Bazyli Krupicz[1], **Aleksy Patejuk**[2]
Politechnika Białostocka, Wydział Mechaniczny, ul. Wiejska 45C, 15-950 Białystok

Wiktor W. Barsukow[3]
Grodzieński Państwowy Uniwersytet im. J. Kupały, ul. Orzeszkowej, Grodno, Białoruś

BADANIE KOMPOZYTU EPOKSYDOWO-SZKLANEGO NA PEŁZANIE PRZY SKRĘCANIU

Przedstawiono wyniki badań pełzania kompozytu epoksydowego przy stałym $M(t)$ = const i zmiennym momencie skręcającym $M(t) = M_m\ (1 + A_\sigma \sin 2\pi\nu t)$ (rys. 2). Badano próbki w postaci rurek o średnicy wewnętrznej d_w = 30 mm, grubości ścianek 2 mm i długości pomiarowej l_o = 100 mm (rys. 1). Osnowę kompozytu stanowiła żywica epoksydowa Epidian 5 utwardzana trójetylenoczteroaminą. Wzmocnieniem kompozytu były pasma rovingu w ilości 32% wag., ułożone pod kątem od ±30 do 45°. Dla takich próbek kompozytu wyznaczono wytrzymałość na skręcanie R_s i moduł Kirchhoffa G (rys. 3). Wyniki pełzania przy obciążeniu statycznym (rys. 4) dały podstawę do założenia, że badany kompozyt jest liniowo-lepkosprężysty, dla którego obliczono jądro pełzania $K(t)$. Podczas pełzania dynamicznego rejestrowano pętle histerezy. Na ich podstawie wyznaczono moduł zespolony G, jego część rzeczywistą G', część urojoną G'' i tangens kąta przesunięcia fazowego tgφ (rys. 5). Wymienione wielkości porównano z obliczonymi na podstawie eksperymentalnie wyznaczonego jądra pełzania. Wynikające różnice między porównanymi wartościami G, G', G'' oraz tgφ (rys. 5) są następstwem cech materiałowych składników kompozytu, tj. lepkosprężystej osnowy (żywicy epoksydowej) i sprężystego zbrojenia (włókien szklanych).

Słowa kluczowe: **kompozyt epoksydowo-szklany, pełzanie, pełzanie dynamiczne (wibropełzanie), moduł zespolony**

ROTATION CREEP TESTING OF GLASS-EPOXY COMPOSITE

In the paper, results of creep testing on epoxide resin composite with constant $M(t)$ = const and variable torque $M(t)$ = = M_m $(1+A_\sigma \sin 2\pi\nu t)$ have been presented (Fig. 2). Samples in the form of tubes with internal diameter of d_w = 30 mm, wall thickness of 2 mm and testing length of l_o = 100 mm were used to the testing (Fig. 1). Epoxy resin Epidian 5 cured by triethylenetetraamine constituted the composite's matrix. Roving stripes in the amount of 32% of total weight placed at an angle of ±30÷45° reinforced the composite. Torsional strength R_s and Kirchoff module G were determined for the tested composite samples (Fig. 3). Investigation from results at the static load (Fig. 4) were the ground for the assumption that the tested composite is linear-viscoelastic, for which creeping core $K(t)$ was determined. During dynamic creep, histeresis loops were recorded. Based on them, complex modulus G, its storage modulus part G', loss modulus part G'' and loss tangent tgφ were calculated (Fig. 5). Presented values were compared with the values calculated from experimentally determined creeping core. Identified differencies among G, G', G'' and tgφ values (Fig. 5) were the results of material properties of composite components, i.e. viscoelastic matrix (epoxy resin) and elastic reinforcement (fibreglass).

Key words: **glass-epoxy composite, creep, dynamic creep (vibro-creep), modulus**

WSTĘP

Rozwój zastosowań kompozytów jest związany z postępem rozwiązań konstrukcyjno-technologicznych, w których są wykorzystywane ich właściwości przy różnorodnych obciążeniach. Właściwości kompozytu zależą od rodzaju i ilości jego składników, sposobu ułożenia włókien i technologii wytwarzania półfabrykatów lub gotowych wyrobów [1].

Właściwości mechaniczne kompozytu epoksydowo-szklanego w zasadniczej mierze kształtuje zbrojenie w postaci włókien szklanych i żywica epoksydowa jako osnowa. Włókno szklane jest liniowo sprężyste do zerwania, natomiast żywica epoksydowa jest tworzywem lepkosprężystym. Stąd też kompozyt epoksydowo-szklany również wykazuje cechy lepkosprężyste. Kompozyty posiadające uporządkowaną strukturę zbrojenia w pewnym zakresie obciążeń są liniowo lepkosprężyste. Fenomenologiczna teoria lepkosprężystości liniowej zawiera ścisłe związki wiążące funkcje lepkosprężystości [2].

W niniejszej pracy przedmiotem analizy będą następujące wielkości: zespolony moduł sprężystości postaciowej G_z (moduł Kirchhoffa), jego część rzeczywista G' i część urojona G'', oraz tangens kąta przesunięcia fazowego tgφ. Powyższe wielkości obliczono na podstawie wyznaczonego doświadczalnie jądra pełzania $K(t)$, a ich wartości porównano z danymi doświadczalnymi. Składowe zespolonego modułu Kirchhoffa wyrażone przez jądro pełzania mają postać:

[1, 2] dr inż., [3] starszy pracownik naukowy

$$G' = \frac{1 + K_c}{(1 + K_c)^2 + K_s^2} \tag{1}$$

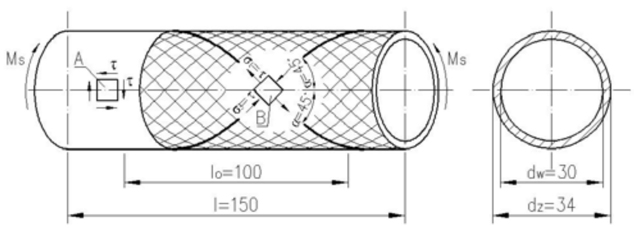
$$G'' = \frac{K_s}{(1 + K_c)^2 + K_s^2} \tag{2}$$

gdzie: K_c i K_s odpowiednio cosinus i sinus przekształcenia Fouriera jądra pełzania $K(t)$. Moduł zespolony i tgφ obliczono jako

$$|G_z| = \sqrt{(G')^2 + (G'')^2}\,, \quad \mathrm{tg}\varphi = \frac{G''}{G'} \tag{3}$$

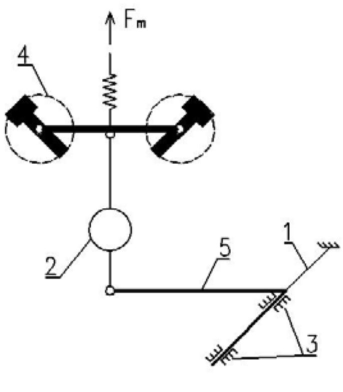
WARUNKI DOŚWIADCZENIA

Kompozyt wykonany z żywicy epoksydowej wzmocnionej rovingiem szklanym należy do tworzyw o dużej sztywności. Jego lepkosprężyste właściwości najpełniej uwidaczniają się przy ścinaniu i dlatego ten rodzaj obciążenia wybrano do badań. Stan ścinania zrealizowano, obciążając momentem skręcającym M_s cienkościenne próbki cylindryczne. Schemat próbek pokazano na rysunku 1. Natomiast próbki obciążano zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 2. Przy próbach statycznych wibrator (4) był unieruchomiony.



Rys. 1. Schemat próbki: α - kąt, jaki tworzy pasmo rovingu z kierunkiem osi próbki

Fig. 1. Sample scheme: α - angle, which is consituted by roving string with axis direction of the sample



Rys. 2. Schemat obciążenia próbki: 1 - próbka, 2 - dynamometr, 3 - łożyska, 4 - wibrator, 5 - dźwignia do wywoływania momentu skręcającego

Fig. 2. Sample load scheme: 1 - sample, 2 - dynamometer, 3 - bearings, 4 - vibrator, 5 - lever for generating the torque

Próbki do badań wykonano z żywicy epoksydowej wzmocnionej włóknem szklanym wielopasmowym typu E (włókno elementarne 9 μm, pasmo tex 40, żywica epoksydowa Epidian 5, utwardzacz - TECZA). Włókna szklane nie były preparowane. Pasma rovingu ułożono w sześciu warstwach. Warstwę stanowił roving nawinięty w różnych próbkach odpowiednio pod kątem $\alpha = \pm 30$; 35; 40; 45^o w stosunku do osi próbki. Kąt w kolejnych warstwach próbki zmieniano, znak kąta, który pozostawał stały na całej długości próbki. Różne kąty ułożenia włókien w próbkach pozwoliły na zróżnicowanie obciążenia włókien przy tym samym obciążeniu zewnętrznym. Zawartość szkła w próbce wynosiła - 32% wag. Próbki pobierano z środkowych części rur o długości 2 m.

Wartość naprężenia stycznego uśrednionego obliczano przy założeniu, że próbka jest cienkościenna i izotropowa, tj.

$$\tau = \frac{2M_s}{\pi g(d_z - g)} \tag{4}$$

gdzie: M_s - moment skręcający, d_z - średnica zewnętrzna próbki. Odkształcenie postaciowe γ próbki obliczano na podstawie pomiaru kąta obrotu przekrojów oddalonych o długość pomiarową l_o = 100 mm. Założenie o jednorodności materiału próbki pozwoliło na wyznaczenie modułu sprężystości postaciowej G (moduł Kirchhoffa) badanych próbek. Moduł G wyznaczono w zakresie naprężeń < 5 MPa. Przy tym poziomie naprężeń próbki odkształcały się zgodnie z prawem Hooke'a.

MODUŁ KIRCHHOFFA *G* I WYTRZYMAŁOŚĆ NA SKRĘCANIE R_S

Na rysunku 3 przedstawiono wyniki wyznaczonych modułów G i wytrzymałości na skręcanie R_s w zależności od kąta ułożenia włókien w próbce. Wytrzymałość na skręcanie wyznaczano na maszynie wytrzymałościowej KM-50-1. Wytrzymałość na skręcanie obliczano ze wzoru (4) jako naprężenie styczne $R_s = \tau$, przyjmując maksymalną wartość momentu skręcającego M_s, przy którym następowało zniszczenie próbki. Wartość R_s kompozytu o danym kącie skrzyżowania włókien ustalono jako średnią z 10 prób.

Dane doświadczalne przedstawione na rysunku 3 opisano funkcjami:

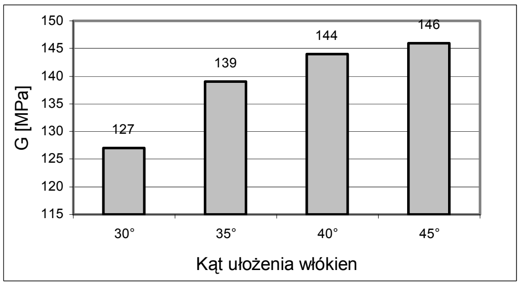
$$G = G_o(p_1 \sin 2\alpha + p_2)$$

$$R_s = R_{so}(k_1 \sin 2\alpha + k_2)$$

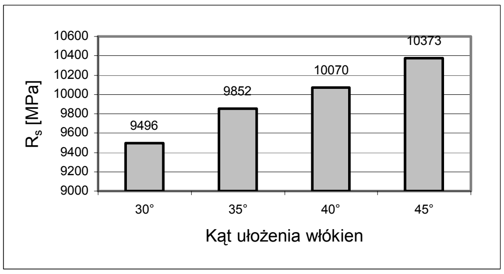
gdzie: G_o = 1 MPa, R_{so} = 1 MPa. Współczynniki p_1, p_2, k_1, k_2 obliczono metodą najmniejszych kwadratów. Ich wartości są następujące: $p_1 = 5941{,}2$; $p_2 = 4317{,}7$; $k_1 = 141{,}2$; $k_2 = 5{,}2$.

Z przedstawionych danych na rysunku 3 wynika, że badane próbki kompozytu posiadały największą sztywność oraz wytrzymałość na skręcanie, gdy kąt α, jaki tworzyły włókna szklane z osią próbki, wynosił 45º. Jest to wynik zgodny z literaturą [3]. Ten kierunek ułożenia rovingu pokrywał się z kierunkiem naprężeń głównych w badanych próbkach. O wytrzymałości próbek kompozytu na skręcanie decydowało rozwarstwienie włókien rovingu.

a)



b)



Rys. 3. Wpływ kąta ułożenia włókien na: a) moduł G, b) wytrzymałość na skręcanie R_s

Fig. 3. Relation between fibre composition angle and: a) G module, b) torsional strength R_s

WYNIKI BADAŃ NA PEŁZANIE

Próby pełzania prowadzono przy następujących naprężeniach stałych w czasie: τ_o = 18,2; 24,3; 30,4; 42,6 MPa. Maksymalne naprężenie niszczące stanowiło około 30% naprężenia niszczącego próbkę. Każdą próbkę poddano pełzaniu w czasie 5 godz. Wyniki odkształceń pełzania przedstawiono na rysunku 4. Obliczano je według wzoru (5) jako różnicę odkształceń całkowitych i sprężystych przy różnych kątach ułożenia włókien w kompozycie

$$\frac{\gamma_c(t)}{\tau_o} = \frac{\gamma(t)}{\tau_o} - \frac{\tau_o}{G} \tag{5}$$

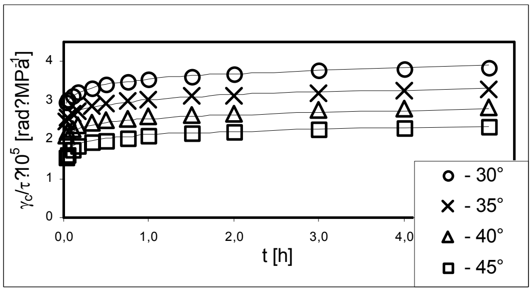
Do opisu odkształceń pełzania wybrano funkcję potęgową przedstawioną za pomocą wzoru

$$f(t) = \frac{\gamma_c(t)\tau_o}{\tau} = p_1\left(\frac{t}{t_o}\right)^p \tag{6}$$

gdzie: p, p_1 - współczynniki obliczone metodą najmniejszych kwadratów, t_o = 1 h, τ_o = 1 MPa. Analiza wartości współczynników p, p_1 dla poszczególnych kątów ułożenia włókien w kompozycie wykazała, że wykładnik potęgi p można przyjąć jako wartość stałą. Współczynnik p_1 jest zmienny i aproksymowano go zależnością

$$p_1 = a_1\cos^2\alpha + a_2\cos^2 2\alpha \tag{7}$$

gdzie: a_1, a_2 - stałe.



Rys. 4. Wyniki prób pełzania kompozytu $\gamma_c(t)/\tau$

Fig. 4. Results of composite $\gamma_c(t)/\tau$ creep testing

Linie ciągłe na rysunku 4 są wynikiem przyjętej aproksymacji. Otrzymane wyniki pełzania kompozytu posłużyły również do wyznaczenie jego jądra pełzania $K(t)$. Występuje ono w równaniach całkowych Volterry

$$\gamma(t) = \frac{1}{G}\left[\tau + \int_{-\infty}^{t} K(t-\theta)\tau(\theta)d\theta\right] \tag{8}$$

Wykorzystując zależności (5)-(8), otrzymano

$$K(t) = \frac{G(\alpha)}{\tau_o}\dot{f}(t) = \frac{G(\alpha)}{t_o\tau_o}\left(a_1\cos^2\alpha + a_2\cos^2 2\alpha\right)p\left(\frac{t}{t_o}\right)^{p-1} = \\ = A(\alpha)p\left(\frac{t}{t_o}\right)^{p-1} \tag{9}$$

gdzie $A(\alpha) = \dfrac{G(\alpha)}{t_o\tau_o}\left(a_1\cos^2\alpha + a_2\cos^2 2\alpha\right)$

WYNIKI BADAŃ MODUŁU ZESPOLONEGO G_Z I JEGO SKŁADOWYCH G' I G''

Zespolony moduł Kirchhoffa G_z, jego składowe, tj. rzeczywistą G' i urojoną G'', oraz tangens kąta przesunięcia fazowego tgφ wyznaczono jak dla tworzywa liniowo-lepkosprężystego obciążonego wymuszeniem dynamicznym o przebiegu

$$\tau = \tau_m + \tau_a \exp(2\pi\nu t) \tag{10}$$

gdzie: τ_m - naprężenie średnie, τ_a - amplituda naprężenia, ν - częstość drgań. Dla tak zadanego obciążenia oczekiwano odkształcenia postaciowego zgodnego z równaniem (7)

$$\gamma(t) = \frac{1}{G(\alpha)}\left\{\begin{aligned}&[\tau_m + \tau_a \exp(i\omega t)] + \\ &+ \int_{-\infty}^{t} [\tau_m + \tau_a \exp(i\omega\theta)] K(t-\theta) d\theta\end{aligned}\right\} \tag{11}$$

Wykorzystując transformację Fouriera całek we wzorze (10), po podstawieniu $z = (t-\Theta)$, jądra pełzania (8) oraz wykorzystując własności funkcji $\Gamma = \Gamma(1+p)/p$, otrzymano

$$\gamma(t,\alpha) = \tau_m\left[\frac{1}{G(\alpha)} + \frac{f(t,\alpha)}{\tau_o}\right] + \\ + \frac{\tau_a\, exp(i\omega t)}{G(\alpha)}\left[\begin{aligned}&1 + \frac{A(\alpha)\Gamma(1+p)}{\omega^p} cos\frac{\pi p}{2} + \\ &- i\frac{A(\alpha)\Gamma(1+p)}{\omega^p} sin\frac{\pi p}{2}\end{aligned}\right] \tag{12}$$

Z analizy wzoru (11) wynika, że przewidywane odkształcenie próbki jest sumą odkształcenia statycznego $\tau_m/G(\alpha)$ i odkształcenia pełzania $\tau_m f(t, \alpha)/\tau_o$, na które jest nałożone odkształcenie harmonicznie zmienne

$$\gamma_a(t) = \frac{\tau_a\, exp(i\omega t)}{G_z} = \\ = \tau_a\, exp(i\omega t)\frac{1}{G(\alpha)}\left(1 + C\,cos\frac{\pi p}{2} - iC\,sin\frac{\pi p}{2}\right) \tag{13}$$

gdzie $C = A(\alpha)\Gamma(1+p)/\omega^p$.

Z wzoru (12) wynika moduł zespolony G_z i dalej G', G'' oraz tgφ, tj.

$$G_z = \frac{\frac{1}{G(\alpha)} + C\cos\frac{\pi p}{2} - iC\sin\frac{\pi p}{2}}{\left(\frac{1}{G(\alpha)} + C\cos\frac{\pi p}{2}\right)^2 + \left(C\sin\frac{\pi p}{2}\right)^2} \tag{14}$$

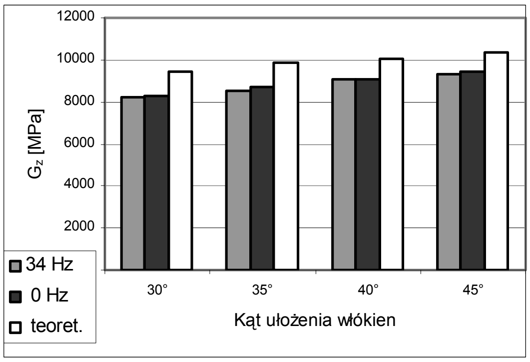
$$G' = \frac{\frac{1}{G(\alpha)} + C\cos\frac{\pi p}{2}}{\left(\frac{1}{G(\alpha)} + C\cos\frac{\pi p}{2}\right)^2 + \left(C\sin\frac{\pi p}{2}\right)^2} \tag{15}$$

$$G'' = \frac{C\sin\frac{\pi p}{2}}{\left(\frac{1}{G(\alpha)} + C\cos\frac{\pi p}{2}\right)^2 + \left(C\sin\frac{\pi p}{2}\right)^2} \tag{16}$$

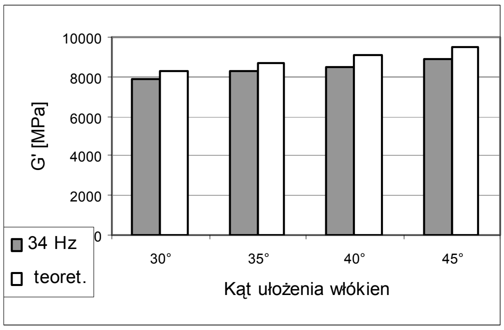
$$\mathrm{tg}\varphi = \frac{C\sin\frac{\pi p}{2}}{\left(\frac{1}{G(\alpha)} + C\cos\frac{\pi p}{2}\right)} \tag{17}$$

Wartości doświadczalne zespolonego moduł Kirchhoffa G_z, jego składowych - G' i G'' oraz tgφ wyznaczono z pętli histerezy rejestrowanej podczas pełzania dynamicznego [4].

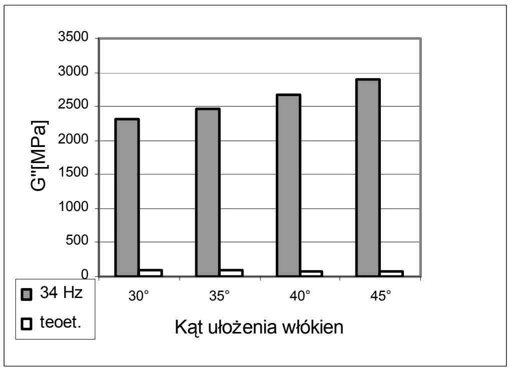
a)



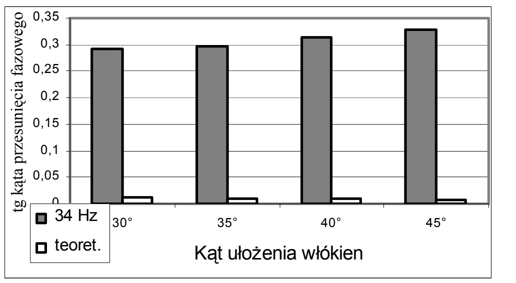
b)



c)



d)



Rys. 5. a) G_z, b) G', c) G'', d) tgφ_d uzyskanych doświadczalnie i obliczonych na podstawie jądra pełzania przy τ_m = 36,5 MPa, τ_a = 4,7 MPa, ν = 34 Hz

Fig. 5. a) G_z, b) G', c) G'', d) tgφ_d, which were calculated during testing and determined on the basis of creeping core at τ_m = 36.5 MPa, τ_a = 4.7 MPa, ν = 34 Hz

Uzyskane wartości doświadczalne G_{zd}, G'_d, G''_d oraz tgφ_d porównano z obliczonymi na podstawie jądra pełzania dla czasu t = 5 h (rys. 5).

Z danych przedstawionych na rysunku 5a wynika, że wartości modułów Kirchhoffa statycznego G (■ 0 Hz) i zespolonego G_z, wyznaczonego na podstawie przebiegu pętli histerezy (■34 Hz), są zbliżone. Moduł zespolony obliczony (□ teoret.) na podstawie jądra pełzania jest wyższy od modułów statycznego i wyznaczonego doświadczalnie. Ta tendencja dotyczy też części rzeczywistej zespolonego modułu Kirchhoffa G' (rys. 5b). W przypadku modułu zespolonego G_z różnica jest najmniejsza przy kącie skrzyżowania włókien w próbce α = 45°, tj. gdy włókna w próbce są poddane działaniu naprężeń głównych. Wartości części rzeczywistej modułu zespolonego G' są najmniejsze przy kącie α = 30°.

Istotnie różnią się między sobą wartości części urojonej G'' (rys. 5c) i tangensa kąta przesunięcia fazowego tgφ (rys. 5d), wyznaczonych na podstawie przebiegu pętli histerezy (i obliczonego na podstawie jądra pełzania ([5]. Wynikłe różnice są następstwem cech materiałowych składników kompozytu, tj. lepkosprężystej osnowy (żywicy epoksydowej) i sprężystego zbrojenia (włókien szklanych). Osnowa decyduje o przesunięciu fazowym odkształcenia w stosunku do naprężenia, wyrażonym przez tgφ, czego konsekwencją jest identyczne kształtowanie się wartości części urojonej zespolonego modułu Kirchhoffa G''.

WNIOSKI

1. Wytrzymałość kompozytu i statyczny moduł Kirchhoffa jest największy, gdy włókna szklane tworzą z osią próbki kąt α = 45°.
2. Porównanie wartości modułów zespolonego G_z, jego części rzeczywistej G' i urojonej G'' oraz tangensa kąta przesunięcia fazowego tgφ, wyznaczonych doświadczalnie na podstawie przebiegu pętli histerezy oraz obliczonych na podstawie jądra pełzania, wskazuje, że wartości obliczone są wyższe w stosunku do doświadczalnych. W obu tych przypadkach występują znaczne różnice (około 2 rzędy wielkości) pomiędzy wartościami modułu G'' i tgφ.
3. Wykazano, że dla kompozytu posiadającego przy pełzaniu cechy liniowo-lepkosprężyste występują ograniczenia w wyznaczaniu zespolonego modułu G_z i tgφ na podstawie jądra pełzania.

Pracę wykonano w Politechnice Białostockiej, finansowanej ze środków przeznaczonych na działalność statutową S/WM/1/03.

LITERATURA

[1] Wilczyński A., Mechanika polimerów w praktyce konstrukcyjnej, WNT, Warszawa 1984.

[2] Wilczyński A., Nowa funkcja typu wykładniczego jako funkcja tworząca w lepkosprężystości, Mat. X Seminarium nt. Two- rzywa sztuczne w budowie maszyn, Kraków 2003, 403-409.

[3] Kłosowska-Wołkowicz Z., Królikowski W., Penczek P., Żywice i laminaty poliestrowe, WNT, Warszawa 1969.

[4] Krupicz B., Badania wpływu kompozycji laminatów na ich reologiczne właściwości dynamiczne - rozprawa doktorska, Białystok 1979.

[5] Jakowluk A., Krupicz B., Ograniczenia wyznaczania wielkości dynamicznych ciał lepkosprężystych na podstawie jądra pełzania, Inżynieria Materiałowa 1983, 6, 179-181.

Recenzent
Zbigniew Rosłaniec