

Dariusz Kwiatkowski¹, Józef Koszkuł²

Politechnika Częstochowska, Katedra Przetwórstwa Tworzyw Sztucznych i Zarządzania Produkcją, al. Armii Krajowej 19c, 42-200 Częstochowa

BADANIE PEŁZANIA KOMPOZYTÓW POLIAMIDU 6 WZMOCNIONYCH WŁÓKNEM SZKLANYM

W pracy przedstawiono wpływ zawartości włókna szklanego w kompozytach poliamidu 6 na przebiegi pełzania podczas zginania. Dane eksperymentalne aproksymowano z użyciem nieliniowego opisu pełzania. Badaniami objęto dwa kompozyty poliamidu 6 z włóknem szklanym. W celach porównawczych badano także poliamid 6, stanowiący osnowę kompozytu.

CREEP TESTS OF POLYAMIDE 6 COMPOSITES REINFORCED WITH FIBRE GLASS

In the paper the influence of the filler content on the creep function during bending of the polyamide composites was analysed. Non-linear polymer creep description, proposed by the authors [1], was used in order to approximate the experimental data. The dependence between deformation ε stress σ and observation time t is given

$$\varepsilon(\sigma, t) = \frac{\sigma}{E} \cdot \left\{ 1 + \left(1 + a_1 \cdot \sigma + b_1 \cdot \sigma^2 \right) \cdot \omega_1 \cdot F(\nu_1, \alpha_1) + \left(1 + a_2 \cdot \sigma + b_2 \cdot \sigma^2 \right) \cdot \omega_2 \cdot F(\nu_2, \alpha_2) \right\}$$

where :

E - Young modulus,

a, b - non-linear indicators of retardation intensity,

ω - linear indicator of retardation intensity,

$F(\nu, \alpha)$ - the integrated form of the exponential fractional function of α and ν .

Two polyamide 6 composites reinforced with fibre glass were taken under examination and the results were compared with the pure polyamide 6 being the matrix of the composite. The specimens were subjected to the bending stress for time $t = 300$ hours. For the creep tests the cubicoid specimens of 150x10x5 mm were used. The creep tests were performed on the test stand which had been designed and made at the Katedra Przetwórstwa Tworzyw Sztucznych i Zarządzania Produkcją. The test stand allowed to perform the creep process during pure bending at the different stress levels: 5, 10, 15 MPa. The factors $a_1, b_1, a_2, b_2, \omega_1, \omega_2$ occurring in the equation as well as the exponential fractional function parameters α_1, ν_1 i α_2, ν_2 were calculated with the specially elaborated numerical procedure.

WSTĘP

Przy projektowaniu konstrukcji z materiałów polimerowych należy zwrócić szczególną uwagę na zjawisko pełzania. Jest to zjawisko powolnego wzrostu odkształcenia ciała stałego pod wpływem działającego naprężenia. Tylko nieliczne polimery można uznać za ciała liniowe w sensie Boltzmanna, dlatego do prognozowania właściwości lepkosprężystych używa się nieliniowego opisu pełzania. Głównym problemem podczas prognozowania właściwości lepkosprężystych jest odpowiedni dobór funkcji matematycznych występujących w równaniach konstytutywnych. W niniejszej pracy do opisu właściwości lepkosprężystych wybrano funkcję wykładniczą ułamkową. Na podstawie przeprowadzonych badań pełzania przeanalizowano wpływ zastosowanego napelnacza w postaci włókien szklanych na przebiegi pełzania.

RODZAJE KOMPOZYTÓW I METODYKA BADAŃ

Do badań użyto poliamidu 6 o nazwie handlowej Tarnamid T-27 produkcji Zakładów Azotowych S.A. w Tarnowie. Do wzmocnienia tego tworzywa zastosowano włókno szklane o symbolu E ze szkła bezalkalicznego boroglinokrzemowego, o zawartości tlenków alkalicznych poniżej 1%. Kompozyty poliamidu 6 z włóknem szklanym wytworzono za pomocą wyłaczarki dwuślimakowej, sterowanej komputerowo.

W pracy przeanalizowano wpływ zawartości włókna szklanego na przebiegi pełzania podczas zginania kompozytów poliamidu 6. Badaniami objęto dwa kompozyty poliamidu 6 o zawartościach 15 i 30% włókna szklanego. W celach porównawczych badano także poliamid 6, stanowiący osnowę kompozytu. Próbkę z wybranych materiałów polimerowych były poddane działaniu naprężenia zginającego przez 300 godzin.

¹ dr inż., ² dr hab. inż., prof. PCz.

Do badań pełzania poliamidu 6 i jego kompozytów wykorzystano próbki prostopadłościowe o wymiarach 150x10x5 mm. Badania pełzania były przeprowadzone na stanowisku, które realizowało proces pełzania podczas czystego zginania przy różnych poziomach naprężeń:

- 5 MPa,
- 10 MPa,
- 15 MPa.

Próbki przed badaniami pełzania klimatyzowano przez 16 godz. w temperaturze $23 \pm 2^\circ\text{C}$ i wilgotności względnej $50 \pm 5\%$.

Dane doświadczalne aproksymowano z użyciem opisu nieliniowego pełzania polimerów, zaproponowanego przez autorów [1, 2]. Jedną z propozycji opisu pełzania materiałów polimerowych w ujęciu nieliniowym jest przyjęcie zależności między odkształceniem ε , naprężeniem σ i czasem obserwacji t poprzez funkcję

$$\varepsilon(\sigma, t) = \frac{\sigma}{E} \cdot \left\{ 1 + \sum_{i=1}^2 (1 + a_i \cdot \sigma + b_i \cdot \sigma^2) \times \right. \\ \left. \times \omega_i \cdot \int_0^t \phi_i(t-u) du \right\} \quad (1)$$

gdzie:

E - moduł Younga,

ω - liniowy wskaźnik asymptotycznego natężenia retardacji,

a_i, b_i - wskaźniki regresji nieliniowych współczynników natężenia retardacji poszczególnych wyrazów lepkosprężystych,

$1 + a_i \cdot \sigma + b_i \cdot \sigma^2$ - nieliniowy wskaźnik natężenia retardacji.

Do opisu właściwości lepkosprężystych poliamidu 6 i jego kompozytów z włóknem szklanym zastosowano równanie (1), w którym występują dwa człony lepkosprężyste

$$\varepsilon(\sigma, t) = \frac{\sigma}{E} \cdot \left\{ 1 + \omega_1 \cdot (1 + a_1 \cdot \sigma + b_1 \cdot \sigma^2) \cdot \int_0^t \phi_1(t-u) du + \right. \\ \left. + \omega_2 \cdot (1 + a_2 \cdot \sigma + b_2 \cdot \sigma^2) \cdot \int_0^t \phi_2(t-u) du \right\} \quad (2)$$

gdzie jądro pełzania zastąpiono scałkowaną postacią funkcji wykładniczej ułamkowej [3]

$$\int_0^t \phi(t-u) du = e_{v,\alpha}^*(t) = 1 - \frac{\sin \pi \cdot v}{\pi} \times \\ \times \int_0^\infty e^{-\alpha \cdot u \cdot t} \cdot \frac{u^{v-1} du}{1 + 2 \cdot u^v \cdot \cos \pi \cdot v + u^{2v}} \quad (3)$$

Wyniki otrzymane z badań pełzania podczas czystego zginania aproksymowano nieliniowym opisem pełzania. W celu dopasowania krzywej pełzania otrzymanej z doświadczeń do krzywej teoretycznej opisanej równaniem (2) należy wyznaczyć wartości liczbowe parametrów równania E, ω, a i b oraz parametrów występujących w jądrze pełzania α i v . Wartości scałkowanej funkcji wykładniczej ułamkowej dla różnych parametrów v stabilizowano, tak aby można było z niej łatwo korzystać. Okazuje się, iż dla każdej pary parametrów jądra pełzania α i v istnieje tylko jedna para parametrów równania (2), przy której zbieżność krzywych eksperymentalnej i obliczeniowej jest najlepsza [3]. Analityczne obliczenie liczbowych wartości parametrów funkcji z reguły nie jest możliwe. Dokonuje się tego drogą numeryczną z użyciem komputera. Zmieniając każdy z parametrów w odpowiednim przedziale wartości, otrzymuje się ostatecznie taką ich kombinację, aby pokrywanie się krzywej eksperymentalnej z krzywą opisaną równaniem (2) było najlepsze. Jeśli wielkością mierzoną w procesie pełzania w n punktach jest odkształcenie $\varepsilon(t, \sigma)$, to za optymalną przyjęto kombinację parametrów, przy której jest spełniony warunek

$$\sum_{i=1}^n [\varepsilon_{dosw}(t_i, \sigma) - \varepsilon_{teor}(t_i, \sigma)]^2 \rightarrow \min \quad (4)$$

gdzie:

$\varepsilon_{dosw}(t_i, \sigma)$ - punkty eksperymentalne,

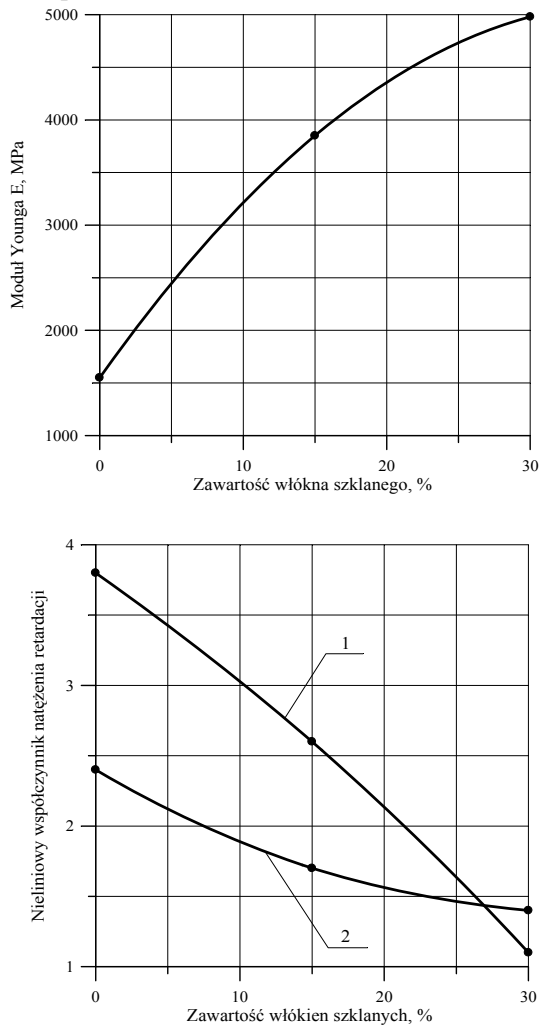
$\varepsilon_{teor}(t_i, \sigma)$ - punkty krzywej symulującej proces pełzania, obliczone dla tych samych czasów.

Do rozwiązania układów równań nieliniowych, jakie otrzymamy z zależności (4), zastosowano iteracyjną metodę Levenberga-Marquarda. Metoda ta stanowi odmianę algorytmu Newtona. W każdym kolejnym kroku ustala pierwsze pochodne błędu względem niewiadomych, tworząc tzw. macierz Jacobiego. Zwykle oszacowanie kolejnego przybliżenia odbywa się wówczas poprzez obliczenie kroku Gaussa-Newtona dla każdej zmiennej.

WYNIKI BADAŃ

Na rysunku 1 przedstawiono wpływ zawartości włókna szklanego na moduł Younga E i nieliniowe współczynniki natężenia retardacji. Graficznie przedstawiono też eksperymentalne i aproksymowane przebiegi zmian odkształcenia podczas pełzania. Linia ciągłą oznaczono odkształcenie obliczone drogą teoretyczną, zaś punktami oznaczono wyniki doświadczalne. Z przeprowadzonych badań wynika, że największą wartość modułu Younga E ma kompozyt poliamidu 6 z 30% zawartością włókna szklanego. Najniższą wartość modułu Younga zanotowano dla poliamidu 6. Kompozyt z 30% zawartością włókna szklanego ma też najniższą

podatność pełzania w zakresie asymptotycznego odkształcenia lepkosprężystego. Największą zaobserwowano dla poliamidu 6.

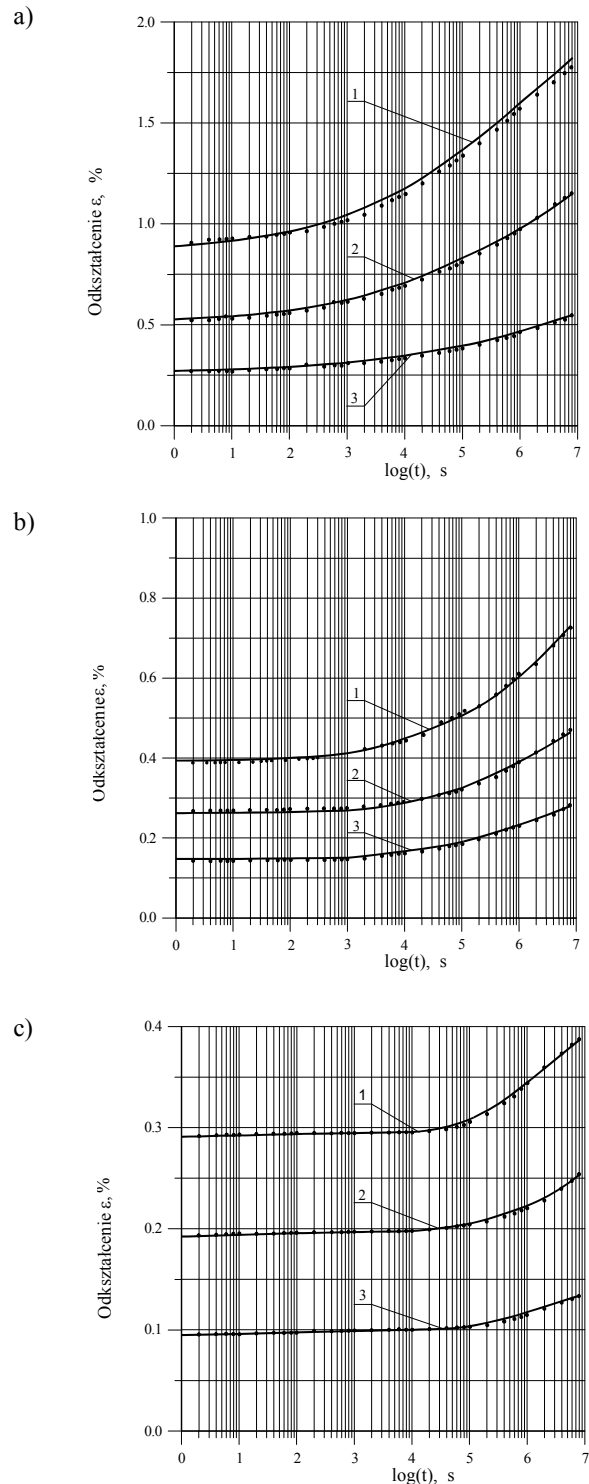


Rys. 1. Wpływ zawartości włókna szklanego na wartość: a) modułu Younga, b) nieliniowych współczynników natężenia retardacji: 1 - pierwszego wyrazu lepkosprężystego, 2 - drugiego wyrazu lepkosprężystego

Fig. 1. The influence of the fibre glass content on value: a) Young modulus, b) non-linear indicators of retardation intensity: 1 - first viscoelastic term, 2 - second viscoelastic term

Dla poliamidu 6 o strukturze częściowo krystalicznej (oprócz fazy krystalicznej występuje faza amorficzna) niezbędne okazuje się uwzględnienie dwóch wyrazów lepkosprężystych. Jeden z nich opisuje mechanizm przebiegający z niższym natężeniem retardacji (średniokresowy), drugi zaś przebiega z wyższym natężeniem retardacji (wysokookresowy). Wartość liniowego wskaźnika natężenia retardacji ω_1 pierwszego wyrazu lepkosprężystego dla poliamidu 6 wyniosła 2,55, zaś dla kompozytu z 30% zawartością włókien szklanych zmniejszyła się do wartości 0,92. Zanotowano więc 32% spadek tej wielkości. Wartość liniowego wskaźnika natężenia retardacji ω_2 drugiego wyrazu lepkosprężystego dla poliamidu 6 wyniosła 4,6, zaś dla kompozytu z 30% zawartością włókien szklanych zmniejszyła się do war-

tości 2,28. Zanotowano więc 50% spadek tej wielkości. Zwiększająca się zawartość napełniacza w postaci włókien szklanych ciętych okazała się silnym czynnikiem ograniczającym podatność na pełzanie.



Rys. 2. Przykładowe przebiegi zmian odkształcenia ϵ w czasie t podczas pełzania przy różnych poziomach naprężeń: 1 - 15 MPa, 2 - 10 MPa, 3 - 5 MPa: a) PA, b) PA6+15%, c) PA+30%

Fig. 2. Runs of changes of deformation ϵ in time t during creeping at different tension level: 1 - 15 MPa, 2 - 10 MPa, 3 - 5 MPa: a) PA, b) PA6+15%, c) PA+30%

Miarą udziału odkształcenia lepkosprężystego w odkształceniu całkowitym badanych materiałów polimerowych jest iloczyn nieliniowego współczynnika natężenia retardacji i wskaźnika liniowego natężenia retardacji ω . Dla poliamidu 6 udział odkształcenia lepkosprężystego w odkształceniu całkowitym wyniósł około 50%. W miarę zwiększania ilości włókien szklanych w kompozycie udział odkształcenia lepkosprężystego w odkształceniu całkowitym maleje. Dla kompozytu z 30% zawartością włókien szklanych udział odkształcenia lepkosprężystego zmniejszył się do 15%.

Wzrost zawartości włókien szklanych w kompozytach poliamidu 6 w sposób wyraźny zmniejsza też efekt nieliniowości pełzania. Podczas pełzania poliamidu 6 wskaźniki regresji nieliniowego współczynnika natężenia retardacji były największe. Najmniejsze wartości wskaźników a i b zarówno dla pierwszego, jak i drugiego wyrazu lepkosprężystego zanotowano dla kompozytu poliamidu 6 z 30% zawartością włókien szklanych. W miarę wzrostu ilości włókien szklanych w kompozycie maleje wartość nieliniowego współczynnika natężenia retardacji dla pierwszego i drugiego wyrazu lepkosprężystego (rys. 1). Wartość nieliniowego współczynnika natężenia retardacji dla pierwszego wyrazu lepkosprężystego zmniejszyła się o 45%, zaś dla drugiego wyrazu lepkosprężystego zmniejszyła się o 60% i była bliska jedności. Do prognozowania właściwości lepkosprężystych tego materiału można byłoby zastosować równania rządzące lepkosprężystością liniową. Najniższą prędkość pełzania zaobserwowano dla kompozytu z maksymalną zawartością włókien szklanych. Prędkość ta wynika z wpływu wartości α i ν . Najniższe wartości w zakresie wysokookresowego mechanizmu retardacji $\nu = 0,20$ i $\alpha = 10^{-9}$ zanotowano dla poliamidu 6, najwyższe zaś miał kompozyt z 30% zawartością włókien szklanych ($\nu = 0,35$ i $\alpha = 10^{-12}$).

WNIOSKI

Do opisu właściwości lepkosprężystych zastosowano ujęcie nieliniowe. Otrzymano dość zadowalające

wyniki symulacji procesu pełzania poliamidu 6 i jego kompozytów z włóknem szklanym. Różnica między wynikami uzyskanymi z doświadczeń a tymi, które uzyskano z symulacji przy użyciu funkcji wykładniczej ułamkowej, nie przekroczyła 8%. Największą różnicę zanotowano dla poliamidu 6 podczas pełzania przy naprężeniu 15 MPa. Najmniejszą różnicę miał poliamid 6 wzmocniony 30% zawartością włókna szklanego, zwłaszcza przy poziomym naprężeniu 5 i 10 MPa. Wyniki symulacji pełzania poliamidu 6 i jego kompozytów z włóknem szklanym potwierdzają przydatność funkcji wykładniczej ułamkowej. Dzięki dwóm parametrom α i ν oraz dwóm wyrazom lepkosprężystym osiągnięta została dość duża elastyczność. Funkcja ta może być z powodzeniem stosowana do opisu właściwości lepkosprężystych poliamidu 6 i jego kompozytów z włóknem szklanym.

LITERATURA

- [1] Jaklewicz M., Karmowski W., Kuciel S., Litak A., Mazurkiewicz S., Ocena przebiegów pełzania poliacetali w świetle przyjętego modelu nieliniowego, VII Seminarium Tworzywa sztuczne w budowie maszyn, Kraków 1994, 153-158.
- [2] Jaklewicz M., Karmowski W., Kuciel S., Litak A., Propozycja aproksymacji nieliniowych przebiegów pełzania konstrukcyjnych polimerów, VII Seminarium Tworzywa sztuczne w budowie maszyn, Kraków 1994, 147-152.
- [3] Wilczyński A.P., Mechanika polimerów w praktyce konstrukcyjnej, WNT, Warszawa 1984.

Recenzent
Danuta Żuchowska