

## ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΗΜΙΣΤΕΡΕΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΡΕΟΛΟΓΙΑ

**Α.Ν. Αλεξάνδρου**

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Παραγωγής, Πανεπιστήμιο Κύπρου, ΤΘ 20537,  
1678 Λευκωσία, Κύπρος

**Γ. Γεωργίου**

Τμήμα Μαθηματικών και Στατιστικής, Πανεπιστήμιο Κύπρου, ΤΘ 20537, 1678 Λευκωσία, Κύπρος

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι διεργασίες ημιστερεών υλικών (semisolid processing), δηλαδή μετάλλων που βρίσκονται σε μια ενδιάμεση κατάσταση μεταξύ στερεάς και υγρής φάσης, παρουσιάζουν αρκετό ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια. Η γνώση της ρεολογίας των υλικών αυτών είναι απαραίτητη για την επιτυχή παραγωγή προϊόντων, δεδομένου ότι αυτά συμπεριφέρονται με διαφορετικό τρόπο απ' ό,τι τα τήγματα μετάλλων. Ο πειραματισμός για τον προσδιορισμό των υλικών παραμέτρων είναι ιδιαίτερα δύσκολος, αν όχι αδύνατος, λόγω της διαφασικής φύσης των ημιστερεών υλικών και των υψηλών θερμοκρασιών διεργασίας. Στην εργασία αυτή δείχνουμε ότι μέσω προσομοιώσεων με πεπερασμένα στοιχεία του κλασικού πειράματος θλίψης (compression) είναι δυνατός ο προσδιορισμός των ρεολογικών παραμέτρων των ημιστερεών υλικών.

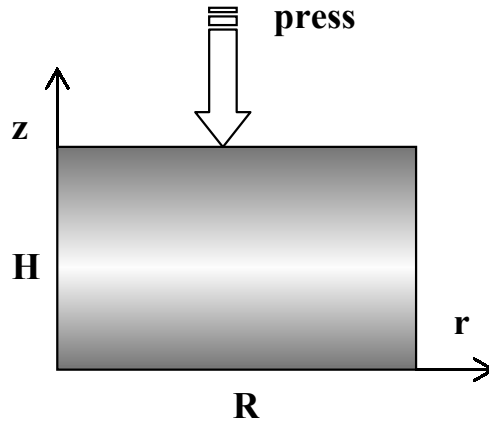
### ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η Υπολογιστική Ρεολογία αναφέρεται στην ταυτόχρονη χρήση υπολογιστικής μηχανικής και ρεομετρικών πειραμάτων με στόχο τον προσδιορισμό των ρεολογικών σταθερών ενός ρευστού. Η προσέγγιση αυτή είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική σε πολύπλοκα από ρεολογικής απόψεως ρευστά και σε περιπτώσεις όπου τα κλασικά πειράματα είναι δύσκολο να πραγματοποιηθούν, λόγω φυσικών περιορισμών. Μια τέτοια περίπτωση είναι αυτή των ημιστερεών υλικών, δεδομένου ότι η πολύπλοκη τους συμπεριφορά σε υψηλές θερμοκρασίες περιορίζει σημαντικά τη χρήση των κλασικών ιξωδομετρικών τεχνικών.

Η προσέγγιση που προτείνουμε σ' αυτή την εργασία θα αναπτυχθεί με βάση το τυπικό πείραμα θλίψης (compression) που φαίνεται στο Σχήμα 1. Ένα κυλινδρικό δείγμα συμπιέζεται είτε με σταθερή ταχύτητα είτε με σταθερή δύναμη. Στην πράξη, οι μετρήσιμες ποσότητες είναι η ταχύτητα ή η δύναμη. Από αυτές μπορούν να υπολογιστούν οι υλικές σταθερές βάσει απλοποιητικών παραδοχών τόσο για τη ροή που προκαλείται από τη συμπίεση όσο και για τη μορφή του δείγματος το οποίο παραμορφώνεται και παύει να είναι κυλινδρικό.

Στην εργασία αυτή, προσομοιώνουμε τα ημιστερεά υλικά σαν πλαστικά Bingham, χρησιμοποιώντας την ακόλουθη καταστατική εξίσωση:

$$\begin{aligned} \dot{\gamma} &= 0, & \tau &\leq \tau_0 \\ \tau &= \tau_0 + \eta \dot{\gamma}, & \tau &\geq \tau_0 \end{aligned} \quad (1)$$



Σχήμα 1. Διάγραμμα του πειράματος θλίψης

όπου  $\dot{\gamma}$  ο ρυθμός διάτμησης και  $\tau$  η διατμητική τάση. Οι δύο υλικές παράμετροι, το ιξώδες  $\eta$  και η τάση διαρροής  $\tau_0$  θα προσδιοριστούν με την προτεινόμενη μέθοδο.

#### ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΚΑΙ ΤΗΣ ΡΟΗΣ

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1, το δείγμα με διάμετρο  $D=2R$  και αρχικό ύψος  $H$  συμπιέζεται με σταθερή ταχύτητα ή σταθερή δύναμη. Για την αποφυγή των δυσκολιών που επιδεικνύει το ασυνεχές μοντέλο Bingham, χρησιμοποιούμε το ομαλοποιημένο συνεχές μοντέλο που πρότεινε ο Παπαναστασίου [1]:

$$\tau = \left[ \eta + \tau_0 \frac{1 - \exp(-m \dot{\gamma})}{\dot{\gamma}} \right] \dot{\gamma} \quad (2)$$

Όπου  $\gamma$  είναι η δεύτερη αναλλοίωτη του  $\dot{\gamma}$ . Η παράμετρος  $m$ , η οποία έχει διαστάσεις χρόνου, ελέγχει την εκθετική αύξηση της τάσης σε χαμηλούς ρυθμούς διάτμησης. Η ιδανική συμπεριφορά Bingham προσεγγίζεται για σχετικά μεγάλες τιμές του  $m$ . Η ακρίβεια και η αποτελεσματικότητα του μοντέλου του Παπαναστασίου έχει καταδειχθεί σε πολλές εργασίες (βλ. βιβλιογραφία στην εργασία [2]).

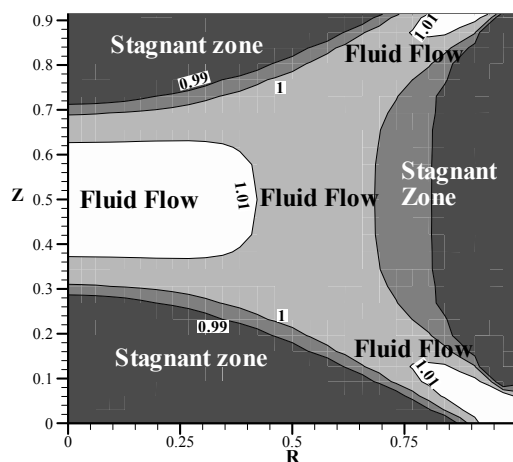
Με την αδιαστατοποίηση των εξισώσεων ροής (εξίσωση συνέχειας και εξίσωση διατήρησης της ορμής) προκύπτουν δύο αδιάστατοι αριθμοί, οι αριθμοί Reynolds και Bingham, οι οποίοι ορίζονται από τις

$$\text{Re} = \frac{\rho U_0 D}{\eta} \quad \text{και} \quad \text{Bi} = \frac{\tau_0 D}{\eta U_0} \quad (3)$$

όπου  $\rho$  η πυκνότητα και  $U_0$  η μέση ταχύτητα στην είσοδο.

## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Το Σχήμα 2 δείχνει την κατανομή της δεύτερης αναλλοίωτης του τανυστή τάσεων στο κυλινδρικό ημιστερεό δείγμα σε μια χρονική στιγμή του πειράματος. Η κατανομή είναι πολύπλοκη και μεταβάλλεται δραστικά κατά τη συμπίεση. Συνεπώς, τα αποτελέσματα καταδεικνύουν την άποψη ότι η κατανομή τάσεων δεν μπορεί να απλοποιηθεί για την εξαγωγή του ιξώδους του δείγματος.

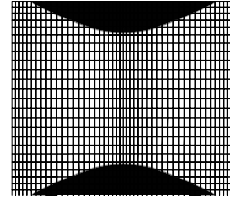
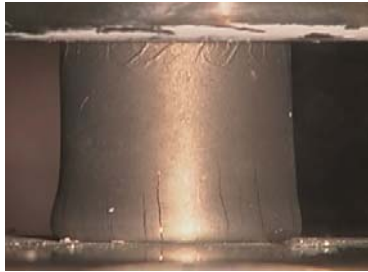


Σχήμα 2. Κατανομή της τάσης στην αρχή του πειράματος ( $Bi=5$ ,  $Re=1$ ,  $F=-1$ ).

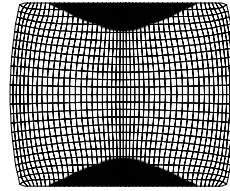
Το Σχήμα 3 δείχνει πειραματικά δεδομένα συμπίεσης ενός δείγματος A356 στους 585 C με σταθερή ταχύτητα 6mm/sec. Το αρχικό ύψος του δείγματος είναι 20 mm και η αρχική διάμετρος επίσης 20mm. Τα αποτελέσματα αντιστοιχούν σε διαφορετικούς χρόνους του πειράματος. Στα δεξιά φαίνονται προκαταρκτικές προσομοιώσεις οι οποίες λήφθηκαν για τιμές του ιξώδους  $\eta$  και της τάσης διαρροής  $\tau_0$  οι οποίες αναπαράγουν ικανοποιητικά το ιστορικό της εφαρμοζόμενης δύναμης. Οι σκιασμένες περιοχές αντιστοιχούν στις περιοχές όπου η διαρροή είναι μηδενική (unyielded regions). Οι προσομοιώσεις θα συνεχιστούν έτσι ώστε να υπάρχει πλήρης συμφωνία μεταξύ πειράματος και θεωρίας χρησιμοποιώντας ως επιπλέον κριτήριο την παραμόρφωση της ελεύθερης επιφάνειας του δοκιμίου.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

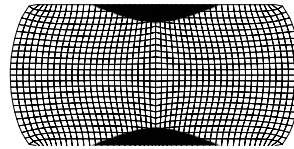
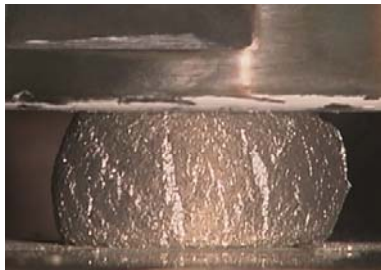
- [1] Papanastasiou T.C., J. Rheology **31**:385 (1987)
- [2] Burgos G.R. and Alexandrou A.N., J. Rheology **43**:485 (2001).



(α)



(β)



(γ)

**Σχήμα 3.** Συμπεριφορά δείγματος A356 σε διάφορους ρυθμούς παραμόρφωσης (θερμοκρασία 585°C, ρυθμός διάτμησης  $5.0 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ ) (α) 0, (β) 19.5 (c) 31.9. Στα αριστερά φαίνονται τα πειραματικά αποτελέσματα και στα δεξιά οι προσομοιώσεις.