

Ανάπτυξη ρεολογικών εξισώσεων για σύνθετα υλικά με πολυμερική μήτρα

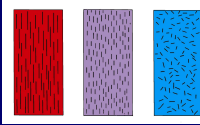
Κ. Παπούλιας, Σ. Σοφού, Ε. Μητσούλης

Εργαστήριο Υπολογιστικής Ρεολογίας και Επεξεργασίας Πολυμερών και Σύνθετων Υλικών (Ε.Υ.Ρ.Ε.Σ.Υ.)

Σχολή Μηχανικών-Μεταλλείων Μεταλλουργών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ζωγράφου 157 80, Αθήνα, ΕΛΛΑΣ



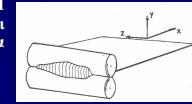
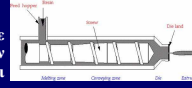
Σύνθετα υλικά με πολυμερική μήτρα (π.χ. ίνες γυαλιού σε πολυμερή) χρησιμοποιούνται ευρέως στη βιομηχανία υλικών για προηγμένες τεχνολογικές εφαρμογές.



Οι ίνες μπορεί να είναι μακρές ή κοντές, με διαφορετικό βαθμό προσανατολισμού. Ανάλογα με τη συγκέντρωσή, το μήκος τους και τον προσανατολισμό τους δίνουν διαφορετικές ρεολογικές ιδιότητες στο σύνθετο υλικό.

ΠΡΟΒΛΗΜΑ - ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Τα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται σε διεργασίες μορφοποίησης για την παραγωγή χρήσιμων αντικειμένων. Οι διεργασίες είναι χύτευση με έγχυση, εκβολή, κλινδρόση, κλπ. Η μοντελοποίηση των διεργασιών γίνεται βάσει ρεολογικών μοντέλων για τα μορφοποιούμενα υλικά.



Ρεολογία – Υπολογιστική Ρεολογία

- Ρεολογία είναι η επιστήμη της παραμόρφωσης και ροής των υλικών
- Το μεγαλύτερο μέρος της ρεολογίας αφορά τα πολυμερή και σύνθετα υλικά λόγω της βιομηχανικής σπουδαιότητας και ασυνήθους συμπεριφοράς τους
- Η υπολογιστική ρεολογία απασκoiεί στη διατύπωση και επίλυση ρεολογικών εξισώσεων για μη-Newtonικά ρευστά

Σκοπός

Η ανάπτυξη κατάλληλων ρεολογικών καταστατικών εξισώσεων για σύνθετα υλικά με πολυμερική μήτρα που εμφανίζουν τάση διαρροής.

Βραχυπρόθεσμο προϊόν

Ρεολογικό μοντέλο προς χρήση στην υπολογιστική ρεολογία για τη μοντελοποίηση σύνθετων υλικών και την ανάλυση διεργασιών μορφοποίησης (εκβολή, χύτευση με έγχυση σύνθετων υλικών).

Μακροπρόθεσμο όφελος

Η εφαρμογή του στην επιτυχή προσομοίωση διεργασιών μορφοποίησης στη βιομηχανία σύνθετων υλικών.

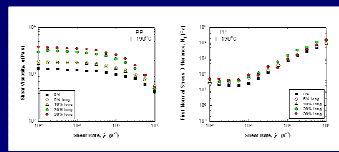
ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΜΕ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΗ ΜΗΤΡΑ

Υλικά

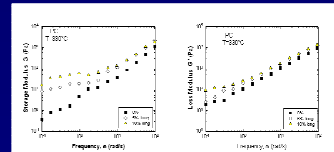
Τήγμα πολυπροπυλενίου (PP) στους 190°C, ενισχυμένο με μακρές και κοντές ίνες γυαλιού, σε κλάσματα όγκου 5%, 10%, 20% και 30%.

Τήγμα πολυκαρβονιλίου (PC) στους 330°C, ενισχυμένο με μακρές ίνες γυαλιού, σε κλάσματα όγκου 5% και 10%.

Τήγμα ναυλον 6/6 στους 290°C, ενισχυμένο με κοντές ίνες γυαλιού, σε κλάσματα όγκου 13%, 30% και 42%.



Πειραματικά δεδομένα για το ιξώδες διάτμησης η_s και την πρώτη διαφορά κάθετων τάσεων N_1 συναρτήσει του ρυθμού διάτμησης για τήγμα πολυπροπυλενίου (PP) με μακρές ίνες στους 190°C.



Πειραματικά δεδομένα για το μέτρο αποθήκευσης G' και το μέτρο απώλειας G'' συναρτήσει της συχνότητας για τήγμα πολυκαρβονιλίου (PC) με μακρές ίνες στους 330°C.

Πειραματικά δεδομένα

Greene and Wilkes (1995) μέτρηση ρεολογικά δεδομένα για τα σύνθετα υλικά σε πείραμα διάτμησης (στατικές και δυναμικές μετρήσεις με ρεόμετρο παράλληλων δίσκων)

Σκοπός

Χρήση κατάλληλης ρεολογικής εξίσωσης που να περιγράφει την ιξωδοελαστικότητα των πολυμερών.

Ολοκληρωτικό ιξωδοελαστικό μοντέλο

Γίνεται χρήση του ολοκληρωτικού ρεολογικού μοντέλου K-BKZ που δίνει τις τάσεις συναρτήσει των παραμορφώσεων.

ΡΕΟΛΟΓΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΕΙΣΩΣΗ ΓΙΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ

$$\tau_p = -p\bar{I} + \frac{1}{1-\theta} \sum_{k=1}^n \int_{-\infty}^t m(t-t') H_{[C_{-1}, I_C]} (C_{-1}^{-1}(t') + \theta C_1(t')) dt'$$

$$m(t-t') = \frac{a_k}{\lambda_k} \exp\left(-\frac{t-t'}{\lambda_k}\right)$$

$$H_{[C_{-1}, I_C]} = \frac{\alpha}{\alpha - 3 + \beta I_{C_{-1}} + (1-\beta) I_C}$$

όπου λ_k, a_k είναι οι χρόνοι και τα μέτρα χαλάρωσης για n τρόπους χαλάρωσης του πολυμερούς, α, β και θ είναι υλικές παράμετροι, και I_C, I_C^{-1} είναι οι πρώτες αναλλοίωτες των τανυστών Cauchy-Green και Finger.

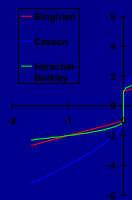
Σκοπός

Χρήση κατάλληλης ρεολογικής εξίσωσης που να περιγράφει την ιξωδοελαστικότητα των υλικών με τάση διαρροής.

Ιξωδοελαστικό μοντέλο

Γίνεται χρήση του διαφορικού ρεολογικού μοντέλου Herschel-Bulkley. Για $\tau < \tau_y$ περιγράφει τις μη-παραμορφωμένες περιοχές κάτω από την τάση διαρροής, και για $\tau > \tau_y$ περιγράφει τις παραμορφωμένες περιοχές πάνω από την τάση διαρροής τ_y .

ΡΕΟΛΟΓΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΕΙΣΩΣΗ ΓΙΑ ΥΛΙΚΑ ΜΕ ΤΑΣΗ ΔΙΑΡΡΟΗΣ

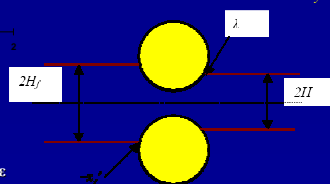


$$\tau_{vp} = K \dot{\gamma}^n + \tau_y \quad \text{for } \tau > \tau_y$$

$$\dot{\gamma} = 0 \quad \text{for } \tau \leq \tau_y$$

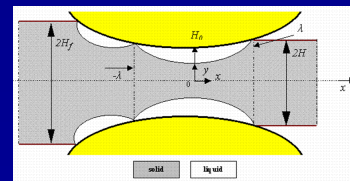
Ρεολογικό ιξωδοελαστικό μοντέλο Herschel-Bulkley

όπου K είναι ο δείκτης συνοχής, n ο δείκτης εκθετικού νόμου, και τ_y η τάση διαρροής.



Ρεολογική απόκριση των ιξωδοελαστικών μοντέλων με τάση διαρροής (Bingham, Casson, Herschel-Bulkley).

Διεργασία κλινδρόσης ιξωδοελαστικών υλικών.



Παραμορφωμένες (liquid) – μη παραμορφωμένες (solid) περιοχές στην κλινδρόση υλικών.

Σκοπός

Ανάπτυξη ρεολογικής εξίσωσης για σύνθετα υλικά με πολυμερική μήτρα και τάση διαρροής.

ΝΕΑ ΡΕΟΛΟΓΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΕΙΣΩΣΗ ΓΙΑ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΜΕ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΗ ΜΗΤΡΑ ΚΑΙ ΤΑΣΗ ΔΙΑΡΡΟΗΣ

$$\tau_c = \tau_p + \tau_f + \tau_{vp}$$

A. Για τη μήτρα

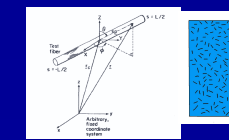
Ιξωδο-ελαστικό-πλαστικό μοντέλο Προσθετικές συμβολές της ιξωδοελαστικότητας και της ιξωδοπλαστικότητας

B. Για τις ίνες

Προσθετική συμβολή των τάσεων λόγω παρουσίας των ινών και του προσανατολισμού τους

$$\tau_f = \eta \frac{n L^3}{24 \ln(2h/D)} u_{i,j} S_{ij} S_{ij}$$

όπου η είναι το ιξώδες διάτμησης, n η πυκνότητα αριθμού των ινών, L το μήκος τους και D η διάμετρος τους, και h η μέση απόσταση μεταξύ τους. Ο τανυστής S_{ij} προσανατολισμού 4ης τάξης περιγράφει τη συμβολή των ινών στις τάσεις του σύνθετου, και επίσης την κατάσταση προσανατολισμού των ινών σε στατιστικές μεθόδους.

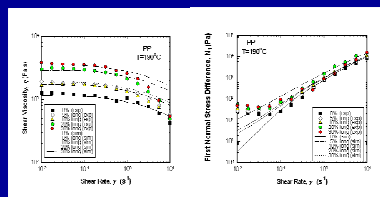


$$S_{ijkl} = \iint p_k p_l p_i p_j \psi(\mathbf{p}, t) d\mathbf{p}$$

$$\int_0^\pi \psi_\theta d\theta = 1$$

$$\psi_\theta(\mathbf{p}, t) = \frac{1}{\pi} (\Delta^T \Delta : \mathbf{pp})^{-1}$$

όπου \mathbf{p} είναι το μοναδιαίο διάνυσμα προσανατολισμού, $\psi_\theta(\mathbf{p}, t)$ η συνάρτηση κατανομής πιθανότητας, Δ ο τανυστής βαθμιαίας παραμορφώσεων ($=\partial\mathbf{x}'/\partial\mathbf{x}$), και \mathbf{T} ο ανάστροφος τανυστής.



Πειραματικά δεδομένα (σύμβολα) και προσαρμογή τους με το νέο μοντέλο (συνεχείς γραμμές) για το ιξώδες διάτμησης η_s και την πρώτη διαφορά κάθετων τάσεων N_1 συναρτήσει του ρυθμού διάτμησης για τήγμα πολυπροπυλενίου (PP) με μακρές ίνες στους 190°C.

Λημοσιεύσεις

- Sofou, S., Mitsoulis, E., "Calendering of Pseudoplastic and Viscoplastic Fluids Using the Lubrication Approximation", J. Polym. Eng., 24, 505-522, 2004.
- Sofou, S., Mitsoulis, E., "Calendering of Pseudoplastic and Viscoplastic Sheets of Finite Thickness", J. Plastic Film and Sheeting, 20, 185-222, 2004.
- Mitsoulis, E., Sofou, S., "Calendering Analysis of Pseudoplastic and Viscoplastic Materials", Proceedings of the Europe-Africa Regional Meeting of the Polymer Processing Society, Athens, GREECE, September 2003, paper 19A1.
- Mitsoulis, E., Sofou, S., "Simulations of Herschel-Bulkley Flow in Roll Coating", Proceedings of the 4th International Meeting of the Hellenic Society of Rheology, Athens, GREECE, June 2004, paper 11A1.
- Παπούλιας, Κ., «Μοντελοποίηση ρεολογίας πολυμερών σύνθετων υλικών ενισχυμένων με ίνες», Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών, ΕΜΗ, Ιούλιος 2003.
- Mitsoulis, E., Papoulias, C., "Modeling the Rheology of Semiconcentrated Polymer Composites", Proceedings of the Europe-Africa Regional Meeting of the Polymer Processing Society, Athens, GREECE, September 2003, paper 19A2.
- Mitsoulis, E., Papoulias, C., "The Effect of Fiber Glass Content on the Rheology of Semiconcentrated Polymer Composites", Proceedings of the 4th International Meeting of the Hellenic Society of Rheology, Athens, GREECE, June 2004, paper 11-8A.