μόχλευση και χωρίς ροπή αποσυγχρονισμού. Ένα τέτοιου είδους φαινόμενο θα υπέβαλλε το τεμάχιο και τη πρέσσα σε μεγαλύτερες πιέσεις και μικρότερη ακρίβεια απότμησης. Για αυτό το λόγο είναι σημαντικό ο άξονας του πείρου στερέωσης να βρίσκεται στη σωστή θέση, στο κεντρικό σημείο (κέντρο βάρους) της δύναμης. Τέλος, αποφεύγεται η δημιουργία ζευγών δυνάμεων, τα οποία τείνουν να ανατρέψουν το έμβολο.

Καθώς η δύναμη υπολογίζεται από την περιφέρεια και το πάχος του υλικού, το κεντρικό σημείο

της δύναμης βρίσκεται στο κέντρο βαρύτητας της γραμμής περιφέρειας. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο ονομάζεται κέντρο βάρους.

Ανάλογα με τη διάταξη του σχήματος η εφαρμογή της δύναμης προσδιορίζεται με διαφορετικούς τρόπους.

### 1<sup>η</sup> περίπτωση: Διάταξη με ένα σχήμα

Αν το σχήμα δεν είναι συμμετρικό ως προς κάποιος άξονα, ορίζεται σύστημα συντεταγμένων  $X, Y$  και υπολογίζεται το μήκος και οι συντεταγμένες του μέσου των επιμέρους τμημάτων της διάταξης. Το σημείο εφαρμογής της δύναμης βρίσκεται στο κέντρο βάρους του αντικειμένου και προκύπτει από τη παρακάτω σχέση

$$x_0 = \frac{x_1 \cdot L_1 + x_2 \cdot L_2 + x_3 \cdot L_3 + x_4 \cdot L_4 + x_i \cdot L_i}{L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_i} \quad (\text{Εξίσωση 6.4α})$$

και

$$y_0 = \frac{y_1 \cdot L_1 + y_2 \cdot L_2 + y_3 \cdot L_3 + y_4 \cdot L_4 + y_i \cdot L_i}{L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_i} \quad (\text{Εξίσωση 6.4β})$$

όπου

$L_i$  το μήκος του επιμέρους τμήματος

$x_i$  οι συντεταγμένες των μέσων των τμημάτων στον άξονα X

$y_i$  οι συντεταγμένες των μέσων των τμημάτων στον άξονα Y

$S(x_0, y_0)$  το σημείο εφαρμογής της δύναμης απότμησης

## 2η περίπτωση: Διάταξη με παραπάνω σχήματα

Στη περίπτωση που η διάταξη αποτελείται από παραπάνω του ενός σχήματα, χωρίς καθορισμένη διάταξη, ορίζεται πάλι σύστημα συντεταγμένων X,Y , με αρχή των αξόνων κοινή για όλα τα σχήματα. Υπολογίζεται για κάθε σχήμα ξεχωριστά η περίμετρος του και οι συντεταγμένες του κέντρου βάρους τους. Σε αυτή τη περίπτωση γίνεται χρήση των παρακάτω τύπων

$$x_0 = \frac{x_1 \cdot U_1 + x_2 \cdot U_2 + x_3 \cdot U_3 + x_4 \cdot U_4 + x_i \cdot U_i}{U_1 + U_2 + U_3 + U_4 + U_i} \quad (\text{Εξίσωση 6.5α})$$

και

$$y_0 = \frac{y_1 \cdot U_1 + y_2 \cdot U_2 + y_3 \cdot U_3 + y_4 \cdot U_4 + y_i \cdot U_i}{U_1 + U_2 + U_3 + U_4 + U_i} \quad (\text{Εξίσωση 6.5β})$$

Στη προκειμένη περίπτωση

$x_i$  , οι συντεταγμένες του κέντρου βάρους του i σχήματος στον άξονα X

$y_i$  οι συντεταγμένες του κέντρου βάρους του i σχήματος στον άξονα Y

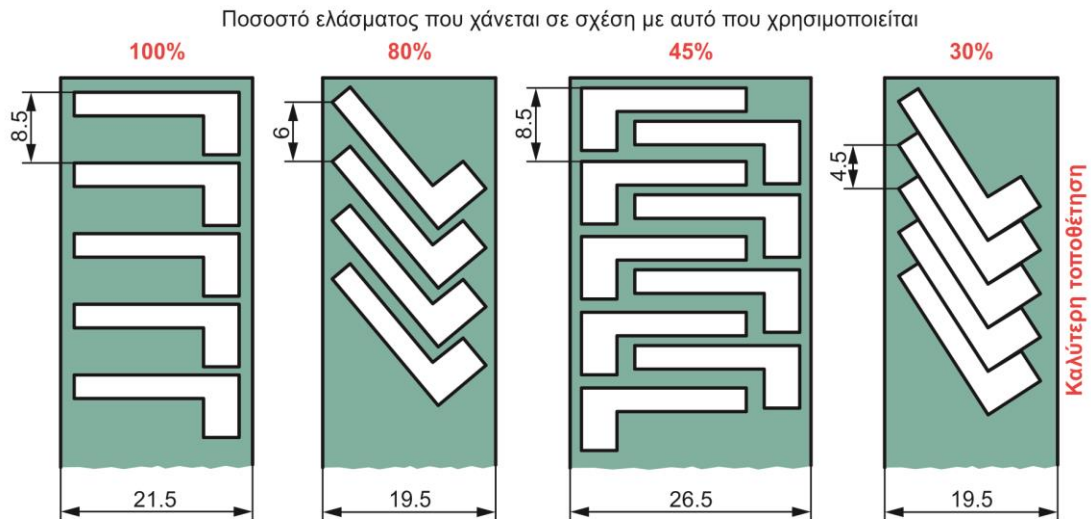
$U_i$  η περίμετρος του εκάστοτε τεμαχίου

$S(x_0, y_0)$  το σημείο εφαρμογής της δύναμης απότμησης

## **6.6 Συντελεστής εκμετάλλευσης**

Τα τεμάχια πρέπει να σχεδιάζονται με τη μικρότερη δυνατή επιφάνεια, δηλαδή το σχήμα τους πρέπει να είναι τέτοιο ώστε να παρατάσσονται ή να εμπερικλείονται το ένα στο άλλο, στη λωρίδα μετάλλου, με σκοπό την εξασφάλιση του ελάχιστου δυνατού αποβλήτου. Η καλύτερη δυνατή αξιοποίηση του υλικού γίνεται όταν οι επιφάνειες των σχημάτων αλληλοσυνδέονται πλήρως, δηλαδή αποκόπτονται από τη λωρίδα μετάλλου χωρίς να αφήνουν αχρησιμοποίητο υλικό. Το αρνητικό βέβαια αυτής της μεθόδου είναι ότι εμφανίζονται θραύσματα και στις δύο πλευρές του τεμαχίου και συνεπώς ο σχεδιασμός των μηχανημάτων απότμησης για αυτή τη διαδικασία είναι αρκετά περίπλοκος.

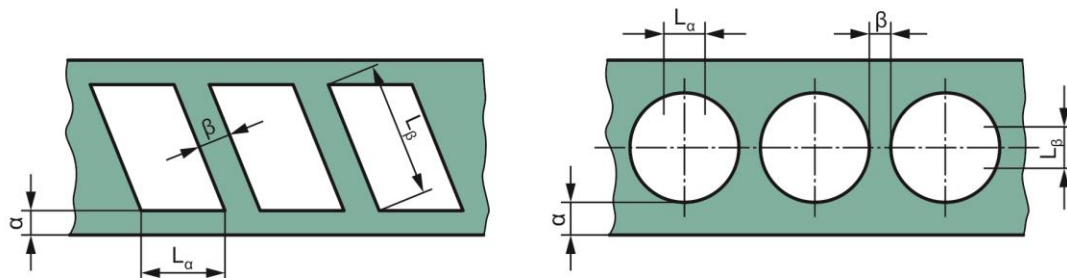
Τα τεμάχια προς κατεργασία σε σχήμα L, παράγονται συνήθως σε γωνιακή διάταξη όπως στο σχήμα 6.3



**Σχήμα 6.3** Συντελεστής εκμετάλλευσης υλικού, διάταξη τύπου L

Στο Σχήμα 6.3 παρουσιάζονται τέσσερις πιθανές διατάξεις τεμαχίων σχήματος L. Στη πρώτη ορθογωνική διάταξη, α, αξιοποιείται το 62.5% της ελασματοταινίας. Στη δεύτερη περίπτωση, β, στη διάταξη υπό γωνία, αξιοποιείται το 76,5% της ελασματοταινίας. Στη τρίτη περίπτωση αξιοποιείται το 81.8%. Η μέγιστη οικονομία υλικού επιτυγχάνεται στη τέταρτη περίπτωση, δ, αλλά ο σχεδιασμός της μήτρας και η παραγωγή τους είναι αρκετά πιο περίπλοκη από τις προηγούμενες διατάξεις.

Τετραγωνικά τεμάχια συνήθως ταξινομούνται σε ευθεία διάταξη. Τεμάχια προς κατεργασία σε σχήμα T, U και W μπορούν να παραχθούν οικονομικά αν στοιχισθούν αντεστραμμένα.



**Σχήμα 6.4** Περιθώρια απότμησης, διάταξη σχημάτων

Ένας πολύ σημαντικός παράγοντας, στη διάταξη της λωρίδας είναι η απόσταση ανάμεσα στα πιο κοντινά σημεία των ακατέργαστων τεμαχίων αλλά και από τις άκρες των λωριδών. Με σκοπό να αποφεύγεται το σφήνωμα και η περιστροφή των υπολειμμάτων των τεμαχίων ανάμεσα στο έμβολο και τη μήτρα, η απόσταση αυξάνεται με την αύξηση του πάχους του μετάλλου.

Το πλάτος της ελασματοταινίας εξαρτάται από το είδος του υλικού καθώς και από το μήκος της ελασματοταινίας. Σε κάθε περίπτωση, είναι σημαντικό να λαμβάνεται υπόψιν κατά πόσο οι οικονομίες που αφορούν το υλικό δεν ανατρέπονται από το υψηλό κόστος διεργασίας στη μήτρα.

Δεδομένου ότι ο συντελεστής εκμετάλλευσης του ελάσματος ορίζεται ως ο λόγος του εμβαδού του τεμαχίου, προς το εμβαδόν του διατιθέμενου ελάσματος, ο συντελεστής εκμετάλλευσης του υλικού δίνεται από τη σχέση:

$$\xi = \frac{n \cdot A}{L \cdot W}$$

(Εξίσωση 6.6)

όπου :

$n$  (-) το πλήθος των τεμαχίων που παράγονται από μία ελασματοταινία

$A$  (mm<sup>2</sup>) το εμβαδόν της επιφάνειας διαμόρφωσης που αποκόπτεται

$L$  (mm) μήκος διατιθέμενου ελάσματος

$W$  (mm) πλάτος διατιθέμενου ελάσματος

Το πλήθος των τεμαχίων ( $n$ ) που παράγονται από μία ελασματοταινία:

$$n = \frac{L}{L_a + \beta}$$

(Εξίσωση 6.7)

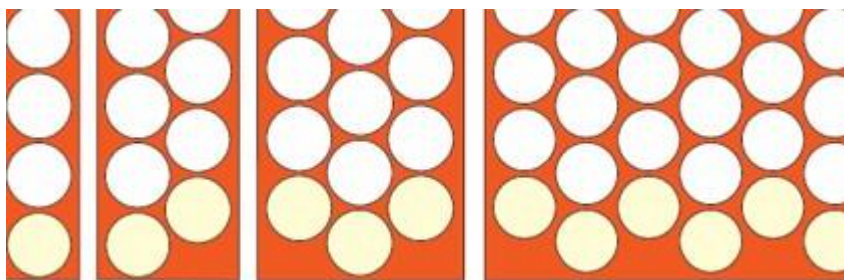
όπου :

$L$  (mm) το μήκος του διατιθέμενου ελάσματος

$L_a$  (mm) το μήκος της διαμόρφωσης

$\beta$  (mm) απόσταση ανάμεσα στις διαμορφώσεις

Για μεγέθη που αντιστοιχούν σε εκείνα όπως στο σχήμα 6.5, ο συντελεστής εκμετάλλευσης για κυκλικά τεμάχια διατεταγμένα σε  $n$  σειρές της ελασματοταινίας, υπολογίζεται ως εξής :



**Σχήμα 6.5** Κυλινδρική διάταξη σε  $n$  σειρές

$$\xi = \frac{n \cdot A}{V \cdot W} = \frac{v \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2}{(d + \beta) \cdot W}$$

(Εξίσωση 6.8)

όπου:

$a_R$  (mm) η απόσταση μεταξύ των σειρών  $a_R = \sin \theta \cdot V$ ,  $\theta = 60^\circ$  για διάταξη κυκλικών τεμαχίων

$\xi$ , ο συντελεστής εκμετάλλευσης του υλικού

$v$ , το πλήθος των σειρών που είναι διατεταγμένα τα κατεργαζόμενα τεμάχια

$A$  (mm<sup>2</sup>), το εμβαδόν της επιφάνειας διαμόρφωσης που αποκόπτεται

$V$  (mm), βήμα, μήκος που απαιτείται για τη παραγωγή ενός τεμαχίου, υπολογίζεται ως το άθροισμα της διαμέτρου συν την απόσταση των κατεργαζόμενων τεμαχίων ( $d + e$ )

$W$  (mm) πλάτος διατιθέμενου ελάσματος

Το πλάτος  $W$  διατιθέμενου ελάσματος υπολογίζεται :

$$W = 2 \cdot a + 2 \frac{d}{2} + (v-1) \cdot a_R = 2 \cdot a + d + (v-1) \cdot 0.866 \cdot V$$

(Εξίσωση 6.9)

Ποσοστιαία η μεγαλύτερη εξοικονόμηση γίνεται με τη μετάβαση από μία σειρά σε δύο ή τρεις σειρές, καθώς γενικά όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των σειρών των οπών, τόσο πιο ευνοϊκή είναι η συνολική αξιοποίηση του υλικού.

Ο πίνακας 6.2 δίνει προτεινόμενες τιμές των περιθωρίων στην απότμηση

| πάχος<br>$s$<br>(mm) | πλάτος<br>στελέχους<br>$e$ (mm)<br>πλάτος<br>περιθωρίου<br>$a$ (mm) | πλάτος ελάσματος $W$<br>(mm)    |         |          |        |                                   |         |          |        |
|----------------------|---|---------------------------------|---------|----------|--------|-----------------------------------|---------|----------|--------|
|                      |   | $W \leq 100$ (mm)               |         |          |        | $W \in (100,200]$ (mm)            |         |          |        |
|                      |   | πλάτος στελέχους $L_\beta$ (mm) |         |          |        | πλάτος περιθωρίου $L_\alpha$ (mm) |         |          |        |
|                      |   | $\leq 10$                       | (10,50] | (50,100] | $>100$ | $\leq 10$                         | (10,50] | (50,100] | $>100$ |
| 0.3                  | $\beta$   | 0.8                             | 1.2     | 1.4      | 1.6    | 1.0                               | 1.4     | 1.6      | 1.8    |
|                      | $\alpha$  | 0.9                             | 1.5     | 1.7      | 1.9    | 1.1                               | 1.7     | 1.9      | 2.2    |
| 0.5                  | $\beta$   | 0.8                             | 0.9     | 1.0      | 1.2    | 1.0                               | 1.0     | 1.2      | 1.4    |
|                      | $\alpha$  | 0.9                             | 1.0     | 1.2      | 1.5    | 1.1                               | 1.2     | 1.5      | 1.7    |
| 0.75                 | $\beta=\alpha$  | 0.9                             | 1.0     | 1.2      | 1.4    | 1.0                               | 1.2     | 1.4      | 1.6    |
| 1.0                  | $\beta=\alpha$  | 1.0                             | 1.1     | 1.3      | 1.5    | 1.1                               | 1.3     | 1.5      | 1.7    |
| 1.5                  | $\beta=\alpha$  | 1.3                             | 1.4     | 1.6      | 1.8    | 1.4                               | 1.6     | 1.8      | 2.0    |
| 2.0                  | $\beta=\alpha$  | 1.6                             | 1.7     | 1.9      | 2.1    | 1.7                               | 1.9     | 2.1      | 2.3    |

**Πίνακας 6.2** Περιθώρια στην απότμηση

## 6.7 Δύναμη εξόλκευσης

Η δύναμη που απαιτείται για να αφαιρεθεί το τεμάχιο από τη μήτρα, ονομάζεται δύναμη εξόλκευσης και αποτελεί το 3 με 5% της δύναμης απότμησης όταν ο λόγος της διαμέτρου του εμβόλου  $d$  προς το πάχος του μετάλλου  $s$  είναι περίπου ίσος με 10 ( $d/s=10$ ). Στη περίπτωση που ο λόγος  $d/s < 10$  η δύναμη εξόλκευσης αυξάνεται σημαντικά. Πιο συγκεκριμένα για  $d/s=2$ , η δύναμη εξόλκευσης ανέρχεται στο 10 με 20% της δύναμης απότμησης, ενώ το ποσοστό αυτό μειώνεται με την αύξηση του λόγου. Όσο πιο σκληρό είναι το υλικό τόσο μεγαλύτερη είναι η δύναμη εξόλκευσης που απαιτείται, ενώ στα πιο ψαθυρά υλικά απαιτείται μικρότερη δύναμη εξόλκευσης.

Η δύναμη εξόλκευσης αποτελεί ένα παράγοντα που πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν κατά το σχεδιασμό του εμβόλου και της μήτρας

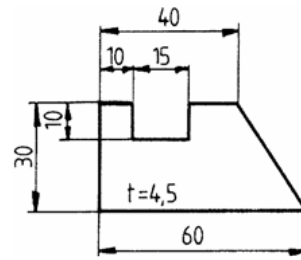
## 6.8 Ασκήσεις

### Άσκηση 1

Το εικονιζόμενο τμήμα μετάλλου υπόκειται σε απότμηση για τη παραγωγή του. Το πάχος του μετάλλου είναι 4.5mm. Η αντοχή σε εφελκυσμό δίνεται  $\sigma_B=420 \text{ N/mm}^2$  και η γωνία κλίσης  $5^\circ$ .

Να υπολογιστούν:

- η απαραίτητη δύναμη κοπής σε οριζόντιο κοπτικό εργαλείο
- η απαραίτητη δύναμη κοπής σε κεκλιμένο κοπτικό εργαλείο



### Λύση

Η δύναμη απότμησης κατά μήκος κλειστής γραμμής δίνεται από το τύπο  $F = A \cdot \tau_\alpha$

Για κοπή κλειστού περιγράμματος με κοπτικό εργαλείο χωρίς κλίση η επιφάνεια διάτμησης:

$A = U \cdot s$ , όπου  $s$  το πάχος του ελάσματος και  $U$  το μήκος του περιγράμματος.

$$F = U \cdot s \cdot \tau_\alpha$$

Η περίμετρος του σχήματος υπολογίζεται:

$$U = 60 + 30 + 10 + 10 + 15 + 10 + 15 + \sqrt{20^2 + 30^2} = 186.06 \text{ mm}$$

$\tau_\alpha$  η αντοχή απότμησης

κατά προσέγγιση  $\tau_\alpha = 0.8 \cdot \sigma_B$

$$\tau_\alpha = 0.8 \cdot 420 = 336 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Άρα } F = 186.06 \text{ mm} \cdot 4.5 \text{ mm} \cdot 336 \text{ N/mm}^2 = 281.3 \text{ kN}$$

Η δύναμη απότμησης κατά μήκος κλειστής γραμμής δίνεται από το τύπο  $F = A \cdot \tau_B$

Για κοπή με κεκλιμένο κοπτικό εργαλείο η επιφάνεια απότμησης :  $A = \frac{l \cdot s}{2} = \frac{s^2}{2 \cdot \tan \lambda}$  ,

$$\lambda = (2^\circ - 10^\circ)$$

Υπολογισμός επιφάνειας απότμησης

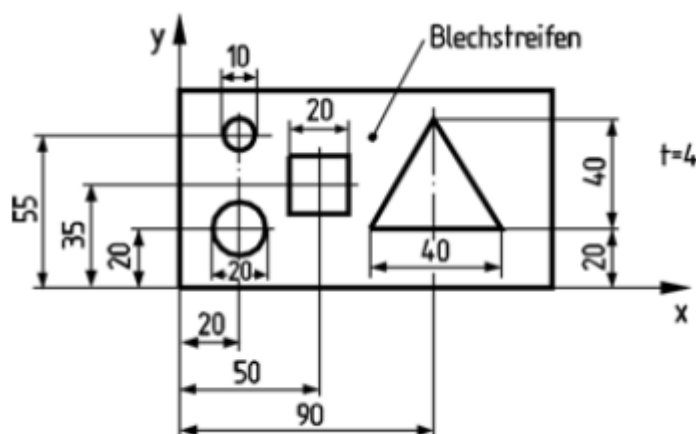
$$A = \frac{1}{2} \cdot \frac{4.5^2}{\tan 5^\circ} = 115.84 \text{ mm}^2 \quad \tau_\alpha = 0.8 \cdot \sigma_B$$

Άρα η δύναμη τελικά υπολογίζεται:

$$F = 115.84 \text{ mm}^2 \cdot 0.8 \cdot 420 \text{ N/mm}^2 = 38.9 \text{ kN}$$

### Άσκηση 2

Ζητείται το σημείο εφαρμογής της δύναμης για την απότμηση της διαμόρφωσης του παρακάτω σχήματος



### Λύση:

Στο παραπάνω γράφημα απεικονίζονται τέσσερα σχήματα με διαφορετικές διαστάσεις. Η επίλυση της άσκησης για την εύρεση του σημείου εφαρμογής της δύναμης, πραγματοποιείται σύμφωνα με τη δεύτερη περίπτωση.

$$x_0 = \frac{x_1 \cdot U_1 + x_2 \cdot U_2 + x_3 \cdot U_3 + x_4 \cdot U_4 + x_i \cdot U_i}{U_1 + U_2 + U_3 + U_4 + U_i}$$

$$y_0 = \frac{y_1 \cdot U_1 + y_2 \cdot U_2 + y_3 \cdot U_3 + y_4 \cdot U_4 + y_i \cdot U_i}{U_1 + U_2 + U_3 + U_4 + U_i}$$

Υπολογίζεται η περίμετρος του κάθε σχήματος:

Περίμετρος μικρού κύκλου  $U_1 = \pi \cdot D = 3.14 \cdot 10 = 31.4 \text{ mm}$

Περίμετρος μεγάλου κύκλου  $U_2 = \pi \cdot D = 3.14 \cdot 20 = 62.8 \text{ mm}$

Περίμετρος τριγώνου  $U_3 = 40 + 2 \cdot \sqrt{20^2 + 40^2} = 129.443 \text{ mm}$

Περίμετρος τετραγώνου  $U_4 = 20 \cdot 4 = 80 \text{ mm}$

Από την εικόνα λαμβάνονται οι τιμές του κέντρου βάρους του κάθε σχήματος στον άξονα X

$x_1 = 20 \text{ mm}$

$x_2 = 20 \text{ mm}$

$x_3 = 90 \text{ mm}$

$x_4 = 50 \text{ mm}$

Από την εικόνα λαμβάνονται και υπολογίζονται οι τιμές του κέντρου βάρους του κάθε σχήματος στον άξονα Y

$y_1 = 55 \text{ mm}$

$y_2 = 20 \text{ mm}$

$y_3 = 33.32 \text{ mm}$

$y_4 = 35 \text{ mm}$

Εφαρμόζοντας τους παραπάνω τύπους, προκύπτει το σημείο εφαρμογής της δύναμης απότμησης  $S(x_0, y_0)$ .

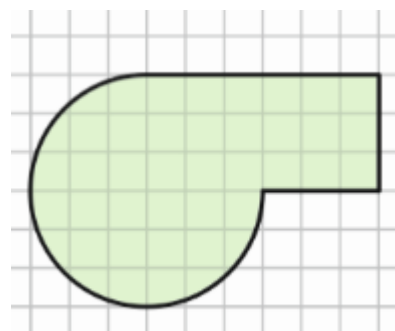
$$x_0 = \frac{31.14 \cdot 20 + 62.8 \cdot 20 + 129.44 \cdot 90 + 80 \cdot 50}{129.44 + 80 + 62.8 + 31.14} = 57.75 \text{ mm}$$

$$y_0 = \frac{31.14 \cdot 55 + 62.8 \cdot 20 + 129.44 \cdot 33.32 + 80 \cdot 35}{129.44 + 80 + 62.8 + 31.14} = 33.25 \text{ mm}$$

Τελικά  $S(x_0, y_0) = S(57.75, 33.25)$

### Άσκηση 3

Ζητείται το σημείο εφαρμογής της δύναμης για την απότμηση των διαμορφώσεων του σχήματος



### Λύση:

Επιλέγεται σύστημα συντεταγμένων X-Y με αρχή των αξόνων το κέντρο του κύκλου. Το συγκεκριμένο σχήμα δεν είναι συμμετρικό ως προς τους άξονες συνεπώς πρέπει να βρεθεί το γραμμικό κέντρο βάρους του. Αρχικά, το σχήμα χωρίζεται σε επιμέρους τμήματα με σκοπό να υπολογιστεί το εκάστοτε μήκος και έπειτα να ευρεθεί το μέσο καθώς και οι συντεταγμένες των μέσων τους.

Διαστάσεις τεμαχίου  $R=30\text{mm}$

Συνολικό μήκος  $L=90\text{mm}$

1<sup>ο</sup> τμήμα: Ημικύκλιο 1: Μήκος ημικυκλίου :  $L_1=\pi \cdot R=3.14 \cdot 30=94.2\text{mm}$ . Το μέσο του ημικυκλίου είναι το σημείο A και έχει συντεταγμένες:  $x_1=-30\text{mm}$ ,  $y_1=0$

2<sup>ο</sup> τμήμα: Τεταρτοκύκλιο: Μήκος τεταρτοκύκλιου  $L_2=\pi \cdot R/4=3.14 \cdot 3/4=23.55\text{mm}$ . Το μέσο του τεταρτοκύκλιου είναι το σημείο M με συντεταγμένες  $x_2=-21.2$ ,  $y_2=-21.2$

$M(x,y)$  ανήκει στο κύκλο  $C$   $x^2+y^2=R^2$  και  $\varphi \in [0,2\pi)$ , άρα συντεταγμένες του σημείου είναι  $x=R\cos\varphi$ ,  $y=R\sin\varphi$  όπου  $\varphi=7\pi/4$

3<sup>ο</sup> και 4<sup>ο</sup> τμήμα: Ευθύγραμμο τμήμα: Μήκος ευθ. τμήματος  $L_3=L_4=30\text{mm}$ , με συντεταγμένες  $x_3=45$   $y_3=0$ ,  $x_4=60$   $y_4=15$  αντίστοιχα.

5<sup>ο</sup> τμήμα: Ευθύγραμμο τμήμα: Μήκος ευθ. τμήματος  $L_5=60\text{mm}$ , με συντεταγμένες  $x_5=25$   $y_5=30$

Αφού έχουν υπολογιστεί τα κέντρα των επιμέρους τμημάτων, υπολογίζεται το κέντρο βάρους του σχήματος, άρα και το σημείο εφαρμογής της δύναμης.

$$x_0 = \frac{L_1 \cdot x_1 + L_2 \cdot x_2 + L_3 \cdot x_3 + L_4 \cdot x_4 + L_5 \cdot x_5}{L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_5}, \quad y_0 = \frac{L_1 \cdot y_1 + L_2 \cdot y_2 + L_3 \cdot y_3 + L_4 \cdot y_4 + L_5 \cdot y_5}{L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_5}$$

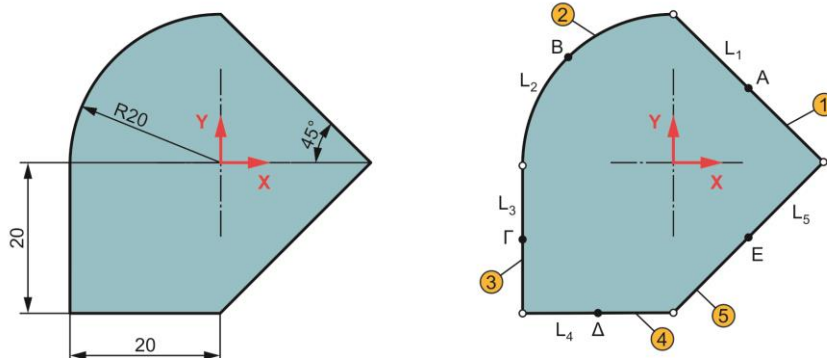
$$x_0 = \frac{94.2 \cdot (-30) + 23.55 \cdot (-21.2) + 30 \cdot (45) + 30 \cdot (60) + 60 \cdot (25)}{94.2 + 23.55 + 30 + 30 + 60} = 5.57$$

$$y_0 = \frac{(94.2 \cdot 0) + (23.55 \cdot (-21.2)) + (30 \cdot 0) + (30 \cdot 15) + 60 \cdot 30}{94.2 + 23.55 + 30 + 30 + 60} = 7.36$$

Συνεπώς το σημείο εφαρμογής της δύναμης  $S(x_0, y_0)$  έχει συντεταγμένες  $x_0=5.57$ ,  $y_0=7.36$

### Άσκηση 4

Να συμπληρωθούν οι σχέσεις για τον υπολογισμό του σημείου εφαρμογής της δύναμης για την απότμηση της διαμόρφωσης του σχήματος.



### Λύση:

Επιλέγεται σύστημα συντεταγμένων Χ-Υ με αρχή των αξόνων όπως φαίνεται στην εικόνα του δοσμένου σχήματος. Το συγκεκριμένο σχήμα δεν είναι συμμετρικό ως προς τους άξονες συνεπώς πρέπει να βρεθεί το γραμμικό κέντρο βάρους του. Αρχικά, το σχήμα χωρίζεται σε επιμέρους τμήματα με σκοπό να υπολογιστεί το εκάστοτε μήκος και έπειτα να ευρεθεί το μέσο καθώς και οι συντεταγμένες των μέσων τους

Το μήκος  $L_1$  αποτελεί την υποτείνουσα ορθογώνιου ισοσκελούς τριγώνου.

Η πλευρά που συμπίπτει με τον άξονα Ψ είναι και ίση με ακτίνα κύκλου R20

Συνεπώς :  $\sin 45^\circ = R20/L_1 \Rightarrow L_1 = 20/(\sqrt{2}/2) = 28.28\text{mm}$

Το μήκος  $L_2$  αποτελεί τεταρτημόριου κύκλου ακτίνας R20 με κέντρο την αρχή των αξόνων.

Συνεπώς:  $L_2 = \pi \cdot R/4 = 3.14 \cdot 20/4 = 15.7\text{mm}$

Το μήκος  $L_3$  καθώς και το μήκος  $L_4$  δίνονται από την άσκηση  $L_3 = L_4 = 20\text{mm}$

Το μήκος  $L_5$  αποτελεί υποτείνουσα ορθογώνιου τριγώνου, δοσμένης πλευράς μήκους 20mm

ενώ η άλλη υπολογίζεται μέσω του συνημιτόνου του τριγώνου που χρησιμοποιήθηκε για την εύρεση μήκους  $L_1$ . Έστω το όνομα της πλευράς που θα βρεθεί OK. Δηλαδή  $\cos 45^\circ = OK/L_1$ .

$L_1 \Rightarrow OK = \cos 45^\circ \cdot L_1 \Rightarrow OK = 19.996 \approx 20\text{mm}$ . Άρα υπολογίζεται το  $L_5 = \sqrt{20^2 + 20^2} = 28.28\text{mm}$

Υπολογισμός Συντεταγμένων μέσων.

Εφόσον βρέθηκαν τα μήκη σημειώνονται οι συντεταγμένες των σημείων πάνω στο σχήμα  
Δηλαδή K(28.28,0), Λ(0,20), Μ(-20,0), Ν(-20,-20), Ξ(0,-20)

Το μέσον ευθύγραμμου τμήματος υπολογίζεται  $x = \frac{x_1 + x_2}{2}$  και  $y = \frac{y_1 + y_2}{2}$

Το μέσο του  $L_1$  είναι το σημείο Α με συντεταγμένες Α(14.14,10)=( $x_1, y_1$ )

Το μέσο του  $L_2$  είναι το σημείο Β με συντεταγμένες Β(-14.14, 14.14)=( $x_2, y_2$ )

$B(x,y)$  ανήκει στο κύκλο  $C$   $x^2 + y^2 = R^2$  και  $\varphi \in [0, 2\pi)$ , άρα συντεταγμένες του σημείου είναι  $x = R \cos \varphi$ ,  $y = R \sin \varphi$  όπου  $\varphi = 3\pi/4$

$x = R \cos \varphi \Rightarrow 20 \cdot (-0.707) = -14.14$ ,  $y = R \sin \varphi \Rightarrow y = 20 \cdot 0.707 = 14.14$

Το μέσο του  $L_3$  είναι το σημείο Γ με συντεταγμένες Γ(-20,-10)=( $x_3, y_3$ )

Το μέσο του  $L_4$  είναι το σημείο Δ με συντεταγμένες Δ(-10,-20)=( $x_4, y_4$ )

Το μέσο του  $L_5$  είναι το σημείο Ε με συντεταγμένες Ε(-14.14,-10)=( $x_5, y_5$ )

Αφού έχουν υπολογιστεί τα κέντρα των επιμέρους τμημάτων, υπολογίζεται το κέντρο βάρους του σχήματος, άρα και το σημείο εφαρμογής της δύναμης.

$$x_0 = \frac{L_1 \cdot x_1 + L_2 \cdot x_2 + L_3 \cdot x_3 + L_4 \cdot x_4 + L_5 \cdot x_5}{L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_5}, \quad y_0 = \frac{L_1 \cdot y_1 + L_2 \cdot y_2 + L_3 \cdot y_3 + L_4 \cdot y_4 + L_5 \cdot y_5}{L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_5}$$

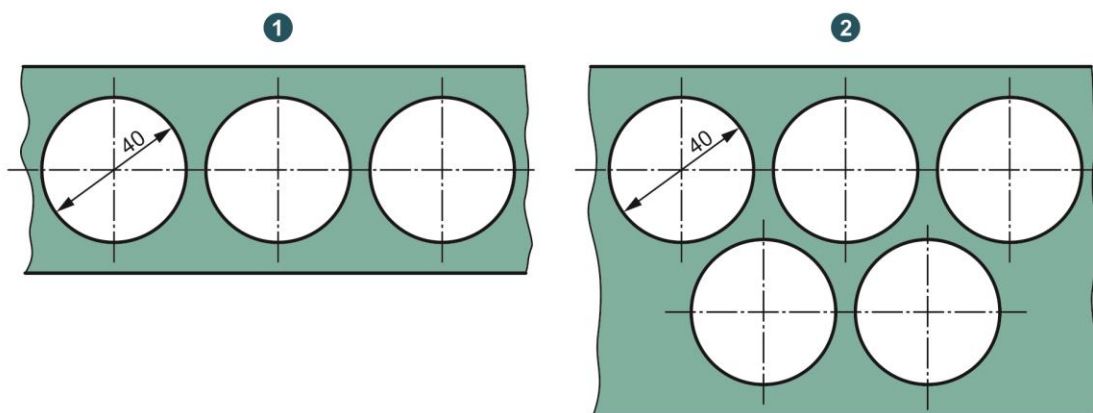
$$x_0 = \frac{28.28 \cdot 14.14 + 15.7 \cdot (-14.14) + 20 \cdot (-20) + 20 \cdot (-10) + 28.28 \cdot (-14.14)}{28.28 + 15.7 + 20 + 20 + 28.28} = \frac{-821.998}{112.26} = -7.38$$

$$y_0 = \frac{28.28 \cdot 10 + 15.7 \cdot 14.14 + 20 \cdot (-10) + 20 \cdot (-20) + 28.28 \cdot (-10)}{28.28 + 15.7 + 20 + 20 + 28.28} = \frac{-378.002}{112.26} = -3.367$$

Το σημείο εφαρμογής S έχει συντεταγμένες S(-7.38,-3.367)

### Άσκηση 5

Να προσδιοριστεί ο συντελεστής εκμετάλλευσης του υλικού για την απότμηση των διαμορφώσεων του σχήματος από έλασμα μήκους 2.5m και πάχους 1.0mm. Ο υπολογισμός να γίνει και για τις δύο διατάξεις του σχήματος



### Λύση

Το πλάτος της διαμόρφωσης στη πρώτη διάταξη :  $W=d+2\cdot a$

όπου:  $d(mm)$  η διάμετρος του κύκλου,  $a(mm)$  το πλάτος του περιθωρίου

Συνεπώς  $W=40+2a$

Καθώς το πάχος του ελάσματος δίνεται  $t=1.0mm$ , υπολογίζεται η τιμή του  $a, b$  από το πίνακα 6.2.

Βάση του πίνακα για  $t=1.0mm$ , η μέγιστη τιμή που ενδέχεται να πάρει το  $a$  είναι 1.7 αλλά ακόμα και έτσι το πλάτος του ελάσματος  $W \leq 100mm$ .

Το συνολικά διατιθέμενο έλασμα έχει μήκος  $L=2500mm$ . Καθώς ο κάθε κύκλος έχει διάμετρο 40mm, το πλήθος ελασμάτων που μπορούν να παραχθούν από το συγκεκριμένο

μήκος ελάσματος είναι:  $n=\frac{L}{L_a+\beta}$ , όπου  $L(mm)$  μήκος διατιθέμενου ελάσματος,  $L_a(mm)$

μήκος διαμόρφωσης, στη προκειμένη  $L_a=d=20mm$ ,  $\beta(mm)$  απόσταση μεταξύ των διαμορφώσεων.

Συνεπώς  $n=\frac{2500}{40+\beta}$ .  $2500/40=62,5$ . Για  $t=1.0mm$  η και πλάτος μεταλλικού φύλλου έως

100mm η τιμή του  $\beta$  κυμαίνεται από 1.0 μέχρι 1.3, άρα η τιμή του  $n$  βρίσκεται στο διάστημα από 50 έως 100 σύμφωνα με τον πίνακα 6.2. Οι τιμές των  $a, \beta$  λοιπόν του για  $t=1.0mm$  λαμβάνονται  $a=\beta=1.3$

Αντικατάσταση στους τύπους :

πλήθος παραγόμενων τεμαχίων:  $n=\frac{2500}{40+1.3}=60.53 \approx 61$

πλάτος διαμόρφωσης:  $W=40+2\cdot 1.3=42.6mm$

Ο συντελεστής εκμετάλλευσης για στρογγυλά τεμάχια δίνεται από την εξίσωση:

$$\xi = \frac{n \cdot A}{V \cdot W} = \frac{v \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2}{(d+\beta) \cdot W}, \quad W=2 \cdot a + 2 \cdot \frac{d}{2} + (v-1) \cdot a_R = 2 \cdot a + d + (v-1) \cdot 0.866 \cdot V$$

όπου:

$a_R(mm)$  η απόσταση μεταξύ των σειρών  $a_R=\sin\theta \cdot V, \theta=60^\circ$  για διάταξη κυκλικών τεμαχίων  $\xi$ , ο συντελεστής εκμετάλλευσης του υλικού

$v$ , το πλήθος των σειρών που είναι διατεταγμένα τα κατεργαζόμενα τεμάχια

$A(mm^2)$ , το εμβαδόν της επιφάνειας διαμόρφωσης που αποκόπτεται

$V(\text{mm})$  , βήμα, μήκος που απαιτείται για τη παραγωγή ενός τεμαχίου, υπολογίζεται ως το άθροισμα της διαμέτρου συν την απόσταση των κατεργαζόμενων τεμαχίων ( $d+e$ )

$W(\text{mm})$  πλάτος διατιθέμενου ελάσματος

Η πρώτη διάταξη έχει μία σειρά συνεπώς  $v=1$

$$\xi = \frac{v \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2}{(d+\beta) \cdot W} = \frac{1 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 40^2}{(40+1.3) \cdot (2 \cdot 1.3+40)} = 0.71 \text{ ή αλλιώς } \xi=71\%$$

Η συγκεκριμένη άσκηση, καθώς έχει μόνο μία σειρά η διάταξη της, λύνεται και με τις δύο εξισώσεις του συντελεστή εκμετάλλευσης

## 2Η ΔΙΑΤΑΞΗ

Στη συγκεκριμένη διάταξη οι σειρές είναι δύο. Για αυτό το λόγο εφαρμόζεται η δεύτερη εξίσωση για την εύρεση του συντελεστή εκμετάλλευσης.

$$\xi = \frac{n \cdot A}{V \cdot W} = \frac{v \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2}{(d+\beta) \cdot W} = \frac{2 \cdot 1256}{41.3 \cdot 78.36} = 0.776 \text{ ή αλλιώς } \xi=77\%$$

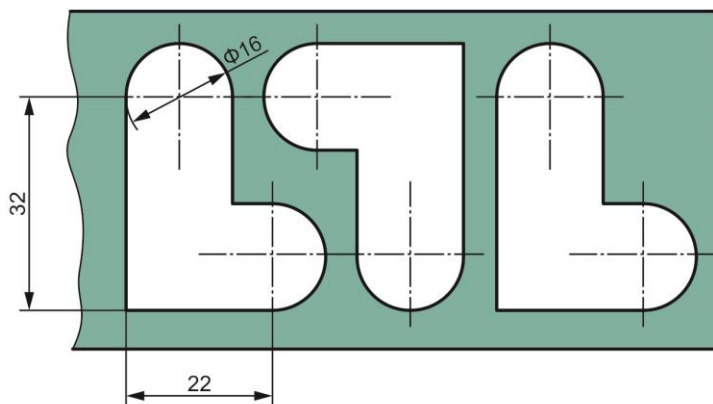
υπολογίζεται  $W$ :

$$W = 2 \cdot a + 2 \frac{d}{2} + (v-1) \cdot a_R = 2 \cdot a + d + (v-1) \cdot 0.866 \cdot V \Rightarrow W = 2 \cdot 1.3 + 40 + 1 \cdot 0.866 \cdot 41.3 = 78.36 \Rightarrow$$

$$W = 78.36$$

## Άσκηση 6

Να προσδιοριστεί ο συντελεστής εκμετάλλευσης του υλικού για την απότμηση των διαμορφώσεων του σχήματος από έλασμα μήκους 2.5m και πάχους 1.5mm.



## Λύση

Οι τιμές  $\alpha, \beta$  για  $t=1.5\text{mm}$  προκύπτουν από το πίνακα 6.2

Το πλάτος του διατιθέμενου ελάσματος σύμφωνα με τη διάταξη του σχήματος υπολογίζεται  $W=32+R+2\alpha=40+2\alpha$ , όπου  $R(\text{mm})$ , η ακτίνα του κύκλου διαμέτρου  $D=16\text{mm}$

Για  $t=1.5$  η μέγιστη τιμή του  $\alpha$  από πίνακα είναι 2.0. Συνεπώς  $W \leq 100\text{mm}$ . Όσον αφορά το βήμα  $V=22+R+\beta+D+\beta=46+2\beta$ . Το πλήθος των τεμαχίων για το διατιθέμενο έλασμα :

$$n = \frac{2500}{46+2\beta}. \text{ Για } t=1.5\text{mm} \text{ και } W \leq 100\text{mm}, \text{ οι τιμές του } \beta \text{ κυμαίνονται μεταξύ } 1.3 \text{ και } 1.6. \text{ Άρα}$$

το πλήθος των τεμαχίων που θα κατασκευαστούν θα είναι από 50 έως 100. Τελικά  $\alpha=\beta=1.6$ .

Υπολογίζεται  $n=50.8$  όπου με στρογγυλοποίηση  $n=51$  και  $W=43.2\text{mm}$

Υπολογισμός εμβαδού διαμόρφωσης:

Η διάταξη αποτελείται από τέσσερα σχήματα, δύο ορθογώνια και δύο ημικύκλια. Συνεπώς υπολογίζεται το καθένα ξεχωριστά:

$$A_1 = \pi \cdot R^2 / 2 = 3.14 \cdot 8^2 / 2 = 100.48\text{mm}^2$$

$$A_2=(32-16) \cdot 16=256\text{mm}^2$$

$$A_3=22 \cdot 16=352\text{mm}^2$$

$$A_4=A_1=\pi \cdot R^2/2=3.14 \cdot 8^2/2=100.48\text{mm}^2$$

Το συνολικό εμβαδόν είναι το άθροισμα των επιμέρους εμβαδών του σχήματος.

$$A=A_1+A_2+A_3+A_4$$

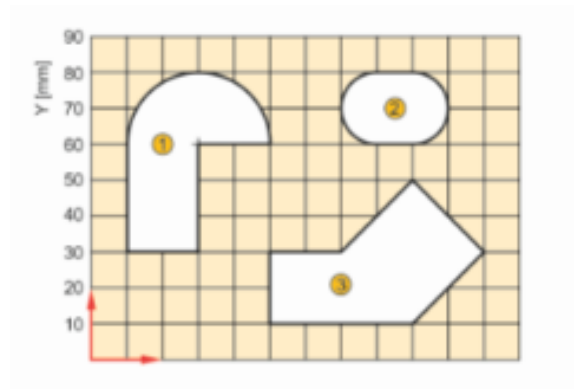
$$A=808.96\text{mm}^2$$

Υπολογισμός συντελεστή εκμετάλλευσης

$$\xi = \frac{n \cdot A}{L \cdot W} = \frac{51 \cdot 808.96}{2500 \cdot 43.2} = 0.382 \text{ ή αλλιώς } \xi = 38. \%$$

### Άσκηση 7 (Ασκήσεις βιβλίου) ΣΕΛ 209 ΑΣΚΗΣΗ 2

Ζητείται το σημείο εφαρμογής της δύναμης για την απότμηση των διαμορφώσεων των σχημάτων.



### Λύση

Η συγκεκριμένη διάταξη περιλαμβάνει περισσότερα του ενός σχήματα, τα οποία δεν είναι συμμετρικά και δεν έχουν γνωστό κέντρο βάρους. Συνεπώς υπολογίζεται αρχικά το κέντρο βάρους όλων των περιγραμμάτων και έπειτα το σημείο εφαρμογής της δύναμης απότμησης.

|   |        |                 |              |
|---|--------|-----------------|--------------|
| Κέντρο  | βάρους | 1 <sup>ης</sup> | διαμόρφωσης: |
| $x_1 = \frac{62.8 \cdot 30 + 30 \cdot 10 + 20 \cdot 20 + 30 \cdot 30 + 20 \cdot 40}{62.8 + 30 + 20 + 30 + 20} = \frac{4284}{162.8} = 26.31$ |        |                 |              |

$$y_1 = \frac{62.8 \cdot 80 + 30 \cdot 45 + 20 \cdot 30 + 30 \cdot 45 + 20 \cdot 60}{62.8 + 30 + 20 + 30 + 20} = \frac{9524}{162.8} = 58.79$$

|  |  |
|--|--|
| Κέντρο βάρους 2 <sup>ης</sup> διαμόρφωσης: | $x_2 = \frac{10 \cdot 85 + 31.4 \cdot 70 + 10 \cdot 85 + 31.4 \cdot 100}{10 + 31.4 + 10 + 31.4} = \frac{7038}{82.8} = 85$ $y_2 = \frac{10 \cdot 80 + 31.4 \cdot 70 + 10 \cdot 60 + 31.4 \cdot 70}{10 + 31.4 + 10 + 31.4} = \frac{5796}{82.8} = 70$ |
|--|--|

|   |        |                 |              |
|---|--------|-----------------|--------------|
| Κέντρο  | βάρους | 3 <sup>ης</sup> | διαμόρφωσης: |
| $x_3 = \frac{20 \cdot 60 + 20 \cdot 50 + 40 \cdot 70 + 20 \cdot 100 + 20 \cdot 100 + 20 \cdot 80}{20 + 20 + 40 + 20 + 20 + 20} = \frac{10600}{140} = 75.71$ |        |                 |              |

$$y_3 = \frac{20 \cdot 30 + 20 \cdot 20 + 40 \cdot 10 + 20 \cdot 20 + 20 \cdot 40 + 20 \cdot 40}{20 + 20 + 40 + 20 + 20 + 20} = \frac{3400}{140} = 24.28$$

Το σημείο εφαρμογής της δύναμης απότμησης προκύπτει από τα κέντρο βάρους των επιμέρους διαμορφώσεων

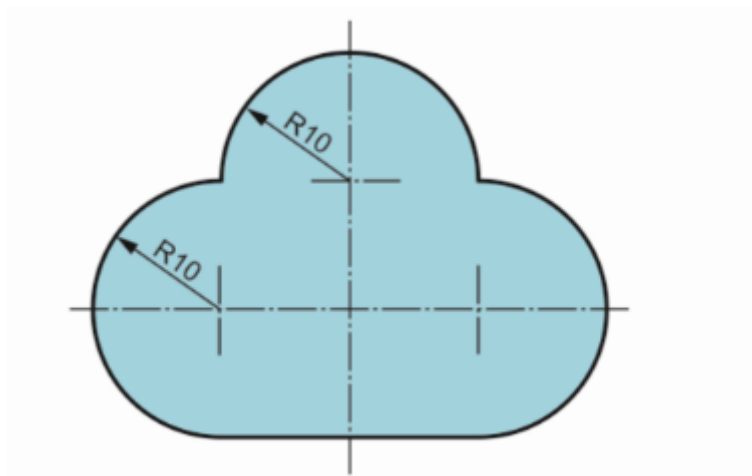
$$x_0 = \frac{26.31 \cdot 162.8 + 85 \cdot 82.8 + 75.71 \cdot 140}{162.8 + 82.8 + 140} = \frac{21920.668}{385.6} = 56.84$$

$$y_0 = \frac{58.79 \cdot 162.8 + 70 \cdot 82.8 + 24.28 \cdot 140}{162.8 + 82.8 + 140} = \frac{18766.212}{385.6} = 48.66$$

Άρα  $S(x_0, y_0) = (56.84, 48.66)$

### Άσκηση 8

Για την απότμηση των τεμαχίων του σχήματος από λαμαρίνα St37 πάχους 2mm, ζητείται να υπολογιστούν: το ύψος της κλίσης του εμβόλου, η μέση δύναμη απότμησης, το σημείο εφαρμογής της δύναμης, η χάρη και η διάμετρος της χρησιμοποιούμενης μήτρας και το έργο απότμησης.



### Λύση

Το ύψος της κλίσης του εμβόλου δίνεται από τη σχέση:

$h = (0.6 \text{ έως } 0.9) \cdot s$ , λαμβάνεται κατά προσέγγιση η τιμή 0.75 και υπολογίζεται το ύψος της κλίσης.

$$h = 0.75 \cdot 2 = 1.5 \text{ mm}$$

Για τη μέση δύναμη της απότμησης υπολογίζεται αρχικά η περίμετρος της διαμόρφωσης.

Το περίγραμμα της διαμόρφωσης αποτελείται από τα εξής μεγέθη

τρία ημικύκλια ακτίνας  $R = 10 \text{ mm}$  με αντίστοιχα μήκη  $L_1 = L_2 = L_4 = \pi \cdot R = 3.14 \cdot 10 = 31.4 \text{ mm}$

ευθύγραμμο τμήμα μήκους  $L_3 = 20 \text{ mm}$

$$\text{Συνεπώς η περίμετρος της διαμόρφωσης } U = L_1 + L_2 + L_3 + L_4 = 114.2 \text{ mm}$$

Η δύναμη απότμησης κατά μήκος κλειστής γραμμής δίνεται από το τύπο

$$F = A \cdot \tau_a$$

Για κοπή κλειστού περιγράμματος:  $A = U \cdot s$ ,  $U$  το μήκος του περιγράμματος

$\tau_a$  (N/mm<sup>2</sup>) αντοχή απότμησης

Η αντοχή απότμησης για λαμαρίνα St37 δίνεται κατευθείαν από πίνακα  $\tau_a = 310 \text{ N/mm}^2$

$$\text{Το εμβαδόν της επιφάνειας : } A = 114.2 \cdot 2 = 228.4 \text{ mm}^2$$

$$L_2 = \pi \cdot R_1 = 3.14 \cdot 10 = 31.4 \text{ mm}$$

$$L_3 = \pi \cdot R_2 = 3.14 \cdot 10 = 31.4 \text{ mm}$$

$$L_4 = \pi \cdot R_4 = 3.14 \cdot 10 = 34.1 \text{ mm}$$

$$U = L_1 + L_2 + L_3 + L_4$$

Άρα η δύναμη της απότμησης υπολογίζεται :  $F = 228.4 \cdot 310 = 70.804 \text{ N} \approx 71 \text{ kN}$

Για το σημείο εφαρμογής της δύναμης υπολογίζεται το κέντρο βάρους συναρτήσει των κέντρων των αντικειμένων καθώς και των μηκών τους. Επιλέγεται σύστημα συντεταγμένων Χ-Υ με αρχή των αξόνων το κέντρο του ημικυκλίου με μήκος  $L_2$ .

για το πρώτο ημικύκλιο το κέντρο  $A = (x_1, y_1) = (-10, 0)$

για ευθύγραμμο τμήμα το κέντρο  $B = (x_2, y_2) = (10, -10)$

για το τρίτο ημικύκλιο το κέντρο  $\Gamma = (x_3, y_3) = (30, 0)$

για το τέταρτο ημικύκλιο το κέντρο  $\Delta = (x_4, y_4) = (10, 20)$

Αφού έχουν υπολογιστεί τα κέντρα των επιμέρους τμημάτων, υπολογίζεται το κέντρο βάρους του σχήματος, άρα και το σημείο εφαρμογής της δύναμης.

$$x_0 = \frac{L_1 \cdot x_1 + L_2 \cdot x_2 + L_3 \cdot x_3 + L_4 \cdot x_4}{L_1 + L_2 + L_3 + L_4}, \quad y_0 = \frac{L_1 \cdot y_1 + L_2 \cdot y_2 + L_3 \cdot y_3 + L_4 \cdot y_4}{L_1 + L_2 + L_3 + L_4}$$

$$x_0 = \frac{31.4 \cdot 10 + 31.4 \cdot (-10) + 20 \cdot 10 + 31.4 \cdot 30}{31.4 + 31.4 + 20 + 31.4} = \frac{1142}{114.2} = 10,$$

$$y_0 = \frac{31.4 \cdot 20 + 31.4 \cdot 0 + 20 \cdot (-10) + 31.4 \cdot 0}{31.4 + 31.4 + 20 + 31.4} = \frac{428}{114.2} = 3.74$$

Το σημείο εφαρμογής S έχει συντεταγμένες  $S(10, 3.74)$

Υπολογισμός χάρης

Από την εμπειρική σχέση  $u = 0.007 \cdot s \cdot \sqrt{T_a}$  για  $s < 3 \text{ mm}$ , υπολογίζεται το μέγεθος της χάρης

$$u = 0.007 \cdot \sqrt{310} \cdot 2 = 0.246 \text{ mm}$$

Υπολογισμός της διαμέτρου της μήτρας  $D = d + 2 \cdot u$

Το τεμάχιο έχει περίμετρο  $= 114.2 \text{ mm}$ . Το μήκος αυτό αντιστοιχεί σε κύκλο  $2\pi r = 114.2 \Rightarrow r = 18.18 \text{ mm}$

Κατά προσέγγιση  $r = 18 \text{ mm}$  άρα  $d = 36 \text{ mm}$

Συνεπώς υπολογίζεται:

$$D = 36 + 2 \cdot 0.246 = 36.492 \text{ mm}$$

Το έργο της απότμησης υπολογίζεται από τον εξής τύπο:

$$W = 0.6 \cdot F_a \cdot s \Rightarrow W = 0.6 \cdot 71 \cdot 2 = 85.2 \text{ Nm}$$

## 7. Βαθεία κοίλανση

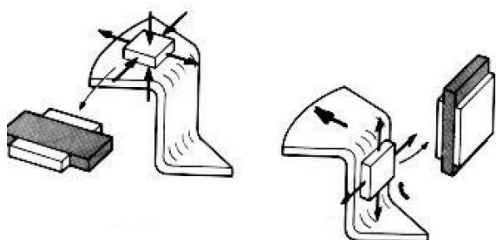
### 7.1 Γενικά για τη βαθεία κοίλανση

Η βαθεία κοίλανση είναι μια κατεργασία διαμόρφωσης ελάσματος κατά την οποία ένα επίπεδο έλασμα μετασχηματίζεται σε κοίλο και πραγματοποιείται υπό την επίδραση εφελκυστικών και θλιπτικών δυνάμεων. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας το πλάτος του αρχικού ελάσματος παραμένει αμετάβλητο καθώς η επιφάνεια δεν μεταβάλλεται. Για την πραγματοποίηση της απαραίτητη είναι η χρήση εμβόλου και μήτρας ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις, όπως για παράδειγμα η κοίλανση λεπτών ελασμάτων, κρίνεται απαραίτητη και η χρήση δακτυλίου συγκράτησης, ο οποίος προστατεύει το τελικό τεμάχιο από τη δημιουργία πτυχώσεων καθώς κρατάει σταθερό το κατεργαζόμενο έλασμα.

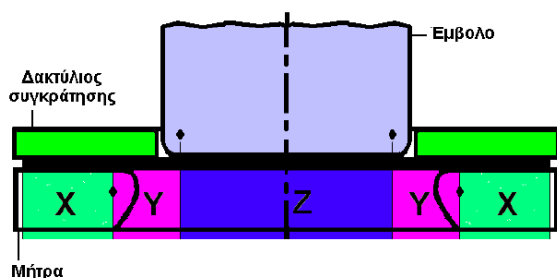
Στο ακατέργαστο έλασμα ασκείται πίεση προς τα κάτω μέσω του εμβόλου έτσι αυτό να εισχωρήσει μέσα στη μήτρα. Καθώς ωθείται προς τα κάτω, το έλασμα σταδιακά καταλαμβάνει το κενό χώρο ανάμεσα στο έμβολο και τη μήτρα μέχρι τελικά να εισέλθει ολόκληρο στο διάκενο και να αποκτήσει τη τελική του, κοίλη μορφή. Η μορφή του εξαρτάται από τη μορφή που έχει ο πυθμένας του εμβόλου καθώς και την επιφάνεια του εμβόλου και της μήτρας.

### 7.2 Διαδικασία βαθείας κοίλανσης

Για την επεξήγηση της διαδικασίας της βαθείας κοίλανσης, χρησιμοποιείται σαν παράδειγμα ένα τμήμα κυκλικού ελάσματος, όπως φαίνεται στο [σχήμα 7.1](#). Το κομμάτι αυτό υποβάλλεται σε τρία είδη παραμορφώσεων. Στο [σχήμα 7.2](#) παριστάνονται οι καταπονήσεις που υφίστανται και οι τάσεις που του ασκούνται κατά τη διάρκεια της κοίλανσης.



Σχήμα 7.1 Καταπόνηση του τεμαχίου



Σχήμα 7.2 Ζώνες καταπόνησης

Το επίπεδο έλασμα που χρησιμοποιείται στο παράδειγμα, χωρίζεται σε τρεις ζώνες, X, Y, Z ανάλογα με το είδος της καταπόνησης που του ασκείται. Καθώς το έμβολο κινείται προς τα κάτω, πιέζοντας το έλασμα προς το διάκενο μήτρας-εμβόλου, παρατηρούνται ορισμένες καταστάσεις.

Χαρακτηριστικό της ζώνης X είναι η επαφή του υλικού με τη μήτρα.

Κατά την διάρκεια της κοίλανσης, το πλεονάζον υλικό του μετάλλου, υποβάλλεται σε αξονικές εφελκυστικές τάσεις καθώς ωθείται μέσω του εμβόλου προς το εσωτερικό του δακτυλίου τη συγκράτησης.

Στη ζώνη Χ, το έλασμα υποβάλλεται σε αξονικές εφελκυστικές τάσεις λόγω της ενέργειας του εμβόλου που το ωθεί προς το εσωτερικό του δακτυλίου της μήτρας. Καθώς το υλικό ολισθαίνει προς το άνοιγμα της μήτρας, η περιφέρεια του κύκλου που έρχεται σε επαφή με αυτό, μειώνεται. Κάτω από αυτές τις συνθήκες δημιουργούνται εφαπτομενικά θλιπτικές τάσεις, οι οποίες έχουν σαν αποτέλεσμα την αύξηση του πάχους στην ζώνη Χ. Εάν το μέγεθος αυτών των καταπονήσεων ξεπεράσει μια κρίσιμη τιμή, υπάρχει κίνδυνος λυγισμού και δημιουργίας τσαλακώματος στη περιοχή της φλάντζας. Για την αποφυγή των παραπάνω, χρησιμοποιείται ο δακτύλιος συγκράτησης στον οποίο εφαρμόζεται η κατάλληλη πίεση. Το εσωτερικό τμήμα του υλικού που βρίσκεται στη ζώνη Χ, μειώνει το πάχος του καθώς διέρχεται στο καμπύλο τμήμα της μήτρας, λόγω της πλαστικής κάμψης.

Χαρακτηριστικό της ζώνης Υ είναι ότι το υλικό προς κατεργασία, αρχικά δεν εφάπτεται ούτε στη μήτρα, ούτε στο έμβολο.

Στη ζώνη Υ, το τεμάχιο υποβάλλεται σε κάμψη και ολίσθηση πάνω στα στρογγυλεμένα άκρα της μήτρας, εφελκύεται ανάμεσα στο έμβολο και στη μήτρα και τέλος κάμπτεται και ολισθαίνει πάνω στο έμβολο.

Χαρακτηριστικό της ζώνης Ζ είναι ότι μία επιφάνεια του ελάσματος έρχεται σε επαφή με την κεφαλή του εμβόλου.

Στη ζώνη Ζ το τεμάχιο υφίστανται έκταση καθώς το τεμάχιο ολισθαίνει πάνω στη κεφαλή του εμβόλου.

Ο Johnson και Mellor θεωρούν ότι συμβαίνουν πέντε διαδικασίες κατά τη διάρκεια της βαθείας κοίλανσης:

1. ακτινικός εφελκυσμός μεταξύ της μήτρας και του συγκρατητή (ζώνη Χ), προκαλώντας πάχυνση του ελάσματος εξαιτίας της δακτυλιοειδούς τάσης.
2. κάμψη και ολίσθηση στο καμπύλο τμήμα της μήτρας, που προκαλούν λέπτυνση στο μέταλλο
3. έκταση (εφελκυσμό) στη ζώνη Υ. Αυτό θα προκαλέσει λέπτυνση του υλικού στο σημείο επαφής του πυθμένα με τα πλευρικά τοιχώματα. Σε περίπτωση που το μέταλλο αδυνατεί να πάρει τη τελική του μορφή, αυτό οφείλεται της αστοχίας σε εφελκυσμό στη ζώνη Υ
4. κάμψη και ολίσθηση στο καμπύλο τμήμα του εμβόλου
5. έκταση και ολίσθηση στη κεφαλή του εμβόλου στη ζώνη Ζ

Οι παραπάνω καταστάσεις στις οποίες υποβάλλεται το μέταλλο, δεν του επιτρέπουν ορισμένες φορές να παραμορφωθεί και να πάρει άμεσα τη τελική του μορφή. Αυτό συμβαίνει γιατί το έλασμα δεν μπορεί να ανταπεξέλθει στις απότομες αλλαγές στη μορφή του και υπάρχει κίνδυνος λυγισμού ή θραύσης του.

Για αυτό το λόγο η διαδικασία τις κοίλανσης ορισμένες φορές πραγματοποιείται σε ενδιάμεσα στάδια, τις ανακοιλάνσεις όπου το έλασμα παίρνει σταδιακά τη τελική του μορφή. Οι ανακοιλάνσεις διακρίνονται σε δύο περιπτώσεις:

- άμεση ανακοιλάνση, κατά την οποία το επόμενο εργαλείο είναι τοποθετημένο με τον ίδιο τρόπο που ήταν τοποθετημένο και στη προηγούμενη κοίλανση
- αντίστροφη ανακοιλάνση, κατά την οποία η εξωτερική επιφάνεια του αντικειμένου της προηγούμενης κοίλανσης, γίνεται εξωτερική

### 7.3 Λόγος κοίλανσης και οριακός λόγος κοίλανσης

Κατά τη διάρκεια της βαθείας κοίλανσης, το πλήθος των κοιλάνσεων που απαιτούνται μπορεί να καθοριστεί μέσω του λόγου κοίλανσης. Ως λόγος κοίλανσης ορίζεται το πηλίκο της αρχικής διαμέτρου του ελάσματος προς τη διάμετρο του τελικού τεμαχίου και εκφράζεται ως εξής:

$$\beta = \frac{D}{d}$$

(Εξίσωση 7.1)

όπου:

$\beta$  (-) ο λόγος κοίλανσης

$D$  (mm) η αρχική διάμετρος ελάσματος

$d$  (mm) η τελική διάμετρος του διαμορφωμένου τεμαχίου

Επιδιώκεται για αποδοτικότερη κατεργασία κοίλανσης ο λόγος κοίλανσης να είναι όσο το δυνατόν πιο μεγάλος ακόμα και για τις ενδιάμεσες φάσεις (ανακοιλάνσεις), αλλά παρόλαυτα η τιμή στις ανακοιλάνσεις του πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 1.2 και 1.3. Για μεγάλους λόγους κοίλανσης είναι δυνατόν μεταξύ των ανακοιλάνσεων να πραγματοποιηθεί ανόπτηση του υλικού και με αυτό το τρόπο ο λόγος κοίλανσης να αυξηθεί κατά 20%. Καθώς όμως ο μεγάλος αριθμός ανακοιλάνσεων είναι οικονομικά ασύμφορος, είναι καλύτερο να αποφεύγεται.

Η τιμή του λόγου κοίλανσης αν και μεγάλη, δε μπορεί να ξεπερνάει τη τιμή του οριακού λόγου κοίλανσης. Στη περίπτωση που αυτό συμβαίνει, το τεμάχιο για να φτάσει στη τελική του μορφή, υποβάλλεται σε διαδοχικές κοιλάνσεις (ανακοιλάνσεις) στις οποίες ο λόγος κοίλανσης παραμένει μεταξύ των επιτρεπτών ορίων

Συνεπώς για μία διαδικασία κοίλανσης ισχύει  $\beta_{act} \leq \beta_{perm}$

Στη περίπτωση που η διαδικασία πραγματοποιείται σε περισσότερες από μία φάσεις, ο λόγος κοίλανσης υπολογίζεται ως εξής:

$$\beta = \beta_0 \cdot \beta_1 \cdot \beta_2 \cdots \beta_n = \frac{D}{d}$$

(Εξίσωση 7.2)

όπου

$$\beta_0 = \frac{D}{d_1}, \beta_1 = \frac{d_1}{d_2}, \dots, \beta_n = \frac{d_{n-1}}{d_n},$$

$\beta_0$  ο λόγος της πρώτης κοίλανσης,  $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$  οι λόγοι κοίλανσης της 1<sup>ης</sup>, 2<sup>ης</sup>, ... νιοστής ανακοίλανσης

Ο απαιτούμενος αριθμός κοιλάνσεων για κυκλικά τεμάχια μπορεί να υπολογιστεί προσεγγιστικά μέσω της εξίσωσης του Hubert:

$$n \cong \frac{h_n}{d_n} = \frac{D^2 - d_n^2}{4 \cdot d_n^2}$$

όπου:

$h_n$  (mm) ύψος του κυathίου μετά τη  $n$  νιοστή ανακοίλανση

$d_n$  (mm) διάμετρος του κυathίου μετά τη  $n$  νιοστή ανακοίλανση

$D$  (mm) αρχική διάμετρος κυathίου

#### Βαθεία κοίλανση για ελλειπτικά τεμάχια

Στη περίπτωση που ο λόγος  $a/b \leq 1.3$ , τα βήματα υπολογισμού είναι ίδια με εκείνα στα κυκλικά τεμάχια και ο λόγος κοίλανσης υπολογίζεται:

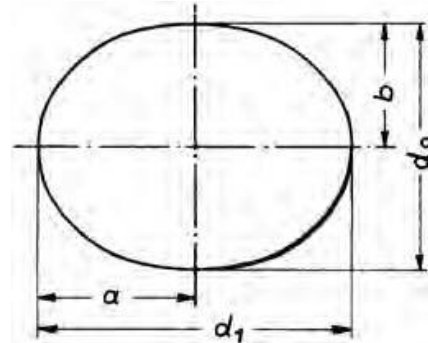
$$\beta = \frac{D}{d_0}$$

(Εξίσωση 7.3)

όπου:

$\beta$  (-) λόγος κοίλανσης ελλειπτικού τεμαχίου

$d_0$  (mm) μικρή διάμετρος της έλλειψης



**Σχήμα 7.3** Ελλειπτικό τεμάχιο

Στη περίπτωση που ο λόγος  $a/b \leq 1.3$  τότε ο λόγος κοίλανσης υπολογίζεται όπως στα ορθογωνικά τεμάχια.

#### Βαθεία κοίλανση ορθογωνικών τεμαχίων

Η βάση του κυαθίου, ο πυθμένας θεωρείται ορθογωνικός και προσδιορίζεται η γωνιακή ακτίνα καμπυλότητας. Από το τελικό αριθμό ανακοιλάνσεων υπολογίζεται η γωνιακή ακτίνα καμπυλότητας.

1<sup>η</sup> κοίλανση :  $r_1 = 1.2 \cdot q \cdot R_1$

2<sup>η</sup> κοίλανση :  $r_2 = 0.6 \cdot r_1$

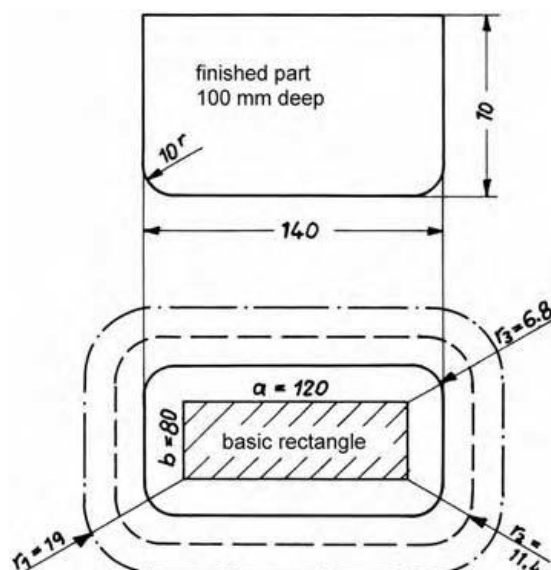
3<sup>η</sup> κοίλανση :  $r_3 = 0.6 \cdot r_2$  (τελικό τεμάχιο)

Στη περίπτωση επιπλέον κοιλάνσεων (ανακοιλάνσεων) τότε :

n-ιοστή κοίλανση :  $r_n = 0.6 \cdot r_{n-1}$

$R_1$  (mm) είναι η διορθωμένη ακτίνα

q συντελεστής διόρθωσης. Για χάλυβες St14 και St12  $q \approx 0.3$



#### Σχήμα 7.4 Ορθογώνιο κοίλο τμήμα με διαφορετικές ακτίνες βάθους και γωνίας

Οριακός Λόγος Κοίλανσης.

Είναι η μέγιστη δυνατή επιτρεπτή τιμή που μπορεί να πάρει ο λόγος κοίλανσης στη πρώτη κοίλανση. Η τιμή του εξαρτάται από τη τελική διάμετρο και το πάχος του ελάσματος ( $d/s$ ), τη γεωμετρία του εργαλείου, τα χαρακτηριστικά του κατεργαζόμενου τεμαχίου αλλά και τη πίεση συγκράτησης. Συμβολίζεται με  $\beta_{perm}$  και οι τιμές που παίρνει ανάλογα με το λόγο  $d/s$  φαίνονται στο παρακάτω πίνακα 7.1.

| $d/s$          | 30  | 50   | 100 | 150  | 200 | 250  | 300 | 350  | 400 | 450  | 500 | 600 |
|----------------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|-----|
| $\beta_{perm}$ | 2.1 | 2.05 | 2.0 | 1.95 | 1.9 | 1.85 | 1.8 | 1.75 | 1.7 | 1.65 | 1.6 | 1.5 |

#### Πίνακας 7.1 Επιτρεπτές τιμές λόγου κοίλανσης

Για υλικά όπως ο χάλυβας St1203 χωρίς ανόπτηση ο επιτρεπτός λόγος κοίλανσης στη πρώτη φάση υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\beta_{perm} = 2 - \frac{1.1}{1000} \cdot \frac{d}{s} \quad (\text{Εξίσωση 7.4 α})$$

ενώ για υλικά υψηλής κατεργασιμότητας, όπως ο χάλυβας St1303 χωρίς ανόπτηση,

$$\beta_{perm} = 2.15 - \frac{1}{1000} \cdot \frac{d}{s} \quad (\text{Εξίσωση 7.4 β})$$

Σε περίπτωση ανακοίλανσης χρησιμοποιείται στη πρώτη ανακοίλανση η μέγιστη επιτρεπτή τιμή του λόγου κοίλανσης, δηλαδή  $\beta_1=1.3$  και στη δεύτερη ανακοίλανση η ελάχιστη επιτρεπτή τιμή  $\beta_2=1.2$  (χωρίς ενδιάμεση ανόπτηση). Στη περίπτωση ανακοίλανσης στη πρώτη φάση η τιμή του  $\beta$  όπως προαναφέρθηκε αυξάνεται κατά 20%, δηλαδή  $\beta_1=1.6$

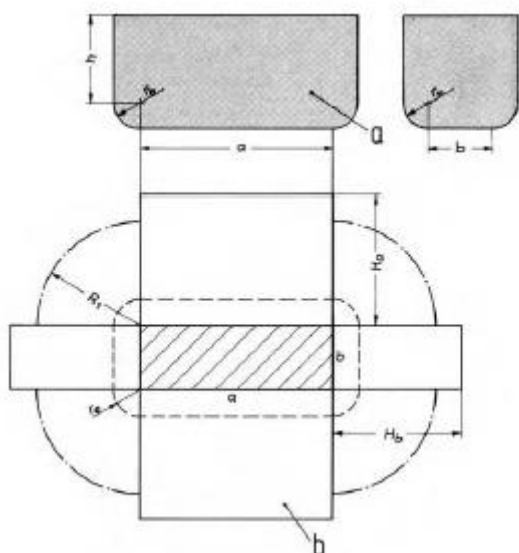
#### 7.4 Ανάπτυγμα ελάσματος

Πριν ξεκινήσει η διαδικασία της κοίλανσης είναι απαραίτητο να έχουν καθοριστεί το μέγεθος και η μορφή του αρχικού ελάσματος προς κατεργασία. Για να γίνει ο υπολογισμός αυτός θεωρείται ότι κατά τη κοίλανση δε μεταβάλλεται το αρχικό πάχος του ελάσματος και συνεπώς η αρχική του επιφάνεια ισούται με την τελική επεξεργασμένη επιφάνεια.

Ως εκ τούτου, το τελικό τεμάχιο διαιρείται σε επιμέρους τμήματα, για τα οποία υπάρχουν έτοιμοι τύποι υπολογισμού της επιφάνειάς τους, και τελικά το άθροισμα των επιμέρους εμβαδών ισοδυναμεί με την αρχική επιφάνειά. Με αυτό το τρόπο υπολογίζεται η αρχική διάμετρος του αρχικού, ακατέργαστου ελάσματος.

#### Υπολογισμός αρχικών διαστάσεων για ορθογώνια παραλληλόγραμμα τεμάχια

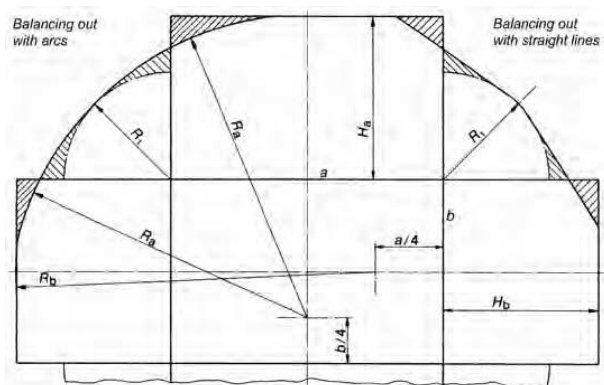
Για τον υπολογισμό των αρχικών διαστάσεων το τεμάχιο αναλύεται σε επιμέρους κοίλα τμήματα ίσης επιφάνειας όπως φαίνεται στο σχήμα 7.5



**Σχήμα 7.5** Ανάλυση ορθογωνίου κοίλου τμήματος

Τα βήματα που ακολουθούνται είναι τα εξής:

1. Σχεδιάζεται ο πυθμένας του κυαθίου χωρίς την ακτίνα και δημιουργείται ένα ορθογώνιο παραλληλόγραμμο τμήμα με πλευρές  $a$ ,  $b$  όπως στο σχήμα 7.6
2. Μετακινούνται τα πλευρικά τοιχώματα συμπεριλαμβανομένης της ακτίνας  $r_b$  και προστίθενται στις αντίστοιχες πλευρές του ορθογωνίου παραλληλογράμμου
3. Με τη μετακίνηση του βήματος 2, δημιουργείται σχήμα με πλευρές  $H_a$ ,  $H_b$ , όπως φαίνεται και στο σχήμα
4. Από τις εισέχουσες γωνίες του ορθογωνίου σχεδιάζονται τετατροκύκλια με ακτίνες  $R_1$
5. Τα γωνιακά κενά που δημιουργούνται στο ενδιάμεσο εξισορροπούνται με το σχεδιασμό τόξων ή καμπυλών ούτως ώστε η επιφάνεια του βασικού σώματος να παραμείνει ίδια. Οι ακτίνες αντιστάθμισης  $R_a$  και  $R_b$ , ορίζονται περίπου  $a/4$  και  $b/4$  αντίστοιχα, όπως στην στο σχήμα . Στη περίπτωση που  $a=b$  τότε το τεμάχιο είναι κύκλος.



**Σχήμα 7.6** Ανάλυση του σχήματος με χρήση τόξων και ευθύγραμμων τμημάτων

Υπολογισμός παραμέτρων  $R_1$ ,  $H_a$ ,  $H_b$  δοσμένων των τιμών  $a$ ,  $b$ ,  $r$

Διακρίνονται δύο περιπτώσεις:

α) γωνιακή ακτίνα ( $r_e$ ) = ακτίνα πυθμένα ( $r_b$ ) =  $r$

Υπολογίζεται σχεδιασμένη ακτίνα  $R$ :  $R = 1.42 \cdot \sqrt{r \cdot h + r^2}$

Συντελεστής διόρθωσης  $x$ :  $x = 0.074 \cdot \left( \frac{R}{2 \cdot r} \right)^2 + 0.982$

Διορθωμένη ακτίνα  $R_1 = x \cdot R$

Αναπτυγμένο μήκος  $H_b$ :  $H_b = 1.57 \cdot r + h - 0.785(x^2 - 1) \cdot R^2 / \alpha$

όπου:

$\alpha = L - 2 \cdot r_e$

$b = B - 2 \cdot r_e$

$h = H - 2 \cdot r_e$

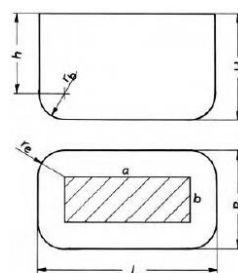


Figure 14.13 Rectangular hollow part with different bottom and corner radii

β) γωνιακή ακτίνα ( $r_e$ )  $\neq$  ακτίνα πυθμένα ( $r_b$ )

Υπολογίζεται σχεδιασμένη ακτίνα  $R$ :  $R = \sqrt{1.012 \cdot r_e^2 + 2 \cdot r_e(h + 0.506 \cdot r_b)}$

Συντελεστής διόρθωσης  $x$ :  $x = 0.074 \cdot \left( \frac{R}{2 \cdot r_e} \right)^2 + 0.982$

Διορθωμένη ακτίνα  $R_1 = x \cdot R$

Αναπτυγμένο μήκος  $H_b = 0.57 \cdot r_b + h + r_e - 0.785 \cdot (x^2 - 1) \cdot R^2 / b$

## 7.5 Δύναμη Κοίλανσης

Η γνώση της δύναμης που απαιτείται για να εκτελεστεί μια κατεργασία βαθείας κοίλανσης είναι σημαντική μιας και επιλέγεται αναλόγως η κατάλληλη πρέσσα. Στη βαθεία κοίλανση ανάλογα με το πλήθος των ανακοιλάνσεων η δύναμη υπολογίζεται διαφορετικά. Το είδος όμως της πρέσσας που θα χρησιμοποιηθεί για τη κατεργασία, καθορίζεται από τη πρώτη κιάλας κοίλανση όπου η δύναμη έχει τη μέγιστη τιμή της.

Για κυλινδρικά τεμάχια η δύναμη κοίλανσης δίνεται από τη σχέση:

$$F_z = d \cdot U \cdot s \cdot \sigma_B \cdot n$$

(Εξίσωση 7.5α)

όπου:

$F(N)$ , δύναμη κοίλανσης

$d$  (mm), διάμετρος του εμβ

$U$  (mm), περίμετρος του εμβόλου

$s$  (mm), πάχος ελάσματος

$\sigma_B$  (N/mm<sup>2</sup>) όριο θραύσης σε εφελκυσμό του υλικού

$n$  (-) συντελεστής διόρθωσης (εξαρτάται από τις διαστάσεις της επόμενης κατάστασης).

Υπολογίζεται από τον πίνακα 7.2

| $\beta$ | $d/s$ | 50   | 100  | 200  | 300  | 400  | 500  | 600 |
|---------|-------|------|------|------|------|------|------|-----|
| 1.2     | 0.21  | 0.22 | 0.25 | 0.3  | 0.36 | 0.45 | 0.58 |     |
| 1.4     | 0.42  | 0.44 | 0.5  | 0.6  | 0.71 | 0.89 | 1.14 |     |
| 1.6     | 0.63  | 0.68 | 0.76 | 0.9  | 1.08 | 1.30 | -    | -   |
| 1.8     | 0.85  | 0.9  | 1.02 | 1.18 | 1.4  | -    | -    | -   |
| 2.0     | 1.05  | 1.12 | 1.29 | 1.45 | -    | -    | -    | -   |
| 2.1     | 1.15  | 1.25 | 1.4  | -    | -    | -    | -    | -   |

Πίνακας 7.2 Υπολογισμός συντελεστή διόρθωσης

Εναλλακτικά η δύναμη κοίλανσης υπολογίζεται:

$$F_z = d \cdot \pi \cdot s \cdot \sigma_B \cdot \frac{\beta - 1}{\beta_{perm} - 1} \quad (\text{Εξίσωση 7.5}\beta)$$

Για την πρώτη ανακοίλανση κυλινδρικού τεμαχίου, χρησιμοποιείται η σχέση:

$$F_{z1} = \frac{F_z}{2} + d_1 \cdot \pi \cdot \sigma_B \cdot n \quad (\text{Εξίσωση 7.6})$$

όπου:

$d_1$ (mm) η διάμετρος του εμβόλου στη δεύτερη ανακοίλανση

Για τετραγωνικά τεμάχια η δύναμη κοίλανσης υπολογίζεται:

$$F_z = \left( 2 \cdot \pi \cdot r_e + \frac{4 + (\alpha + b)}{2} \right) \cdot \sigma_B \cdot n \quad (\text{Εξίσωση 7.7})$$

όπου:

$r_e$  (mm), η ακτίνα καμπυλότητας κυαθίου

$\alpha$  (mm) μήκος κυαθίου χωρίς το πυθμένα

$b$  (mm). πλάτος κυαθίου χωρίς το πυθμένα

$n$ (-) συντελεστής διόρθωσης, υπολογίζεται από το πίνακα 6.3.

|                                 |     |     |     |     |     |     |     |
|---------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| <b>n</b>                        | 0.2 | 0.3 | 0.5 | 0.7 | 0.9 | 1.1 | 1.3 |
| <b><math>\beta = D/d</math></b> | 1.1 | 1.2 | 1.4 | 1.6 | 1.8 | 2.0 | 2.2 |

**Πίνακας 7.3** Υπολογισμός συντελεστή διόρθωσης

|                                 |        |        |                   |                              |
|---------------------------------|--------|--------|-------------------|------------------------------|
| <b>Υλικό</b>                    | St1303 | St1404 | CuZn28<br>(Ms 72) | Al99.5 (F10)                 |
| <b><math>\beta = D/d</math></b> | 400    | 380    | 300               | 100 (μεσαίας<br>σκληρότητας) |

**Πίνακας 7.4** Όριο θραύσης υλικών σε εφελκυσμό

## 7.6 Δύναμη Συγκράτησης

Η δύναμη συγκράτησης αφορά στη δύναμη που ασκεί ο συγκρατητής στο έλασμα. Η δύναμη αυτή πρέπει να είναι αρκετή, έτσι ώστε να μην υπάρχει κίνδυνος κάμψης του ελάσματος. Υπολογίζεται ως εξής:

$$F_N = p \cdot A_N \quad (\text{Εξίσωση 7.7})$$

όπου:

$F_N$  (N), η δύναμη συγκράτησης

$p$  (N/mm<sup>2</sup>) πίεση συγκράτησης

$A_N$  (mm<sup>2</sup>) επιφάνεια συγκράτησης

Για να υπολογιστεί η δύναμη συγκράτησης πρέπει να έχουν υπολογιστεί κάποιοι άλλοι παράμετροι προηγουμένως:

-πίεση συγκράτησης

υπολογίζεται ως εξής:

$$p = \left[ (\beta_1 - 1)^2 + \frac{d}{200 \cdot s} \right] \cdot \frac{\sigma_B}{400} \quad (\text{Εξίσωση 7.8})$$

όπου:

$p$  (N/mm<sup>2</sup>), πίεση συγκράτησης

$\beta_1$  (-) ο λόγος της πρώτης κοίλανσης

$\sigma_B$  (N/mm<sup>2</sup>) αντοχή του υλικού σε εφελκυσμό

$s$  (mm) πάχος ελάσματος

-χάρη κοίλανσης

Σημαντικό ρόλο παίζει και στη βαθεία κοίλανση η χάρη μεταξύ του εμβόλου και της μήτρας, όσον αφορά την κατασκευή του αντικειμένου. Χρήση πολύ μικρής χάρης μπορεί να επιφέρει ράγισμα του τεμαχίου, ενώ αντίθετα, χρήση πολύ μεγάλης χάρης μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία πτυχώσεων εξωτερικά του αντικειμένου.

Η χάρη εκφράζεται με δύο διαφορετικές σχέσεις:

$$w = s \cdot \sqrt{\frac{D}{d}} \quad (\text{Εξίσωση 7.9})$$

όπου:

$w$  (mm) χάρη κοίλανσης

$s$  (mm) πάχος ελάσματος

$D$  (mm) διάμετρος αρχικού ελάσματος

$d$  (mm) διάμετρος του εμβόλου

Για ακόμα μεγαλύτερη ακρίβεια, χρησιμοποιείται η σχέση:

$$w = s + k \cdot \sqrt{s} \quad (\text{Εξίσωση 7.10})$$

όπου:

$w$  (mm) χάρη κοίλανσης

$s$  (mm) πάχος ελάσματος

$k$  συντελεστής χάρης κοίλανσης, υπολογίζεται ανάλογα με το προς κατεργασία υλικό από το πίνακα 7.5.

| Υλικό | χάλυβας | πυρίμαχα<br>κραμαρα | αλουμίνιο | μη σιδηρούχα<br>μέταλλα<br>ή<br>κράματα |
|-------|---------|---------------------|-----------|---|
| k     | 0.07    | 0.2                 | 0.02      | 0.04                                    |

**Πίνακας 7.5** Συντελεστής διόρθωσης για το καθορισμό της χάρης

-ακτίνα καμπυλότητας

Πολύ μικρές τιμές της ακτίνας καμπυλότητας υποβάλλουν το έλασμα σε πρόσθετες τάσεις, ενώ πολύ υψηλές τιμές μπορεί να οδηγήσουν στη δημιουργία “τσαλακώματος” στο τέλος της κοίλανσης καθώς ο συγκρατητής δεν ασκεί αρκετή πίεση.

Υπολογίζεται από τη παρακάτω σχέση:

$$r_M = 0.0035 \cdot [50 + (D - d)] \cdot \sqrt{s} \quad (\text{Εξίσωση 7.11})$$

όπου:

$r_M$  (mm) ακτίνα καμπυλότητας

$D$  (mm) αρχική διάμετρος ελάσματος

$d$  (mm) διάμετρος τελικού τεμαχίου, διάμετρος εμβόλου

Για χαμηλό βάθος κοίλανσης επιλέγεται μικρή τιμή ακτίνας καμπυλότητας, καθώς σε αντίθετη περίπτωση η επιφάνεια που ασκεί πίεση ο συγκρατητής είναι πολύ μικρή.

-επιφάνεια συγκράτησης  $A_N$

Η επιφάνεια συγκράτησης υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$A_N = (D^2 - d_e^2) \cdot \frac{\pi}{4} \quad (\text{Εξίσωση 7.12})$$

όπου:

$A_N$  (mm<sup>2</sup>) επιφάνεια συγκράτησης

$d_e$  (mm) διάμετρος των κέντρων των καμπυλών της μήτρας

Η διάμετρος  $d_e$  δίνεται από τη σχέση:

$$d_e = d + 2 \cdot w + 2 \cdot r_M \quad (\text{Εξίσωση 7.13})$$

όπου:

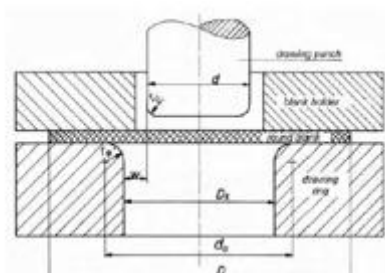
$d$  (mm) η εσωτερική διάμετρος του συγκρατητή

$w$  (mm) χάρη κοίλανσης

$r_M$  (mm) ακτίνα καμπυλότητας

Έχοντας υπολογίσει όλες τις παραπάνω παραμέτρους είναι εφικτός ο υπολογισμός της δύναμης συγκράτησης.

Το σχήμα 7.8 παρουσιάζει τη θέση των παραμέτρων που υπολογίστηκαν πάνω στη διάταξη.



**Σχήμα 7.8** Χαρακτηριστικά συγκράτησης

## 7.7 Έργο κοίλανσης

Το απαιτούμενο έργο για τη διαμόρφωση ελάσματος σε κοίλο συνδέεται άμεσα με το είδος της πρέσσας που χρησιμοποιείται για τη κατεργασία.

Οι πρέσες διπλής ενέργειας ουσιαστικά αποτελούνται από δύο έμβολα. Το εξωτερικό έμβολο λειτουργεί ως συγκρατητής ενώ τη διαδικασία της κοίλανσης εκτελεί το εσωτερικό έμβολο. Το κάθε έμβολο λειτουργεί και ελέγχεται ανεξάρτητα. Οι περισσότερες διαδικασίες κοίλανσης πραγματοποιούνται με πρέσες διπλής ενέργειας.

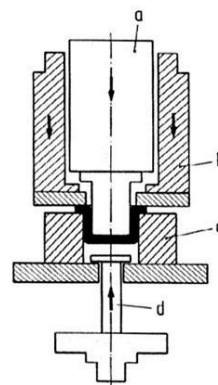
Επομένως το έργο κοίλανσης για πρέσα διπλής ενέργειας δίνεται από τη σχέση:

$$W = F_z \cdot x \cdot h$$

(Εξίσωση 6.13)

όπου:

$x(-)$  συντελεστής του έργου, παίρνει τιμές μεταξύ 0.5 και 0.8



**Σχήμα 7.7** Πρέσα διπλής ενέργειας

Οι πρέσες μονής ενέργειας αποτελούνται από ένα έμβολο και ένα εξολκέα. Ο εξολκέας λειτουργεί ως συγκρατητής στη περίπτωση που η μήτρα είναι ανεστραμμένη κατά 180 μοίρες. Το έμβολο στηρίζεται πάνω σε μια επιφάνεια στερέωσης και η μήτρα επαφίεται με τον ολισθητήρα εργαλειοφορείου. Παράλληλα, ο συγκρατητής στηρίζεται μέσω πείρων στον εξολκέα. Καθώς η δύναμη συγκράτησης σε αυτή τη περίπτωση πρέπει να είναι μεταβλητή, η πρέσα μονής ενέργειας χρησιμοποιείται μόνο όταν η δύναμη εξόλκευσης μπορεί να προσαρμοστεί αναλόγως. Σε αυτού του είδους τη διάταξη, καθώς ο ολισθητήρας πρέπει να ξεπεράσει τη δύναμη κοίλανσης και τη δύναμη συγκράτησης, οι δύο δυνάμεις προστίθενται για τον υπολογισμό του έργου κοίλανσης.

Επομένως το έργο κοίλανσης για πρέσα μονής ενέργειας δίνεται από τη σχέση

$$W = (F_z \cdot x + F_N) \cdot h$$

(Εξίσωση 6.13)

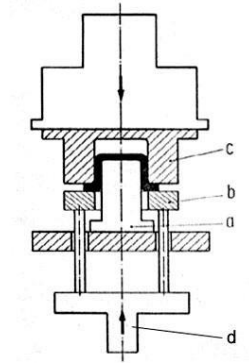
όπου:

$F_z$  (N) δύναμη κοίλανσης

$F_N$  (N) δύναμη συγκράτησης

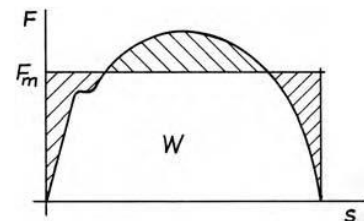
$\chi$  (-) συντελεστής του έργου, παίρνει τιμές μεταξύ 0.5 και 0.8

$h$  (mm) η διαδρομή του εμβόλου



**Σχήμα 7.8** Πρέσα μονής ενέργειας

Το έργο κοίλανσης υπολογίζεται μαθηματικά από το διάγραμμα δύναμης μετατόπισης όπως φαίνεται στο σχήμα 7.9. Το σχήμα απεικονίζει την εξέλιξη της δύναμης κοίλανσης σε σχέση με τη διαδρομή του εμβόλου. Η καμπύλη της μετατόπισης μοιάζει με ανεστραμμένη παραβολή. Η επιφάνεια κάτω από τη παραβολή δίνει το έργο κοίλανσης. Για τον υπολογισμό του έργου κοίλανσης από τη δύναμη και το βάθος κοίλανσης, χρησιμοποιείται η μέση δύναμη  $F_m$  και θεωρείται μία σταθερά καθ'όλη τη διάρκεια της διεργασίας. Η επιφάνεια του ορθογωνίου που σχηματίζεται από την  $F_m, s$  ισούται με την επιφάνεια που βρίσκεται κάτω από την παραβολή. Ο λόγος  $\chi = F_m / F_{max}$  θεωρείται ο συντελεστής της διαδικασίας και χαρακτηρίζει την εξέλιξη της δύναμης. Λαμβάνεται συνήθως  $\chi = 0.63$



**Σχήμα 7.9** Έργο κοίλανσης

## 7.8 Πρέσες

Στις πρέσες διπλής ενέργειας υπάρχουν δύο επιφάνειες που λειτουργούν από πάνω, μία πλάκα στην οποία είναι τοποθετημένο το έμβολο κοίλανσης και άλλη μία στην οποία βρίσκεται ο συγκρατητής. Η δεύτερη πλάκα μεταφέρει ουσιαστικά τη δύναμη συγκράτησης μέσω του συγκρατητή και της μήτρας. Η μήτρα και ο εξολκέας είναι τοποθετημένοι στο κάτω μέρος της εργαλειομηχανής. Κατά τη διάρκεια της κατεργασίας πιέζει προς τα κάτω το έλασμα, φέρνοντας το σε επαφή με τη μήτρα. Παράλληλα το έμβολο κοίλανσης κατεβαίνει προς τα κάτω και εισέρχεται στη μήτρα, δίνοντας έτσι σχήμα στο εισερχόμενο τεμάχιο, ενώ το έλασμα ρέει χωρίς κίνδυνο λυγισμού εκτός τη περιοχή συγκράτησης. Στις πρέσες διπλής ενέργειας η κατεργασία πραγματοποιείται με ένα στερεωμένο συγκρατητή και ένα κινούμενο έμβολο και η επιφάνεια του εμβόλου ασκεί μόνο δύναμη συμπίεσης.

Μειονέκτημα της πρέσας διπλής ενέργειας είναι ότι τα τμήματα του τεμαχίου που θα υποστούν επιπλέον διαδοχικές παραμορφώσεις, χρειάζεται να περιστρέφονται κατά 180°,

μια διαδικασία αρκετά δαπανηρή καθώς επίσης υπάρχει κίνδυνος φθοράς ή καταστροφής άλλων τμημάτων του τεμαχίου κατά τη περιστροφή.

Οι πρέσες απλής ενέργειας λειτουργούν ως εξής: η δύναμη διαμόρφωσης ασκείται από την επάνω επιφάνεια μέσω της μήτρας, η οποία βρίσκεται πάνω σε αυτή και μέσω του συγκρατητή ο οποίος συγκρατείται από δύο πείρους και ελέγχεται από τον εξολκέα.

Το έμβολο κοίλανσης καθώς και ο συγκρατητής βρίσκονται και τα δύο στη βάση του τραπέζιου πίεσης.

Στην αρχή της διαδικασίας το ακατέργαστο τεμάχιο συγκρατείται υπό πίεση ανάμεσα στη μήτρα και το συγκρατητή. Η επάνω αντικειμενοφόρος πλάκα πιέζει το συγκρατητή προς τα κάτω, όπου βρίσκεται η μήτρα και σε αντίθετη κατεύθυνση από τη δύναμη που ασκείται από την κάτω βάση. Τελικά το τεμάχιο δημιουργείται από την καθοδική κίνηση της μήτρας προς το στατικό έμβολο κοίλανσης.

Με τη χρήση πρέσας απλής ενέργειας το τεμάχιο δε χρειάζεται να περιστρέφεται.

## 7.9 Ταχύτητα κοίλανσης

Η ταχύτητα κοίλανσης, ουσιαστικά αναφέρεται στη ταχύτητα κίνησης της πρέσας και κατ' επέκταση πόσο γρήγορα εκτελείται η κατεργασία. Επηρεάζει το όριο διαρροής του υλικού και εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως: τις μηχανικές και φυσικές ιδιότητες του αρχικού τεμαχίου, τη γεωμετρία του ( όσο πιο πολύπλοκο το αντικείμενο, τόσο χαμηλότερη ταχύτητα.)

Ο παρακάτω πίνακας 7.6 δίνει προτεινόμενες τιμές ταχυτήτων για διάφορα υλικά. Οι αναγραφόμενες τιμές είναι αξιόπιστες μόνο όταν η διαδικασία πραγματοποιείται σε ιδανικές συνθήκες κοίλανσης, δηλαδή η ποιότητα του υλικού να είναι κατάλληλη, το τεμάχιο να είναι συμμετρικό, η λίπανση επαρκής, η πρέσσα σε καλή κατάσταση και τέλος ο συγκρατητής να μπορεί να ρυθμίζεται ανάλογα με τις ανάγκες. Σε αντίθετη περίπτωση κυμαίνεται μεταξύ 8 με 10 m/min.

| Υλικό                             | Πρέσα απλής ενέργειας | Πρέσα διπλής ενέργειας |
|-----------------------------------|-----------------------|------------------------|
| Συνήθης χάλυβας                   | 17                    | 11-17                  |
| ανοξείδωτος χάλυβας               | -                     | 6-9                    |
| Ορείχαλκος                        | 60                    | 30                     |
| Χαλκός                            | 45                    | 25                     |
| Αλουμίνιο                         | 53                    | 30                     |
| Κράματα Αλουμινίου υψηλής αντοχής | -                     | 9-12                   |
| Ψευδάργυρος                       | 45                    | 12                     |

**Πίνακας 7.6.** Προτεινόμενες τιμές ταχύτητας κοίλανσης

## 7.10 Λίπανση

Τα λιπαντικά κατά τη διάρκεια της χρήσης τους υποβάλλονται σε διαφορετικές θερμοκρασίες και θλιπτικές τάσεις. Για αυτό το λόγο τα κατάλληλα λιπαντικά επιλέγονται με

βάση το ιξώδες (όπου υποδεικνύεται η σχέση και εξάρτηση της πίεσης με τη θερμοκρασία), τη πυκνότητα και τη δυνατότητα συμπίεσης.

Στα σημεία επαφής με επιφάνειες μεγάλης πίεσης, απαιτείται μεγάλη προσοχή στην επίδραση της πίεσης.

Τα λιπαντικά κατατάσσονται στις εξής κατηγορίες:

- υδατοδιαλυτά
- μη υδατοδιαλυτά
- στερεά λιπαντικά

Οι απαιτήσεις για την απόδοση των λιπαντικών είναι οι εξής:

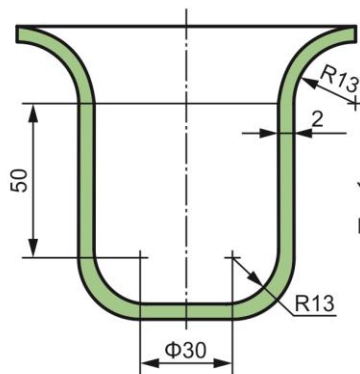
- ανάπτυξη συνεκτικής πίεσης και λίπανση με υμένια με ανθεκτικότητα στη θερμοκρασία ( διαχωρίζουν τις επιφάνειες των προς κατεργασία τεμαχίων με τη μήτρα)
- υψηλή συγκολλητική και διατμητική αντοχή καθώς και διαβροχική ικανότητα
- εύκολη και ολική αφαίρεση του λιπαντικού από το τελικό τεμάχιο
- μη χρησιμοποίηση ανθυγιεινών και επιβλαβών για το περιβάλλον ουσιών

## 7.11 Ασκήσεις

### Άσκηση 1

Πρόκειται να κατασκευαστεί το κυλινδρικό τεμάχιο από χάλυβα St14 με όριο θραύσης σε εφελκυσμό  $\sigma_B=300 \text{ N/mm}^2$ . Ζητείται να υπολογιστούν:

- η διάμετρος του αρχικού ελάσματος
- ο λόγος κοίλανσης
- η δύναμη κοίλανσης στη πρώτη φάση κοίλανσης
- η χάρη κοίλανσης
- η δύναμη συγκράτησης
- το έργο κοίλανσης



Υλικό: **St33 ή 1.0035**

Ιδιότητες: Όριο θραύσης σε εφελκυσμό  $\sigma_B=290 \text{ N/mm}^2$

### Λύση

Για τον υπολογισμό της αρχικής διαμέτρου θεωρείται ότι η αρχική επιφάνεια του ελάσματος ισούται με τη τελική επιφάνεια του διαμορφωμένου κυathίου. Εν συνεχεία το κυλινδρικό τεμάχιο του σχήματος χωρίζεται σε επιμέρους τμήματα και υπολογίζεται ξεχωριστά το εμβαδόν κάθε επιμέρους επιφάνειας από τους έτοιμους πίνακες που έχουν δοθεί. Τελικά τα επιμέρους εμβαδά αθροίζονται και εξισώνονται με την επιφάνεια του αρχικού ελάσματος.

διάμετροι σχήματος : εσωτερική διάμετρος  $d= 56 \text{ mm}$ , εξωτερική διάμετρος  $D=82 \text{ mm}$ , διάμετρος πυθμένα  $d_1=30 \text{ mm}$

Το εμβαδόν της αρχικής επιφάνειας :  $\pi \cdot \frac{D_0^2}{4}$

1<sup>ο</sup> τμήμα: πυθμένας κυathίου με ακτίνα  $R=13 \text{ mm}$ :  $\pi^2 \cdot R \cdot d_1 = 3.14^2 \cdot 13 \cdot 30 = 3845.244 \text{ mm}^2$

2<sup>ο</sup> τμήμα: κάθετη επιφάνεια ύψους  $h=50 \text{ mm}$ :  $\pi \cdot d \cdot h = 3.14 \cdot 56 \cdot 50 = 8792 \text{ mm}^2$

3<sup>ο</sup> τμήμα: φλάντζα με ακτίνα  $R=13 \text{ mm}$ :  $\pi^2 \cdot R/2(D-1.3R) = 3.14^2 \cdot 13/2(82-1.3 \cdot 13) = 4172.089 \text{ mm}^2$

Συνεπώς  $S_{\text{τελ}} = S_1 + S_2 + S_3 = 16809.33$

$S_{\text{αρχ}} = S_{\text{τελ}} \Rightarrow \pi \cdot \frac{D_0^2}{4} = 16809.33 \Rightarrow D_0 = 146.3 \text{ mm}$

Επιλέγεται αρχική διάμετρος  $146 \text{ mm}$

Ο λόγος κοίλανσης αρχικά υπολογίζεται  $\beta_{\text{actual}} = \frac{D}{d} = \frac{146}{56} = 2.6$

όπου:

$D(\text{mm})$  : η αρχική διάμετρος

$d(\text{mm})$  : διάμετρος κυathίου

Ο λόγος  $d/s=56/2=28$  δίνει, όπως προκύπτει από το πίνακα 6.1 επιτρεπτό λόγο κοίλανσης  $\beta_{perm} \approx 2.1$

Επειδή λοιπόν  $\beta_{actual} > \beta_{perm}$  η διαδικασία πραγματοποιείται με παραπάνω από μία κοιλάνσεις.

$$1^{\eta} \text{ κοίλανση : } \beta_{0perm} = \frac{D}{d_1} \Rightarrow d_1 = \frac{D}{\beta_{0perm}} = \frac{146}{2.1} = 69.5\text{mm} \quad (\beta_{0perm}=2.1, \text{ όπως δίνει ο πίνακας 6.1})$$

Επιλέγεται διάμετρος  $d_1=70\text{mm}$

$$\text{άρα ο λόγος κοίλανσης είναι: } \beta_0 = \frac{D}{d_1} = \frac{146}{70} = 2.08$$

$$1^{\eta} \text{ ανακοίλανση: } \beta_{1perm} = \frac{d_1}{d_2} \Rightarrow d_2 = \frac{d_1}{\beta_{1perm}} = \frac{70}{1.3} = 53.8\text{mm} \quad (\beta_{1perm}=1.3)$$

Επειδή  $53.8 < d=56$  η διαδικασία τερματίζεται και  $d_2=56\text{mm}$

$$\text{άρα ο λόγος κοίλανσης είναι: } \beta_1 = \frac{d_1}{d_2} = \frac{70}{56} = 1.25$$

Συνεπώς η κοίλανση πραγματοποιείται σε δύο φάσεις για τις οποίες ισχύει :

1<sup>η</sup> φάση : αρχική διάμετρος  $D=146\text{mm}$

τελική διάμετρος  $d_1=70\text{mm}$

λόγος κοίλανσης  $\beta_0=2.08$

2<sup>η</sup> φάση : αρχική διάμετρος  $d_1=70\text{mm}$

τελική διάμετρος  $d_2=56\text{mm}$

λόγος κοίλανσης  $\beta_1=1.25$

Η δύναμη κοίλανσης στη πρώτη φάση της κοίλανσης υπολογίζεται ως εξής:

$$p = \left[ (\beta_1 - 1)^2 + \frac{d_1}{200 \cdot s} \right] \cdot \frac{\sigma_B}{400}$$

$$F_z = d \cdot \pi \cdot s \cdot \sigma_B \cdot \frac{\beta_1 - 1}{\beta_{perm}} = d_1 \cdot \pi \cdot s \cdot \sigma_B \cdot \frac{\beta_0 - 1}{\beta_{perm}} = 70 \cdot 3.14 \cdot 2 \cdot 300 \cdot \frac{2.08 - 1}{2.1 - 1} = 129482.182\text{N} = 129.482\text{kN}$$

Η χάρη κοίλανσης υπολογίζεται :  $c = s + k \cdot \sqrt{s} = 2 + 0.07 \cdot \sqrt{2} = 2.09$

Η τιμή  $k$  για χάλυβα ισούται με 0.07 (από πίνακα 6.4)

Η δύναμη συγκράτησης δίνεται από τη σχέση  $F_N = p \cdot A_N$

Αρχικά υπολογίζεται η πίεση συγκράτησης:

$$p = \left[ (\beta_0 - 1)^2 + \frac{d_1}{200 \cdot s} \right] \cdot \frac{\sigma_B}{400} = \left[ (2.08 - 1)^2 + \frac{70}{200 \cdot 2} \right] \cdot \frac{300}{400} = 1.0 \text{ N/mm}^2$$

Έπειτα υπολογίζεται η επιφάνεια συγκράτησης

$$A_N = (D^2 - d_e^2) \cdot \frac{\pi}{4} = (146^2 - 83^2) \cdot 3.14 / 4 = 11325.195\text{mm}^2$$

όπου  $d_e = d_1 + 2 \cdot c + 2 \cdot r_M = 70 + 2 \cdot 2.09 + 2 \cdot 4.41 = 83\text{mm}$

ακτίνα καμπυλότητας  $r_M = 0.035 \cdot [50 + (D - d)] \cdot \sqrt{s} = 0.035 \cdot (50 + (146 - 70)) = 4.41\text{mm}$

Αφού έχουν υπολογιστεί οι πίεση και η επιφάνεια συγκράτησης, πλέον μπορεί να υπολογιστεί και η δύναμη:

$$F_N = p \cdot A_N = 1 \cdot 11325.195 = 11325.195 \text{ N} \Rightarrow F_N = 11.325195 \text{ kN}$$

Το έργο κοίλανσης για πρέσα διπλής ενέργειας, δίνεται από τη σχέση:

$$W = F_Z \cdot x \cdot h$$

επιλέγεται συντελεστής διόρθωσης  $x=0.63$

και υπολογίζεται η ενεργός διαδρομή του εμβόλου χωρίς να παραλείπεται το πάχος του κυαθίου :

$$\pi \cdot \frac{D_0^2}{4} = \pi^2 \cdot R \cdot d_1 + \pi \cdot d \cdot h + \frac{\pi^2 \cdot R}{2} \cdot (D - 1.3R) \Rightarrow \pi \cdot d \cdot h_1 = \pi \cdot \frac{D_0^2}{4} - \pi^2 \cdot R \cdot d_1 - \frac{\pi^2 \cdot R}{2} \cdot (D - 1.3R) \Rightarrow$$

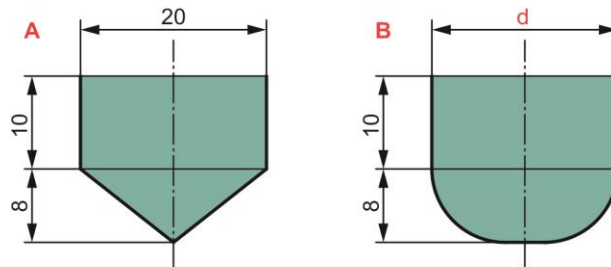
$$\Rightarrow \pi \cdot d \cdot h_1 = 16733.06 - 4172.089 - 3845.244 = 8715.727$$

$$\Rightarrow h_1 = 49.56 + 2 = 51.56 \text{ mm}$$

$$\text{Συνεπώς } W = 129.482 \cdot 0.63 \cdot 51.56 = 4205.93 \text{ kN}$$

## Άσκηση 2

Αν για το αντικείμενο Β του σχήματος απαιτείται διπλάσιας διαμέτρου αρχικό έλασμα από αυτήν που απαιτείται για το Α ποια είναι η διάμετρος  $d$  του δεύτερου αντικειμένου;



## Λύση

Για την επίλυση της άσκησης ισχύει η παραδοχή ότι η αρχική επιφάνεια ελάσματος ισούται με την αρχική δηλαδή το πάχος και ο όγκος του ελάσματος παραμένει σταθερός. Με αυτή τη παραδοχή υπολογίζεται για κάθε σχήμα ξεχωριστά η αρχική διάμετρος:

Σχήμα Α:

Το σχήμα Α χωρίζεται σε δύο επιμέρους τμήματα και για κάθε ένα εξ αυτών υπολογίζεται η επιφάνεια του μέσω των έτοιμων εξισώσεων που έχουν δοθεί.

$$S_{APX} = S_{TEΛ} \Rightarrow S_{APX} = S_1 + S_2$$

$$S_1 = \pi \cdot \frac{d \cdot e}{2} = \frac{3.14 \cdot 20 \cdot 12.8}{2} = 401.92 \text{ mm}^2, \text{ όπου } e = \sqrt{\frac{d^2}{4} + h^2} = \sqrt{\frac{20^2}{4} + 8^2} = 12.8$$

$$S_2 = \pi \cdot d \cdot h = 3.14 \cdot 20 \cdot 10 = 628 \text{ mm}^2$$

Συνεπάγεται λοιπόν ότι:

$$\pi \cdot \frac{D_A^2}{4} = 401.92 + 628 = 1029.92 \Rightarrow D_A^2 = \frac{1029.92 \cdot 4}{\pi} = 1312 \Rightarrow D_A = 36.22 \text{ mm}$$

Σχήμα Β

Αντίστοιχα, το σχήμα Β χωρίζεται σε δύο επιμέρους τμήματα και για κάθε ένα εξ αυτών υπολογίζεται η επιφάνεια του μέσω των έτοιμων εξισώσεων που έχουν δοθεί. Επίσης η ακτίνα καμπυλότητας του πυθμένα κυαθίου θεωρείται  $r < 10 \text{ mm}$ , άρα αμελητέα

$$S_{APX} = S_{TEΛ} \Rightarrow S_{APX} = S_1 + S_2$$

$$S_1 = \pi \cdot d \cdot h = 10 \cdot \pi \cdot d$$

$$S_2 = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$$

$$\text{Συνεπάγεται λοιπόν ότι } \pi \cdot \frac{D_B^2}{4} = 10 \cdot \pi \cdot d + \frac{\pi \cdot d^2}{4}$$

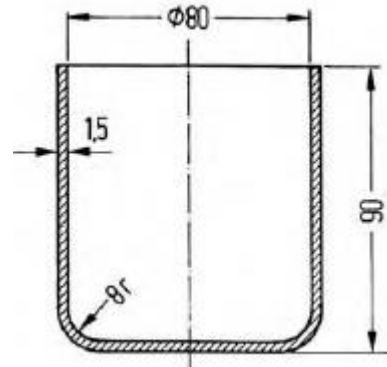
Λαμβάνοντας υπόψιν ότι η αρχική διάμετρος του σχήματος Β είναι διπλάσια της αρχικής διαμέτρου ισχυεί η σχέση :  $D_B = 2 \cdot D_A$  και αντικαθίσταται στη παραπάνω εξίσωση με σκοπό να βρεθεί η τελική διάμετρο d.

Συνεπώς:

$$\pi \cdot \frac{4 \cdot D_A^2}{4} = 10 \cdot \pi \cdot d + \frac{\pi \cdot d^2}{4} \Rightarrow d^2 + 4 \cdot d = 5248 \Rightarrow d = 55.15$$

### Άσκηση 3

Πρόκειται να κατασκευαστεί το ορθογώνιο τεμάχιο της εικόνας από χάλυβα St1303, πάχους 1.2mm και ζητείται να υπολογιστούν τα βήματα κοίλανσης. Δίνεται πλάτος τεμαχίου 100mm



### Λύση

Δεδομένα που λαμβάνονται από το σχήμα  $H=80\text{mm}$ ,  $L=120\text{mm}$ ,  $r_b=8\text{mm}$

Ισχύει η πρώτη περίπτωση όπου  $r_e=r_b=r$

έστω  $q=0.3$

Υπολογίζονται αρχικά οι πλευρές α, b του ορθογωνίου σύμφωνα με τη σχέση:

$$a = L - 2 \cdot r_e = 120 - 2 \cdot 8 = 104\text{mm}$$

$$b = B - 2 \cdot r_e = 100 - 2 \cdot 8 = 84\text{mm}$$

$$\text{καθώς και το ύψος } h = H - r_b = 80 - 8 = 72\text{ mm}$$

$$\text{Υπολογίζεται η αρχική διάμετρος } R_1 = x \cdot R = 1.35 \cdot 48.5 = 19.8\text{mm}$$

$$\text{όπου : } R = 1.42 \cdot \sqrt{r \cdot h + r^2} = \sqrt{8 \cdot 72 + 8^2} = 35.9\text{ mm και}$$

$$x = 0.074 \cdot \left( \frac{R}{2 \cdot r} \right) + 0.982 = 0.074 \cdot \left( \frac{35.9}{2 \cdot 8} \right) + 0.982 = 1.35$$

Το σύνολο των κοιλάνσεων προκύπτει από τις γωνιακές ακτίνες

$$1^{\text{η}} \text{ κοίλανση } r_1 = 1.2 \cdot q \cdot R_1 = 1.2 \cdot 0.34 \cdot 46.8 = 19.8$$

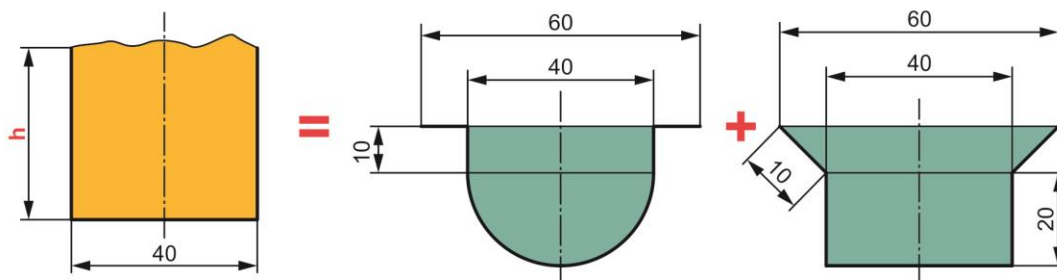
$$2^{\text{η}} \text{ κοίλανση } r_2 = 0.6 \cdot r_1 = 0.6 \cdot 19.8 = 11.9$$

$$3^{\text{η}} \text{ κοίλανση } r_3 = 0.6 \cdot r_2 = 0.6 \cdot 11.9 = 7.14$$

Όμως  $r_3 < r = 8\text{mm}$  οπότε η διαδικασία σταματάει και ολοκληρώνεται σε 3ς φάσεις.

#### Άσκηση 4

Αν ισχύει η ισότητα στις αρχικές επιφάνειες των τριών ελασμάτων των αντικειμένων του σχήματος να προσδιοριστεί το ύψος  $h$ .



#### Λύση

Δηλαδή ισχύει ότι :  $S_{APX1} = S_{APX2} + S_{APX3}$

Κατά την εκφώνηση, η ισότητα που δίνεται ισχύει για τις αρχικές επιφάνειες των αντικειμένων. Καθώς όμως ισχύει η παραδοχή ότι για το καθένα η αρχική του επιφάνεια ισούται με την τελική του ισχύει και το αντίστοιχο:  $S_{TEΛ1} = S_{TEΛ2} + S_{TEΛ3}$

Συνεπώς αρκεί να υπολογιστούν οι τελικές επιφάνειες των αντικειμένων προκειμένου να βρεθεί το ζητούμενο ύψος  $h$  του πρώτου αντικειμένου.

Υπολογίζεται για κάθε αντικείμενο ξεχωριστά η τελική του επιφάνεια και όπου χρειάζεται χωρίζεται σε επιμέρους τμήματα τα οποία έχουν γνωστό τύπο υπολογισμού.

1<sup>ο</sup> σχήμα:

Για το πρώτο σχήμα λαμβάνεται  $d=40\text{mm}$

$$S_{APX}=S_{TEΛ}$$

$$S_{TEΛ} = \pi \cdot D \cdot h = 40 \cdot \pi \cdot h$$

2<sup>ο</sup> σχήμα:

Για το δεύτερο σχήμα λαμβάνεται  $d_1=60\text{mm}$ ,  $d_2=40\text{mm}$ ,  $h=10\text{mm}$

$$1^{\circ} \text{ τμήμα: } \frac{\pi}{4} (d_1^2 - d_2^2) = \frac{\pi}{4} \cdot (60^2 - 40^2) = 500 \cdot \pi$$

$$2^{\circ} \text{ τμήμα: } \pi \cdot d_1 \cdot h = 40 \cdot \pi \cdot 10 = 400 \cdot \pi$$

$$3^{\circ} \text{ τμήμα: } \frac{\pi \cdot d_1^2}{2} \cdot h = \frac{\pi \cdot 40^2}{2} = 800 \cdot \pi$$

Το άθροισμα των επιμέρους τμημάτων του 2<sup>ου</sup> σχήματος δίνει τη τελική επιφάνεια του τεμαχίου  $S_{TEΛ} = 500 \cdot \pi + 400 \cdot \pi + 800 \cdot \pi = 1700\pi$

3<sup>ο</sup> σχήμα

Για το πρώτο σχήμα λαμβάνεται  $d_1=60\text{mm}$ ,  $d_2=40\text{mm}$ ,  $e=10\text{mm}$ ,  $h=20\text{mm}$

$$1^{\circ} \text{ τμήμα: } \frac{\pi \cdot e}{2} \cdot (d_1 + d_2) = \frac{\pi \cdot 10}{2} \cdot (60 + 40) = 500 \cdot \pi$$

$$2^{\circ} \text{ τμήμα: } \pi \cdot d_1 \cdot h = 40 \cdot \pi \cdot 20 = 800 \cdot \pi$$

Το άθροισμα των επιμέρους τμημάτων του 3<sup>ου</sup> σχήματος δίνει τη τελική επιφάνεια του τεμαχίου  $S_{TEΛ} = 500 \cdot \pi + 800 \cdot \pi = 1300\pi$

$$\text{Συνεπάγεται λοιπόν ότι : } S_{TEΛ1} = S_{TEΛ2} + S_{TEΛ3} \Rightarrow 40 \cdot \pi \cdot h = 1700 \cdot \pi + 1300 \cdot \pi \Rightarrow h = 75\text{mm}$$

## 8. Κάμψη

### 8.1 Γενικά για τη κάμψη

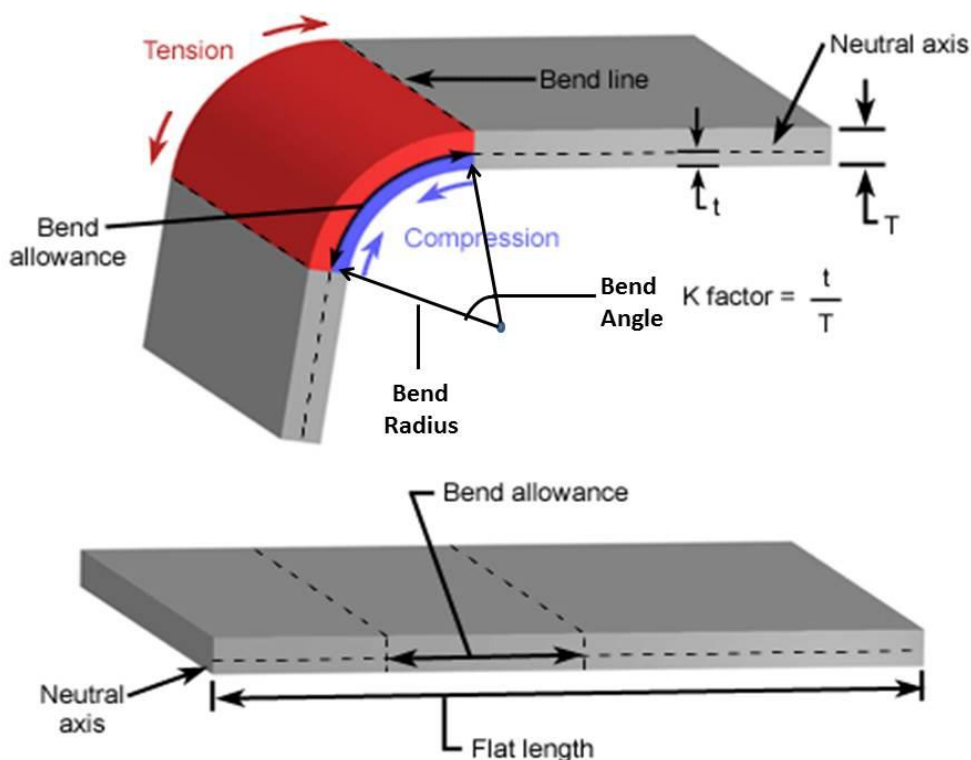
Η κάμψη είναι μια διαδικασία διαμόρφωσης κατά την οποία ένα ευθύγραμμο μέταλλο παραμορφώνεται σε καμπύλο μέγεθος.

Η κάμψη χρησιμοποιείται για το μετασχηματισμό ελασμάτων ή λωρίδων μετάλλων σε γωνιακά ή δακτυλιοειδή τεμάχια και τη παραγωγή σωλήνων και τεμαχίων όπου η αξιοποίηση βρίσκει εφαρμογή σε πολλούς κλάδους της βιομηχανίας.

Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας το μέταλλο παραμορφώνεται πλαστικά με αποτέλεσμα η κάμψη να παίρνει μία μόνιμη μορφή κατά την αφαίρεση των τάσεων που τη προκάλεσαν. Θεωρείται ότι μετά το τέλος της διαδικασίας το πάχος του μετάλλου δεν έχει υποστεί σημαντικές αλλαγές.

Οι λειτουργίες της κάμψης πραγματοποιούνται εν θερμώ ή εν ψυχρώ και αυτό εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του μετάλλου προς κατεργασία. Για παράδειγμα φύλλα μετάλλου με μικρή διατομή κάμπτονται εν θερμώ σε αντίθεση με τα μέταλλα μεγάλων διατομών τα οποία υπόκεινται σε κατεργασίες εν ψυχρώ

Τέλος τα εργαλεία που χρησιμοποιούνται στη διαδικασία της κάμψης είναι οι στράντζες και οι στραντζοπρέσες.



Σχήμα 8.1 Κάμψη ελάσματος

## 8.2 Διαδικασία και μηχανική της κάμψης

Το τεμάχιο προς κατεργασία που υφίσταται την κάμψη μέχρι να διαμορφωθεί στη τελική του μορφή υφίστανται ορισμένες καταπονήσεις. Αρχικά ένα έμβολο πιέζει το έλασμα προς τα κάτω ασκώντας δύναμη που δεν υπερβαίνει το όριο ελαστικότητας του τεμαχίου. Ως εκ τούτου το έλασμα παραμορφώνεται ελαστικά σε πρώτη φάση. Έπειτα, καθώς το έμβολο συνεχίζει να ασκεί πίεση προς τα κάτω, το έλασμα υπόκειται σε τάσεις που υπερβαίνουν το όριο διαρροής του και τελικά υφίσταται πλαστική παραμόρφωση.

Οι καταπονήσεις που δέχεται το έλασμα λοιπόν κατά τη διάρκεια της κάμψης είναι οι εξής: Στην εσωτερική του επιφάνεια ασκούνται θλιπτικές τάσεις κατά μήκος του τεμαχίου αυξάνοντας το πλάτος του κατεργαζόμενου υλικού.

Στην εξωτερική επιφάνεια ασκούνται εφελκυστικές τάσεις κατά μήκος του τεμαχίου μειώνοντας το πλάτος της εξωτερικής του επιφάνειας.

Υπάρχει μια ενδιαμέση επιφάνεια στο εσωτερικό του ελάσματος στην οποία δεν ασκούνται ούτε εφελκυστικές ούτε θλιπτικές τάσεις. Ονομάζεται ουδέτερος άξονας και χαρακτηριστικό του γνώρισμα είναι ότι στη περιοχή αυτή το μήκος δε μεταβάλλεται και για αυτό το λόγο είναι εφικτό μέσω αυτού να γίνει ο υπολογισμός του αρχικού μήκους του ελάσματος πριν τη κάμψη.

Η θέση του ουδέτερου άξονα είναι περίπου στο κέντρο της διατομής του τεμαχίου. Παρόλαυτα για μικρή ακτίνα κάμψης ο άξονας μετατοπίζεται προς την εσωτερική πλευρά της διατομής.

Ο ουδέτερος άξονας εξαρτάται από το πάχος του ελάσματος και την ακτίνα καμπυλότητας της κάμψης καθώς όσο μειώνεται η ακτίνα καμπυλότητας, ο άξονας μετακινείται προς την εσωτερική επιφάνεια, καθώς επίσης και με την αύξηση του πάχους του τεμαχίου.

Σύμφωνα με τη θεωρία της κάμψης των J. D. Lubahn και G. Sachs, η τάση αυξάνεται καθώς μειώνεται η ακτίνα καμπυλότητας. Στη περίπτωση που η μεταβολή του πάχους θεωρείται αμελητέα, ο ουδέτερος άξονας παραμένει στο κέντρο της διατομής και η περιφερειακή τάση στην εξωτερική επιφάνεια θα ισούται με την θλιπτική τάση στην εσωτερική επιφάνεια και αντίθετες. Οι τάσεις αυτές συνδέονται με τη σχέση:

$$\sigma_{εξ} = -\sigma_{εσ} = \frac{1}{\frac{2 \cdot r_i}{s} + 1} \quad (\text{Εξίσωση 8.1})$$

όπου:

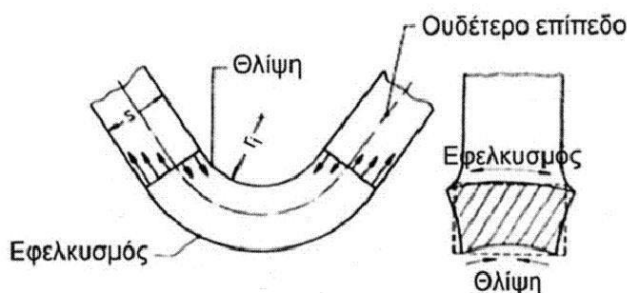
$\sigma_{εξ}$  η τάση που ασκείται στην εξωτερική επιφάνεια

$\sigma_{εσ}$  η τάση που ασκείται στην εσωτερική επιφάνεια

$r_i$  η ακτίνα κάμψης

$s$  πάχος ελάσματος

Βέβαια πειραματικά έχει αποδειχθεί ότι η τάση που ασκείται στην εξωτερική επιφάνεια, είναι αρκετά μεγαλύτερη από τη αυτή που προκύπτει από τη σχέση για υψηλές τιμές του λόγου  $r_i/s$ , ενώ αντίστοιχα η τάση που ασκείται στην εσωτερική επιφάνεια συμπίπτει σχεδόν απόλυτα με τη παραπάνω σχέση.



**Σχήμα 8.2** Αξονική καταπόνηση

Η ακτίνα κάμψης κατά κανόνα πρέπει να λαμβάνει τιμές που προτείνονται κατά DIN 6935, δηλαδή να επιλέγονται με την εξής ακόλουθη σειρά ( κατά προτίμηση χρησιμοποιούνται οι τιμές με έντονη γραφή):

τιμές ακτίνας καμπυλότητας  $r_i$

**1 1.2 1.6 2 2.5 3 4 5 6 8 10 12 16 20 25 28 32 36 40 45 50 63 80 100**

Τέλος , πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψιν στη κατεύθυνση της έλασης. Η πιο σωστή κατεύθυνση για την κάμψη είναι εγκάρσια στην κατεύθυνση της έλασης. Στη περίπτωση που ο άξονας κάμψης βρίσκεται παράλληλα στη κατεύθυνση της έλασης του ελάσματος, η ελάχιστη ακτίνα κάμψης  $r_{imin}$ , που θα επιλεγθεί πρέπει να είναι μεγαλύτερη από ό,τι κατά την κάμψη υπό ορθή γωνία προς την κατεύθυνση της έλασης.

Ο πίνακας 8.1 δίνει τις μικρότερες αποδεκτές ακτίνες κάμψης για γωνίες κάμψης  $\alpha$  μέχρι και  $120^\circ$ . Για γωνίες κάμψης μεγαλύτερες από  $120^\circ$  ( $\alpha > 120^\circ$ ) ισχύει η επόμενη πιο υψηλή τιμή. Παραδείγματος χάριν, για τη κάμψη χαλύβδινων ελασμάτων QSt 42-2 πάχους  $s=6$  mm σε ορθή γωνία με κατεύθυνση ίδια με κατεύθυνση της έλασης η μικρότερη αποδεκτή ακτίνα κάμψης είναι  $r_{imin}=10$  mm για γωνία  $\alpha \leq 120^\circ$  και  $r_{imin}=12$  mm για  $\alpha > 120^\circ$

|  |  | ελάχιστα επιτρεπόμενες τιμές της ακτίνας κάμψης $r_{imin}$ για πάχος ελάσματος $s$ |            |              |            |          |          |          |          |
|--|--|--|------------|--------------|------------|----------|----------|----------|----------|
| Αντοχή σε εφελκυσμό (N/mm <sup>2</sup> ) | κατεύθυνση κάμψης σε σχέση με τη κατεύθυνση έλασης του ελάσματος | 1  | >1 έως 1.5 | >1.5 έως 2.5 | >2.5 έως 3 | >3 έως 4 | >4 έως 5 | >5 έως 6 | >6 έως 7 |
|  |  | 1  | 1.6        | 2.5          | 3          | 5        | 6        | 8        | 10       |
| μέχρι 390                                | εγκάρσια   | 1  | 1.6        | 2.5          | 3          | 5        | 6        | 8        | 10       |
|  | διαμήκη  | 1  | 1.6        | 2.5          | 3          | 6        | 8        | 10       | 12       |
| 390-490                                  | εγκάρσια   | 1.2  | 2          | 3            | 4          | 5        | 8        | 10       | 12       |
|  | διαμήκη  | 1.2  | 2          | 3            | 4          | 6        | 10       | 12       | 16       |
| 490-960                                  | εγκάρσια   | 1.6  | 2.5        | 4            | 5          | 6        | 8        | 10       | 12       |
|  | διαμήκη  | 1.6  | 2.5        | 4            | 5          | 8        | 10       | 12       | 16       |

|  |  | ελάχιστα επιτρεπόμενες τιμές της ακτίνας κάμψης $r_{imin}$ για πάχος ελάσματος $s$ |           |            |            |            |            |            |  |
|--|--|--|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|--|
| Αντοχή σε εφελκυσμό (N/mm <sup>2</sup> ) | κατεύθυνση κάμψης σε σχέση με τη κατεύθυνση έλασης του ελάσματος | >7 έως 8   | >8 έως 10 | >10 έως 12 | >12 έως 14 | >14 έως 16 | >16 έως 18 | >18 έως 20 |  |
| μέχρι 390                                | εγκάρσια   | 12   | 16        | 20         | 25         | 28         | 36         | 40         |  |
|  | διαμήκη  | 16   | 20        | 25         | 28         | 32         | 40         | 45         |  |
| 390-490                                  | εγκάρσια   | 16   | 20        | 25         | 28         | 32         | 40         | 45         |  |
|  | διαμήκη  | 20   | 25        | 32         | 36         | 40         | 45         | 50         |  |
| 490-960                                  | εγκάρσια   | 16   | 20        | 25         | 32         | 36         | 45         | 50         |  |
|  | διαμήκη  | 20   | 25        | 32         | 36         | 40         | 50         | 63         |  |

**Πίνακας 8.1** ελάχιστα επιτρεπόμενες τιμές ακτίνας κάμψης

#### Ελάχιστη ακτίνα κάμψης

Είναι η μικρότερη επιτρεπτή ακτίνα κάμψης του υλικού πριν παρουσιαστεί ρωγμή στο τεμάχιο. Είναι πολύ σημαντική η τήρηση της έτσι ώστε να μην επηρεάζεται η ποιότητα του τεμαχίου όταν δέχεται εφελκυστικές και θλιπτικές τάσεις. Σε περίπτωση που η ακτίνα κάμψης είναι μικρότερη από την ελάχιστη ακτίνα υπάρχει κίνδυνος δημιουργίας εξωτερικών ρωγμών καθώς και εσωτερικών θραύσεων και τελικά σπάσιμο του υλικού.

Η σχέση που υπολογίζει την ακτίνα καμπυλότητας είναι η εξής:

$$r_{imin} = c \cdot s$$

(Εξίσωση 8.2)

όπου:

$r_{imin}$  (mm) μικρότερη δυνατή ακτίνα κάμψης

$s$  (mm) πάχος του ελάσματος

$c$  (-) συντελεστής που εξαρτάται από το υλικό και υπολογίζεται από το πίνακα 8.2

| Υλικό      | Επαναφορά |           | Σκλήρυνση |            |
|------------|-----------|-----------|-----------|------------|
|            | Λοξή      | Επαναφορά | Λοξή      | Κατά Μήκος |
| Al         | 0.01      | 0.3       | 0.3       | 0.8        |
| Cu         | 0.01      | 0.3       | 1         | 2          |
| Ms67, Ms72 | 0.01      | 0.3       | 0.4       | 0.8        |
| St13-3     | 0.01      | 0.4       | 0.4       | 0.8        |
| C15-20     | 0.1       | 0.5       | 0.5       | 1          |
| C35-40     | 0.3       | 0.8       | 0.8       | 1.5        |

**Πίνακας 8.2** Τιμές συντελεστή  $c$

Η τιμή της ακτίνας κάμψης δε πρέπει να είναι μικρότερη από  $0.6 \cdot s$  και για σκληρά υλικά πρέπει να είναι ίση με το πάχος του ελάσματος. Τέλος η πραγματική ακτίνα κάμψης πρέπει να είναι μεγαλύτερη ή ίση με τη ελάχιστη ακτίνα κάμψης καθώς σε αντίθετη περίπτωση το μέταλλο σπάει στην εξωτερική του επιφάνεια.

### 8.3 Ελαστική επαναφορά (Springback)

Στο τέλος της κάμψης, οι δυνάμεις και οι τάσεις που ασκούνται στο τεμάχιο απομακρύνονται και εκείνο αποφορτίζεται. Το τεμάχιο έχει υποστεί σε ορισμένα τμήματα του ελαστική παραμόρφωση και τείνει να επανέλθει στην αρχική του κατάσταση, παρόλαυτα υπάρχει μία απόκλιση από την επιθυμητή γωνία κλίσης. Η επαναφορά αυτή ονομάζεται springback. Το μέγεθος της επαναφοράς του ελάσματος εξαρτάται από το όριο διαρροής του υλικού, τον λόγο της ακτίνας καμπυλότητας προς το πάχος του ελάσματος αλλά και το είδος της κάμψης που είχε υποβληθεί.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 8.3 η τελική γωνία κάμψης μετά την επαναφορά του ελάσματος είναι μικρότερη και η γωνία καμπυλότητας μεγαλύτερη από την αρχική κατάσταση.

Ένα ποσοτικό μέγεθος που χαρακτηρίζει το springback είναι ο συντελεστής επαναφοράς  $K_s$ , ο οποίος βασίζεται στο γεγονός ότι τα όρια κάμψης δε μεταβάλλονται πριν και μετά τη κάμψη.

Η σχέση που συνδέει τη ακτίνα καμπυλότητας και τη γωνία κάμψης, δίνεται από τη σχέση:

$$B = \left( r_i + \frac{s}{2} \right) \cdot \alpha_i = \left( r_f + \frac{s}{2} \right) \cdot \alpha_f \quad (\text{Εξίσωση 8.3})$$

όπου :

$r_i$  (mm) ακτίνα καμπυλότητας μήτρας

$r_f$  (mm) ακτίνα καμπυλότητας τεμαχίου

$s$  (mm) πάχος ελάσματος

$\alpha_i$  (°) γωνία κάμψης των εργαλείων

$\alpha_f$  (°) πραγματική τελική γωνία κάμψης του ελάσματος

Από τη παραπάνω σχέση προκύπτει και ο συντελεστής επαναφοράς:

$$K_s = \frac{\alpha_i}{\alpha_f} = \frac{\left( r_i + \frac{s}{2} \right)}{\left( r_f + \frac{s}{2} \right)} \quad (\text{Εξίσωση 8.4})$$

Στη περίπτωση που  $K_s=1$  το τεμάχιο δεν υπάρχει καθόλου ελαστική επαναφορά, ενώ αντίθετα για  $K_s=0$  το τεμάχιο υφίσταται ολική ελαστική επαναφορά όπως φαίνεται στο σχήμα 8.4

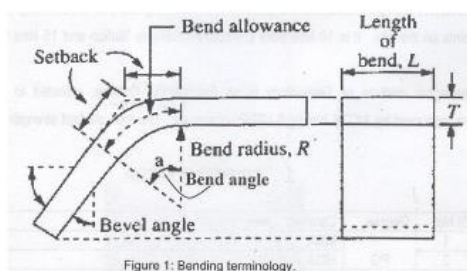


Figure 1: Bending terminology.

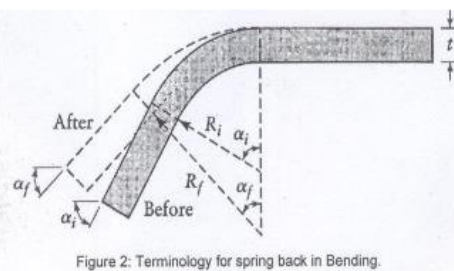
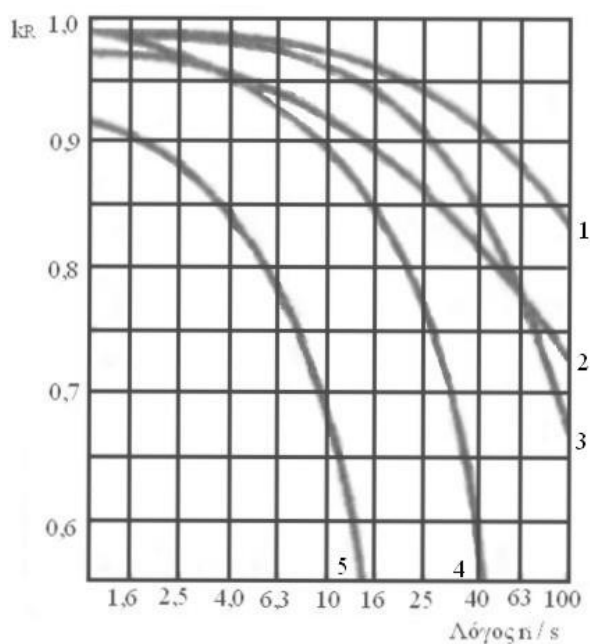


Figure 2: Terminology for spring back in Bending.

**Σχήμα 8.3** Γωνία κάμψης και επαναφορά (springback)



**Σχήμα 8.4** Συντελεστής επαναφοράς  $K_s$  για διάφορα υλικά

Ο συντελεστής επαναφοράς  $K_s$  υπολογίζεται είτε από το παραπάνω σχήμα είτε από το πίνακα 8.3

| r/s           | 1  | 1.6  | 2.5  | 4    | 6.3  | 10   | 16   | 25   | 40   | 63   | 100  |
|---------------|--|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Υλικό         | <b>ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΕΛΑΣΤΙΚΗΣ ΕΠΑΝΑΦΟΡΑΣ <math>k_s</math></b> |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| FePO4(St 14)  | 0,99   | 0,99 | 0,99 | 0,98 | 0,97 | 0,97 | 0,96 | 0,94 | 0,91 | 0,87 | 0,83 |
| FePO1(St 12)  | 0,99   | 0,99 | 0,99 | 0,97 | 0,96 | 0,96 | 0,93 | 0,9  | 0,85 | 0,7  | 0,66 |
| X12CrNi18 - 8 | 0,99   | 0,98 | 0,97 | 0,95 | 0,93 | 0,89 | 0,84 | 0,76 | 0,63 | -    | -    |
| CuZn 33 F 29  | 0,97   | 0,97 | 0,96 | 0,95 | 0,94 | 0,93 | 0,89 | 0,86 | 0,83 | 0,77 | 0,73 |
| AlCuMg F 38   | 0,98   | 0,98 | 0,98 | 0,98 | 0,97 | 0,97 | 0,96 | 0,95 | 0,93 | 0,91 | 0,87 |

**Πίνακας 8.3** Συντελεστής  $K_s$  σε σχέση την ακτίνα καμπυλότητας τεμαχίου

Η παραπάνω συμπεριφορά επαναφοράς ονομάζεται θετική ελαστική επαναφορά. Κάτω από ορισμένες συνθήκες βέβαια, είναι πιθανό να υπάρξει και αρνητική ελαστική επαναφορά. Δηλαδή, η γωνία κάμψης μειώνεται μετά το τέλος της κάμψης και την αφαίρεση των φορτίων. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται κυρίως στις κάμψης μορφής V. Η ανάπτυξη της αρνητικής επαναφοράς παρατηρείται από το σχήμα 8.5 και παρατηρώντας τη σειρά παραμόρφωσης του ελάσματος. Κατά την αφαίρεση του τεμαχίου από το 2<sup>ο</sup> στάδιο, όπως φαίνεται στην εικόνα, εκείνο υπόκειται σε θετική ελαστική επαναφορά. Στο στάδιο 3<sup>ο</sup> στάδιο τα άκρα του τεμαχίου εφάπτονται με το έμβολο. Ανάμεσα στο 2<sup>ο</sup> και 3<sup>ο</sup> στάδιο το τεμάχιο ουσιαστικά κάμπτεται σε αντίθετη κατεύθυνση με εκείνη στο 1<sup>ο</sup> και 2<sup>ο</sup> στάδιο. Στο 2<sup>ο</sup> και 3<sup>ο</sup> στάδιο κάμψης η ακτίνα του εμβόλου και η εσωτερική ακτίνα του τεμαχίου δε συμπίπτουν απόλυτα μεταξύ τους σε αντίθεση με το 4<sup>ο</sup> στάδιο, στο οποίο ταυτίζονται.

Κατά την εκ φόρτιση το τεμάχιο στο 4<sup>ο</sup> στάδιο υπόκειται σε ελαστική επαναφορά προς τα μέσα καθώς χαλαρώνει από το 3<sup>ο</sup> στάδιο τόσο στη κορυφή του εμβόλου όσο και στα άκρα

του ελάσματος. Η αρνητική αυτή εσωτερική επαναφορά είναι μεγαλύτερη από τη θετική επαναφορά λόγω των μεγάλων παραμορφώσεων που υποβλήθηκε το τεμάχιο στο 2<sup>ο</sup> στάδιο.

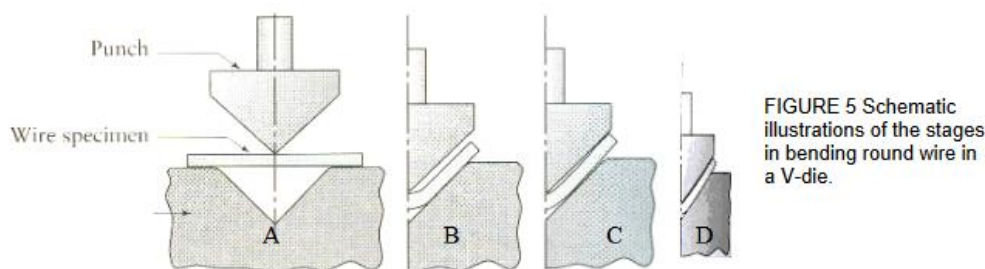


FIGURE 5 Schematic illustrations of the stages in bending round wire in a V-die.

**Σχήμα 8.5** Στάδια κάμψης

#### 8.4 Ανάπτυγμα ελάσματος

Το μήκος του ελάσματος προς κατεργασία ισούται με το μήκος του τελικού τεμαχίου που υπολογίζεται με βάση τον ουδέτερο άξονα και ονομάζεται ανοιγμένο μήκος. Το ανοιγμένο μήκος ουσιαστικά αποτελεί το άθροισμα όλων των ευθύγραμμων και καμπύλων τμημάτων του τελικού τεμαχίου και εκφράζεται από την παρακάτω σχέση:

$$L = l_1 + l_{cu} + l_2 \quad (\text{Εξίσωση 8.5})$$

όπου:

$L$  (mm) ανηγμένο, συνολικό μήκος

$l_1, l_2$  (mm) μήκος ευθύγραμμων τμημάτων

$l_{cu}$  (mm) μήκος καμπύλου τμήματος

Επειδή κατά τη κάμψη το έλασμα υπόκειται σε επιμήκυνση, το πραγματικό μήκος του τεμαχίου υπολογίζεται με τη βοήθεια ενός συντελεστή διόρθωσης:

$$L = l_1 + \frac{\pi \cdot \alpha}{180^\circ} \left( r_i + \frac{e \cdot s}{2} \right) + l_2 \quad (\text{Εξίσωση 8.5})$$

όπου:

$r_i$  (mm) η ακτίνα κάμψης τεμαχίου

$\alpha$  (°) γωνία κάμψης τεμαχίου

$s$  (mm) πάχος ελάσματος

$e$  (-) συντελεστής διόρθωσης. Υπολογίζεται από το πίνακα 8.4 και εξαρτάται από το πάχος υλικού

Για γωνία κάμψης  $\alpha = 90^\circ$ :

$$L = l_1 + 1.57 \left( r_i + \frac{e \cdot s}{2} \right) + l_2 \quad (\text{Εξίσωση 8.6})$$

| $r/s$ | 5.0 | 3.0 | 2.0 | 1.2 | 0.8 | 0.5 |
|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $e$   | 1.0 | 0.9 | 0.8 | 0.7 | 0.6 | 0.5 |

**Πίνακας 8.4** Συντελεστής διόρθωσης  $e$

## 8.5 Είδη κάμψης

Η κάμψη είναι μία κατεργασία που ανάλογα με τις απαιτήσεις για το τελικό προϊόν μπορεί να πραγματοποιηθεί με αρκετές μεθόδους. Παρακάτω αναλύονται οι μέθοδοι κάμψης.

### -Ελεύθερη κάμψη

Στην ελεύθερη κάμψη το έμβολο και η μήτρα χρησιμοποιούνται ως μέσω μετάδοσης ενέργειας. Το τεμάχιο προς διαμόρφωση στηρίζεται σε δύο σημεία. Το έμβολο πραγματοποιεί τη κίνηση προς την κάμψη, διαμορφώνεται η καμπυλότητα και αυξάνεται στο κέντρο.

### -Κάμψη με χρήση καλουπιών

Στη κάμψη με τη χρήση καλουπιών, το έμβολο πιέζει και ωθεί το τεμάχιο προς τη μήτρα. Η διαδικασία ολοκληρώνεται με την άσκηση τάσεων από το έμβολο και τη μήτρα. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται με τη χρήση στρατζοπρέσσας

Στη κατηγορία αυτή ανήκουν ανάλογα με το σχήμα της γωνίας κάμψης οι εξής διαμορφώσεις:

κάμψη V: όπου το έμβολο και η μήτρα έχουν σχήμα V. Η διαμόρφωση αυτή ξεκινάει όπως η ελεύθερη κάμψη με την ακτίνα του τεμαχίου να μεταβάλλεται συνεχώς. Το τεμάχιο είναι κατάλληλα τοποθετημένο έτσι ώστε όταν αρχίσει η κάμψη το έμβολο να έρθει σε επαφή με το σημείο κάμψης, πιέζοντας το να εισχωρήσει στη μήτρα και τελικά να πάρει το σχήμα της.

κάμψη U: αντίστοιχα το τεμάχιο παίρνει το σχήμα του εμβόλου και της μήτρας σε σχήμα U κατά την εισχώρηση του στα τοιχώματα της. Ανάλογα με το τελικό σχήμα του τεμαχίου πραγματοποιείται με τρεις μεθόδους. Στη πρώτη χωρίς αντίθλιψη και το τελικό τεμάχιο παρουσιάζει έντονη κυρτότητα, ουσιαστικά λαμβάνει χώρα ελεύθερη κάμψη. Στη δεύτερη περίπτωση, παρουσία αντίθλιψης ο πυθμένας του τεμαχίου παρουσιάζει κυρτότητα προς τα επάνω. Στη τρίτη περίπτωση γίνεται χρήση συγκρατητή που χρησιμεύει και για την εξόλκευση του τεμαχίου. Ο πυθμένας του τεμαχίου είναι σχεδόν επίπεδος.

### -γωνιακή κάμψη

χρησιμοποιείται ένα μαξιλάρι στήριξης το οποίο ασκεί δύναμη και συγκρατεί του τεμαχίου κόντρα στη μήτρα, καθώς το έμβολο πιέζει το τεμάχιο για να το λυγίσει και να καμφθεί πάνω στη γωνία της μήτρας. Η γωνία κάμψης δε ξεπερνάει τις 90°.

### - κάμψη με κύλιση

Η κίνηση κάμψης εκφράζεται μέσω την κύλισης των ραούλων. Καθώς αυτά περιστρέφονται το έλασμα εσωκλείεται ανάμεσα τους και καμπυλώνεται μέσω της περιστροφής τους.

### - κάμψη με περιστροφική κίνηση της μήτρας

Περιλαμβάνει τη κάμψη κυλίνδρου, κάμψη με λυγισμό και κάμψη κυλίνδρου. Κατά τη διάρκεια της περιστροφικής κάμψης η ροπή κάμψης εφαρμόζεται μέσω της έλασης. Από αυτή τη κατεργασία κατασκευάζονται κύλινδροι, ή κωνικά τεμάχια. Μέσω της ίδιας διαδικασίας είναι δυνατό το ίσιωμα κυλίνδρων με σκοπό το περιορισμό ανεπιθύμητων παραμορφώσεων στο έλασμα.

Κατά τη κάμψη με στρέψη χρησιμοποιείται εργαλείο το οποίο κάμπτει το τεμάχιο γύρω από την άκρη της κάμψης.

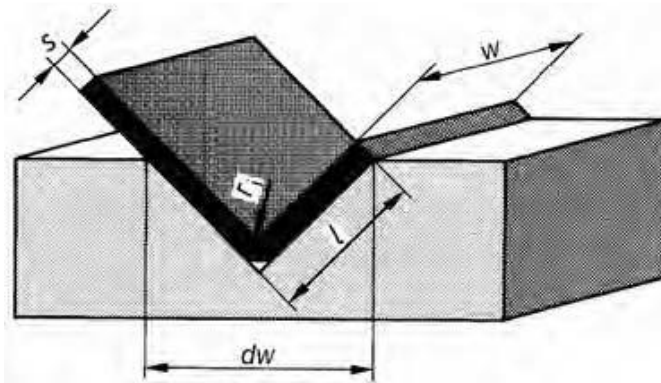
Η κυκλική κάμψη είναι μία συνεχής διαδικασία κάμψης η οποία εξελίσσεται προς τη κατεύθυνση του στελέχους χρησιμοποιώντας λωρίδες ελασμάτων, ράβδους είτε σωλήνες. Η μέγιστη γωνία κάμψης είναι 360°.

## 8.6 Δύναμη και εργασία κάμψης

Η κάμψη σε καλούπια της μορφής V πραγματοποιείται μεταξύ εμβόλου και μήτρας με την εφαρμογή πίεσης πάνω στη μήτρα με σκοπό την εκτόνωση της από τις υπολειπόμενες τάσεις. Οι γωνίες κάμψης και η δύναμη κάμψης εξαρτώνται από το πλάτος της μήτρας. Το μέγεθος της ακτίνας κάμψης έχει μικρότερη σημασία, με τη προϋπόθεση ότι το πλάτος  $dw$  της μήτρας είναι σωστά καθορισμένο. Το μήκος  $l$  (mm) της μήτρας σε σχέση με το πάχος του ελάσματος συνδέονται με τη παρακάτω σχέση:

$$l=6 \cdot s$$

(Εξίσωση 8.7)



**Σχήμα 8.6** Γεωμετρία κάμψης τύπου V

Η δύναμη κάμψης σε μήτρα σχήματος V υπολογίζεται ως εξής:

$$F_b = \frac{1.2 \cdot w \cdot s^2 \cdot \sigma_B}{dw}$$

(Εξίσωση 8.8)

όπου:

$F_b$  (N) δύναμη κάμψης

$w$  (mm) πλάτος ελάσματος

$s$  (mm) πάχος ελάσματος

$\sigma_B$  (N/mm<sup>2</sup>) όριο θραύσης σε εφελκυσμό

$dw$  (mm) διάστημα κάμψης, πλάτος μήτρας

Για το πλάτος της μήτρας/ διάστημα κάμψης ισχύει ότι:

αν  $r_i > r_{imin} \cong 2 \cdot s$  μέχρι  $5 \cdot s$  τότε  $dw = 5 \cdot r_i$ , ενώ αν  $r_i = r_{imin} \cong 1.3 \cdot s$  τότε  $dw = 7 \cdot r_i$ ,

όπου  $r_i$  (mm) γωνία κάμψης,  $r_{imin}$  (mm), η μικρότερη επιτρεπτή ακτίνα

Η ακτίνα καμπυλότητας στα άκρα της μήτρας  $r_m$ , όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα, υπολογίζεται από τη σχέση:

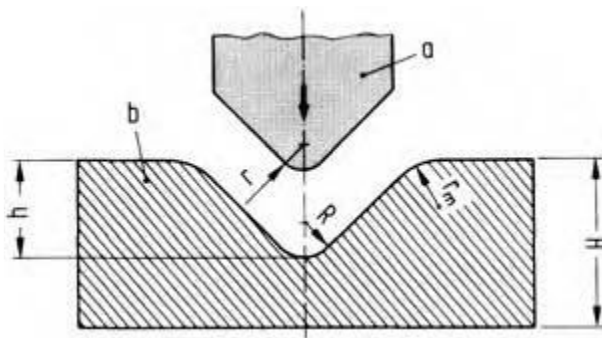
$$r_m = 2.5 \cdot s$$

(Εξίσωση 8.9)

και ακτίνα καμπυλότητας στο μέσο της μήτρας  $R$  από το ίδιο σχήμα:

$$R = 0.7 \cdot (r + s)$$

(Εξίσωση 8.10)



**Σχήμα 8.7** Γεωμετρία κάμψης

Το βάθος  $h$  της κοιλότητας της μήτρας υπολογίζεται από το παρακάτω πίνακα:

| $h$ | 4  | 7  | 11 | 15 | 18 | 22 | 25 | 28 |
|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| $s$ | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  |
| $H$ | 20 | 30 | 40 | 45 | 55 | 65 | 70 | 80 |

**Πίνακας 8.5** Βάθος κοιλότητας μήτρας

Η δύναμη κάμψης σε μήτρα σχήματος U υπολογίζεται ανάλογα τη περίπτωση :  
Στη πρώτη περίπτωση όπου δεν υπάρχει μαξιλάρι υποστήριξης:

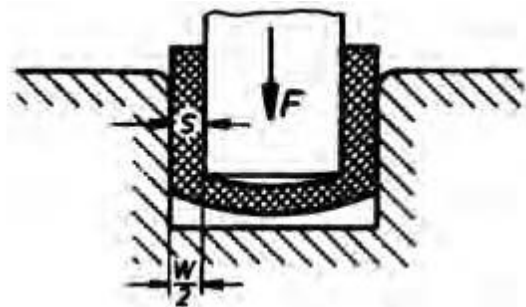
$$F_b = 0.4 \cdot s \cdot b \cdot \sigma_B \quad (\text{Εξίσωση 8.11})$$

όπου:

$s$  (mm) πάχος ελάσματος

$b$  (mm) πλάτος ελάσματος

$\sigma_B$  (N/mm<sup>2</sup>) όριο θραύσης σε εφελκυσμό



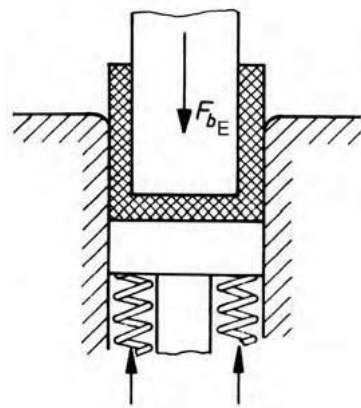
**Σχήμα 8. 8** Τεμάχιο κατά τη κάμψη τύπου U

Στη περίπτωση που υπάρχει το μαξιλάρι ενίσχυσης η δύναμη κάμψης σε μήτρα σχήματος U υπολογίζεται:

$$F_{bT} = 0.5 \cdot s \cdot b \cdot \sigma_B \quad (\text{Εξίσωση 8.12})$$

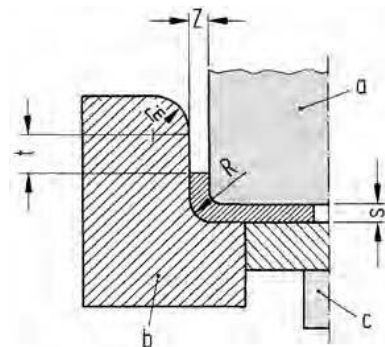
δηλαδή  $F_{bT} \approx 1.25 \cdot F_b$

και η πίεση που ασκείται από τα ελατήρια:  $F_{PP} = 0.25 \cdot F_b$



**Σχήμα 8. 9** Κάμψη τύπου U με συγκράτηση

Η διάταξη της κάμψης με μήτρα σχήματος U φαίνεται στο σχήμα καθώς και κάποια χαρακτηριστικά μεγέθη όπως:



**Σχήμα 8. 10** Κάμψη τύπου U με συγκράτηση

Η εξωτερική ακτίνα καμπυλότητας της μήτρας  $r_m$  :

$$r_m = 2.5 \cdot s$$

(Εξίσωση 8.13)

Η εσωτερική ακτίνα καμπυλότητας της μήτρας R

$$R = 0.7 \cdot (r + s) \text{ ή } R = 0$$

(Εξίσωση 8.14)

Το ύψος  $t$  (mm), η απόσταση δηλαδή μεταξύ των καμπύλων επιφανειών της μήτρας υπολογίζεται από το παρακάτω πίνακα

|          |   |   |   |   |   |    |    |    |
|----------|---|---|---|---|---|----|----|----|
| <b>t</b> | 3 | 4 | 5 | 6 | 8 | 10 | 15 | 20 |
| <b>s</b> | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6  | 7  | 8  |

**Πίνακας 8.6** Υπολογισμός ύψους  $t$

Το άνοιγμα  $Z$  (mm), η χάρη δηλαδή ανάμεσα στο έμβολο και τη μήτρα: μέγιστη χάρη :

$$Z_{\max} = s_{\max} \cdot n$$

(Εξίσωση 8.15)

όπου  $n$  μέγεθος εξαρτώμενο από το πάχος του ελάσματος

$s_{\max}$  (mm) το μέγιστο πάχος ελάσματος

Για τη περίπτωση που τα μήκη των πλευρών του τεμαχίου είναι μεταξύ 25 και 100 mm τότε το μέγεθος  $n$  υπολογίζεται από το παρακάτω πίνακα:

|          |      |      |      |      |      |      |      |      |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| <b>n</b> | 0.15 | 0.10 | 0.10 | 0.08 | 0.08 | 0.07 | 0.07 | 0.06 |
| <b>s</b> | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    |

**Πίνακας 8.7** Υπολογισμός μεγέθους n

Γωνιακή Κάμψη

Στη γωνιακή κάμψη η δύναμη υπολογίζεται ως εξής:

$$F_b = 0.2 \cdot s \cdot b \cdot \sigma_B$$

(Εξίσωση 8.16)

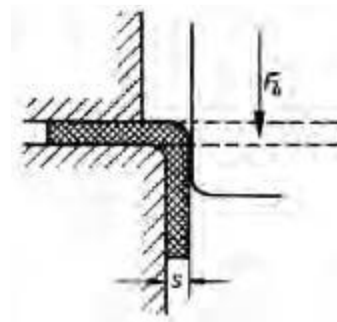
όπου:

s (mm) πάχος ελάσματος

b (mm) πλάτος ελάσματος

$\sigma_B$  (N/mm<sup>2</sup>) όριο θραύσης σε εφελκυσμό

η διάταξη για γωνιακή κάμψη φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



**Σχήμα 8. 9** Γωνιακή κάμψη

Κυλινδρική κάμψη

Στη κυλινδρική κάμψη η δύναμη υπολογίζεται ως εξής:

$$F_b = \frac{0.7 \cdot s^2 \cdot b \cdot \sigma_B}{d_1}$$

(Εξίσωση 8.17)

όπου:

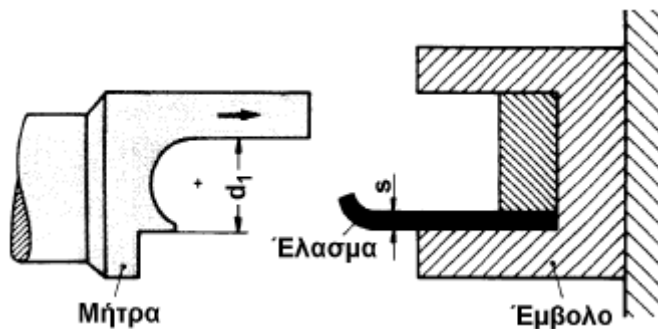
s (mm) πάχος ελάσματος

b (mm) πλάτος ελάσματος

$\sigma_B$  (N/mm<sup>2</sup>) όριο θραύσης σε εφελκυσμό

d<sub>1</sub> (mm) διάμετρος εμβόλου

διάταξη για κυλινδρική κάμψη φαίνεται στο παρακάτω σχήμα



Διαπλάτυνση οπής με κάμψη

Στη διαπλάτυνση οπής με κάμψη η δύναμη υπολογίζεται ως εξής

$$F_b = 0.7 \cdot s \cdot d_1 \cdot \delta \cdot \sigma_B \quad (\text{Εξίσωση 8.18})$$

ενώ ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$d = D - 2(H - 0.43 \cdot r - 0.72 \cdot s) \quad (\text{Εξίσωση 8.19})$$

$$H = \frac{D-d}{2} + 0.43 \cdot r + 0.72 \cdot s \quad (\text{Εξίσωση 8.20})$$

$$H_{\max} = 0.12 \cdot d_1 + s \quad (\text{Εξίσωση 8.21})$$

$$d_1 \approx D + 0.3 \cdot s \quad (\text{Εξίσωση 8.22})$$

$$\delta = \frac{d_1 - d}{d_1} \quad (\text{Εξίσωση 8.23})$$

όπου:

H (mm) ύψος διαπλάτυνσης

D (mm) μέση ακτίνα περιλαιμίου

s (mm) πάχος ελάσματος

r (mm) ακτίνα κάμψης

d<sub>1</sub> (mm) διάμετρος οπής μήτρας

δ (mm) άνοιγμα οπής

d (mm) διάμετρος διάτρησης

σ<sub>B</sub> (N/mm<sup>2</sup>) αντοχή υλικού σε εφελκυσμό

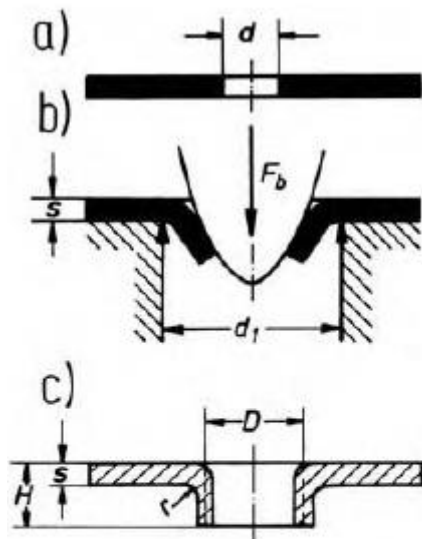


Figure 16.9 The principle of collar forming,

- a) workpiece before,
- b) during,
- c) after forming

## 8.7 Έργο

Το έργο κάμψης για στη γενική του μορφή δίνεται από τη παρακάτω σχέση και ανάλογα με το είδος της κάμψης που εφαρμόζεται, προσαρμόζεται.

$$W = x \cdot F_b \cdot h$$

(Εξίσωση 8.24)

όπου:

$x$  (-) συντελεστής κάμψης

$F_b$  (N) δύναμη κάμψης

$h$  (mm) ύψος κάμψης

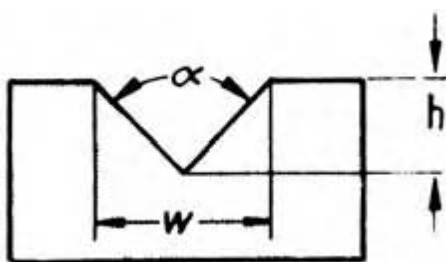
Στη κάμψη με μήτρα σε σχήμα V:

$$W = \frac{1}{3} \cdot F_b \cdot h$$

(Εξίσωση 8.25)

δηλαδή  $x = \frac{1}{3}$  και το ύψος κάμψης  $h = \frac{w/2}{\tan \frac{\alpha}{2}}$ , όπου  $w$  (mm) το διάστημα κάμψης, και  $\alpha$  (°) η

γωνία κάμψης του τεμαχίου.



Κάμψη με μήτρα σε σχήμα U (χωρίς αντιστήριξη) :

$$W = \frac{2}{3} \cdot F_b \cdot h \quad (\text{Εξίσωση 8.26})$$

δηλαδή  $x = \frac{2}{3}$  και το ύψος κάμψης  $h = 4 \cdot s$ , όπου  $s$  (mm) το πάχος ελάσματος.

άρα τελικά το έργο :

$$W = 1.06 \cdot s^2 \cdot b \cdot \sigma_B \quad (\text{Εξίσωση 8.27})$$

Κάμψη με μήτρα σε σχήμα U (με αντιστήριξη) :

$$W = x \cdot (F_b + F_{pp}) \quad (\text{Εξίσωση 8.28})$$

όπου:

$x$  (-) συντελεστής κάμψης,  $x = 2/3$

$F_b$  (N) δύναμη κάμψης

$F_{pp}$  (N) δύναμη συγκράτησης,  $F_{pp} = 0.25 \cdot F_b$

$h$  (mm) ύψος κάμψης,  $h = 4 \cdot s$

άρα τελικά το έργο :

$$W = 2.4 \cdot s^2 \cdot b \cdot \sigma_B \quad (\text{Εξίσωση 8.29})$$

όπου

$b$  (mm) πλάτος ελάσματος

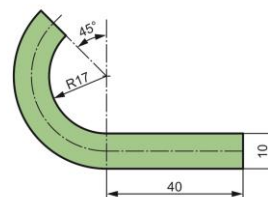
$s$  (mm) πάχος ελάσματος

$\sigma_B$  (N/mm<sup>2</sup>) αντοχή τεμαχίου σε εφελκυσμό

## 8.8 Ασκήσεις

### Άσκηση 1

Να υπολογιστεί το συνολικό μήκος του αναπτύγματος για το έλασμα του σχήματος



### Λύση

Για τον υπολογισμό του συνολικού μήκους του αναπτύγματος, ουσιαστικά αθροίζονται τα επιμέρους μήκη του ελάσματος τα οποία λαμβάνονται και υπολογίζονται σε σχέση με τον ουδέτερο άξονα, του οποίου το μήκος ισούται με το μήκος του αρχικού ελάσματος.

Ο λόγος  $r/s = 17/10 = 1.7$  άρα από πίνακα 7.4 λαμβάνεται η τιμή του  $e$  περίπου 0.78,  $\alpha = 45^\circ$  και υπολογίζεται το καμπύλο μήκος του τεμαχίου από τη σχέση:

$$l_b = \frac{\pi \cdot \alpha}{180} \left( r_i + \frac{e \cdot s}{2} \right) \Rightarrow l_b = \frac{\pi \cdot 45}{180} \left( 17 + \frac{0.78 \cdot 10}{2} \right) = 25 \text{ mm}$$

$$l_2 = 40 \text{ mm}$$

Συνεπώς το μήκος ελάσματος είναι  $L=l_b+l_2=25+40=65 \text{ mm}$

## Άσκηση 2

Σε περίπτωση κάμψης μορφής V ενός ελάσματος από χάλυβα C 35, πλάτους  $b=25 \text{ mm}$  και πάχους  $s=3 \text{ mm}$ , με ακτίνα κάμψης  $r_i=12 \text{ mm}$ , μήκη των σκελών  $l_1=30 \text{ mm}$ ,  $l_2=20 \text{ mm}$  και αντίστοιχα γωνία κάμψης  $\alpha=60^\circ$ , ζητούνται το συνολικό μήκος του αναπτύγματος, η ελάχιστη δυνατή ακτίνα, το διάστημα κάμψης.  $\sigma_B=400 \text{ N/mm}^2$

Λύση

Το συνολικό μήκος του αναπτύγματος, όπως και στη προηγούμενη άσκηση υπολογίζεται προσθέτοντας τα επι μέρους τμήματα του αναπτύγματος, σε σχέση με τον ουδέτερο άξονα.

$$L=l_b+l_1+l_2$$

$l_1, l_2$ , δίνονται, υπολογίζεται λοιπόν το μήκος  $l_b$ , για γνωστή γωνία κάμψης  $\alpha=60^\circ$

υπολογίζεται ο συντελεστής  $e$  με βάση το λόγο  $r_i/s : 12/3=4$ , άρα με βάση το πίνακα 7.4  $e=0.95$ .

$$l_b = \frac{\pi \cdot \alpha}{180} \left( r_i + \frac{e \cdot s}{2} \right) \Rightarrow l_b = \frac{\pi \cdot 60}{180} \left( 12 + \frac{0.95 \cdot 3}{2} \right) = 14.01 \text{ mm}$$

Συνεπώς το μήκος ελάσματος είναι  $L=l_b+l_2=30+20+14=64 \text{ mm}$

Η ελάχιστη δυνατή ακτίνα για κάμψη μορφής V :  $r_{i\min} = s \cdot c$

Ο συντελεστής  $c$ , για υλικό C35 επιλέγεται από το πίνακα 8.1, 0.08 και υπολογίζεται η ελάχιστη επιτρεπόμενη ακτίνα  $r_{i\min}=s \cdot c=3 \cdot 0.08=2.4 \text{ mm}$ . Η τιμή που βρέθηκε είναι επιτρεπτή καθώς η πραγματική ακτίνα είναι μεγαλύτερη από την ελάχιστη επιτρεπτή

$$r_{i\text{act}} \geq r_{i\min} \Rightarrow 12 \geq 2.4$$

Το διάστημα κάμψης για μορφή V δίνεται από τη σχέση:

$$\text{για } r_{i\text{act}} \geq r_{i\min} \quad dw=5 \cdot r_i=5 \cdot 12=60 \text{ mm}$$

$$\text{Η δύναμη κάμψης μορφής V δίνεται από τη σχέση: } F_b = \frac{1.2 \cdot b \cdot s^2 \cdot \sigma_B}{dw} = F_b = \frac{1.2 \cdot 25 \cdot 3^2 \cdot 400}{60} = \\ \Rightarrow F_b = 1800 \text{ N}$$

Το έργο κάμψης μορφής V δίνεται από τη σχέση:  $W = \frac{1}{3} \cdot F_b \cdot h$ , όπου το ύψος  $h$ , υπολογίζεται

$$\text{από τη σχέση: } h = \frac{dw/2}{\tan \frac{\alpha}{2}} = h = \frac{dw/2}{\tan \frac{\alpha}{2}} = \frac{60/2}{\tan 30} = \frac{30}{0.57} = 52.6 \text{ mm}$$

$$\text{Άρα } W = \frac{1}{3} \cdot 1800 \cdot 52.6 = 31560 = 31.5 \text{ Nm}$$

## 9. Συμπεράσματα

Στα πλαίσια αυτής της εργασίας αναλυθήκαν κατεργασίες διαμόρφωσης, τα χαρακτηριστικά τους, τα είδη τους, οι δυνάμεις παραμόρφωσης τους. Για κάθε μία από τις κατεργασίες δόθηκαν ασκήσεις σαν παραδείγματα με σκοπό την εμπέδωση του και για να γίνει αντιληπτό τη εφαρμογή έχει η κάθε μια σε ρεαλιστικά δεδομένα.

## 1. Βιβλιογραφία

1. Αντωνιάδης Θ. Αριστομένης, Μηχανουργική Τεχνολογία, 3<sup>η</sup> Έκδοση
2. Kalpakjian, Serope, Manufacturing processes for engineering materials, Reading, Mass. : Addison-Wesley, c1984
3. Schey, John A., Introduction to manufacturing processes, New York St. Louis San Francisco McGraw - Hill, c1987, 2<sup>nd</sup> Edition
4. Schuler. – Berlin ; Heidelberg ; New York ; Barcelona ;Budapest ; Hong Kong ; London ; Milan ; Paris ; Santa Clara ; Singapore ; Tokyo:Springer, 1998, Metal forming handbook , (1998)
5. Boljanovic, Vukota, Sheet metal forming processes and die design ,(2004)
6. Klocke Fritz, Manufacturing Processes 4: Forming, August 2, 2006
7. SL. Semiatin ,Introduction to Bulk-Forming Processes, Air Force Research Laboratory, Materials and Manufacturing Directorate
8. Taylan Altan, ERC/NSM, Ohio State University,Gracious Ngaile, North Carolina State University, Gangshu Shen, Ladish Company, Inc, Cold and Hot Forging Fundamentals and Applications
9. Wojahn Ulrich, Thomas Zipsner Aufgabensammlung Fertigungstechnik
10. Groover P. Mikell, Fundamentals of Modern Manufacturing, Materials, Processes and Systems, 4<sup>th</sup> Edition
11. Dieter George E., JR, Mechanical Metallurgy, (1961)
12. Tschätsch, Heinz , Metal Forming Practice, Springer
13. Mr.George Guchu, Prof S.M.Maranga and Eng Dr. B.W Ikua, Performance Measurement for Raw Material Utilization in Blanking.