



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ**

**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΑΝΤΟΧΗΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Θέμα :**

*«Διέλαση χάλυβα και αλουμινίου – Προσομοίωση με πεπερασμένα στοιχεία»*

**ΦΟΙΤΗΤΗΣ: ΝΙΚΟΛΑΙΔΗΣ ΦΙΛΟΠΟΙΜΗΝ - ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ**

Εξεταστική επιτροπή  
Καθ. Αράβας Ν. (Επιβλέπων)  
Καθ. Χαϊδεμενόπουλος Γ.  
Επικ. Καθ. Πετρόπουλος Γ.

**ΒΟΛΟΣ 2003**



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗΣ & ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ  
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 906/1  
Ημερ. Εισ.: 27-02-2004  
Δωρεά:  
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ ΜΜΒ  
2003  
ΝΙΚ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000070543

Με το πέρας της διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Ν. Αράβα για τη βοήθεια και καθοδήγηση στο συγκεκριμένο θέμα. Η εμπιστοσύνη που μου έδειξε στην ανάληψη του θέματος αποτελεί ιδιαίτερη τιμή για εμένα. Επίσης θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για το ενδιαφέρον και την επιμονή που καθημερινά επιδεικνύει όντας πανεπιστημιακός δάσκαλος. Θερμές ευχαριστίες οφείλω στον Καθηγητή κ. Γ. Χαϊδεμενόπουλο και στον Επικ. Καθηγητή κ. Γ. Πετρόπουλο που αποτελούν και τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ θα ήθελα να εκφράσω για όλα τα μέλη της ακαδημαϊκής κοινότητας που βοήθησαν όχι μόνο στη δημιουργία αυτής της διπλωματικής, αλλά και στη διαμόρφωση της προσωπικότητάς μου ως μηχανικού. Ιδιαιτέρως θα ήθελα να ευχαριστήσω τους υποψήφιους διδάκτορες του τομέα, χωρίς τη βοήθεια των οποίων δε θα μπορούσε να ολοκληρωθεί η παρούσα εργασία.

Τέλος, ευχαριστώ θερμά τους ανθρώπους που με έφεραν στη ζωή και με την εργατικότητα και επιμονή τους αποτέλεσαν για εμένα πηγή έμπνευσης και μου έδωσαν τη σημαντικότερη αποστολή κάθε ανθρώπου: να τους ξεπεράσω.

*Στους Γονείς μου*

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>Κεφάλαιο 1- Διέλαση</b>	
1.1 Γενικά	1
1.2 Επίδραση διαφόρων παραγόντων κατά τη διέλαση	4
1.3 Μέθοδοι μελέτης της κατεργασίας	5
<b>Κεφάλαιο 2 - Άμεση αξονοσυμμετρική διέλαση εν ψυχρώ</b>	7
<b>Κεφάλαιο 3 - Κριτήρια διαρροής</b>	
3.1 Γενικά	14
3.2 Κριτήριο διαρροής von Mises	14
3.3 Κριτήριο διαρροής Gurson	16
3.4 Κριτήριο ανισότροπου μοντέλου	17
<b>Κεφάλαιο 4 - Προσομοίωση διέλασης χάλυβα με πεπερασμένα στοιχεία</b>	
4.1 Μοντέλο – Γεωμετρία	19
4.2 Αποτελέσματα 1ου βήματος	22
4.3 Αποτελέσματα 2ου βήματος	31
4.4 Συμπεράσματα	33
<b>Κεφάλαιο 5 - Διέλαση αλουμινίου</b>	
5.1 Γενικά	34
5.2 Στάδια της διέλασης αλουμινίου	35
5.3 Προβλήματα της κατεργασίας	36
<b>Κεφάλαιο 6 - Μοντέλο για διέλαση αλουμινίου</b>	
6.1 Γενικά	38
6.2 Το κράμα 6061	38
6.3 Το μοντέλο	39
6.4 Καταστατικές εξισώσεις	41
6.5 Αποτελέσματα	42
6.6 Συμπεράσματα	44
<b>Γενικά συμπεράσματα – Προτάσεις για συνέχεια</b>	45
<b>Παράρτημα 1 – Κώδικας ABAQUS για συμπαγές μοντέλο</b>	46
<b>Παράρτημα 2 – Κώδικας ABAQUS για μοντέλο Gurson</b>	49
<b>Παράρτημα 3 – Κώδικας ABAQUS για ανισότροπο μοντέλο</b>	52
<b>Παράρτημα 4 – Υπορουτίνα FORTRAN μετατροπής αποτελεσμάτων</b>	55
<b>Παράρτημα 5 - Κώδικας ABAQUS για διέλαση αλουμινίου (σταθ. ταχ.)</b>	57
<b>Παράρτημα 6 - Κώδικας ABAQUS για διέλαση αλουμινίου (μετ. ταχ.)</b>	62
<b>Βιβλιογραφία</b>	67

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά την κατεργασία της διέλασης και ουσιαστικά είναι χωρισμένη σε δύο μέρη: στη διέλαση χάλυβα, όπου εξετάζεται το πρόβλημα της κεντρικής αστοχίας και στη διέλαση αλουμινίου, όπου παρουσιάζεται η επίδραση της ταχύτητας κατά την κατεργασία.

Στο πρώτο κεφάλαιο υπάρχουν πληροφορίες σχετικά με τα βασικά στοιχεία της διέλασης και τους βασικούς παράγοντες που την επηρεάζουν. Επίσης, παρουσιάζονται διάφοροι τρόποι μελέτης της κατεργασίας. Το κεφάλαιο αυτό είναι κατά βάση εισαγωγικό και αφορά ασφαλώς τόσο τη διέλαση χάλυβα, όσο και τη διέλαση αλουμινίου.

Τα κεφάλαια δύο έως τέσσερα αφορούν την άμεση αξονοσυμμετρική ψυχρή διέλαση χάλυβα. Παρουσιάζεται το πρόβλημα της κεντρικής αστοχίας, το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη του, καθώς και μία σειρά από χρήσιμα αποτελέσματα.

Το πέμπτο και έκτο κεφάλαιο σχετίζονται με τη διέλαση αλουμινίου. Παρουσιάζονται οι βασικοί περιοριστικοί παράγοντες της κατεργασίας και η επίδραση της ταχύτητας, ενώ εξάγονται χρήσιμα και πρακτικά αποτελέσματα.

Τέλος, στα παραρτήματα υπάρχουν όλοι οι κώδικες των μοντέλων που χρησιμοποιήθηκαν.

## Κεφάλαιο 1

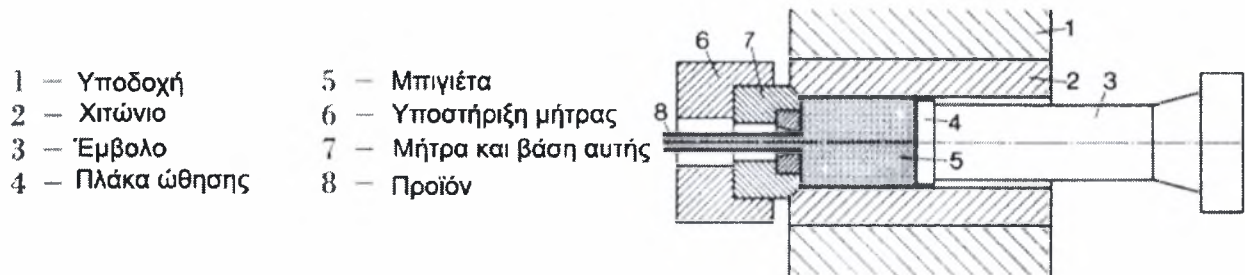
### Διέλαση

#### 1.1 Γενικά

Η διέλαση είναι μία κατεργασία διαμόρφωσης κατά την οποία μία μπιγιέτα υλικού μετατρέπεται σε ένα συνεχές προϊόν με συγκεκριμένη και ομοιόμορφη διατομή. Τέτοια προϊόντα μπορούν να είναι ράβδοι, σωλήνες, «προφίλ», σύρματα και άλλα. Η εγκάρσια τομή των προϊόντων αυτών μπορεί να έχει κάποιο κανονικό (γεωμετρικό) ή ακανόνιστο σχήμα.

Η αρχή λειτουργίας της διέλασης είναι σχετικά απλή: Εξαναγκασμένη ροή μετάλλου μέσα από μήτρα (καλούπι) κατάλληλου σχήματος (αρχή της οδοντόπαστας). Είναι σημαντικό να τονίσουμε ότι το εντατικό πεδίο της κατεργασίας είναι κυρίως θλιπτικό, κάτι που οδηγεί σε μεγάλες ικανότητες για παραμόρφωση. Σαν αποτέλεσμα, μπορούν να υποστούν διέλαση υλικά τα οποία με άλλες κατεργασίες θα μπορούσαν να παραλάβουν μικρές μόνο παραμορφώσεις.

Στο σχήμα 1.1.1 απεικονίζονται τα βασικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται στη διέλαση, ενώ στο σχήμα 1.1.2 φαίνονται διάφορα προϊόντα διέλασης.



Σχήμα 1.1.1



Σχήμα 1.1.2

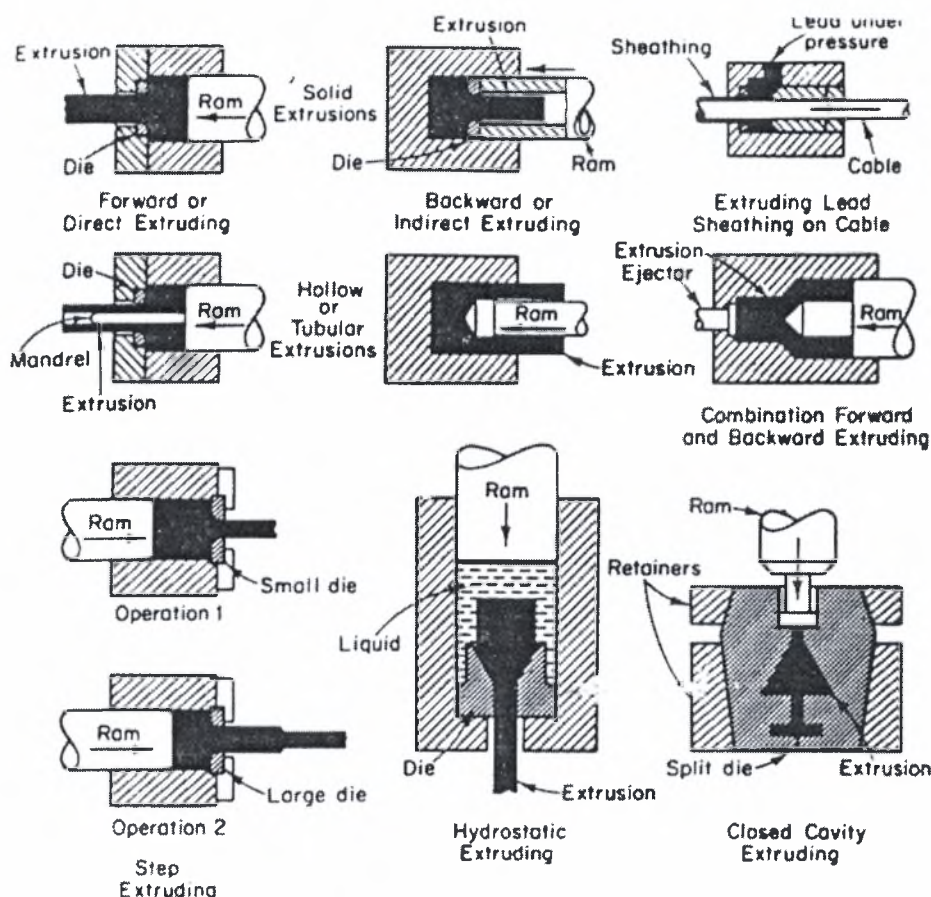
Η διέλαση μπορεί να γίνει είτε σε θερμοκρασία δωματίου, είτε σε υψηλότερη θερμοκρασία. Έτσι, μια πρώτη διάκριση μπορεί να γίνει με βάση τη θερμοκρασία, οπότε έχουμε ψυχρή και θερμή διέλαση.

Οι μέθοδοι διέλασης είναι αρκετές και διακρίνονται μεταξύ τους με βάση κάποια χαρακτηριστικά όπως:

- Την κίνηση του διελασμένου τεμαχίου σε σχέση με την κίνηση του εμβόλου – Άμεση ή έμμεση διέλαση.
- Τον προσανατολισμό του άξονα της πρέσας διέλασης – Οριζόντια ή κατακόρυφη διέλαση.
- Τον τρόπο κίνησης του εμβόλου – Υδραυλικό ή μηχανικό.
- Τον τρόπο εφαρμογής της δύναμης στην μπιγιέτα - Συμβατική ή υδραυλική διέλαση.

Στο σχήμα 1.1.3 παρουσιάζονται οι διάφορες μέθοδοι διέλασης.





Σχήμα 1.1.3

Από ιστορική άποψη, πρέπει να αναφέρουμε ότι η πρώτη υδραυλική πρέσα διέλασης εφευρέθηκε από τον Άγγλο S. Bramah το 1810 και ήταν σχεδιασμένη για τη διέλαση μολύβδου. Για κράματα με υψηλότερο σημείο ζέσης, η μέθοδος πρωτοεφαρμόστηκε από τον Γερμανό A. Dick στα 1890. Η περαιτέρω εξέλιξη της κατεργασίας ως τη σημερινή της μορφή είναι ασφαλώς στενά συνδεδεμένη με τις βελτιώσεις των επιμέρους εργαλείων, των πρέσων και των χάλυβων που επεξεργάζονται σε υψηλές θερμοκρασίες.

Το μέλλον της διέλασης καθορίζεται από κάποιες γενικές γραμμές όπως:

- Την ανάγκη για ταχύτερες και μεγαλύτερες πρέσες διέλασης.
- Την ανάγκη για προϊόντα μεγαλύτερα και πιο σύνθετης – πολύπλοκης διατομής.
- Τη διέλαση βελτιωμένων κραμάτων ή διαφορετικών υλικών, όπως είναι το γαλί.
- Τη βελτίωση της ποιότητας του τελικού προϊόντος.

- Τη θεώρηση της διέλασης ως μίας κατεργασίας που όχι απλώς μορφοποιεί αλλά βελτιώνει και τις μηχανικές ιδιότητες του προϊόντος.
- Τη βελτίωση των μήτρων που χρησιμοποιούνται κατά τη διέλαση και κυρίως την αύξηση του χρόνου ζωής τους.

## **1.2 Επίδραση διαφόρων παραγόντων κατά τη διέλαση.**

Κατά τη διέλαση ενός υλικού λαμβάνουν χώρα μεγάλες πλαστικές παραμορφώσεις. Οι βασικές συνθήκες διέλασης είναι η θερμοκρασία, η ταχύτητα παραμόρφωσης και η δομή του υλικού που υπόκειται διέλαση. Αφού συμβαίνουν μεγάλες παραμορφώσεις, είναι σημαντικό να γνωρίζουμε τις επιδράσεις που έχουν οι παραπάνω παράγοντες στην πλαστικότητα των μετάλλων. Η πλαστικότητα ορίζεται ως η ικανότητα των μεταλλικών υλικών να παραμορφώνονται πλαστικά υπό την επίδραση εξωτερικών δυνάμεων, χωρίς να χάνουν τη δομική και κρυσταλλική τους ακεραιότητα. Απλούστερα, η πλαστικότητα εκφράζει την ικανότητα για παραμόρφωση.

- Η επίδραση της θερμοκρασίας

Κατά κανόνα, υψηλές θερμοκρασίες ευνοούν τη μορφοποίηση, οπότε και μειώνονται οι απαιτήσεις σε οδηγούσα δύναμη της πρέσας διέλασης.

Αν θέλουμε να εξετάσουμε την αιτία που συμβαίνουν τα παραπάνω, τότε θα πρέπει να φτάσουμε στο κρυσταλλικό επίπεδο της δομής των μεταλλικών υλικών. Η παραμόρφωση των μετάλλων γίνεται μέσα από ολίσθηση των κρυσταλλικών επιπέδων του υλικού. Με θέρμανση, αυξάνονται οι ταλαντώσεις των ατόμων γύρω από τη θέση ισορροπίας τους και τα κρυσταλλικά επίπεδα μπορούν να ολισθήσουν μεταξύ τους με τη δράση μικρότερων εξωτερικών δυνάμεων (θερμική πράυνση).

Βέβαια, υπάρχει περίπτωση να μειωθεί η πλαστικότητα λόγω αύξησης του μεγέθους του κόκκου του υλικού. Στη γενική όμως περίπτωση, όταν απαιτούνται υψηλά φορτία παραμόρφωσης, γίνεται αύξηση της θερμοκρασίας ώστε τα φορτία αυτά να μειωθούν. Τέλος, πρέπει να αναφέρουμε ότι η θερμοκρασία είναι ο σημαντικότερος παράγοντας που επηρεάζει την πλαστικότητα.

- Η επίδραση της ταχύτητας παραμόρφωσης

Η ταχύτητα παραμόρφωσης στην πράξη εκφράζει την ταχύτητα της πρέσας για δεδομένη γεωμετρία μήτρας. Η επίδρασή της στην πλαστικότητα δεν είναι μονοσήμαντη, διότι εξαρτάται από τη θερμοκρασία και από τη φύση του μεταλλικού υλικού. Η μεταβολή της ταχύτητας μπορεί να προκαλέσει αύξηση της πλαστικότητας σε συγκεκριμένες και μείωση σε κάποιες άλλες συνθήκες. Ακόμη, μπορεί να μην προκαλέσει μεταβολή της πλαστικότητας.

Υπάρχουν δύο μηχανισμοί που καθορίζουν το αν θα μεταβληθεί η πλαστικότητα ή όχι. Οι μηχανισμοί αυτοί δρουν ανταγωνιστικά και είναι η παραγωγή διδυμιών και η ανακρυστάλλωση. Όταν επικρατεί ο πρώτος, μειώνεται η ικανότητα για διαμόρφωση, ενώ αντίθετα, όταν επικρατεί ο δεύτερος, η ικανότητα αυτή αυξάνεται.

- Η επίδραση της δομής και της χημικής σύστασης

Η ύπαρξη ξένων ατόμων στη δομή του μετάλλου δυσκολεύει την κίνηση των γραμμοαταξιών, οπότε η παραμόρφωση του μετάλλου γίνεται δυσκολότερα. Σαν συνέπεια, η δυνατότητα παραμόρφωσης των καθαρών μετάλλων είναι μεγαλύτερη από εκείνη των κραμάτων. Επίσης, τα πολυφασικά κράματα διαμορφώνονται δυσκολότερα από τα μονοφασικά. Η λεπτόκοκκη δομή διευκολύνει τη μορφοποίηση. Τέλος, όσο περισσότερα είναι τα κρυσταλλικά επίπεδα, τόσο καλύτερη είναι η διαμορφωσιμότητα.

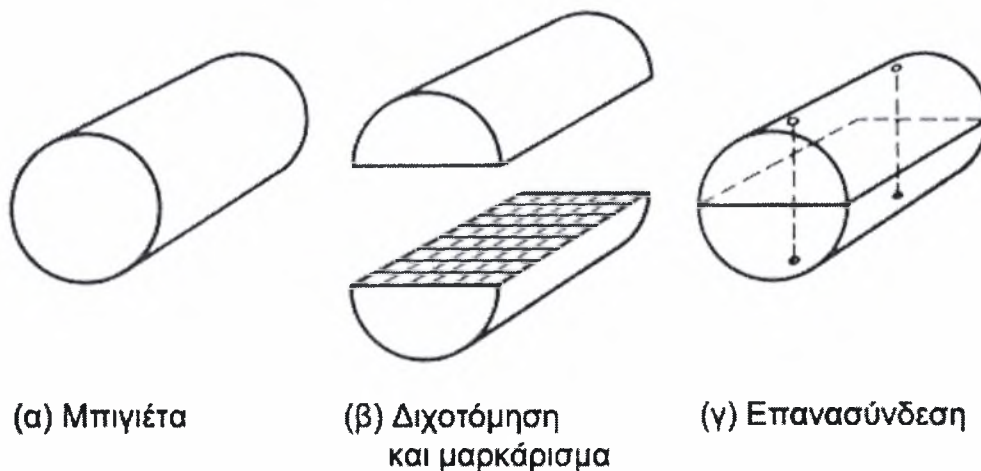
### **1.3 Μέθοδοι μελέτης της κατεργασίας**

Οι συνηθέστερες μέθοδοι ανάλυσης κατεργασιών όπως η διέλαση είναι οι προσεγγίσεις με πεδία ολίσθησης, με τεχνικές άνω φράγματος και η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων.

Για πειραματικές μελέτες χρησιμοποιούνται οι λεγόμενες «οπτοπλαστικές» μέθοδοι, οι οποίες κατατάσσονται με βάση το υλικό που χρησιμοποιείται κατά το πείραμα. Τα υλικά αυτά μπορεί να είναι κερί ή πλαστελίνη, μέταλλα που παραμορφώνονται εύκολα σε θερμοκρασία ίση ή λίγο μεγαλύτερη από αυτή του δωματίου, όπως είναι ο μόλυβδος, ο κασσίτερος ή το βισμούθιο και τέλος, διάφορα μέταλλα παρόμοια με αυτά που συναντά κανείς σε εμπορική χρήση. Οι παραπάνω

μέθοδοι κατατάσσονται και με βάση την τεχνική που χρησιμοποιείται για τη δημιουργία σημείων αναφοράς στη μπιγιέτα. Έτσι έχουμε:

- Μέθοδος δίσκου (disc method). Δίσκοι όμοιοι μεταξύ τους αλλά οπτικά διακριτοί τοποθετούνται σε στρώματα ώστε να αποτελέσουν μια μπιγιέτα.
- Μέθοδος δείκτη (indicator method). Πάνω στην επιφάνεια της μπιγιέτας τοποθετούνται «καρφιά», η μετατόπιση των οποίων οδηγεί σε χρήσιμα συμπεράσματα. Η μέθοδος αυτή δε δίνει καμία πληροφορία για το εσωτερικό της μπιγιέτας.
- Μέθοδος διαμήκους πλέγματος (longitudinal grid method). Η μπιγιέτα χωρίζεται σε δύο τμήματα κατά μήκος του επιμήκη άξονά της. Οι προκύπτουσες επιφάνειες μαρκάρονται με πλέγμα. Κατόπιν, τα δύο τμήματα ενώνονται σε ένα. Στο σχήμα 1.3 φαίνεται η τεχνική που ακολουθείται σε αυτή τη μέθοδο.



Σχήμα 1.3

## Κεφάλαιο 2

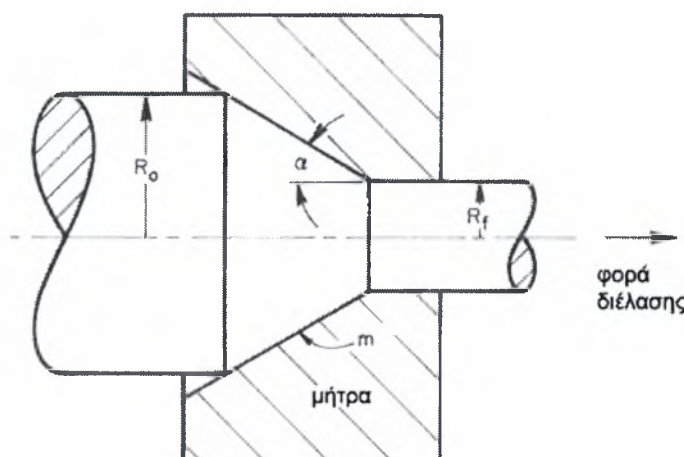
### Άμεση αξονοσυμμετρική διέλαση εν ψυχρώ

Κατά την άμεση αξονοσυμμετρική διέλαση μία κυλινδρική μπιγιέτα τοποθετείται στον «κύλινδρο» της πρέσας διέλασης και στη συνέχεια πιέζεται ώστε να περάσει μέσα από μία κωνική μήτρα.

Οι κύριες ανεξάρτητες παράμετροι της διεργασίας είναι:

- Το ποσοστό μείωσης της διατομής.
- Η ημιγωνία της κωνικής μήτρας.
- Ο συντελεστής τριβής (μεταξύ μήτρας και κατεργαζόμενου υλικού).
- Οι ιδιότητες του υλικού.

Αν οι παραπάνω παράμετροι επιλεγούν σωστά, το τελικό προϊόν είναι μία ράβδος συμπαγής, μειωμένης διατομής και αυξημένων μηχανικών ιδιοτήτων. Στο σχήμα 2.1 φαίνεται η γεωμετρία του προβλήματος.



Σχήμα 2.1

Υπάρχει όμως περίπτωση το τελικό προϊόν να είναι ελαττωματικό. Ένα κοινό ελάττωμα είναι η λεγόμενη κεντρική αστοχία (central bursts). Είναι η ανάπτυξη εσωτερικών αστοχιών – ρηγμάτων σε σχήμα βέλους. Τα ρήγματα έχουν προσανατολισμό κάθετο στον άξονα συμμετρίας του προϊόντος και εμφανίζονται περιοδικά. Το σχήμα 2.2 είναι περισσότερο διαφωτιστικό.



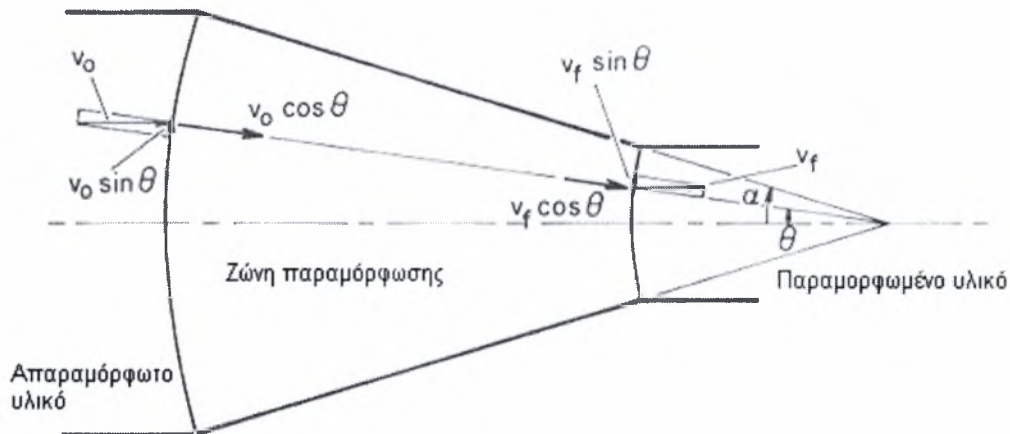
Σχήμα 2.2

Στη ψυχρή διέλαση το παραπάνω ελάττωμα παρατηρείται στο τελευταίο πέρασμα – «πάσο» μετά από μία σειρά από διαδοχικά περάσματα. Όταν συμβεί η κεντρική αστοχία, η ικανότητα του προϊόντος για παραλαβή φορτίων μειώνεται δραστικά. Επειδή η κεντρική αστοχία συμβαίνει στο εσωτερικό του προϊόντος, δεν μπορεί να εντοπιστεί με εξωτερική παρατήρηση. Μπορεί όμως να εντοπιστεί με υπέρηχους, μέθοδο που ακολούθησαν οι κατασκευαστές εξαρτημάτων που τοποθετούνται σε κρίσιμα σημεία, όπως το σύστημα οδήγησης ενός αυτοκινήτου. Προφανώς, στα συγκεκριμένα εξαρτήματα γίνεται 100% έλεγχος λόγω της σπουδαιότητάς τους. Η κεντρική αστοχία παρουσιάζεται και σε κατεργασίες συρματοποίησης (drawing).

Από την εμπειρία γνωρίζουμε ότι η κεντρική αστοχία συμβαίνει όταν έχουμε μικρές μειώσεις της διατομής, μεγάλες ημιγωνίες της κωνικής μήτρας και κακή ποιότητα του διελάσιμου υλικού (εγκλείσματα, σωματίδια και άλλα), όπως επίσης όταν η μιγιέτα έχει υποστεί μεγάλη παραμόρφωση εν ψυχρώ. Πραγματικά, πειράματα που έγιναν από τους Zimerman, Darlington και Kottcamp (1970) έδειξαν ότι η κεντρική αστοχία δε συμβαίνει για μικρές γωνίες και μεγάλες μειώσεις της διατομής.

Η κεντρική αστοχία αποτέλεσε το θέμα για πολλές δημοσιεύσεις από το 1930 ως σήμερα (Remmers 1930, Jennison 1930, Tanaka 1952, Russel 1962, Johnson και Kudo 1962, Pepe 1976). Πρώτος όμως ο B. Avitzur (1968) προσπάθησε να προσδιορίσει εκείνους τους συνδυασμούς ημιγωνίας και μείωσης της διατομής για τους οποίους συμβαίνει κεντρική αστοχία. Έκανε χρήση του άνω οριακού θεωρήματος και περιέλαβε και άλλες ανεξάρτητες μεταβλητές της κατεργασίας, όπως

το συντελεστή τριβής και το συντελεστή κράτυνσης. Η ανάλυση έγινε με τη χρήση σφαιρικού πεδίου ταχυτήτων, όπως αυτό του σχήματος 2.3. Συγκεκριμένα, υπολογίστηκε αρχικά το συνολικό έργο παραμόρφωσης. Κατόπιν, το έργο αυτό συγκρίθηκε με το έργο παραμόρφωσης ενός κινηματικώς ίδιου πεδίου, στο οποίο συμβαίνει αστοχία. Η ημιγωνία του κώνου, η μείωση της διατομής και άλλες παράμετροι για τις οποίες απαιτείται λιγότερη ενέργεια παραμόρφωσης, διαμορφώνουν ένα κριτήριο. Στο σχήμα 2.4 φαίνονται τα αποτελέσματα των μελετών του Avitzur.



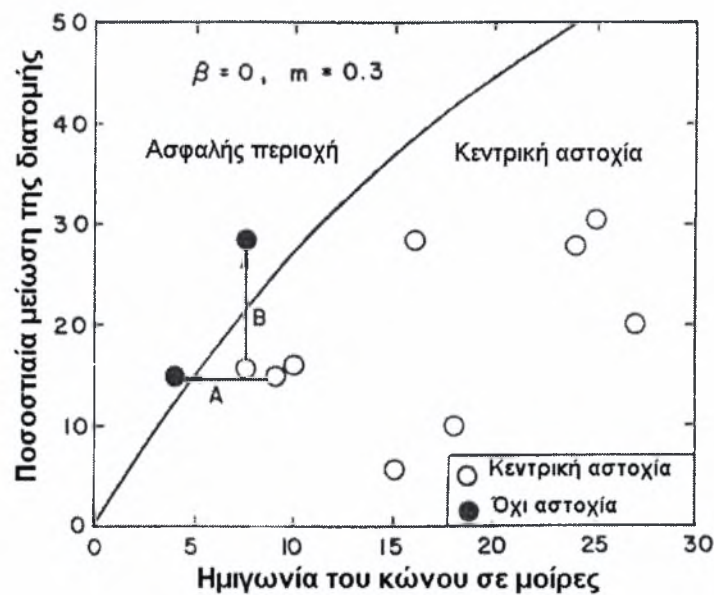
Σχήμα 2.3



Σχήμα 2.4

Όπως είναι προφανές, με μικρές ημιγωνίες του κώνου της μήτρας και μεγάλες μειώσεις διατομής η κεντρική αστοχία δε συμβαίνει (ασφαλής περιοχή). Με αύξηση του συντελεστή τριβής ( $m$ ) ή του βαθμού κράτυνσης, η ασφαλής περιοχή διευρύνεται.

Το 1970 ο Zimerman έκανε πειράματα στη βιομηχανία, χρησιμοποιώντας ως υλικό διέλασης κυρίως το χάλυβα. Όσα από τα προϊόντα παρουσίασαν κεντρική αστοχία δε βρίσκονταν στην ασφαλής περιοχή. Στο σχήμα 2.5 απεικονίζονται τα παραπάνω. Στο ίδιο σχήμα έχουμε τις διαδρομές A και B. Αυτές παριστάνουν τις μεταβολές που μπορούν να γίνουν στη γεωμετρία μίας μήτρας όπου παρουσιάζεται κεντρική αστοχία. Με μείωση της ημιγωνίας του κώνου (διαδρομή A) ή με αύξηση της μείωσης της διατομής (διαδρομή B), η κεντρική αστοχία δε συμβαίνει.



Σχήμα 2.5

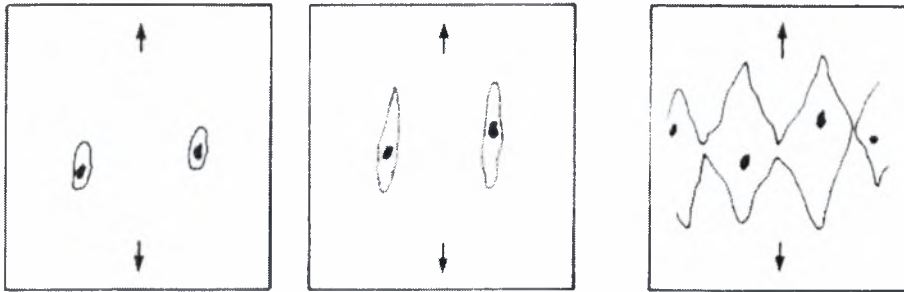
Πάντως, οι μελέτες του Avitzur δε δίνουν πληροφορίες για την επικρατούσα εντατική κατάσταση, ούτε για την προέλευση των ρηγμάτων. Τέλος, δε δίνει καμία πληροφορία για τον αριθμό περασμάτων – «πάσων» στον οποίο προκύπτει κεντρική αστοχία.

Μια βαθύτερη ανάλυση έκαναν οι H. Tanaka (1952) και J. Pepe (1976) εξετάζοντας την εντατική κατάσταση που επικρατεί κατά την κατεργασία: Η κεντρική αστοχία προκαλείται από ισχυρές εφελκυστικές τάσεις στον άξονα συμμετρίας του προϊόντος. Αυτό συμβαίνει για συγκεκριμένους συνδυασμούς της ημιγωνίας του κώνου της μήτρας και της μείωσης της διατομής. Ο J. Pepe έκανε πειράματα με χάλυβα AISI 1080 και υδροστατική διέλαση και παρατήρησε ότι ο εφελκυσμός στον άξονα συμμετρίας μειώνεται όταν για σταθερή ημιγωνία αυξήσουμε τη μείωση της

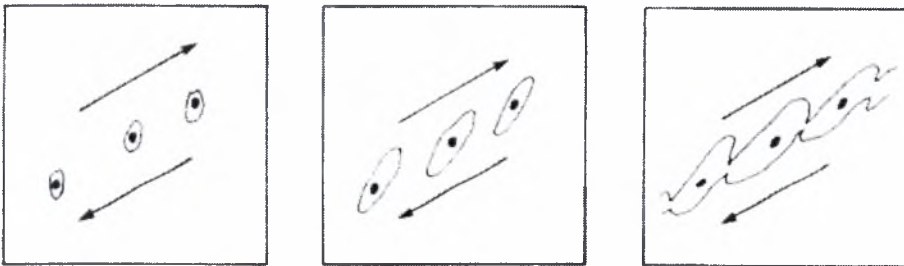


διατομής ή όταν, για δεδομένη μείωση της διατομής, ελαττώσουμε την ημιγωνία του κώνου. Επιπρόσθετα, κατέληξε στο συμπέρασμα ότι όσο απομακρυνόμαστε από τον άξονα συμμετρίας, ο εφελκυσμός μειώνεται, ενώ από ένα σημείο και μετά έχουμε μόνο θλίψη.

Ο Η. Tanaka έκανε πειράματα ολκής (ή συρματοποίησης), από τα οποία όμως εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα και για τη διέλαση. Ένα από αυτά είναι και το γεγονός ότι η αρχή της κεντρικής αστοχίας γίνεται στον άξονα συμμετρίας του υλικού. Εκεί συμβαίνει θραύση ή αποσύνδεση εγκλεισμάτων ή σωματιδίων δεύτερης φάσης από το μητρικό υλικό. Κατόπιν, κάτω από ισχυρό εφελκυσμό συμβαίνει συνένωση μικρο-οπών. Καθώς απομακρυνόμαστε από τον άξονα συμμετρίας, η θραύση δε γίνεται πλέον με εφελκυσμό αλλά με διάτμηση. Στα σχήματα 2.6 και 2.7 φαίνονται αντίστοιχα οι δύο μηχανισμοί θραύσης.



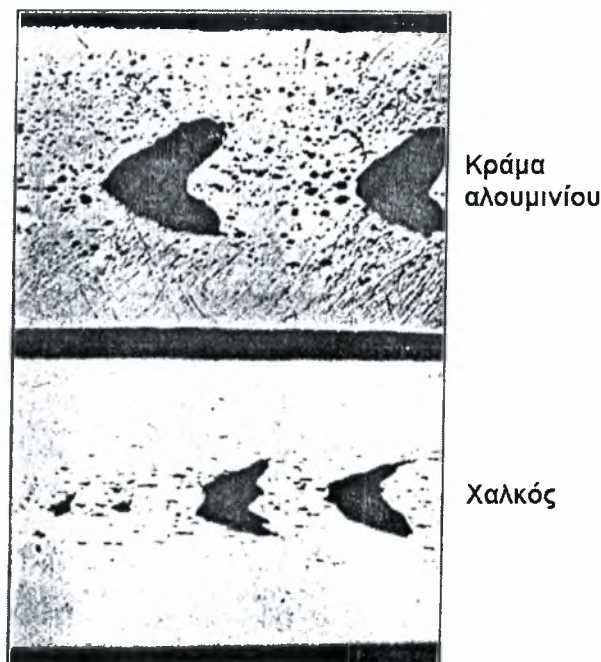
Σχήμα 2.6



Σχήμα 2.7

Μάλιστα ο J. Pere με ηλεκτρονική μικροσκοπία και κρυσταλλογραφικές μελέτες επιβεβαιώνει τα παραπάνω. Κοντά στον άξονα συμμετρίας η επιφάνεια του ρήγματος παρουσιάζει έντονη τραχύτητα, που είναι χαρακτηριστικό της θραύσης λόγω εφελκυσμού. Καθώς απομακρυνόμαστε, η αντίστοιχη επιφάνεια είναι λεία, κάτι που είναι χαρακτηριστικό έντονης διάτμησης. Ακόμη, παρατηρήθηκε αύξηση του

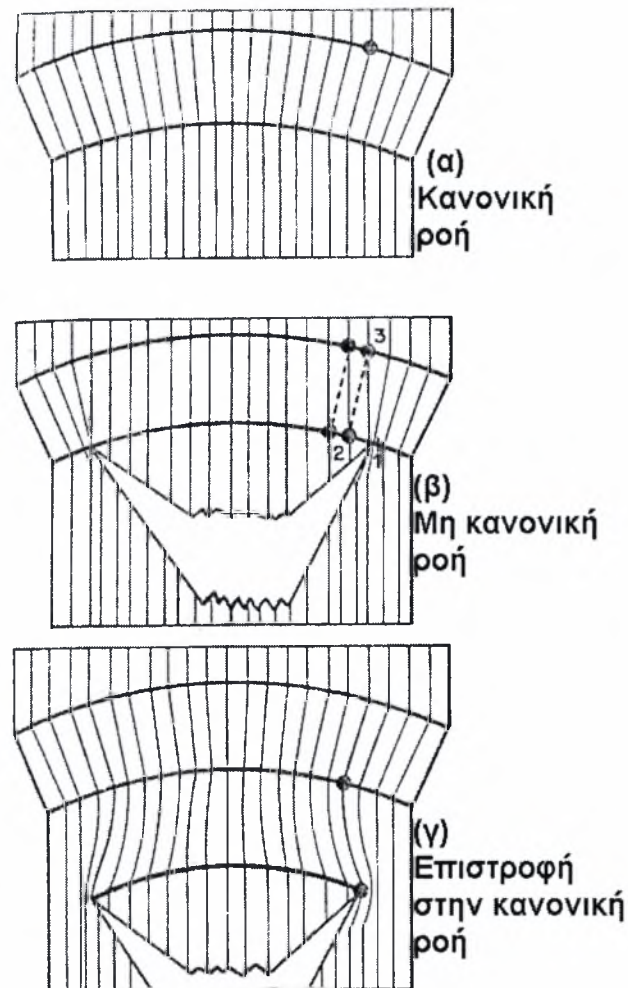
πορώδους στον άξονα συμμετρίας. Την αύξηση του πορώδους παρατήρησε και ο Remmers (1930) σε πειράματα ολκής που έκανε τόσο σε κράματα αλουμινίου, όσο και σε χαλκό. Το σχήμα 2.8 δείχνει ακριβώς τα παραπάνω.



Σχήμα 2.8

Με τη βοήθεια του σχήματος 2.9, ο J. Pere εξήγησε το μηχανισμό της αστοχίας και την περιοδικότητα που εμφανίζουν τα ρήγματα. Η ροή του υλικού γίνεται μέσα από ένα σφαιρικό πεδίο παραμόρφωσης. Αρχικά η ροή συμβαίνει κανονικά (α), έως ότου το υλικό φτάσει την άνω σφαιρική επιφάνεια (β). Τότε η κατεύθυνση της ροής μεταβάλλεται και έχουμε ακτινική κίνηση προς το κέντρο της υποθετικής σφαίρας. Όταν το υλικό φτάσει στην κάτω σφαιρική επιφάνεια, η κατεύθυνση αλλάζει πάλι σε αξονική. Όταν όμως έχουμε δημιουργία ρήγματος, τα πράγματα δε συμβαίνουν ακριβώς έτσι. Όπως φαίνεται στο β' μέρος του σχήματος 2.8, το σημείο 3 κανονικά θα έπρεπε να κινηθεί στο σημείο 2. Αυτό όμως μετακινείται στη θέση 1, πιέζοντας το επιπλέον υλικό στη μήτρα. Το σημείο 1 βρίσκεται έξω από τη ζώνη παραμόρφωσης και επειδή ανάντη του ρήγματος δεν υπάρχουν μικρορωγμές έτοιμες να ενωθούν, η ροή συνεχίζει κανονικά. Καθώς η ροή συνεχίζει κανονικά, εμφανίζονται πάλι οπές που ενώνονται σε ρήγμα. Έτσι έχουμε περιοδικές ρηγματώσεις, καθώς ο παραπάνω μηχανισμός επαναλαμβάνεται κυκλικά.

Η εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων για τη μελέτη της κατεργασίας της διέλασης έγινε με επιτυχία από τους E. Lee, R. Mallett και W. Yang (1977). Στη μελέτη τους φαίνεται για ακόμη μία φορά η σημασία των εφελκυστικών τάσεων κατά μήκος του άξονα συμμετρίας του υλικού.



Σχήμα 2.9

## Κεφάλαιο 3

### Κριτήρια διαρροής

#### 3.1 Γενικά

Προκειμένου να μελετήσουμε την κεντρική αστοχία θα χρησιμοποιήσουμε τρία διαφορετικά κριτήρια διαρροής, γεγονός που θα επιτρέψει την εξαγωγή συγκριτικών αποτελεσμάτων. Τα κριτήρια αυτά είναι:

- Το κριτήριο von Mises για συμπαγή υλικά.
- Το κριτήριο Gurson για πορώδη υλικά.
- Το κριτήριο του ανισότροπου μοντέλου για πορώδη υλικά.

#### 3.2 Κριτήριο διαρροής von Mises

Το κριτήριο διαρροής του von Mises είναι το απλούστερο από τα τρία παραπάνω κριτήρια. Εκφράζεται από τη σχέση:

$$\sigma_e = \sigma_0 \Rightarrow \left( \frac{3}{2} \sigma'_{ij} \sigma'_{ij} \right)^{\frac{1}{2}} = \sigma_0$$

όπου:

$\sigma_e$  η ισοδύναμη τάση

$\sigma_0$  το όριο διαρροής του υλικού και

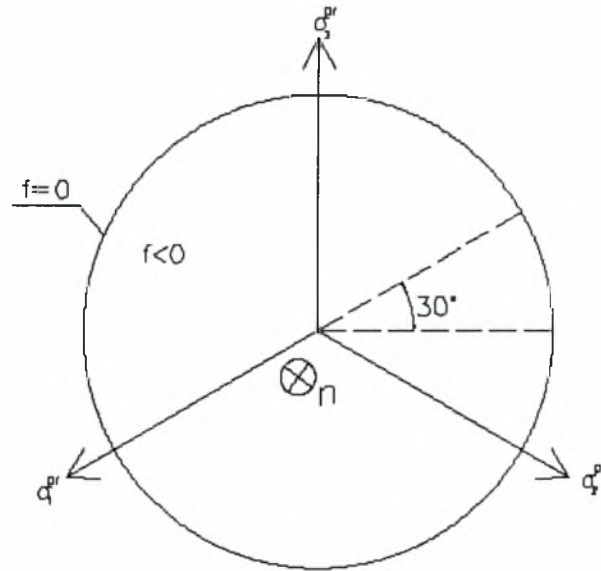
$\sigma'_{ij}$  ο αποκλίνοντας τανυστής  $\left( \sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \sigma_{kk} \right)$ , με  $\delta_{ij}$  το δέλτα του Kronecker.

Το κριτήριο διαρροής μπορεί να παρασταθεί γεωμετρικά σε ένα τρισσορθογώνιο σύστημα συντεταγμένων πάνω στους τρεις άξονες του οποίου μετρώνται οι κύριες τάσεις  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  που αντιστοιχούν σε δοσμένη εντατική κατάσταση. Ένα τέτοιο σύστημα ονομάζεται χώρος των κυρίων τάσεων, ενώ ένα σημείο του χώρου αυτού θα περιγράφει κάποια εντατική κατάσταση που οι κύριες τάσεις της είναι ίσες με τις συντεταγμένες του υπ' όψη σημείου.

Στον παραπάνω χώρο ορίζεται το επίπεδο  $\Pi$  με τη βοήθεια της σχέσης:

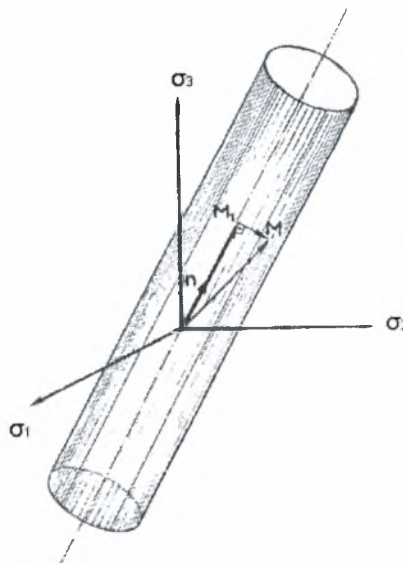
$$\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = 0$$

Το κριτήριο διαρροής του von Mises αναπαριστάται στο επίπεδο  $\Pi$  ως ένας κύκλος με κέντρο το  $(0,0,0)$  και ακτίνα  $r = \sigma_0 \sqrt{\frac{2}{3}}$ , όπως φαίνεται στο σχήμα 3.2.1. Με  $f$  συμβολίζεται η συνάρτηση διαρροής. Η εξίσωση  $f(\sigma_{ij}) = 0$  αναπαριστά μία υπερεπιφάνεια. Κάθε σημείο που βρίσκεται πάνω σε αυτή αναπαριστά μία εντατική κατάσταση στην οποία ξεκινά πλαστικοποίηση. Συνεπώς, εσωτερικά του κύκλου δεν έχουμε πλαστικοποίηση.



Σχήμα 3.2.1

Αφού το κριτήριο von Mises αναπαριστάται με έναν κύκλο στο επίπεδο  $\Pi$ , στο χώρο θα αποτελεί κύλινδρο. Το σχήμα 3.2.2 είναι περισσότερο διαφωτιστικό.



Σχήμα 3.2.2

### 3.3 Κριτήριο διαρροής Gurson

Βασιζόμενος σε μία ανάλυση άνω φράγματος για την μελέτη σφαιρικά συμμετρικών παραμορφώσεων γύρω από μία σφαιρική οπή ενός υλικού που θεωρείται τέλειο-πλαστικό και συμπαγές, ο Gurson (1977) πρότεινε το παρακάτω κριτήριο διαρροής, το οποίο εξαρτάται από τον αποκλίνοντα τανυστή των τάσεων  $\sigma'$  και από την υδροστατική τάση  $p$ :

$$\Phi(\sigma, \sigma_m, f) = \left[ \frac{\bar{\sigma}}{\sigma_m} \right]^2 + 2f \cosh \left[ \frac{\sigma_{kk}}{2\sigma_m} \right] - (1 + f^2) = 0 \quad (3.3.1)$$

όπου:

$\bar{\sigma}$  η ισοδύναμη τάση κατά von Mises  $\left( = \left( \frac{3}{2} \sigma'_{ij} \sigma'_{ij} \right)^{\frac{1}{2}} \right)$

$\sigma_m$  το όριο διαρροής της μήτρας του υλικού

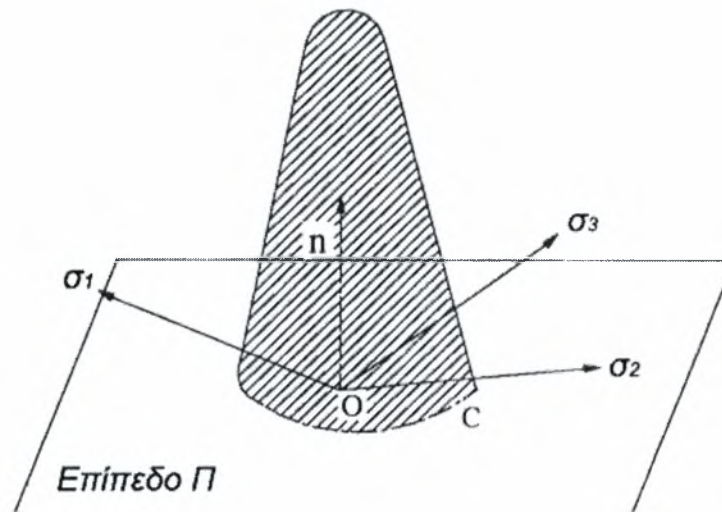
$\sigma_{kk}$  η υδροστατική τάση

$f$  το πορώδες του υλικού, δηλαδή το κλάσμα του όγκου των οπών στο υλικό

$$\left( f = \frac{V_{voids}}{V_{total}} \right)$$

Παρατηρούμε ότι θέτοντας  $f = 0$  στη σχέση (3.3.1) προκύπτει το κριτήριο διαρροής του von Mises.

Καθώς το κριτήριο διαρροής του Gurson εξαρτάται και από την υδροστατική τάση, δεν θα απεικονίζεται στο χώρο με κύλινδρο αλλά με μία επιφάνεια κωνικής μορφής, όπως αυτή του σχήματος 3.3.1. Το κριτήριο του Gurson μπορεί να εφαρμοστεί για την εξέταση ενός μη συμπαγούς υλικού, δηλαδή ενός υλικού με μικρο-οπές (πόρους). Όταν ένα σώμα από το παραπάνω υλικό παραμορφώνεται πλαστικά, τότε με βάση το μοντέλο του Gurson οι πόροι αρχικά είναι σφαιρικοί και παραμένουν σφαιρικοί και κατά την παραμόρφωση. Αυτό που αλλάζει είναι το μέγεθος των οπών, άρα και το πορώδες του υλικού.



Σχήμα 3.3.1

### 3.4 Κριτήριο ανισότροπου μοντέλου

Σύμφωνα με το ανισότροπο ελαστο-πλαστικό καταστατικό μοντέλο για πορώδη μέταλλα [Kailasam M., Aravas N. & Castañeda P. (2000). *Porous metals with developing anisotropy: Constitutive models, computational issues and application to deformation processing*, Computer modeling in Engineering and Sciences, p. 105-118], όταν ένα υλικό αυτής της κατηγορίας είναι αφόρτιστο, περιέχει πόρους που είναι κατανομημένοι τυχαία μέσα σε μία μεταλλική μήτρα, η οποία θεωρείται τέλεια - πλαστική. Στην κατάσταση αυτή οι πόροι έχουν σφαιρικό σχήμα. Όταν όμως συμβαίνει πλαστική παραμόρφωση, οι πόροι αλλάζουν όγκο, σχήμα και προσανατολισμό και αποκτούν ελλειπτικό σχήμα. Σε κάθε σημείο του ομογενοποιημένου υλικού θεωρείται ένα «αντιπροσωπευτικό» τοπικό ελλειψοειδές με κύριους άξονες που ορίζονται από τα μοναδιαία διανύσματα  $\mathbf{n}^{(1)}, \mathbf{n}^{(2)}, \mathbf{n}^{(3)} = \mathbf{n}^{(1)} \times \mathbf{n}^{(2)}$ , ενώ τα αντίστοιχα μήκη των κύριων αξόνων του ελλειψοειδούς είναι  $a, b, c$ . Το υλικό είναι τοπικά ορθοτροπικό, δηλαδή καθώς παραμορφώνεται οι πόροι αναπτύσσουν παρόμοια σχήματα και κατευθύνσεις. Οι άξονες της ορθοτροπίας συμπίπτουν με τους κύριους άξονες του ελλειψοειδούς. Με βάση τα παραπάνω, οι μεταβλητές που χαρακτηρίζουν ένα σημείο του υλικού είναι οι  $\bar{\epsilon}^p, f, w_1, w_2, \mathbf{n}^{(1)}, \mathbf{n}^{(2)}, \mathbf{n}^{(3)}$  όπου  $\bar{\epsilon}^p$  είναι η τοπική ισοδύναμη πλαστική

παραμόρφωση και  $f$  το πορώδες του υλικού, όπως αυτό ορίστηκε στο μοντέλο Gurson. Η συνάρτηση διαρροής έχει ως εξής:

$$\tilde{\Phi}(\bar{\sigma}, s) = \frac{\bar{\sigma} \cdot (\tilde{\mathbf{m}}(s) \bar{\sigma})}{1-f} - \sigma_y^2$$

όπου:

$\sigma_y$  το όριο διαρροής της μήτρας του υλικού σε εφελκυσμό

$\tilde{\mathbf{m}}(s)$  ένας τανυστής τέταρτης τάξης που δίνεται από τη σχέση:

$$\tilde{\mathbf{m}}(s) = 3\mu \tilde{\mathbf{M}}_{\kappa \rightarrow \infty}$$

Το  $\tilde{\mathbf{M}}$  είναι ο τανυστής ενδοτικότητας (effective compliance tensor) του σύνθετου υλικού που ορίζεται ως:

$$\tilde{\mathbf{M}} = \mathbf{M} + \frac{f}{1-f} \mathbf{Q}^{-1}$$

όπου  $\mathbf{M}$  είναι ο ελαστικός τανυστής ενδοτικότητας (elastic compliance tensor) του υλικού της μήτρας. Οι παρακάτω σχέσεις ορίζουν το  $\mathbf{M}$ :

$$\mathbf{L} = 2\mu \mathbf{K} + 3\kappa \mathbf{J}, \quad \mathbf{M} = \mathbf{L}^{-1} = \frac{1}{2\mu} \mathbf{K} + \frac{1}{3\kappa} \mathbf{J} = \frac{1}{2\mu} \left( \mathbf{K} + \frac{1-2\nu}{1+\nu} \mathbf{J} \right),$$

$$\mathbf{J} = \frac{1}{3} \delta \otimes \delta, \quad \mathbf{K} = \mathbf{I} - \mathbf{J}, \quad \mathbf{Q} = \mathbf{L}(\mathbf{I} - \mathbf{S})$$

με  $\mu$  να είναι το ελαστικό μέτρο διάτμησης και  $\kappa$  το ελαστικό μέτρο διόγκωσης,  $\nu$  το μέτρο Poisson,  $\delta$  τανυστής δεύτερης τάξης,  $\mathbf{I}$  τανυστής τέταρτης τάξης και  $\mathbf{S}$  ο τανυστής τέταρτης τάξης του Eshelby.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να τονίσουμε ότι στο μοντέλο αυτό επειδή οι πόροι αλλάζουν σχήμα, όγκο και προσανατολισμό, σε αντίθεση με το μοντέλο του Gurson όπου οι οπές παραμένουν σφαιρικές, το πρόβλημα γίνεται δυσκολότερο αφού το υλικό δεν είναι πλέον ισότροπο και απαιτούνται περισσότερες μεταβλητές για τη μελέτη του προβλήματος.



## Κεφάλαιο 4

### Προσομοίωση διέλασης χάλυβα με πεπερασμένα στοιχεία

#### 4.1 Μοντέλο – Γεωμετρία

Προκειμένου να αναλύσουμε την άμεση αξονοσυμμετρική διέλαση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, γίνεται χρήση του υπολογιστικού πακέτου ABAQUS (HKS). Το πακέτο αυτό ουσιαστικά αποτελεί ένα πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων με σκοπό την επίλυση διαφόρων προβλημάτων και παρέχει τη δυνατότητα χρησιμοποίησης καταστατικών μοντέλων τα οποία ορίζονται από το χρήστη. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω υπορουτίνας γραμμένης σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN, η οποία συνεργάζεται με το πακέτο μετά από τις κατάλληλες ρυθμίσεις. Το πακέτο έχει ενσωματωμένα και ορισμένα καταστατικά μοντέλα, που χρησιμοποιούνται συχνά στην πράξη (για παράδειγμα von Mises). Η επίλυση οποιουδήποτε ελαστο-πλαστικού προβλήματος, όπως αυτό που εξετάζεται στην παρούσα διπλωματική εργασία, γίνεται σταδιακά – αυξητικά, αφού βεβαίως έχουν οριστεί οι κατάλληλες συνοριακές συνθήκες.

Στο συγκεκριμένο πρόβλημα χρησιμοποιήθηκαν τρία διαφορετικά καταστατικά μοντέλα, όπως αυτά παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 3. Από αυτά, τα μοντέλα von Mises και Gurson χρησιμοποιήθηκαν ως έχουν από το υπολογιστικό πακέτο, ενώ για το ανισότροπο μοντέλο έγινε χρήση κατάλληλης υπορουτίνας. Χρησιμοποιήθηκαν αξονοσυμμετρικά, ισοπαραμετρικά στοιχεία με τέσσερις κόμβους και τέσσερα σημεία ολοκλήρωσης κατά Gauss.

Το υλικό του μοντέλου είναι ο χάλυβας 1024 (SAE) που είναι χάλυβας με κατασκευαστική και δομική χρήση και θεωρείται υψηλής αντοχής. Στον πίνακα 4.1.1 φαίνεται η χημική σύνθεση. Οι καταστατικές παράμετροι του υλικού είναι  $\sigma_0/E=1/500$  και  $\nu=0,3$ , όπου  $\sigma_0$  είναι το όριο διαρροής του υλικού,  $E$  το μέτρο ελαστικότητας και  $\nu$  το μέτρο Poisson. Μετά από πειραματικές μετρήσεις, ο Z. Zimmerman κατέληξε στην καμπύλη του σχήματος 4.1.1 η οποία αποτελεί τη γενικευμένη καμπύλη πραγματικής τάσης – πραγματικής παραμόρφωσης. Από την καμπύλη αυτή υπολογίζεται ένας ελάχιστος βαθμός κράτνωσης ίσος με

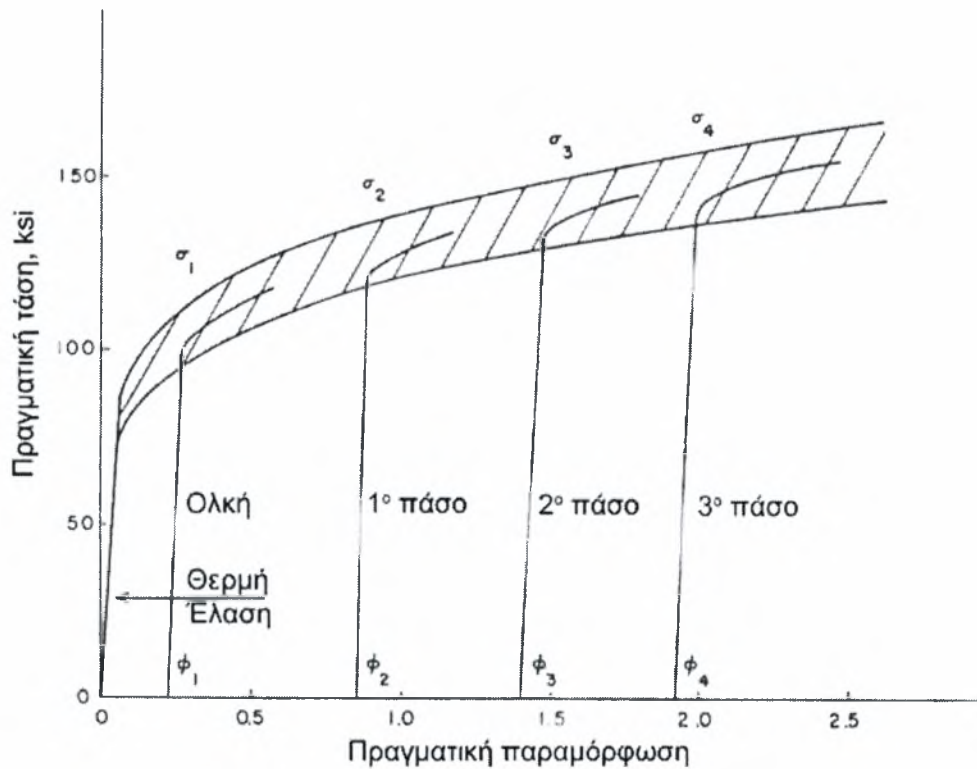
$$\beta = \frac{\sigma_{i+1} - \sigma_i}{\sigma_i(\epsilon_{i+1} - \epsilon_i)} = 0,1. \text{ Όπως τονίστηκε στο κεφάλαιο 2, ο βαθμός κράτνωσης έχει}$$

σημαντική επίδραση στο πρόβλημα της κεντρικής αστοχίας. Με αύξησή του

απομακρύνεται το ενδεχόμενο να συμβεί αστοχία στο προϊόν. Κατά συνέπεια, σε περίπτωση που δεν μπορούμε να προσδιορίσουμε το βαθμό κράτνσης, θα πρέπει να το θεωρούμε πολύ μικρό ώστε να έχουμε μία περισσότερο συντηρητική προσέγγιση στο θέμα. Τέλος, η τιμή του αρχικού πορώδους λαμβάνεται ίση με 4%.

Στοιχείο	min %	max %
C	0,18	0,25
Mn	1,3	1,65
P		0,04
S		0,05

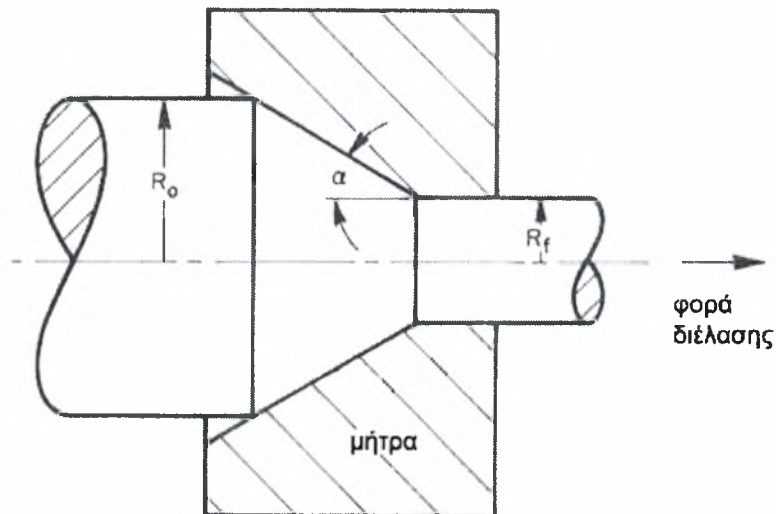
Πίνακας 4.1.1



Σχήμα 4.1.1

Με τη βοήθεια του σχήματος 4.1.2 γίνεται περισσότερο κατανοητή η γεωμετρία του προβλήματος. Αν  $R_0$ ,  $R_f$  είναι αντίστοιχα η αρχική και τελική ακτίνα του προϊόντος και  $L$  το μήκος της περιοχής μείωσης της διατομής, τότε η ημιγωνία του κώνου της μήτρας δίνεται από τη σχέση:

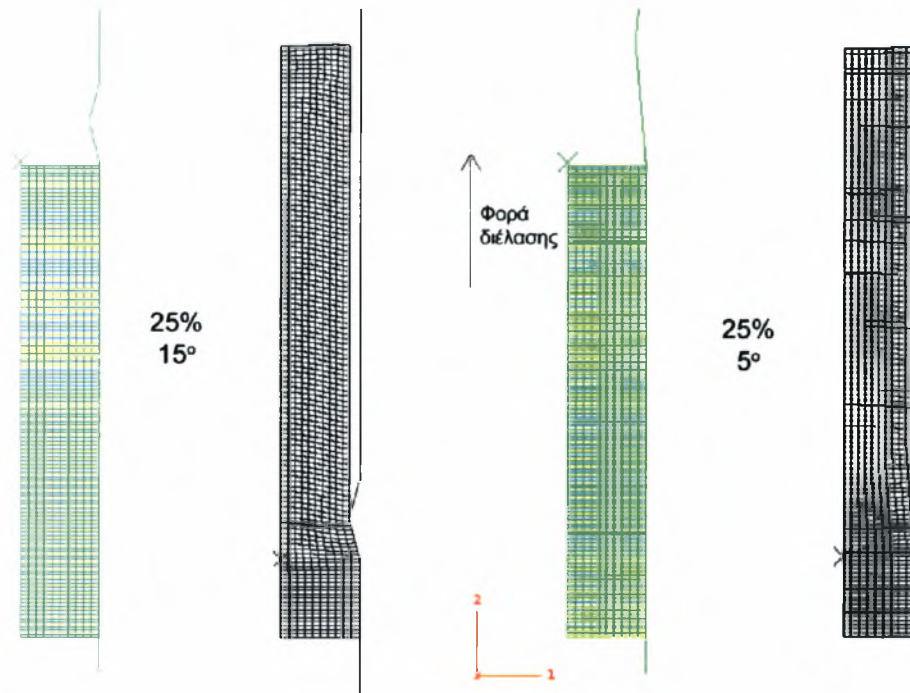
$$a = \arctan \frac{R_0 - R_f}{L}$$



Σχήμα 4.1.2

Θα γίνουν συγκρίσεις για δύο διαφορετικούς συνδυασμούς ποσοστού μείωσης της διατομής και ημιγωνίας του κώνου. Στον πρώτο συνδυασμό έχουμε 25% μείωση της διατομής με ημιγωνία  $15^\circ$  ενώ στο δεύτερο έχουμε πάλι 25% μείωση αλλά με ημιγωνία  $5^\circ$ . Οι δύο αυτοί συνδυασμοί επιλέχθηκαν διότι με βάση τα πειράματα του Z. Zimerman στο συνδυασμό 25% -  $15^\circ$  συμβαίνει κεντρική αστοχία, ενώ στο συνδυασμό 25% -  $5^\circ$  όχι. Θα προσπαθήσουμε επομένως εξετάζοντας τις εντατικές καταστάσεις τη ζώνη παραμόρφωσης να εξάγουμε χρήσιμα συμπεράσματα για το εν λόγω πρόβλημα.

Το πρόβλημα είναι αξονοσυμμετρικό και επομένως μπορούμε να αναπαραστήσουμε την κατεργασία με μία ημιτομή σε δύο διαστάσεις. Στο σχήμα 4.1.3 βλέπουμε το απαραμόρφωτο και παραμορφωμένο πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων. Συνολικά έχουμε 1320 στοιχεία και 1586 κόμβους. Η φορά της διέλασης είναι από κάτω προς τα πάνω. Θεωρούμε δηλαδή ότι το έμβολο της πρέσας διέλασης ασκεί δύναμη στο κάτω μέρος του πλέγματος. Αυτό επιτυγχάνεται με την επιβολή κατάλληλων κινηματικών και συνοριακών συνθηκών. Στο σημείο αυτό πρέπει να τονίσουμε ότι κατά την έξοδο από τη μήτρα, η μπιγιέτα υφίσταται ελαστική επανάκτηση (παραμορφώσεις αποφόρτισης), κάτι που κατέχει σημαντικό ρόλο στην τελική κατανομή των παραμένουσων τάσεων. Αυτό όμως δεν είναι ορατό στο σχήμα 4.1.3.

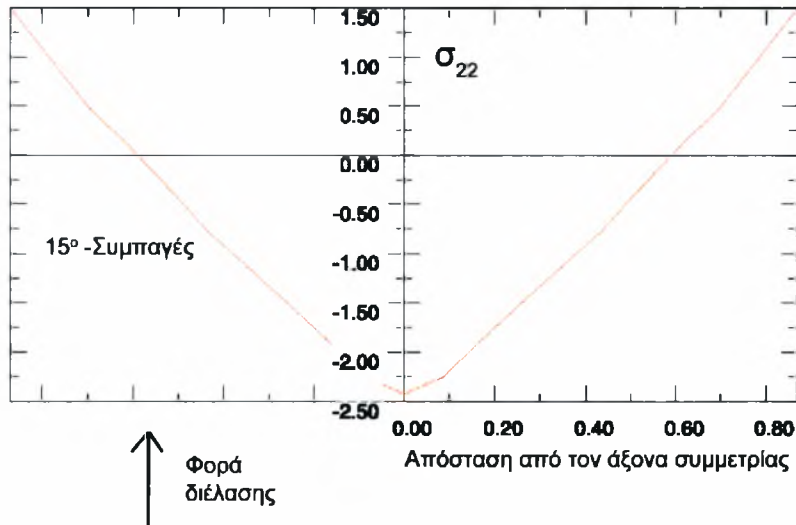


Σχήμα 4.1.3

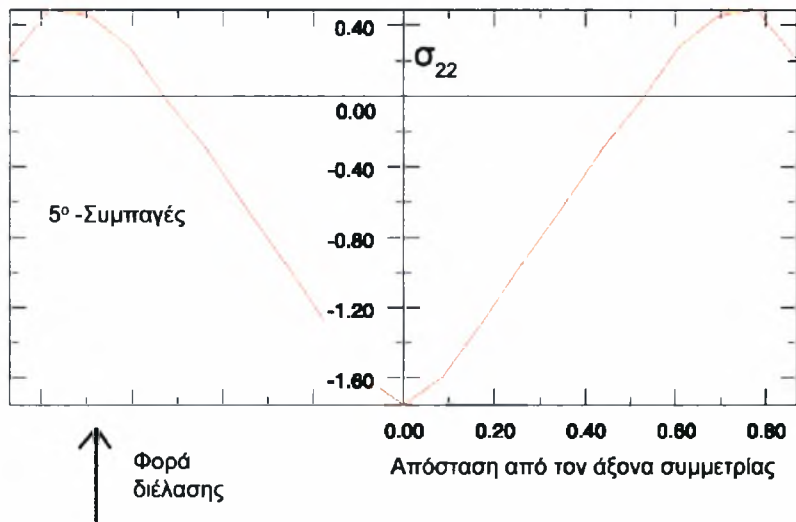
## 4.2 Αποτελέσματα 1<sup>ου</sup> βήματος

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται αφορούν μόνιμη κατάσταση (steady state) της κατεργασίας. Ως τέτοια θεωρούμε την κατάσταση κατά την οποία ένα σημαντικό μέρος της μπιγιέτας έχει εξέλθει από τη μήτρα και η εντατική κατάσταση δε μεταβάλλεται στο μέρος αυτό κατά μήκος της μπιγιέτας (με εξαίρεση το μέρος που είναι κοντά στην «αρχή» της μπιγιέτας). Το παραμορφωμένο πλέγμα του σχήματος 4.1.3 βρίσκεται σε αυτή την κατάσταση. Τα μεγέθη των τάσεων παρουσιάζονται σε αδιάστατη μορφή και σε σχέση με το όριο διαρροής του υλικού.

Αρχικά εξετάζεται ένα βασικό αποτέλεσμα, από το οποίο προκύπτουν συμπεράσματα σχετικά με την ορθότητα του μοντέλου. Αυτό είναι οι παραμένουσες τάσεις  $\sigma_{22}$  σε τυχαία διατομή του προϊόντος. Στα σχήματα 4.2.1 και 4.2.2 απεικονίζονται οι παραπάνω τάσεις για τις γεωμετρίες των 15 και 5 μοιρών αντίστοιχα.



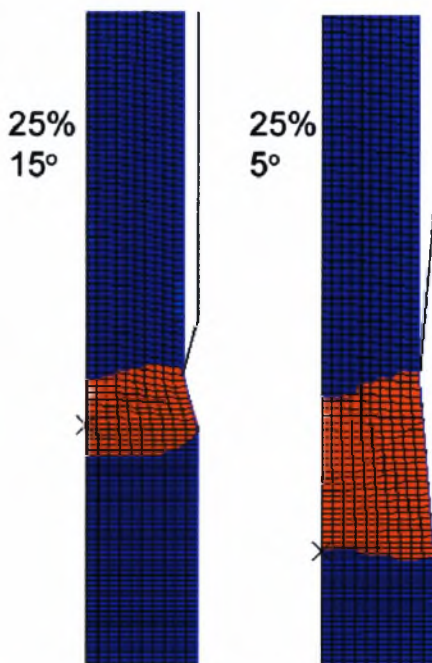
Σχήμα 4.2.1



Σχήμα 4.2.2

Η  $\sigma_{22}$  παραμένει θλιπτική (αρνητικό πρόσημο) για το μεγαλύτερο μέρος της απόστασης από τον άξονα συμμετρίας, δηλαδή για το μεγαλύτερο μέρος της ακτίνας του προϊόντος. Κοντά στην επιφάνεια του προϊόντος το πρόσημο αλλάζει. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι σε μόνιμη κατάσταση και σε κάθε τομή του πεδίου των παραμένουσων τάσεων, θα πρέπει η κατανομή των τάσεων να είναι τέτοια ώστε να μην μεταδίδεται αξονική δύναμη. Εάν δηλαδή  $r$  είναι η ακτίνα του προϊόντος, θα πρέπει να ισχύει:  $\int_{-R}^R \sigma_{22} r dr = 0$ . Ο υπολογισμός αυτού του ολοκληρώματος δίνει μηδενική τιμή, οπότε έχουμε μια πρώτη ένδειξη ότι το μοντέλο είναι ορθό.

Στο σχήμα 4.2.3 φαίνονται ποιά στοιχεία παραμορφώνονται πλαστικά και ποιά όχι.



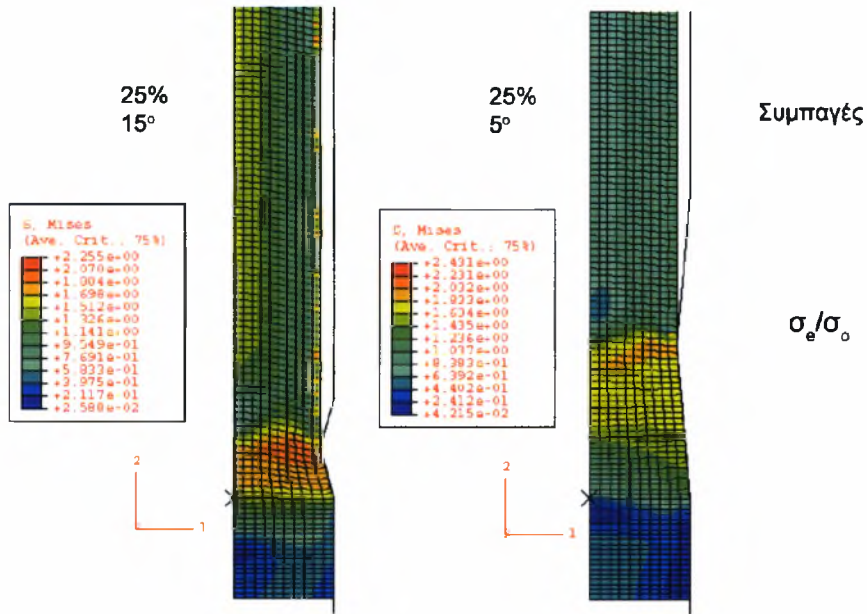
Σχήμα 4.2.3

(σημείωση: το σχήμα προκύπτει από το ανισότροπο μοντέλο διότι αυτό παρείχε την καλύτερη δυνατή απεικόνιση για το συγκεκριμένο αποτέλεσμα)

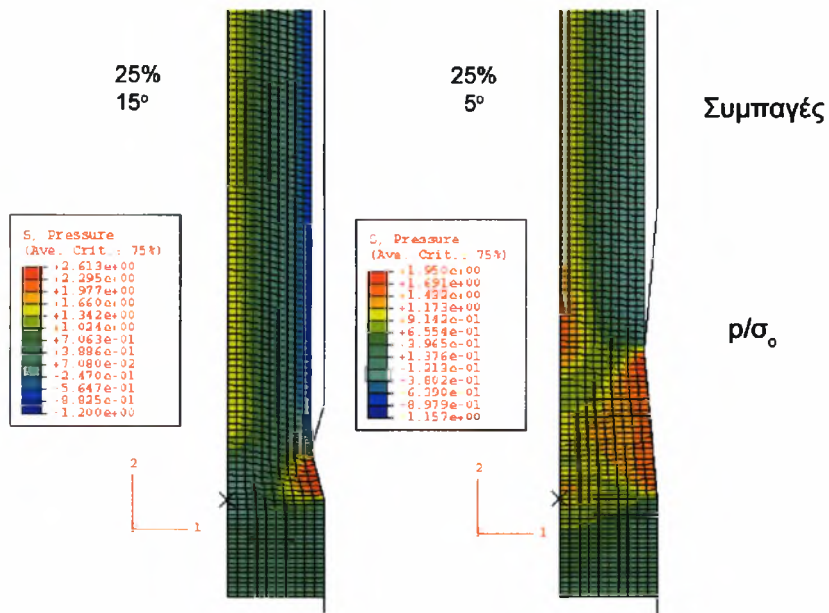
Με κόκκινο χρώμα είναι τα στοιχεία που βρίσκονται στην πλαστική περιοχή. Παρατηρούμε ότι στην «κοντή» μήτρα (15°) τα στοιχεία εισέρχονται στην πλαστική ζώνη πριν από τη γεωμετρική περιοχή μείωσης, κάτι που δε συμβαίνει στην «μακρά» μήτρα (5°), όπου η πλαστικοποίηση γίνεται εντός της γεωμετρικής περιοχής. Γενικά, όσο πιο απότομη είναι η μείωση της διατομής, η πλαστική ζώνη ενεργοποιείται μακρύτερα από τη γεωμετρική ζώνη μείωσης.

Πριν προχωρήσουμε σε συγκρίσεις μεταξύ των τριών μοντέλων, είναι σκόπιμο να εξετάσουμε δύο ακόμα αποτελέσματα που αφορούν την περίπτωση όπου το υλικό είναι συμπαγές. Στο σχήμα 4.2.4 φαίνεται η κατανομή της ισοδύναμης τάσης κατά von Mises κανονικοποιημένη με το όριο διαρροής, ενώ στο σχήμα 4.2.5 βλέπουμε την κατανομή της κανονικοποιημένης υδροστατικής τάσης  $p = -\frac{1}{3}\sigma_{\text{κ}}$ .

Κοντά στο τοίχωμα και μέσα στη ζώνη παραμόρφωσης επικρατούν υψηλότερες τάσεις, οι οποίες είναι ακόμη μεγαλύτερες για την περίπτωση της μήτρας των 15°. Σε ότι αφορά την υδροστατική τάση, πρέπει να πούμε ότι και για τις δύο γεωμετρίες επικρατεί ισχυρή θλίψη κοντά στο τοίχωμα. Στον άξονα συμμετρίας όμως, ενώ για τη μήτρα των 5° εξακολουθούμε να έχουμε θλίψη, στη μήτρα των 15° έχουμε ισχυρό υδροστατικό εφελκυσμό.

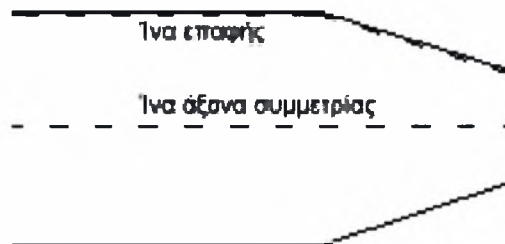


Σχήμα 4.2.4

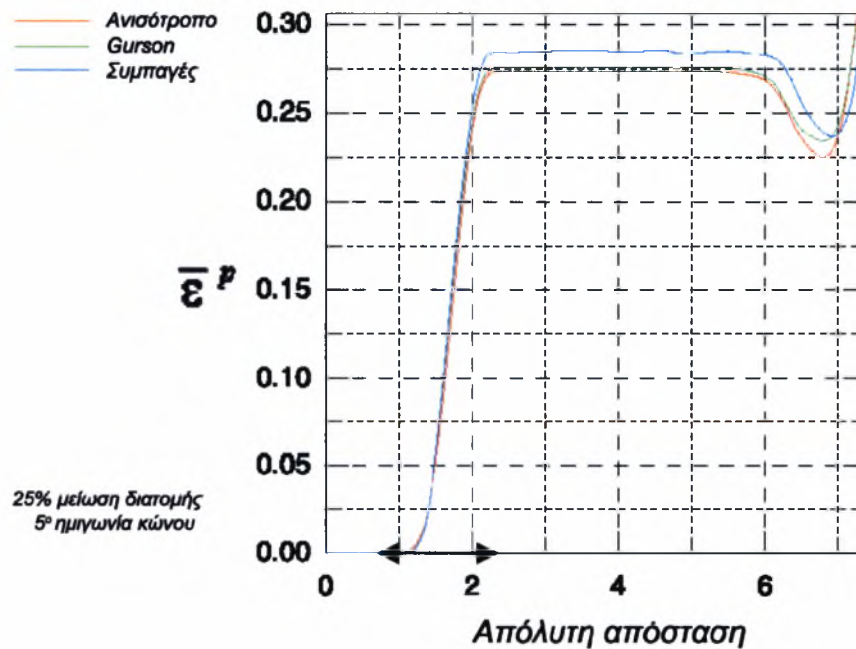
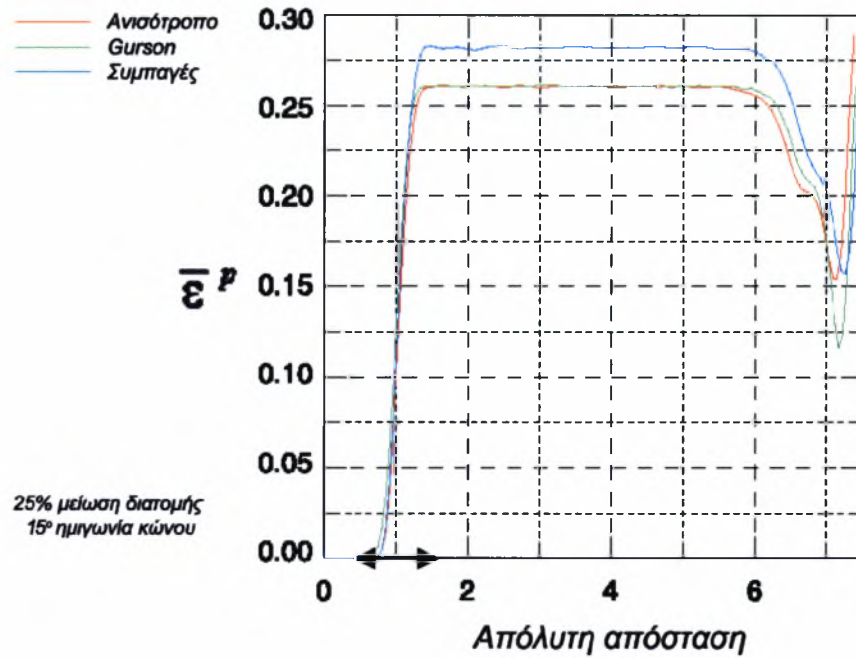


Σχήμα 4.2.5

Το παρακάτω σχήμα είναι διευκρινιστικό σε σχέση με τα σημεία στα οποία αναφερόμαστε στις γραφικές παραστάσεις που θα ακολουθήσουν.



Η κατανομή της ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης  $\overline{\varepsilon}^p$  κατά μήκος της ίνας του άξονα συμμετρίας και για τα τρία μοντέλα φαίνεται στο σχήμα 4.2.6. Με το βέλος σημειώνεται η ζώνη παραμόρφωσης.



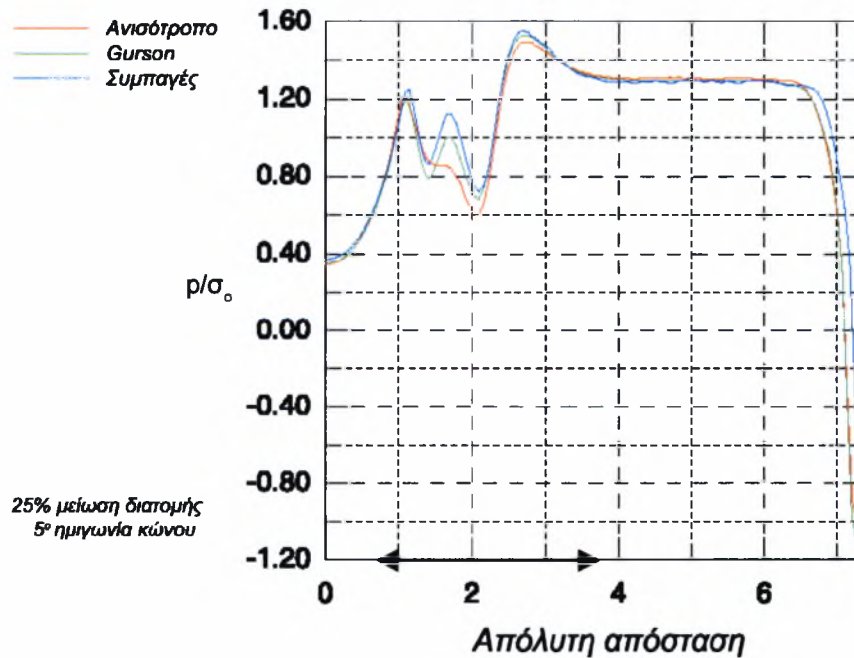
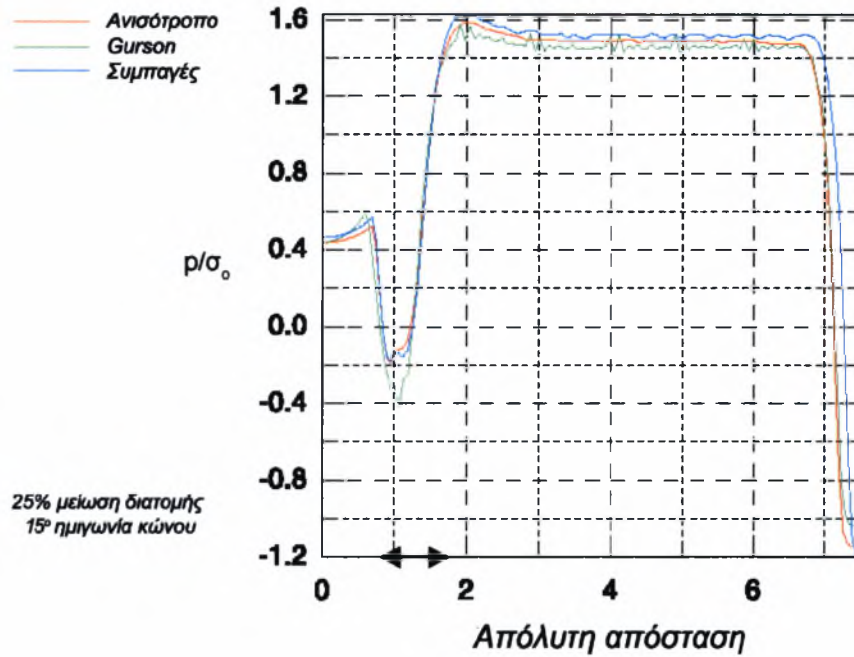
Σχήμα 4.2.6

Παρατηρούμε ότι οι τιμές της ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης που προβλέπει το ανισότροπο μοντέλο είναι οι μικρότερες. Επίσης, η έλλειψη πόρων στο



συμπαγές υλικό προκαλεί μεγαλύτερη ακαμψία, γι' αυτό και η ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση που προβλέπει το συμπαγές μοντέλο είναι μεγαλύτερη από τις υπόλοιπες.

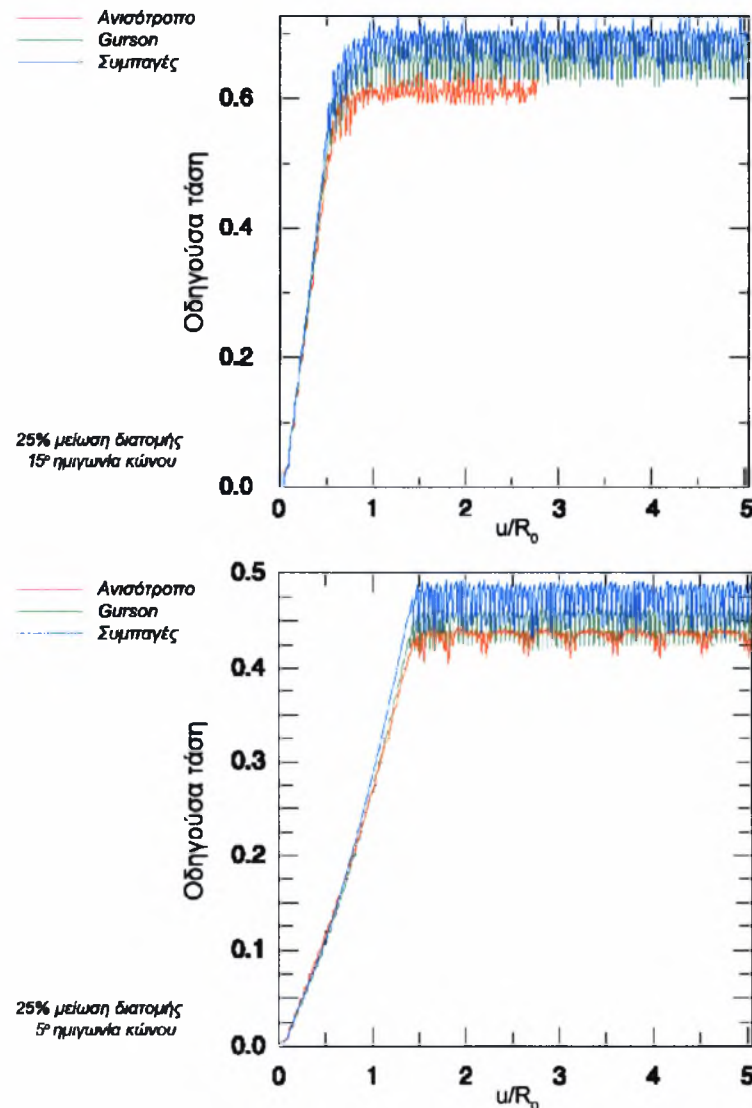
Στο σχήμα 4.2.7 παρουσιάζεται η κατανομή της υδροστατικής τάσης ( $p/\sigma_0$ ) κατά μήκος της ίνας του άξονα συμμετρίας.



Σχήμα 4.2.7

Στην μακρά μήτρα ( $5^\circ$ ) η υδροστατική τάση είναι θλιπτική σε όλο το μήκος της πλαστικής ζώνης, σε αντίθεση με την κοντή μήτρα ( $15^\circ$ ) όπου η τάση είναι εφελκυστική και γίνεται θλιπτική μόνο λίγο πριν από το τέλος της ζώνης παραμόρφωσης. Στη ίνα επαφής και για τις δύο γεωμετρίες βρέθηκε ότι επικρατεί παντού υδροστατική θλίψη.

Ένα πολύ σημαντικό αποτέλεσμα τόσο από θεωρητική όσο και από πρακτική άποψη, αποτελεί η οδηγούσα τάση της διέλασης, δηλαδή η οδηγούσα δύναμη προς την επιφάνεια του εμβόλου της πρέσας. Εδώ παρουσιάζεται κανονικοποιημένη με το όριο διαρροής του υλικού και σε συνάρτηση με την μετατόπιση  $u$  του εμβόλου αδιαστατοποιημένη με την αρχική ακτίνα  $R_0$  της μπιγιέτας. Υπενθυμίζουμε ότι βρισκόμαστε στο πρώτο πέρασμα της μπιγιέτας. Το σχήμα 4.2.8 λοιπόν περιλαμβάνει τα προαναφερθέντα.



Σχήμα 4.2.8

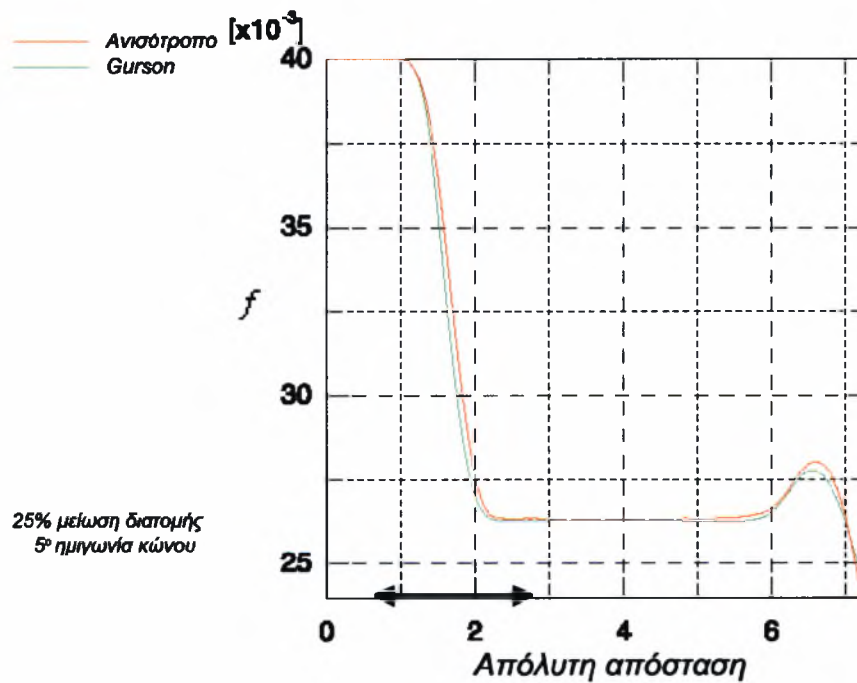
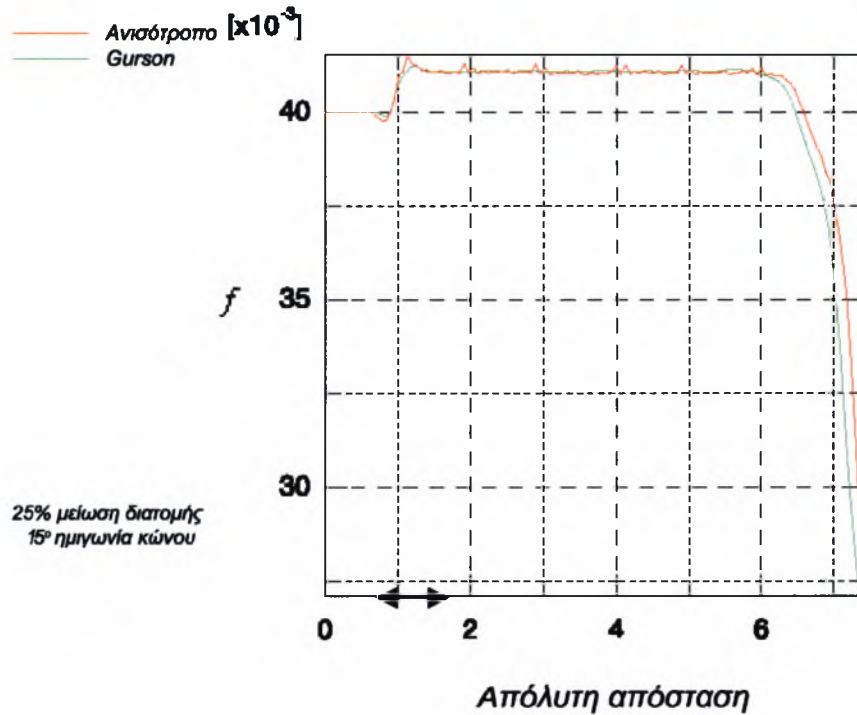
Όπως μπορούμε να δούμε, η οδηγούσα τάση είναι μεγαλύτερη για την κοντή μήτρα. Επειδή δεν έχουμε λάβει υπόψη μας την τριβή, η οδηγούσα τάση αποκτά μία σταθερή (κατά μέσο όρο) τιμή μετά την έξοδο της μπιγιέτας από τη μήτρα, δηλαδή όταν πλέον έχουμε φτάσει σε μία μόνιμη κατάσταση. Ο ρυθμός του πλαστικού έργου της κατεργασίας προκύπτει από το γινόμενο της οδηγούσας δύναμης με την ταχύτητα της μπιγιέτας. Στην περίπτωση της κοντής μήτρας έχουμε μεγαλύτερες πλαστικές παραμορφώσεις, οπότε και μεγαλύτερο ρυθμό πλαστικού έργου σε σχέση με την μακρά μήτρα. Κατά συνέπεια, η παρατήρηση ότι η οδηγούσα τάση είναι μεγαλύτερη στην κοντή μήτρα επιβεβαιώνει τα παραπάνω.

Σε ότι αφορά τα τρία μοντέλα, παρατηρούμε ότι το ανισότροπο μοντέλο δίνει την ελάχιστη τιμή της οδηγούσας τάσης, ενώ το συμπαγές μοντέλο δίνει τη μεγαλύτερη. Αυτό είναι αναμενόμενο, αφού προηγουμένως είδαμε ότι και η ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση είναι μικρότερη για το ανισότροπο μοντέλο. Πάντως και για τα τρία μοντέλα οι τιμές της οδηγούσας τάσης δε διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους (οι διαφορές είναι της τάξης του 6%).

Σε προηγούμενο κεφάλαιο είδαμε ότι το πορώδες διαδραματίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην κατεργασία, καθώς η αύξησή του στον άξονα συμμετρίας του προϊόντος αποτελεί την αρχή για τις ρηγματώσεις. Οι μικρο-οπές δημιουργούνται εξαιτίας της μεγάλης πλαστικής παραμόρφωσης, καθώς έχουμε αποκόλληση εγκλεισμάτων ή σωματιδίων δεύτερης φάσης. Οι οπές μεγαλώνουν μόνο υπό την επίδραση εφελκυστικών τάσεων.

Η μελέτη του πορώδους γίνεται προφανώς μόνο στο μοντέλο Gurson και στο ανισότροπο μοντέλο. Οι τάσεις που προκύπτουν σε αυτά τα μοντέλα είναι κάπως μικρότερες, όπως είδαμε προηγουμένως, αλλά η κατανομή τους παραμένει ακριβώς η ίδια.

Η κατανομή του πορώδους κατά μήκος της ίνας του άξονα συμμετρίας απεικονίζεται στο σχήμα 4.2.9 για τους δύο διαφορετικούς γεωμετρικούς συνδυασμούς.



Σχήμα 4.2.9

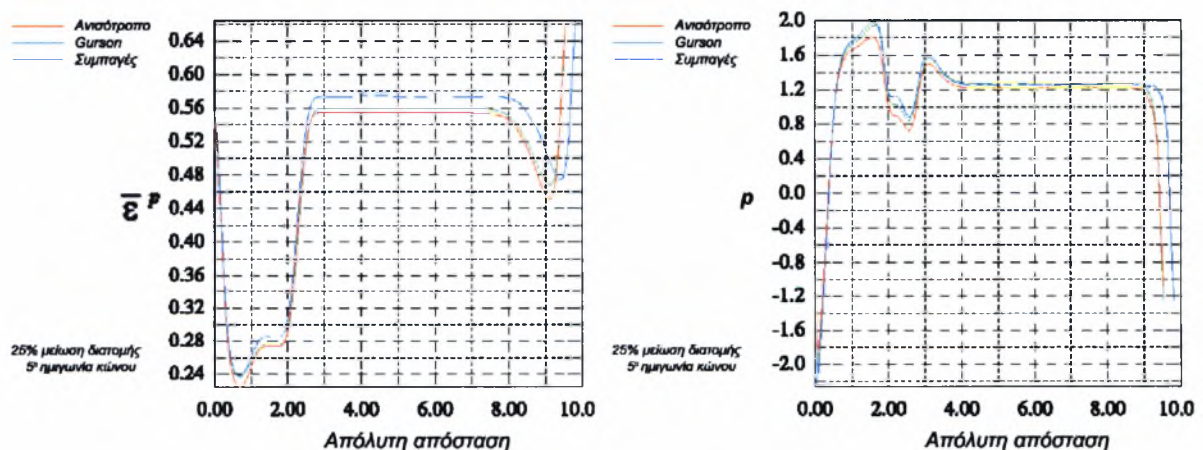
Ενώ στην μακρά μήτρα (5°) οι πόροι κλείνουν και στην έξοδο από την πλαστική ζώνη το πορώδες γίνεται περίπου 2,7%, στην περίπτωση της κοντής μήτρας (15°) οι πόροι ανοίγουν κατά ένα μικρό ποσοστό, αφού δέχονται εφελκυστικές τάσεις. Λίγο πριν το τέλος της πλαστικής ζώνης και για τη γεωμετρία της κοντής μήτρας οι

πόροι κλείνουν ελαφρώς, για να φτάσουμε σε ένα πορώδες του 4,1% περίπου. Υπενθυμίζεται ότι το αρχικό πορώδες είναι 4%.

### 4.3 Αποτελέσματα 2<sup>ου</sup> βήματος

Από την πράξη γνωρίζουμε ότι η κεντρική αστοχία εμφανίζεται μετά από κάποιον αριθμό περασμάτων, γι' αυτό και η παρούσα μελέτη επεκτείνεται και για δεύτερο βήμα – «πάσο». Και πάλι η μείωση της διατομής είναι 25% ενώ η νέα μείωση γίνεται και πάλι με ημιγωνίες του κώνου της μήτρας 5 και 15 μοίρες. Το δεύτερο πέραςμα γίνεται έχοντας ως αρχικά δεδομένα τα αποτελέσματα του πρώτου, δηλαδή οι παραμένουσες τάσεις και παραμορφώσεις του πρώτου βήματος αποτελούν τις αρχικές συνθήκες για το δεύτερο.

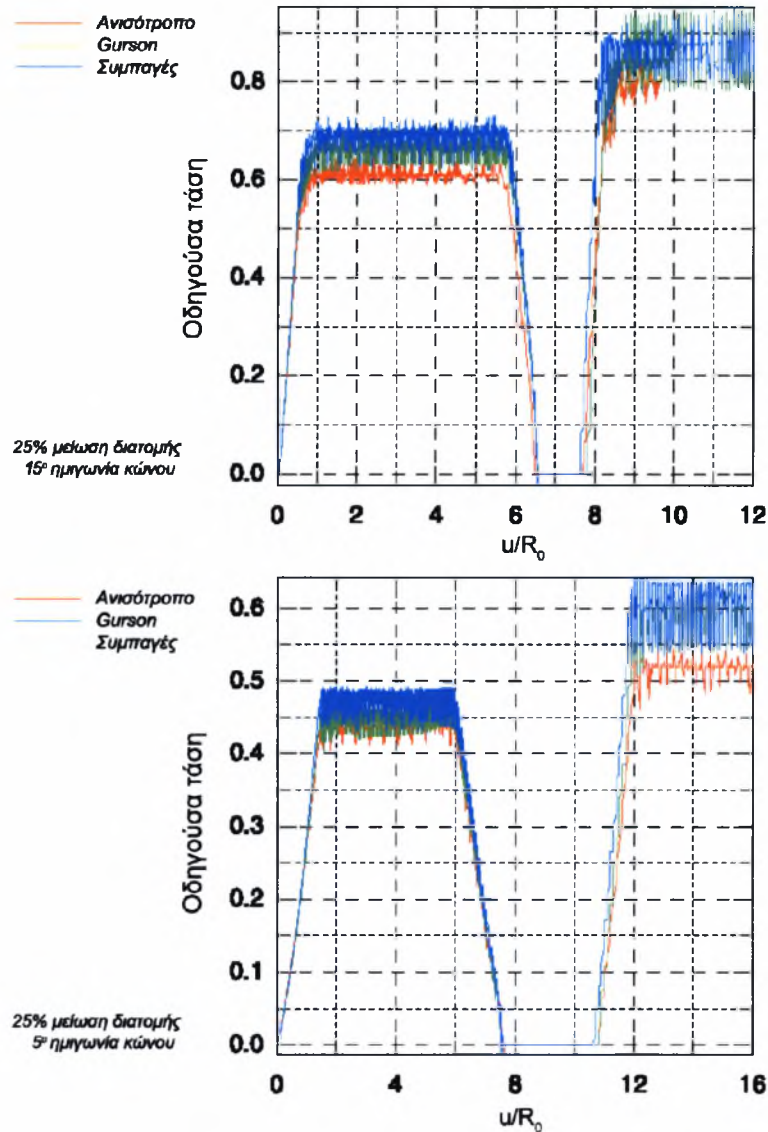
Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι παραμένουσες τάσεις έχουν ακριβώς την ίδια μορφή με το πρώτο βήμα, δηλαδή είναι θλιπτικές στο μεγαλύτερο μέρος της απόστασης από τον άξονα συμμετρίας (ακτίνα) και αλλάζουν πρόσημο κοντά στην εξωτερική επιφάνεια του σχήματος. Απλώς μεγαλώνει κάπως το μέγεθός τους, γεγονός αναμενόμενο αφού τώρα η μπιγιέτα έχει υποστεί εργοσκλήρυνση από το πρώτο πέραςμα. Η υδροστατική τάση στην ίνα του άξονα συμμετρίας είναι θλιπτική για την μακρά μήτρα και εφελκυστική για την κοντή. Το πορώδες για την μακρά μήτρα μειώνεται (οι οπές κλείνουν), ενώ για την κοντή μήτρα αυξάνεται. Ενδεικτικά παρουσιάζονται τα παραπάνω για την μακρά μήτρα στο σχήμα 4.3.1.



Σχήμα 4.3.1

Ϸ

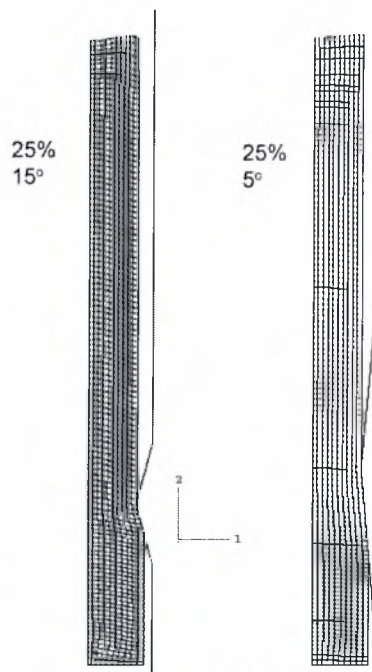
Όπως και στο πρώτο βήμα, ένα σημαντικό αποτέλεσμα είναι η οδηγούσα τάση. Εδώ παρουσιάζεται για τις δύο γεωμετρίες και σε σχέση με το πρώτο βήμα ώστε να είναι ευκολότερη η σύγκριση. Έτσι έχουμε το σχήμα 4.3.2:



Σχήμα 4.3.2

Βλέπουμε ότι η οδηγούσα τάση αυξάνεται σημαντικά, ενώ και πάλι οι τιμές που προβλέπει το ανισότροπο μοντέλο είναι οι σχετικά μικρότερες. Η αύξηση της οδηγούσας τάσης είναι μία απόρροια της εργοσκλήρυνσης που έχει υποστεί το προϊόν από την πρώτη διέλαση. Όπως και στο πρώτο βήμα, η οδηγούσα τάση παίρνει μία μέση τιμή όταν η κατεργασία φτάσει στη μόνιμη κατάσταση. Στο δεύτερο βήμα όμως παρατηρούμε μία μεγαλύτερη διακύμανση στις τιμές.

Στο σχήμα 4.3.3 παρουσιάζεται το παραμορφωμένο πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων για το δεύτερο βήμα.



Σχήμα 4.3.3

#### 4.4 Συμπεράσματα

Έχουμε ήδη τονίσει το γεγονός ότι ο συνδυασμός 25% μείωση της διατομής και 15° ημιγωνία του κώνου της μήτρας οδηγεί σε κεντρική αστοχία, ενώ ο συνδυασμός 25% - 5° όχι. Τα αποτελέσματα της μελέτης με πεπερασμένα στοιχεία δείχνουν ότι στην μακρά μήτρα οι οπές κλείνουν, αφού το εντατικό πεδίο είναι θλιπτικό σε όλο το μήκος της πλαστικής ζώνης. Στο δεύτερο πέρασμα οι οπές κλείνουν ακόμη περισσότερο, αφού οι θλιπτικές τάσεις εξακολουθούν να υπάρχουν. Στην κοντή όμως μήτρα, οι οπές μεγαλώνουν συνεχώς, αφού δέχονται ισχυρές εφελκυστικές τάσεις. Υπενθυμίζεται ότι οι οπές μπορούν να μεγαλώσουν μόνο κάτω από υδροστατικό εφελκυσμό, όπως ακριβώς συμβαίνει στην περίπτωση της κοντής μήτρας. Άρα το πορώδες στην περίπτωση της κοντής μήτρας αυξάνει, κάτι που συνεχίζει να συμβαίνει και στο επόμενο πέρασμα.

Συμπερασματικά, κάθε πέρασμα από την κοντή μήτρα συνεισφέρει αυξητικά στο πορώδες του προϊόντος. Όταν το πορώδες φτάσει μία κρίσιμη τιμή (της τάξης του 10%), οι γειτονικές οπές ενώνονται μεταξύ τους και δημιουργείται τοπική αστοχία. Όταν δημιουργηθεί η αστοχία – ρηγμάτωση, γίνεται αποφόρτιση και ο κύκλος επαναλαμβάνεται, με αποτέλεσμα να έχουμε μία περιοδικότητα στην εμφάνιση των ρηγμάτων.

## Κεφάλαιο 5

### Διέλαση αλουμινίου

#### 5.1 Γενικά

Η διέλαση αλουμινίου είναι μία ευρέως διαδεδομένη κατεργασία διότι τα παραγόμενα προφίλ έχουν πολλές εφαρμογές. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι προϊόντα που παράγονται με τη μέθοδο αυτή χρησιμοποιούνται στην αεροναυτική, σε ειδικές βιομηχανικές εφαρμογές, σε εμπορικές και στρατιωτικές εφαρμογές, ενώ τα τελευταία χρόνια τα κιγκλιδώματα και κουφώματα των κτιρίων είναι κατασκευασμένα σχεδόν αποκλειστικά από προφίλ αλουμινίου.

Τα προφίλ αλουμινίου μπορεί να είναι σχετικά απλής μορφής, όπως απλές ράβδοι, ή μπορεί να έχουν πολύπλοκη διατομή. Στο σχήμα 5.1.1 έχουμε μια κατηγοριοποίηση των προφίλ με βάση το βαθμό της δυσκολίας που παρουσιάζουν κατά τη διέλαση. Η κατηγορία Α αφορά «εύκολα» προφίλ, ενώ η κατηγορία Ν δυσκολότερα.

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ	ΤΥΠΟΣ	ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ
A	Simple bar	
B	Shaped bar	
C	Standard sections	
D	Simple solid sections	
E	Semi-hollow sections	
F	Sections with abrupt section transitions and thin walls; wide sections	
G	Sections with difficult tongues and very narrow inlets	
H	Tubes	
J	Simple hollow sections	
K	Difficult hollow sections; hollow sections with two or more cavities	
L	Tube sections with external projections	
M	Tube shapes with internal projections or K - L	
N	Large or wide hollow sections	

Σχήμα 5.1.1

Στη διέλαση αλουμινίου χρησιμοποιούνται διάφορα κράματα, ανάλογα με τις μηχανικές απαιτήσεις του παραγόμενου προφίλ. Τα κράματα της σειράς 2000 και 7000 χρησιμοποιούνται στην κατασκευή αεροσκαφών, ενώ κράματα όπως τα 1100,



3003, 6060, 6061, 6062, 6063 και X6463 χρησιμοποιούνται σε πολλές άλλες εφαρμογές, όπως τα κουφώματα, οι κατασκευές και οι μεταφορές.

## 5.2 Στάδια της διέλασης αλουμινίου

Ασφαλώς και για τη διέλαση αλουμινίου ισχύουν όλες οι αρχές και μέθοδοι που έχουν παρουσιαστεί στο κεφάλαιο 1. Η διέλαση αλουμινίου γίνεται συνήθως εν θερμώ, κάτι που απαιτεί επιπρόσθετο εξοπλισμό εκτός από την πρέσα διέλασης. Παρακάτω περιγράφονται αναλυτικά τα στάδια που ακολουθούνται ώστε από την αρχική μπιγιέτα να καταλήξουμε στο τελικό «έτοιμο» προφίλ.

- Προθέρμανση της μπιγιέτας. Η μπιγιέτα εισάγεται σε ειδικό φούρνο και προθερμαίνεται σε θερμοκρασία 450-500°C. Έτσι γίνεται πιο εύπλαστη, όπως έχει αναφερθεί στο κεφάλαιο 1.
- Προετοιμασία της πρέσας διέλασης. Συνήθως χρησιμοποιούνται υδραυλικές πρέσες (1000 - 8000 τόνων) οριζόντιας διάταξης. Το εξωτερικό κέλυφος του θαλάμου (container) στον οποίο συντελείται η κατεργασία θερμαίνεται στους 420 – 430°C με ηλεκτρικές αντιστάσεις.
- Προετοιμασία της μήτρας. Η μήτρα προθερμαίνεται σε ειδικό φούρνο στους 480°C, διότι αν αφεθεί κρύα, τότε υπάρχει τόσο ο κίνδυνος της θραύσης, όσο και η περίπτωση να εμποδιστεί η διέλευση της μπιγιέτας. Συνήθως κατασκευάζεται από εργαλειοχάλυβες AISI H11, H12 ή H13. Η ευθυγράμμιση της μήτρας με το θάλαμο της διέλασης και το έμβολο της πρέσας κατέχει πολύ σημαντικό ρόλο για την εξασφάλιση των προδιαγραφών του τελικού προϊόντος.
- Βαφή του νεοπαραγόμενου προφίλ. Αφού η μπιγιέτα περάσει από τη μήτρα, το παραγόμενο προφίλ ψύχεται, είτε με ρεύμα αέρα (με ανεμιστήρες) είτε με ψεκασμό νερού.
- Τάνυση του προφίλ. Όταν ολόκληρη η μπιγιέτα έχει εξέλθει από τη μήτρα, τότε έχουμε ένα επίμηκες προϊόν, μία βέργα προφίλ, η οποία υπόκειται σε τάνυση και το μήκος της αυξάνεται κατά 1 με 2%. Αυτό συμβάλει στην επίτευξη των κατάλληλων γεωμετρικών και μηχανικών χαρακτηριστικών.
- Κοπή του προφίλ. Οι βέργες κόβονται σε κομμάτια καθορισμένου μήκους.

- Τεχνητή γήρανση. Τα προφίλ εισάγονται σε φούρνο σε θερμοκρασία συνήθως 175°C για 7 με 8 ώρες. Η θερμική αυτή διαδικασία βελτιώνει τα μηχανικά χαρακτηριστικά του προϊόντος.

### 5.3 Προβλήματα της κατεργασίας

Η διέλαση περιορίζεται από δύο παράγοντες: την ικανότητα της πρέσας διέλασης (μέγιστη οδηγούσα δύναμη) και από τη μέγιστη θερμοκρασία που μπορεί να αντέξει το παραμορφούμενο υλικό, χωρίς να υποστεί ανακρυστάλλωση ή τήξη.

Σε ότι αφορά τα θερμοκρασιακά πεδία που αναπτύσσονται κατά τη διέλαση, πρέπει να αναφέρουμε ότι αυτά επηρεάζονται από:

- Την παραγωγή θερμότητας λόγω πλαστικής παραμόρφωσης.
- Την παραγωγή θερμότητας λόγω τριβής μεταξύ του υλικού και του εξοπλισμού.
- Τη μεταφορά θερμότητας μέσα στη μπιγιέτα.
- Τη μεταφορά θερμότητας μεταξύ μπιγιέτας και εξοπλισμού.
- Τη θερμότητα που απάγεται από το τελικό προϊόν.

Όλα τα παραπάνω συμβαίνουν ταυτόχρονα και καταλήγουν σε μία πολύπλοκη σχέση που περιλαμβάνει τη θερμοκρασία και το υλικό της μπιγιέτας, την τριβή, το υλικό του εξοπλισμού και τη θερμοκρασία του, την ταχύτητα διέλασης, τη μείωση της διατομής και το σχήμα του προφίλ. Συνδυασμοί υψηλών θερμοκρασιών μπιγιέτας, μεγάλης μείωσης της διατομής και υψηλών ταχυτήτων διέλασης, οδηγούν σε σημαντική αύξηση της θερμοκρασίας στο προϊόν, κυρίως κοντά στην επιφάνειά του. Αυτό μπορεί να προκαλέσει επιφανειακά ελαττώματα, κυρίως σε δυσκολοκατέργαστα κράματα αλουμινίου, όπως αυτά των σειρών 2000 και 7000.



Πολλοί ερευνητές {A. Singer (1961), R. Akeret (1967), G. Lahoti (1974)} ασχολήθηκαν με την παραγωγή θερμότητας κατά τη διέλαση και τα αναπτυσσόμενα θερμοκρασιακά πεδία. Ο R. Akeret (1967) έκανε θεωρητικές και πειραματικές μελέτες σχετικές με το εν λόγω θέμα και κατέληξε σε χρήσιμα συμπεράσματα, όπως ότι κατά τη διέλαση κραμάτων υψηλής αντοχής η θερμοκρασία δεν αυξάνεται περισσότερο από 100 βαθμούς, ενώ η αντίστοιχη αύξηση για κράματα λιγότερο σκληρά δεν ξεπερνά τους 50 βαθμούς.

Όπως είναι προφανές, υψηλές ταχύτητες διέλασης αυξάνουν την παραγωγικότητα. Όμως η αύξηση της ταχύτητας περιορίζεται από την αύξηση της

θερμοκρασίας που προκαλεί. Πειράματα που έγιναν είτε σε εργαστήρια είτε στη βιομηχανία, έδειξαν ότι στην ιδανική περίπτωση θα έπρεπε να μετράται διαρκώς η θερμοκρασία του προϊόντος κατά την έξοδο από τη μήτρα και ανάλογα να ρυθμίζεται η ταχύτητα του εμβόλου. Από τεχνικής άποψης είναι ιδιαίτερα δύσκολη η ακριβής και διαρκής μέτρηση της θερμοκρασίας. Δοκιμάστηκαν μέθοδοι που χρησιμοποιούν θερμοζεύγη ή πυρόμετρα, χωρίς όμως να έχουν καλά αποτελέσματα από πρακτική σκοπιά.

Ο K. Laue πρότεινε το 1960 ένα σύστημα για ισόθερμη διέλαση, κατά το οποίο η μεταβολή στην ταχύτητα διέλασης ήταν τέτοια ώστε η αναπτυσσόμενη θερμοκρασία να βρίσκεται εντός των επιτρεπτών ορίων. Ένας διαφορετικός τρόπος θα ήταν η προθέρμανση της μπιγιέτας κατά ανομοιόμορφο τρόπο, ώστε το θερμότερο άκρο να κατεργάζεται πρώτο. Στην περίπτωση όμως της διέλασης αλουμινίου κάτι τέτοιο δεν θα μπορούσε να εφαρμοστεί λόγω της υψηλής θερμικής αγωγιμότητας του αλουμινίου, κάτι που θα προκαλεί ομοιόμορφη θερμοκρασιακή κατανομή.

Για τον έλεγχο της ταχύτητας του εμβόλου είναι χρήσιμη η προσομοίωση, έτσι ώστε να προβλέψουμε την αύξηση της θερμοκρασίας κατά τη διέλαση. Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζεται ένα μοντέλο που προβλέπει την αύξηση αυτή και αποδεικνύει τη χρησιμότητα της μεταβολής της ταχύτητας του εμβόλου κατά τη διάρκεια της κατεργασίας.

## Κεφάλαιο 6

### Μοντέλο για διέλαση αλουμινίου

#### 6.1 Γενικά

Στο μοντέλο που παρουσιάζουμε γίνεται η προσπάθεια να συμπεριλάβουμε όσο το δυνατό περισσότερους μηχανισμούς που συμβαίνουν κατά τη διέλαση. Το υλικό του προϊόντος είναι αλουμίνιο 6061, ενώ θεωρούμε ότι η μπιγιέτα και η μήτρα έχουν προθερμανθεί. Οι εξισώσεις που συνδυάζουν τις τάσεις και τις παραμορφώσεις δίνονται σε επόμενη παράγραφο και ουσιαστικά αποτελούν εξισώσεις ερπυσμού. Όπως και για την περίπτωση της άμεσης αξονοσυμμετρικής διέλασης, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS. Έγιναν διαδοχικές προσομοιώσεις για σταθερή και για μεταβλητή (stepwise ram speed decrease) ταχύτητα διέλασης.

#### 6.2 Το κράμα 6061

Γενικά, η σειρά 6000 των κραμάτων αλουμινίου χρησιμοποιούνται για το 75% των εφαρμογών προϊόντων διέλασης. Από τη σειρά αυτή, το κράμα 6061-AlMg1SiCu είναι από εκείνα που χρησιμοποιούνται περισσότερο, καθώς καλύπτει συγκεκριμένες απαιτήσεις σε αντοχή, συγκολλησιμότητα, διαμορφωσιμότητα, αντοχή σε διάβρωση και ευκολία στην κατεργασία. Η σύσταση του κράματος 6061 φαίνεται στον πίνακα 6.2.1 ενώ οι πιθανές καταστάσεις θερμικής κατεργασίας είναι οι T1, T4, T5 και T6.

Στοιχείο	% κ.β.
Si	0,4-0,8
Fe	0,7
Cu	0,15-0,4
Mn	0,15
Mg	0,8-1,2

Πίνακας 6.2.1

Στον πίνακα 6.2.2 παρουσιάζονται οι μηχανικές ιδιότητες του κράματος.

Κατάσταση θερμικής κατεργασίας	Μέγιστη αντοχή εφελκυσμού (Μρα)	Όριο διαρροής (Μρα)	Επιμήκυνση (%)
T1	179	97	16
T4, T4510, T4511	179	110	16
T42	179	83	16
T51	241	207	8
T6	262	241	8
T62, T6510, T6511	262	241	10

Πίνακας 6.2.2

Στον πίνακα 6.2.3 φαίνονται κάποιες ακόμα ιδιότητες του υλικού, που είναι απαραίτητες για το μοντέλο.

Ιδιότητα	Τιμή
Πυκνότητα (kg/m <sup>3</sup> )	2690
Μέτρο Young (N/mm <sup>2</sup> )	69000
Λόγος Poisson	0,293
Συντελεστής θερμικής διαστολής (1/°C)	23,6 x 10 <sup>-6</sup>
Ειδική θερμότητα (N/mm <sup>2</sup> °C)	2,39
Θερμική αγωγιμότητα (W/m°C)	180

Πίνακας 6.2.3

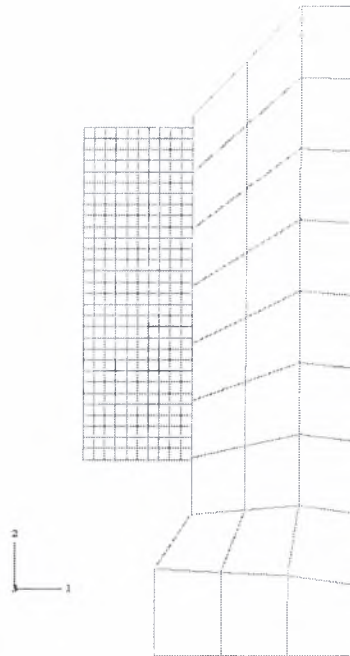
Τέλος, σε ότι αφορά το κράμα πρέπει να αναφέρουμε ότι η μέγιστη θερμοκρασία για την περιοχή solvus του 6061 είναι 529°C (802 K).

### 6.3 Το μοντέλο

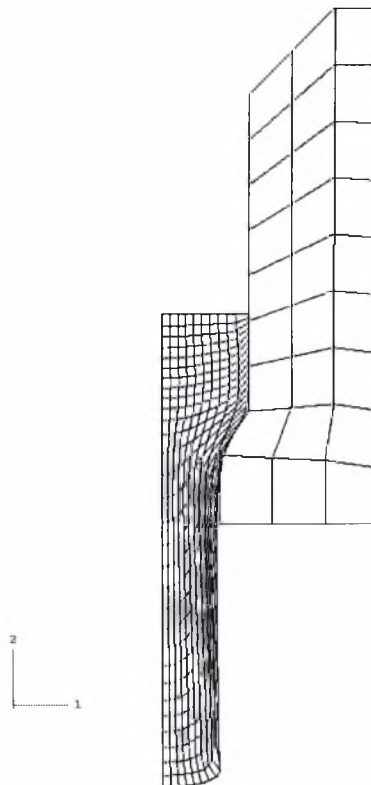
Θεωρούμε ότι η μπιγιέτα έχει αρχική ακτίνα 100 mm και μήκος 300 mm. Η μείωση της διατομής είναι 33% και το προϊόν έχει βέβαια τη μορφή ράβδου. Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφέρουμε ότι μία τυπική μείωση της διατομής που συναντά κανείς στη βιομηχανία είναι περίπου 40%. Αφού έχουμε συμμετρία, μπορούμε να μοντελοποιήσουμε μόνο μία ημιτομή της μπιγιέτας και της μήτρας, κάτι που γίνεται με αξονοσυμμετρικά στοιχεία, με τέσσερις κόμβους και τέσσερα σημεία ολοκλήρωσης. Το σύνολο των στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν είναι 369, ενώ το σύνολο των κόμβων είναι 839. Στο σχήμα 6.3.1 φαίνεται το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων στην απαραμόρφωτη κατάσταση, ενώ στο σχήμα 6.3.2 στην παραμορφωμένη.

Επιπροσθέτως, η μήτρα θεωρούμε ότι έχει προθερμανθεί ομοιόμορφα στους 350 °C (623 K) ενώ η μπιγιέτα στους 430 °C (703 K). Γίνεται η θεώρηση ότι το 90% του πλαστικού έργου μετατρέπεται σε θερμότητα, ενώ η τριβή ακολουθεί το μοντέλο Coulomb με συντελεστή τριβής μεταξύ μήτρας και μπιγιέτας 0,3. Γενικά είναι πολύ

δύσκολο να προσδιοριστεί ο συντελεστής τριβής, ενώ στη βιβλιογραφία βρέθηκαν τιμές που ξεκινούν από 0,1 και υπερβαίνουν το 1.



Σχήμα 6.3.1



Σχήμα 6.3.2

## 6.4 Καταστατικές εξισώσεις

Η εν θερμώ παραμόρφωση των μετάλλων και των κραμάτων χαρακτηρίζεται από τις τάσεις, παραμορφώσεις, ρυθμό παραμόρφωσης και τη θερμοκρασία. Οι εξισώσεις που συνδέουν τις παραπάνω μεταβλητές έχουν ως ακολούθως:

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{\Delta H}{RT}\right) = A(\sinh \alpha \sigma)^n$$

$$\sigma = \frac{1}{\alpha} \ln \left\{ \left(\frac{Z}{A}\right)^{1/n} + \left[\left(\frac{Z}{A}\right)^{2/n} + 1\right]^{1/2} \right\}$$

όπου:

$\alpha$ , A σταθερές ( $\alpha=0,045 \text{ Mpa}^{-1}$ ,  $\ln A=19,3$ )

n εκθέτης ( $n=3,55$ )

$\Delta H$  η ενέργεια ενεργοποίησης (145000 J/mol K)

R η παγκόσμια σταθερά των αερίων (8,34 J/mol K)

Z η παράμετρος Zener-Hollomon και

T η απόλυτη θερμοκρασία

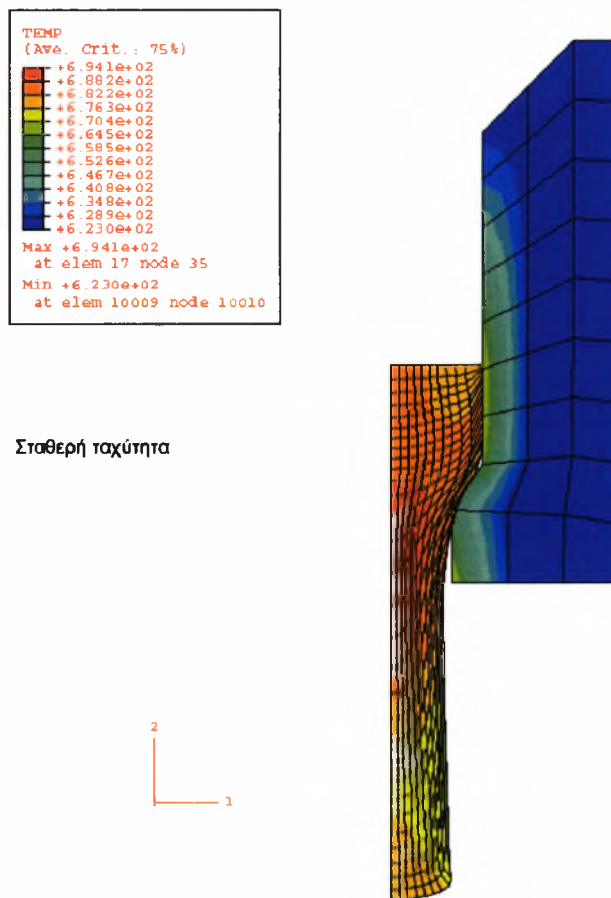
Οι τιμές που δίνονται στις παρενθέσεις είναι για το κράμα 6061. Σκοπός της ισόθερμης διέλασης είναι να διατηρηθεί σταθερή η τιμή του Z. Αυτό πρακτικά είναι πολύ δύσκολο να επιτευχθεί διότι η τάση, η παραμόρφωση και ο ρυθμός παραμόρφωσης μεταβάλλονται σε ένα ευρύ φάσμα, ιδίως στη ζώνη παραμόρφωσης. Η καλύτερη περίπτωση είναι η διατήρηση του Z σε μία σταθερή μέση τιμή, που συνεπάγεται μία σταθερή μέση θερμοκρασία εξόδου.

Οι παραπάνω εξισώσεις εισάγονται στο υπολογιστικό πακέτο ως ένα μοντέλο ερπυσμού (creep) που ακολουθεί νόμο υπερβολικών ημίτονων.

## 6.5 Αποτελέσματα

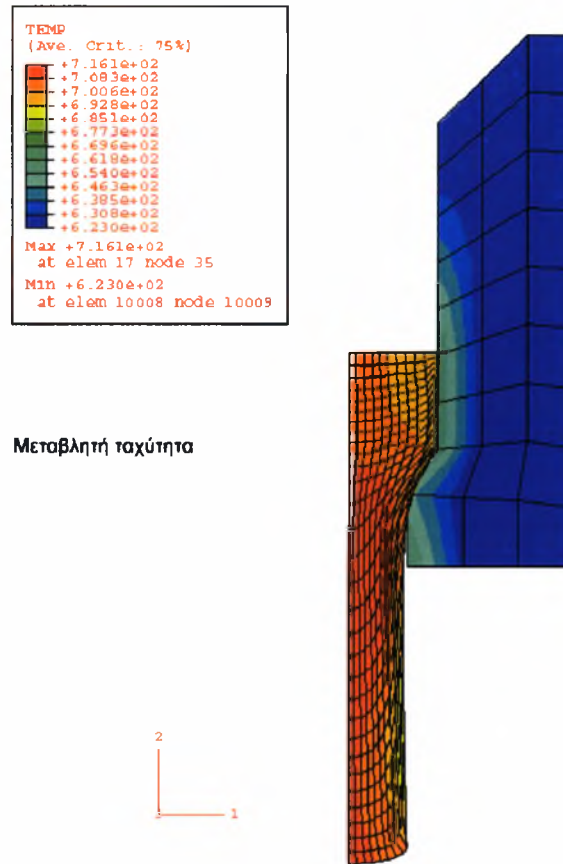
Έγιναν δύο διαφορετικές προσομοιώσεις. Στην πρώτη, η ταχύτητα διέλασης είναι σταθερή και ίση με 5 mm/s. Στη δεύτερη, η ταχύτητα μειώνεται σταδιακά. Η συνολική μετατόπιση του εμβόλου χωρίζεται σε 5 ίσα μέρη για καθένα από τα οποία αντιστοιχεί και μία ταχύτητα. Η αρχική – μέγιστη ταχύτητα είναι 30 mm/s και μειώνεται σε 25, 20, 15, 10 και 5 mm/s.

Στο σχήμα 6.5.1 παρουσιάζονται τα θερμοκρασιακά πεδία για την περίπτωση της σταθερής ταχύτητας, ενώ στο σχήμα 6.5.2 για την περίπτωση της μεταβλητής ταχύτητας.



Σχήμα 6.5.1





**Σχήμα 6.5.2**

Παρατηρούμε ότι στην περίπτωση της σταθερής ταχύτητας η θερμότητα που αναπτύσσεται προλαβαίνει να «απορροφηθεί» από τη μήτρα, αφού η ταχύτητα είναι αρκετά μικρή και κάτι τέτοιο είναι εφικτό. Στην περίπτωση της μεταβλητής ταχύτητας αυτό δε μπορεί να γίνει. Όμως η θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στις δύο περιπτώσεις είναι αρκετά μικρή (περίπου 22 K) και η μέγιστη θερμοκρασία είναι αρκετά κάτω από την οριακή τιμή των 802 K. Ακόμη, η αύξηση της θερμοκρασίας είναι μικρότερη από 50 βαθμούς, δηλαδή έχουμε συμφωνία με τα αποτελέσματα των ερευνών του Akeret, γεγονός που αποτελεί σημαντική ένδειξη για την ορθότητα του μοντέλου μας.

Συμπερασματικά, η διαφορά στις αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες δεν είναι σημαντική. Αντιθέτως, η διαφορά στην ταχύτητα είναι σημαντική: ενώ στην πρώτη περίπτωση έχουμε μία σταθερή ταχύτητα των 5 mm/s, στην περίπτωση της μεταβαλλόμενης ταχύτητας έχουμε μία μέση ταχύτητα ίση με 11,1 mm/s, τιμή που υπερβαίνει το διπλάσιο της σταθερής ταχύτητας. Επίσης, είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι η μέγιστη οδηγούσα δύναμη ήταν σχεδόν ίδια και στις δύο περιπτώσεις. Λαμβάνοντας υπόψη τις δύο τελευταίες παρατηρήσεις, καταλήγουμε

στο συμπέρασμα ότι με τη διέλαση μεταβλητής ταχύτητας έχουμε αύξηση της παραγωγικότητας χρησιμοποιώντας πρέσα ίδιας ικανότητας ως προς τη μέγιστη οδηγούσα δύναμη.

Σε κράματα σκληρότερα από το 6061, τα αποτελέσματα της διέλασης με μεταβλητή ταχύτητα είναι ακόμα πιο έντονα. Στη βιβλιογραφία βρέθηκαν περιπτώσεις όπου η μέση ταχύτητα αυξήθηκε κατά περίπου τρεις φορές, ενώ η οδηγούσα δύναμη παρέμενε ίδια. Σαν αποτέλεσμα, η παραγωγικότητα αυξάνεται δραστικά και το κόστος της διέλασης ως κατεργασίας μειώνεται σημαντικά.

## 6.6 Συμπεράσματα

- Ο έλεγχος της ταχύτητας κατά τη διάρκεια της διέλασης κατέχει εξέχοντα ρόλο στην κατεργασία.
- Η μεταβαλλόμενη ταχύτητα οδηγεί σε αύξηση της παραγωγικότητας, ουσιαστικά με τον ίδιο εξοπλισμό.
- Η αύξηση είναι εντονότερη σε σκληρότερα κράματα.
- Η μείωση της ταχύτητας κατά τη διάρκεια της κατεργασίας μπορεί τελικά να οδηγήσει σε σταθερή μέση θερμοκρασία εξόδου.

## Γενικά συμπεράσματα – Προτάσεις για συνέχεια

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί ένα σύγχρονο και αξιόπιστο εργαλείο στα χέρια του μηχανικού, με το οποίο μπορεί να αποφύγει πολύπλοκες και δαπανηρές πειραματικές διατάξεις. Κάθε μοντέλο μπορεί να γίνει όσο πολύπλοκο ή απλό χρειάζεται, ώστε να ανταποκρίνεται στα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά κάθε κατεργασίας διέλασης.

Η εφαρμογή της μεθόδου στη διέλαση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διαμόρφωση και τον έλεγχο κριτηρίων διαρροής, καθώς υπάρχει συσσωρευμένη εμπειρία στο συγκεκριμένο θέμα, τόσο σε θεωρητικό όσο και σε πρακτικό επίπεδο. Σαν αποτέλεσμα, για κάθε μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων υπάρχουν αρκετά δεδομένα ώστε να γίνει ένας πρώτος έλεγχος σχετικά με την ορθότητα του μοντέλου.

Για περαιτέρω ερευνητική εργασία υπάρχουν ασφαλώς πολλά πεδία που χρειάζονται επιπρόσθετη μελέτη. Μία μελέτη θα μπορούσε να αφορά τη δημιουργία ενός κριτηρίου αστοχίας για υλικά που χρησιμοποιούνται ευρέως στη βιομηχανία διέλασης. Πέρα από αυτά, σε πρακτικό επίπεδο για κάθε νέο προφίλ που παράγεται γίνονται πάρα πολλές χρονοβόρες δοκιμές ώστε να επιτευχθούν οι γεωμετρικές και μηχανικές απαιτήσεις του τελικού προϊόντος. Η ανάπτυξη ενός μοντέλου που θα προβλέπει τη γεωμετρία του παραγόμενου προφίλ, οπωσδήποτε αποτελεί πρόκληση για κάθε ερευνητή, ιδίως για σύνθετες διατομές προφίλ. Τέλος, η βελτιστοποίηση των σχετικών αλγόριθμων ώστε να μειωθεί ο υπολογιστικός χρόνος της προσομοίωσης, αποτελεί μία ακόμη πρόταση για συνέχεια.

## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1**

### **ΚΩΔΙΚΑΣ ABAQUS ΓΙΑ ΣΥΜΠΑΓΕΣ ΜΟΝΤΕΛΟ**

```
*HEADING
EXTRUSION
*RESTART,WRITE,FREQ=10
**
**
*NODE
1, 0., -6.05
11, 1., -6.05
1321, 0., -0.05
1331, 1., -0.05
10000, 0., 0.
*NGEN,NSET=LEFT
1, 11
*NGEN,NSET=RIGHT
1321,1331
*NFILL
LEFT, RIGHT, 120, 11
*NSET,NSET=SYMM,GENERATE
1, 1321,11
*NSET,NSET=TOP,GENERATE
11,1331,11
**
*NODE,NSET=PISTON
20000, 0., 0.
**
**
**
*ELEMENT,TYPE=CAX4H,ELSET=ALL
1, 1,2,13,12
*ELGEN,ELSET=ALLE
1, 120, 11,10,10, 1, 1
**
**
*MATERIAL,NAME=METAL
*ELASTIC
500., 0.3
*PLASTIC
1., 0.
1.6375,0.134
1.765,0.246
1.9,0.37
1.983,0.49
2.11,0.745
2.24,0.99
2.325,1.19
2.457,1.5
2.58,1.99
2.63,2.07
*SOLID SECTION,ELSET=ALLE,MATERIAL=METAL
**
**
*ELEMENT,TYPE=IRS21A
5000, 11, 22, 10000
*ELGEN,ELSET=RIG
5000, 120, 11, 10
**
**
*INTERFACE,ELSET=RIG
*RIGID SURFACE,TYPE=SEGMENTS,ELSET=RIG,FILLET RADIUS=0.05
```

```

START, 1., -6.5
LINE, 1., 0.
LINE, 0.866,1.532
LINE, 1., 3.064
LINE, 1.,11.064
LINE, 0.749,13.92
LINE, 1.,16.78
LINE, 1.,27.44
LINE, 0.6495,31.44
LINE, 1.,35.44
LINE, 1.,49.65
LINE, 0.5624,54.65
LINE, 1.,59.65
**
**
*BOUNDARY
  SYMM, 1, 1
  10000, 1, 6
  20000, 1, 1
  20000, 3, 6
**
**
*EQUATION
  2
  LEFT, 2, 1., 20000, 2, -1.
**
**
**
*STEP,INC=10000,NLGEOM
*STATIC
  0.01, 5.05 , , 0.1
*CONTROLS,PARAMETERS=FIELD,FIELD=DISPLACEMENT
  5.D-3
*BOUNDARY
  PISTON, 2, 2, 5.05
**
**
**
*OUTPUT,FIELD,FREQUENCY=1,VARIABLE=PRESELECT
*ELEMENT OUTPUT
  S, VVF
*NODE OUTPUT
  U
**
*OUTPUT,HISTORY,FREQUENCY=1
*NODE OUTPUT,NSET=PISTON
  RF2, U2
**
*NODE FILE,FREQUENCY=1,NSET=PISTON
  RF
**
*ENDSTEP

```

## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2**

### **ΚΩΔΙΚΑΣ ABAQUS ΓΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟ GURSON**

```

*HEADING
EXTRUSION
*RESTART,WRITE,FREQ=10
**
**
*NODE
1, 0., -6.05
11, 1., -6.05
1321, 0., -0.05
1331, 1., -0.05
10000, 0., 0.
*NGEN,NSET=LEFT
1, 11
*NGEN,NSET=RIGHT
1321,1331
*NFILL
LEFT, RIGHT, 120, 11
*NSET,NSET=SYMM,GENERATE
1, 1321,11
*NSET,NSET=TOP,GENERATE
11,1331,11
**
*NODE,NSET=PISTON
20000, 0., 0.
**
**
**
*ELEMENT,TYPE=CAX4H,ELSET=ALL
1, 1,2,13,12
*ELGEN,ELSET=ALLE
1, 120, 11,10,10, 1, 1
**
**
*MATERIAL,NAME=METAL
*ELASTIC
500., 0.3
*PLASTIC
1., 0.
1.6375,0.134
1.765,0.246
1.9,0.37
1.983,0.49
2.11,0.745
2.24,0.99
2.325,1.19
2.457,1.5
2.58,1.99
2.63,2.07
*POROUS METAL PLASTICITY,RELATIVE DENSITY=0.96
1., 1., 1.
*SOLID SECTION,ELSET=ALLE,MATERIAL=METAL
**
**
*ELEMENT,TYPE=IRS21A
5000, 11, 22, 10000
*ELGEN,ELSET=RIG
5000, 120, 11, 10
**
**
*INTERFACE,ELSET=RIG

```



```

*RIGID SURFACE,TYPE=SEGMENTS,ELSET=RIG,FILLET RADIUS=0.05
  START, 1., -6.5
  LINE, 1., 0.
  LINE, 0.866,1.532
  LINE, 1. ,3.064
  LINE, 1.,11.064
  LINE, 0.749,13.92
  LINE, 1.,16.78
  LINE, 1.,27.44
  LINE, 0.6495,31.44
  LINE, 1.,35.44
  LINE, 1.,49.65
  LINE, 0.5624,54.65
  LINE, 1.,59.65
**
**
*BOUNDARY
  SYMM, 1, 1
  10000, 1, 6
  20000, 1, 1
  20000, 3, 6
**
**
*EQUATION
  2
  LEFT, 2, 1., 20000, 2, -1.
**
**
**
*STEP,INC=10000,NLGEOM
*STATIC
  0.01, 5.05 , , 0.01
*CONTROLS,PARAMETERS=FIELD,FIELD=DISPLACEMENT
  5.D-3
*BOUNDARY
  PISTON, 2, 2, 5.05
**
**
**
*OUTPUT,FIELD,FREQUENCY=1,VARIABLE=PRESELECT
*ELEMENT OUTPUT
  S, VVF
*NODE OUTPUT
  U
**
*OUTPUT,HISTORY,FREQUENCY=10
*NODE OUTPUT,NSET=PISTON
  RF2, U2
**
*NODE FILE,FREQUENCY=1,NSET=PISTON
  RF
**
*ENDSTEP

```

### **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3**

#### **ΚΩΔΙΚΑΣ ABAQUS ΓΙΑ ΑΝΙΣΟΤΡΟΠΟ ΜΟΝΤΕΛΟ**

```
*HEADING
EXTRUSION
*RESTART,WRITE,FREQUENCY=10
**
**
*NODE
1, 0., -6.05
11, 1., -6.05
1321, 0., -0.05
1331, 1., -0.05
10000,0.,0.
*NGEN,NSET=LEFT
1, 11
*NGEN,NSET=RIGHT
1321,1331
*NFILL
LEFT, RIGHT, 120, 11
*NSET, NSET=SYMM, GENERATE
1, 1321,11
*NSET, NSET=TOP,GENERATE
11,1331,11
**
*NODE,NSET=PISTON
20000, 0., 0.
**
**
**
*ELEMENT,TYPE=CAX4,ELSET=ALL
1, 1,2,13,12
*ELGEN,ELSET=ALLE
1, 120, 11, 10, 10, 1, 1
**
**
*MATERIAL,NAME=METAL
*USER MATERIAL,CONSTANTS=7
500, 0.3, 1., 10., 0., 0.4, 0.1
*DEPVAR
6
*INITIAL CONDITIONS,TYPE=SOLUTION
ALLE, 0., 0.04, 1., 1., 0., 0.
*SOLID SECTION,ELSET=ALLE,MATERIAL=METAL
**
**
*ELEMENT,TYPE=IRS21A
5000, 11, 22, 10000
*ELGEN,ELSET=RIG
5000, 120, 11, 10
**
**
*INTERFACE,ELSET=RIG
*RIGID SURFACE,TYPE=SEGMENTS,ELSET=RIG,FILLET RADIUS=0.05
START, 1., -6.5
LINE, 1., 0.
LINE, 0.866,1.532
LINE, 1., 3.064
LINE, 1.,11.064
LINE, 0.749,13.92
LINE, 1.,16.78
LINE, 1.,27.44
LINE, 0.6495,31.44
```

```
LINE, 1.,35.44
LINE, 1.,49.65
LINE, 0.5624,54.65
LINE, 1.,59.65
**
**
*BOUNDARY
  SYMM, 1, 1
  10000, 1, 6
  20000, 1, 1
  20000, 3, 6
**
**
*EQUATION
  2
  LEFT, 2, 1., 20000, 2, -1.
**
**
**
*STEP,INC=10000,NLGEOM,EXTRAPOLATION=NO
*STATIC
  0.01, 20.05 , , 0.01
*BOUNDARY
  PISTON, 2, 2, 20.05
*CONTROLS,PARAMETERS=FIELD,FIELD=DISPLACEMENT
  5.D-3
**
**
**
*OUTPUT,FIELD,FREQUENCY=10
*ELEMENT OUTPUT
  S, SDV
*NODE OUTPUT
  U
**
*OUTPUT,HISTORY,FREQUENCY=10
*NODE OUTPUT,NSET=PISTON
  RF2, U2
**
*NODE FILE,FREQUENCY=10,NSET=PISTON
  COORD,U, RF
**
*ENDSTEP
```

## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 4**

ΥΠΟΡΟΥΤΙΝΑ FORTRAN ΜΕΤΑΤΡΟΠΗΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΑΠΟ BINARY  
ΣΕ TEXT ΜΟΡΦΗ

```

SUBROUTINE HKSMAIN

C  READS INFORMATION FROM FILE.fil (*NODE FILE) AND PROVIDES HISTORY DATA
C  FOR THE REACTION FORCE (STRESS) AT PISTON
  INCLUDE 'aba_param.inc'
  CHARACTER*80 FNAME
  DIMENSION ARRAY(2000) ,JRRAY(NPRECD,2000) ,LRUNIT(2,1) ,XY(20000,2)
  EQUIVALENCE (ARRAY(1) ,JRRAY(1,1))
C
  FNAME='ONOMA ARXEIOU EISODOY'
  NRU=1
  LRUNIT(1,1)=8
  LRUNIT(2,1)=2
  LOUTF=0
  CALL INITPF(FNAME,NRU,LRUNIT,LOUTF)
  JUNIT=8
  CALL DBRNU(JUNIT)
C
  IOUT=321
  OPEN(UNIT=IOUT, FILE='ONOMA ARXEIOU EKSODOU')
C
  PI=4.D0*DATAN(1.D0)
  R0=1.D0
  TOL=1.D-4
C
  KK=1
  XY(1,1)=0.D0
  XY(1,2)=0.D0
C
  DO 100 K1=1,99999
C
  CALL DBFILE(0 ,ARRAY ,JRCD)
  IF (JRCD.NE.0) GOTO 110
C
  KEY=JRRAY(1,2)
C
  IF (KEY.EQ.2000) THEN
    KK=KK+1
    XY(KK,1)=ARRAY(3)
  ENDIF
C
  IF (KEY.EQ.104) THEN
    NODE=JRRAY(1,3)
    IF (NODE.EQ.20000) THEN
      XY(KK,2)=ARRAY(5)/(PI*R0**2)
      IF (KK.NE.1) THEN
        IF (DABS(XY(KK-1,2)).GT.TOL.AND.DABS(XY(KK,2)).LT.TOL)
          R0=R0*DSQRT(0.75D0)
      ENDIF
    ENDIF
  ENDIF
C
  100 CONTINUE
C
  110 CONTINUE
C
  WRITE(IOUT,120) ((XY(I,J) ,J=1,2) ,I=1,KK)
  120 FORMAT(2(1PG12.3))
  STOP
  END

```

## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 5**

**ΚΩΔΙΚΑΣ ABAQUS ΓΙΑ ΔΙΕΛΑΣΗ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΜΕ ΣΤΑΘΕΡΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ**

```

*HEADING
Extrusion
*RESTART,WRITE,FREQUENCY=200
*NODE
1,0.,0.
61,0.,.3
2001,.,1,0.
2061,.,1,.3
*NODE, NSET=PISTON
99999, 0.05 , 0.35
*NGEN,NSET=AXIS
1,61,1
*NGEN,NSET=OUTSIDE
2001,2061,1
*NFILL,NSET=ALL
AXIS,OUTSIDE,20,100
*ELEMENT,TYPE=CAX4HT,ELSET=WORK
1,1,201,203,3
*ELGEN,ELSET=WORK
1,30,2,1,10,200,100
*ELSET,ELSET=BOT,GENERATE
1,901,100
*ELSET,ELSET=SIDE,GENERATE
901,930,1
*ELSET,ELSET=TOP,GENERATE
30,930,100
**
*** Node & element definitions for die
**
*NODE, NSET=CONTACT
10001, 0.250000000, -0.180000000
10002, 0.250000000, -0.114444000
10003, 0.250000000, -0.048888900
10004, 0.250000000, 0.016666700
10005, 0.250000000, 0.082222200
10006, 0.250000000, 0.147778000
10007, 0.250000000, 0.213333000
10008, 0.250000000, 0.278889000
10009, 0.250000000, 0.344444000
10010, 0.250000000, 0.410000000
10011, 0.188867000, -0.180000000
10012, 0.189030000, -0.106122000
10013, 0.199098000, -0.041751700
10014, 0.199227000, 0.022784300
10015, 0.199356000, 0.087320200
10016, 0.199484000, 0.151856000
10017, 0.199613000, 0.216392000
10018, 0.199742000, 0.280928000
10019, 0.199871000, 0.345464000
10020, 0.200000000, 0.410000000
10021, 0.127733000, -0.180000000
10022, 0.127815000, -0.103061000
10023, 0.149548000, -0.045875800
10024, 0.149613000, 0.012106400
10025, 0.149677000, 0.070088700
10026, 0.149742000, 0.128071000
10027, 0.149806000, 0.186053000
10028, 0.149871000, 0.244035000
10029, 0.149935000, 0.302018000
10030, 0.149999000, 0.360000000
    
```



```

10031, 0.066600000, -0.180000000
10032, 0.066600000, -0.100000000
10033, 0.099999000, -0.050000000
10034, 0.099999000, 0.001428570
10035, 0.099999000, 0.052857100
10036, 0.099999000, 0.104286000
10037, 0.099999000, 0.155714000
10038, 0.099999000, 0.207143000
10039, 0.099999000, 0.258571000
10040, 0.099999000, 0.310000000
*ELEMENT, TYPE=CAX4T, ELSET=CONTACT
10001, 10001, 10002, 10012, 10011
10002, 10002, 10003, 10013, 10012
10003, 10003, 10004, 10014, 10013
10004, 10004, 10005, 10015, 10014
10005, 10005, 10006, 10016, 10015
10006, 10006, 10007, 10017, 10016
10007, 10007, 10008, 10018, 10017
10008, 10008, 10009, 10019, 10018
10009, 10009, 10010, 10020, 10019
10010, 10011, 10012, 10022, 10021
10011, 10012, 10013, 10023, 10022
10012, 10013, 10014, 10024, 10023
10013, 10014, 10015, 10025, 10024
10014, 10015, 10016, 10026, 10025
10015, 10016, 10017, 10027, 10026
10016, 10017, 10018, 10028, 10027
10017, 10018, 10019, 10029, 10028
10018, 10019, 10020, 10030, 10029
10019, 10021, 10022, 10032, 10031
10020, 10022, 10023, 10033, 10032
10021, 10023, 10024, 10034, 10033
10022, 10024, 10025, 10035, 10034
10023, 10025, 10026, 10036, 10035
10024, 10026, 10027, 10037, 10036
10025, 10027, 10028, 10038, 10037
10026, 10028, 10029, 10039, 10038
10027, 10029, 10030, 10040, 10039
*SOLID SECTION, ELSET=CONTACT, MATERIAL=RIG
*MATERIAL, NAME=RIG
*ELASTIC
21.0E10,0.3
*SPECIFIC HEAT
460.,
*DENSITY
7760.,
*CONDUCTIVITY
24.3,
*EXPANSION,ZERO=293.0
23.6E-5,
*SOLID SECTION,ELSET=WORK,MATERIAL=METAL
*MATERIAL,NAME=METAL
*ELASTIC
6.9E10,.33
*PLASTIC
1.E10, 0.0, 293.
1.E10, 2.0, 293.
1.E10, 0.0, 323.
1.E10, 2.0, 323.
1.E10, 0.0, 373.

```

```
1.E10, 2.0, 373.
1.E10, 0.0, 423.
1.E10, 2.0, 423.
*SPECIFIC HEAT
896.,
*DENSITY
2700.,
*CONDUCTIVITY
180.,
*EXPANSION,ZERO=293.0
23.6E-5,
*INELASTIC HEAT FRACTION
.9,
*CREEP,LAW=HYPERBOLIC
2.41E8, 4.5E-8, 3.55, 145000.0, 8.314
*PHYSICAL CONSTANTS, ABSOLUTE ZERO=0.0
**
*NSET,NSET=TOP,GENERATE
61,2061,100
*NSET,NSET=ALL
1,2061,1
*INITIAL CONDITIONS,TYPE=TEMPERATURE
ALL,703.
CONTACT,623.
**
*** surface definitions ***
**
*ELSET, ELSET=INDIE, GEN
10019,10027,1
*ELSET, ELSET=BOTDIE, GEN
10001,10019,9
*SURFACE, NAME=RIGID, TYPE=ELEMENT
INDIE, S3
BOTDIE,S4
*SURFACE, NAME=DEF1, TYPE=ELEMENT
SIDE, S2
*SURFACE, NAME=DEF2, TYPE=ELEMENT
BOT, S1
**
*** Interaction definitions
**
*SURFACE INTERACTION, NAME=INTER1
*FRICTION,TAUMAX=23.1E6
0.3,
*GAP HEAT GENERATION
0.95,
*GAP CONDUCTANCE,USER
*SURFACE INTERACTION, NAME=INTER2
*FRICTION,TAUMAX=23.1E6
0.3,
*GAP HEAT GENERATION
0.95,
**
*** Contact pair definitions
**
*CONTACT PAIR, INTERACTION=INTER1, SMOOTH=0.48
DEF1, RIGID
*CONTACT PAIR, INTERACTION=INTER2, SMOOTH=0.48
DEF2, RIGID
**
```

```
*** elset for output purposes
**
*ELSET,ELSET=EFILEOUT
BOT,SIDE, TOP
**
**
*BOUNDARY
10001,1,2
10011,2,2
10021,2,2
10031,2,2
10002,1,1
10003,1,1
10004,1,1
10005,1,1
10006,1,1
10007,1,1
10008,1,1
10009,1,1
10010,1,1
**
*EQUATION
2
TOP, 2, 1., 99999, 2, -1.
**
*** step
**
*STEP,INC=80000,AMPLITUDE=RAMP,NLGEOM, UNSYMM=YES
EXTRUSION
*COUPLED TEMPERATURE-DISPLACEMENT,DELTMX=100.
1,98,0.00001,1
*BOUNDARY
AXIS,1,1,0.0
*BOUNDARY,TYPE=VELOCITY,AMP=VELSTEP
99999,2,2,-0.005
*AMPLITUDE,DEFINITION=SMOOTH STEP, NAME=VELSTEP
0.0,1,98,1
*OUTPUT, FIELD,FREQUENCY=100,VARIABLES=ALL
*OUTPUT, HISTORY,OP=NEW,FREQUENCY=200
*NODE OUTPUT,NSET=PISTON
U,RF
*END STEP
```

## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 6**

### **ΚΩΔΙΚΑΣ ABAQUS ΓΙΑ ΔΙΕΛΑΣΗ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΜΕ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ**

```

*HEADING
Extrusion
*RESTART,WRITE,FREQUENCY=200
*NODE
1,0.,0.
61,0.,.3
2001,.1,0.
2061,.1,.3
*NODE,NSET=PISTON
99999, 0.05 , 0.35
*NGEN,NSET=AXIS
1,61,1
*NGEN,NSET=OUTSIDE
2001,2061,1
*NFILL,NSET=ALL
AXIS,OUTSIDE,20,100
*ELEMENT,TYPE=CAX4HT,ELSET=WORK
1,1,201,203,3
*ELGEN,ELSET=WORK
1,30,2,1,10,200,100
*ELSET,ELSET=BOT,GENERATE
1,901,100
*ELSET,ELSET=SIDE,GENERATE
901,930,1
*ELSET,ELSET=TOP,GENERATE
30,930,100
**
*** Node & element definitions for die
**
*NODE,NSET=CONTACT
10001, 0.250000000, -0.180000000
10002, 0.250000000, -0.114444000
10003, 0.250000000, -0.048888900
10004, 0.250000000, 0.016666700
10005, 0.250000000, 0.082222200
10006, 0.250000000, 0.147778000
10007, 0.250000000, 0.213333000
10008, 0.250000000, 0.278889000
10009, 0.250000000, 0.344444000
10010, 0.250000000, 0.410000000
10011, 0.188867000, -0.180000000
10012, 0.189030000, -0.106122000
10013, 0.199098000, -0.041751700
10014, 0.199227000, 0.022784300
10015, 0.199356000, 0.087320200
10016, 0.199484000, 0.151856000
10017, 0.199613000, 0.216392000
10018, 0.199742000, 0.280928000
10019, 0.199871000, 0.345464000
10020, 0.200000000, 0.410000000
10021, 0.127733000, -0.180000000
10022, 0.127815000, -0.103061000
10023, 0.149548000, -0.045875800
10024, 0.149613000, 0.012106400
10025, 0.149677000, 0.070088700
10026, 0.149742000, 0.128071000
10027, 0.149806000, 0.186053000
10028, 0.149871000, 0.244035000
10029, 0.149935000, 0.302018000

```

```

10030, 0.149999000, 0.360000000
10031, 0.066600000, -0.180000000
10032, 0.066600000, -0.100000000
10033, 0.099999000, -0.050000000
10034, 0.099999000, 0.001428570
10035, 0.099999000, 0.052857100
10036, 0.099999000, 0.104286000
10037, 0.099999000, 0.155714000
10038, 0.099999000, 0.207143000
10039, 0.099999000, 0.258571000
10040, 0.099999000, 0.310000000
*ELEMENT, TYPE=CAX4T, ELSET=CONTACT
10001, 10001, 10002, 10012, 10011
10002, 10002, 10003, 10013, 10012
10003, 10003, 10004, 10014, 10013
10004, 10004, 10005, 10015, 10014
10005, 10005, 10006, 10016, 10015
10006, 10006, 10007, 10017, 10016
10007, 10007, 10008, 10018, 10017
10008, 10008, 10009, 10019, 10018
10009, 10009, 10010, 10020, 10019
10010, 10011, 10012, 10022, 10021
10011, 10012, 10013, 10023, 10022
10012, 10013, 10014, 10024, 10023
10013, 10014, 10015, 10025, 10024
10014, 10015, 10016, 10026, 10025
10015, 10016, 10017, 10027, 10026
10016, 10017, 10018, 10028, 10027
10017, 10018, 10019, 10029, 10028
10018, 10019, 10020, 10030, 10029
10019, 10021, 10022, 10032, 10031
10020, 10022, 10023, 10033, 10032
10021, 10023, 10024, 10034, 10033
10022, 10024, 10025, 10035, 10034
10023, 10025, 10026, 10036, 10035
10024, 10026, 10027, 10037, 10036
10025, 10027, 10028, 10038, 10037
10026, 10028, 10029, 10039, 10038
10027, 10029, 10030, 10040, 10039
*SOLID SECTION, ELSET=CONTACT, MATERIAL=RIG
*MATERIAL, NAME=RIG
*ELASTIC
21.0E10,0.3
*SPECIFIC HEAT
460.,
*DENSITY
7760.,
*CONDUCTIVITY
24.3,
*EXPANSION,ZERO=293.0
23.6E-5,
*SOLID SECTION,ELSET=WORK,MATERIAL=METAL
*MATERIAL,NAME=METAL
*ELASTIC
6.9E10,.33
*PLASTIC
1.E10, 0.0, 293.
1.E10, 2.0, 293.
1.E10, 0.0, 323.
1.E10, 2.0, 323.

```

```
1.E10, 0.0, 373.
1.E10, 2.0, 373.
1.E10, 0.0, 423.
1.E10, 2.0, 423.
*SPECIFIC HEAT
896.,
*DENSITY
2700.,
*CONDUCTIVITY
180.,
*EXPANSION,ZERO=293.0
23.6E-5,
*INELASTIC HEAT FRACTION
.9,
*CREEP,LAW=HYPERBOLIC
2.41E8, 4.5E-8, 3.55, 145000.0, 8.314
*PHYSICAL CONSTANTS, ABSOLUTE ZERO=0.0
**
*NSET,NSET=TOP,GENERATE
61,2061,100
*NSET,NSET=ALL
1,2061,1
*INITIAL CONDITIONS,TYPE=TEMPERATURE
ALL,703.
CONTACT,623.
**
*** surface definitions ***
**
*ELSET, ELSET=INDIE, GEN
10019,10027,1
*ELSET, ELSET=BOTDIE, GEN
10001,10019,9
*SURFACE, NAME=RIGID, TYPE=ELEMENT
INDIE, S3
BOTDIE,S4
*SURFACE, NAME=DEF1, TYPE=ELEMENT
SIDE, S2
*SURFACE, NAME=DEF2, TYPE=ELEMENT
BOT, S1
**
*** Interaction definitions
**
*SURFACE INTERACTION, NAME=INTER1
*FRICTION,TAUMAX=23.1E6
0.3,
*GAP HEAT GENERATION
0.95,
*GAP CONDUCTANCE,USER
*SURFACE INTERACTION, NAME=INTER2
*FRICTION,TAUMAX=23.1E6
0.3,
*GAP HEAT GENERATION
0.95,
**
*** Contact pair definitions
**
*CONTACT PAIR, INTERACTION=INTER1, SMOOTH=0.48
DEF1, RIGID
*CONTACT PAIR, INTERACTION=INTER2, SMOOTH=0.48
DEF2, RIGID
```

```
**
*** elset for output purposes
**
*ELSET,ELSET=EFILEOUT
BOT,SIDE,TOP
**
**
*BOUNDARY
10001,1,2
10011,2,2
10021,2,2
10031,2,2
10002,1,1
10003,1,1
10004,1,1
10005,1,1
10006,1,1
10007,1,1
10008,1,1
10009,1,1
10010,1,1
**
*EQUATION
2
TOP, 2, 1., 99999, 2, -1.
**
*** step
**
*STEP,INC=80000,AMPLITUDE=RAMP,NLGEOM, UNSYMM=YES
EXTRUSION
*COUPLED TEMPERATURE-DISPLACEMENT,DELTMX=10.
0.01,44.101,0.00001,0.01
*BOUNDARY
AXIS,1,1,0.0
*BOUNDARY,TYPE=VELOCITY,AMP=VELSTEP
99999,2,2,-0.01
*AMPLITUDE,DEFINITION=SMOOTH STEP, NAME=VELSTEP
0.0,3,3.2667,2,8.167,1.5,14.701,1,24.501,0.5,44.101,0.5
*OUTPUT, FIELD,FREQUENCY=200,VARIABLES=ALL
*OUTPUT, HISTORY,OP=NEW,FREQUENCY=200
*NODE OUTPUT,NSET=PISTON
U,RF
*END STEP
```



## **BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

### Ξενόγλωσση

- Laue K. & Stenger H. (1981). *Extrusion*, American Society For Metals, Ohio
- Avitzur A. (1980). *Metal Forming*, Marcel Dekker Inc, New York
- Altan T., Oh S. & Gegel H. (1994). *Metal Forming*, American Society For Metals, Ohio
- Aravas N. (1986). *The analysis of void growth that leads to central bursts during extrusion*, J. Mech. Phys. Solids, Illinois, p. 55-79
- Govindarajan R.M & Aravas N. (1991). *Asymptotic analysis of extrusion of porous metals*, J. Mech. Phys. Solids, Philadelphia, p. 505-527
- Zimmerman Z., Darlington H. & Kottcamp E.H. (1970). *Proceedings of a Symposium on the relation between theory and practice of metal forming*, Ohio, p. 47-62
- Zimmerman Z. & Avitzur B. (1970). *Analysis of the effect of strain hardening on central bursting defects in drawing and extrusion*, J. of Engineering for Industry, USA, p. 135-145
- Pepe J. (1976). *Central burst formation during hydrostatic extrusion*, Metals engineering quarterly, USA, p. 46-58
- Tanaka H. (1952). *On the causes of cuppy defects in a drawn material*, The Journal of Japan Institute of Metals, Japan, p. 567-571
- Remmers W.E. (1930). *Causes of cuppy wire*, Trans. AIME 89, USA, p. 107-120
- Aravas N. & Castañeda P. *Numerical methods for porous metals with deformation-induced anisotropy*
- Chanda T., Zhou J. & Duszczuk J. (2001). *A comparative study on iso-speed extrusion and isothermal extrusion of 6061 Al alloy using 3D FEM simulation*, J. of Materials Processing Technology, USA, p. 145-153
- Lof J. (2001). *Elasto-viscoplastic FEM simulations of the aluminium flow in the bearing area for extrusion of thin-walled sections*, J. of Materials Processing Technology, USA, p. 174-183
- Lee E.H., Mallett R.L. & Yang W.H. (1976). *Stress and deformation analysis of the metal extrusion process*, Computer methods in applied mechanics and engineering, USA, p. 339-353

Ελληνόγλωσση

- Μαρχαβίλας Π. (2000). *Μετάδοση θερμότητας κατά τη διέλαση αλουμινίου*, Δελτίο Π.Σ.Δ.Μ.-Η., Αθήνα, σ. 68-79
- Λιάνης Γ. *Ανελαστική συμπεριφορά φορέων και υλικών*, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη
- Χασιώτης Ν. (1999). *Πανεπιστημιακές παραδόσεις του μαθήματος Κατεργασίες και Μηχανές Διαμορφώσεων*, Π.Θ. Βόλος
- Χαϊδεμενόπουλος Γ. (1998). *Πανεπιστημιακές παραδόσεις του μαθήματος Εισαγωγή στην Τεχνολογία Υλικών*, Π.Θ. Βόλος
- Χαϊδεμενόπουλος Γ. (2000). *Φυσική Μεταλλουργία*, Π.Θ. Βόλος
- Μάμαλης Α. (1989). *Κατεργασίες των υλικών*, Ε.Μ.Π., Αθήνα