

Izabela HYLA, Józef ŚLEZIONA,
Michał GUZIKOWSKI

Politechnika Śląska
Instytut Inżynierii Materiałowej

WPLYW TEMPERATURY NA WŁASNOŚCI TŁUMIĄCE
ŻYWICY EPOKSYDOWEJ ZBROJONEJ WŁÓKNAMI
CIĄGLYMI

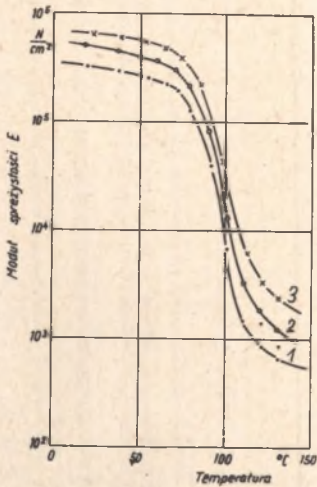
Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki badań oraz wzory empiryczne pozwalające ustalić moduły sprężystości E i logarytmiczne dekrementy tłumienia kompozytów: żywica - włókno szklane i żywica - drut stalowy, w szerokim zakresie temperatur. Badania dotyczyły żywicy epoksydowej E-51 zbrojonej włóknami ciągłymi.

1. Wstęp

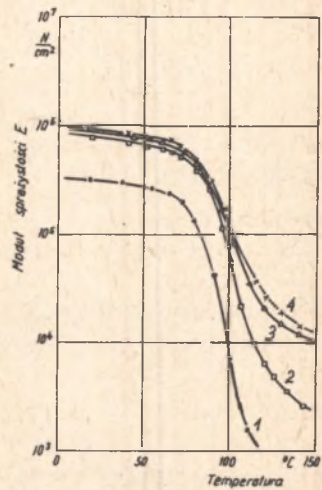
Przy projektowaniu elementów przeznaczonych do pracy pod działaniem obciążeń okresowo zmiennych oprócz danych tradycyjnych stałych materiałowych konieczna jest również znajomość dynamicznego modułu sprężystości oraz współczynnika tłumienia. W przypadku gdy przewiduje się możliwość pracy danego elementu w temperaturach różnych od temperatury otoczenia, istotna jest ponadto temperaturowa zależność tych wielkości [1, 2, 5, 6]. Zależność ta ma szczególnie duże znaczenie w materiałach kompozytowych z osnową polimerową, której stałe materiałowe mogą zmieniać się dość znacznie nawet przy niewielkich skokach temperatury. Przy tworzywach termoplastycznych wiąże się to w dużym stopniu z przechodzeniem tworzywa, w niewielkim zakresie temperatur, od stanu szklistego poprzez wysokoelastyczny do lepkiego płynięcia. Wprowadzenie do takiej osnowy komponentu zbrojącego, odpornego na wysokie temperatury, obniża wrażliwość termiczną materiału finalnego, jednakże jedynie w pewnych ograniczonych rozmiarach.

Badania prowadzone dla tworzyw kompozytowych z polimerową osnową, zbrojonych różnego rodzaju komponentami, wykazały, że wzrost ilości fazy zbrojącej powoduje jakby równoległe przesunięcie krzywej $E = f(T)$ ku wyższym wartościom modułów sprężystości, natomiast nie wpływa na zmianę kształtu krzywej, co ilustrują przykładowo wykresy na rys. 1.

Wniosek ten dotyczy danego, przyjętego typu zbrojenia. Przy zmianie kształtu lub wymiarów komponentu zbrojącego równoległość ta zostaje zachwiana (rys. 2).



Rys. 1. Zależność modułu sprężystości E od temperatury dla poli-chloroku winylu zbrojonego kulkami szklanymi o średnicy $d = 44 \mu\text{m}$ [1]
1 - PCW bez zbrojenia, 2 - PCW + 25% u.c. zbrojenia, 3 - PCW + 40% u.c. zbrojenia



Rys. 2. Zmiana modułu sprężystości E w zależności od temperatury i rodzaju zbrojenia [1]

1 - PCW bez zbrojenia, 2 - PCW wzmocnione kulkami szklanymi ($d = 44 \mu\text{m}$), 3 - PCW wzmocnione włóknem szklanym o długości $l = 140 \mu\text{m}$, 4 - PCW wzmocnione włóknem szklanym o długości $l = 200 \mu\text{m}$

Zaobserwowana prawidłowość zmian, występująca zarówno w odniesieniu do modułów sprężystości jak również do logarytmicznego dekrementu tłumienia, stwarza możliwość opracowania pewnych zależności funkcyjnych, pomocnych przy projektowaniu nowych materiałów. Umożliwiają one bowiem zaprojektowanie składu materiału kompozytowego, który posiadałby określony z góry moduł sprężystości względnie wymagane własności tłumiące podczas pracy w podwyższonych temperaturach.

Do opracowania wspomnianych zależności funkcyjnych wykorzystano badania wykonane dla kompozytów: żywica - włókno szklane oraz żywica - drut stalowy.

2. Materiały i aparatura pomiarowa stosowane do badań

Badania przeprowadzono na próbkach wykonanych z żywicy epoksydowej E-51, zbrojonej włóknem szklanym ciągłym (Roving ER 2003; $\varnothing 10 \mu\text{m}$, szkło E), względnie drutem stalowym St3 o średnicy $\varnothing = 0,4 \text{ mm}$.

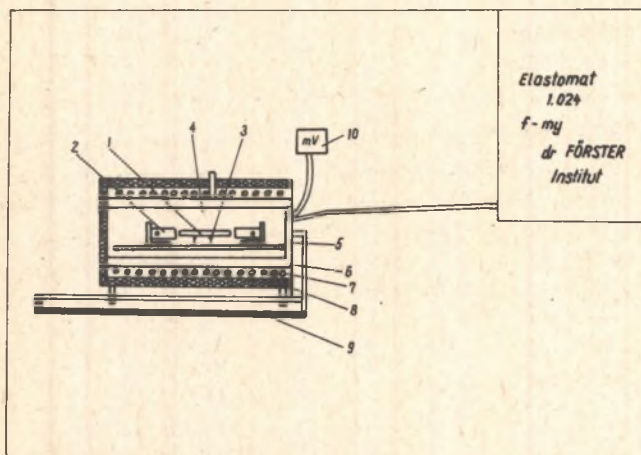
Do oznaczenia skrótowej kompozycji pierwszej przyjęto symbol E-51-S, natomiast kompozycji drugiej E-51-D. Próbkę otrzymywano metodą nasycania

i przeciągania lub zalewania ciekłą osnową włókien zbrojących przygotowanych w formach.

Wszystkie próbki stosowane w badaniach posiadały kształt belek o wymiarach 5x8x100 mm.

Do badań wykorzystano ELASTOMAT. - E1.024, firmy "Dr Förster Institut", uzupełniony komorą termiczną, umożliwiającą prowadzenie badań w zakresie temp. od -190°C do $+200^{\circ}\text{C}$.

Schemat stanowiska pomiarowego przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Schemat urządzenia do pomiaru modułu sprężystości E i logarytmicznego dekrementu tłumienia

1 - próbka, 2 - wzbudniki, 3 - punkty podparcia próbki, 4 - termopara, 5 - wysięgnik z zamontowanymi czujnikami, 6 - strefa chłodząca komorę temperaturową, 7 - strefa grzania, 8 - izolacja termiczna, 9 - podstawa z szyną prowadzącą, 10 - miliwoltomierz, 11 - elastomat 1,024 - f-my dr Förster Institut

3. Pomiary

Pomiary badanych wielkości, tzn. modułu sprężystości E i współczynnika tłumienia Λ , przeprowadzono dla próbek o różnym udziale objętościowym zbrojenia, zmieniającym się w granicach od 5 do 50%. W zakresie temperatur od -150°C do 0°C pomiary prowadzono co 25°C , natomiast w przedziale temperatur od 0°C do $+160^{\circ}\text{C}$ - co 20°C . Moduł sprężystości E wyznaczano z zależności [2, 7]

$$E = K_1 \text{ long} \cdot 4,0775 \cdot 10^{-5} \cdot \gamma \cdot l^2 \cdot f_1 \text{ long} \quad [\text{N/cm}^2] \quad (1)$$

$$\kappa_1 = 1 + 0,882 \nu^2 \frac{a^2 + b^2}{l^2} \approx 1,0 \quad (2)$$

przy

$$\nu = 0,3 - 0,5$$

gdzie:

- a - grubość próbki, cm,
- b - szerokość próbki, cm,
- l - długość próbki, cm,
- ν - liczba Poissona,
- ρ - gęstość, g/cm³,
- f_1 long - pierwsza częstość rezonansowa przy drganiach wzdłużnych, Hz.

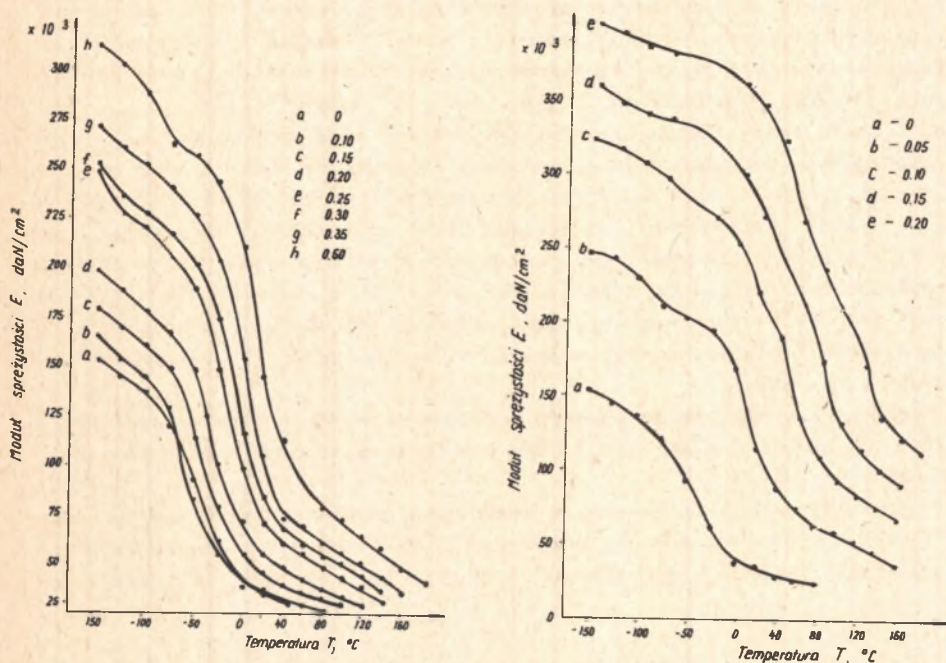
Właściwości tłumiące materiału określano przy pomocy logarytmicznego dekrementu tłumienia $-\Delta$, który wyznaczono dla częstości rezonansowej metodą zanikania. Pomiar logarytmicznego dekrementu tłumienia sprowadzał się więc do pomiaru ilości drgań próbki w okresie czasu, w którym amplituda drgań malała z wartości A_0 do wartości A_0/e . Proces zliczania zaczynał się od chwili ustalenia impulsów pobudzających próbkę do drgań [7].

4. Wyniki pomiarów i ich opracowanie

Zmianę modułu sprężystości E w funkcji temperatury, przy różnych udziałach objętościowych włókien zbrojących, przedstawiono w formie graficznej na rys. 4. Wykresy na rys. 4a dotyczą żywicy zbrojonej włóknem szklanym (E-51-S), natomiast na rys. 4b - żywicy zbrojonej drutem stalowym (E-51-D).

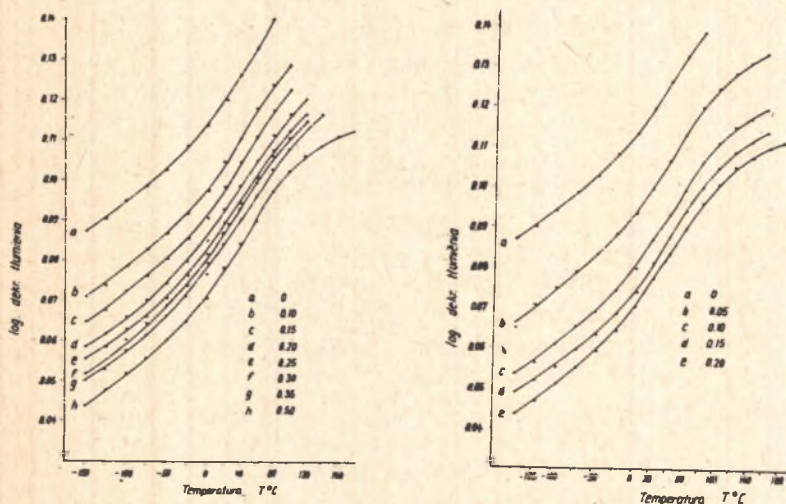
Podobnie zależność logarytmicznego dekrementu tłumienia od temperatury, dla wymienionych uprzednio kompozycji, przedstawiono na rys. 5a i 5b. Jak widać z wykresów, wprowadzenie zbrojenia spowodowało znaczne podwyższenie modułu sprężystości. Wzrost ten w temperaturze -150°C przekracza nawet 100% wartości modułu tworzywa niezbrojonego. Wraz ze wzrostem modułu obserwuje się spadek własności tłumiących materiałów, mieszczący się również w granicach 100%. Równocześnie pomiary wykazują różny charakter zaobserwowanych zmian dla poszczególnych kompozycji. Przy zbrojeniu drutem stalowym udział objętościowy zbrojenia w ilości $V_w = 10\%$ podnosi moduł sprężystości E z wartości ok. $150 \cdot 10^3 \text{ daN/cm}^2$ do wartości ok. $330 \cdot 10^3 \text{ daN/cm}^2$ a więc aż o $180 \cdot 10^3 \text{ daN/cm}^2$, natomiast zwiększenie udziału zbrojenia o dalsze 10% daje już znacznie mniejszy wzrost modułu, bo wynoszący zaledwie ok. $70 \cdot 10^3 \text{ daN/cm}^2$.

Jak widać, jednakowy wzrost udziału objętościowego zbrojenia powoduje zróżnicowane przyrosty modułu sprężystości i to z wyraźną tendencją malejącą. W przeciwieństwie do tej kompozycji, przy zbrojeniu włóknem szkla-



Rys. 4. Wpływ temperatury na wartości modułu sprężystości dla różnych udziałów włókien wzmacniających kompozycji

a) E51 - D, b) E 51 - S



Rys. 5. Zależność logarytmicznego dekrementu tłumienia od temperatury dla różnych udziałów włókien wzmacniających kompozycji

a) E51 - D, b) E51 - S

nym 10% udziału objętościowego włókien zbrojących powoduje wzrost modułu sprężystości (w temp. -150°C) jedynie o $10 \cdot 10^3 \text{ daN/cm}^2$ w stosunku do modułu sprężystości żywicy niezbrojonej, natomiast dodatek dalszych 10% (tzn. $V_w = 20\%$) podwyższa moduł już o $40 \cdot 10^3 \text{ daN/cm}^2$ i jak widać z wykresów, skok ten ma tendencję zwykłą w miarę zwiększania udziału objętościowego włókien zbrojących. Przebiegi krzywych na rys. 4a i 4b wskazują jednak wyraźnie, że dla każdego z udziałów objętościowych zbrojenia występuje pewna temperatura (tym wyższa, im wyższy udział zbrojenia), od której rozpoczyna się gwałtowny spadek modułu sprężystości. Równocześnie na wykresach obrazujących zmianę logarytmicznego dekrementu tłumienia dla tychże temperatur obserwuje się powiększenie kąta nachylenia krzywych, co daje w efekcie większy wzrost współczynnika tłumienia w tych samych zakresach temperatur.

Otrzymane wyniki tworzą powierzchnię odwzorowującą zależność $E_k = f(T, V_w)$ oraz $\Lambda = \Phi(T, V_w)$. Dla ich opisu konieczna jest znajomość funkcji f i Φ .

Wykorzystując dane otrzymane w przeprowadzonych pomiarach, podjęto próbę ustalenia tych zależności. Stwierdzono, że w przypadku logarytmicznego dekrementu tłumienia powierzchnię $\Lambda = \Phi(T, V_w)$ prawidłowo opisuje zależność

$$\frac{\Lambda_k - \Lambda_w}{\Lambda_0 - \Lambda_w} = A_T (1 - \text{erf} \{z\}) \quad (3)$$

Przyjmując do obliczeń następujące wartości, dla temp. 20°C :

$$\Lambda_0 = 0,35, \quad \Lambda_w = 0,12, \quad \Lambda_w = 0,016$$

(wł. szklane) (stal)

otrzymano

$$A_T = \exp \left\{ \frac{27300}{T^2} - \frac{418,4}{T} + 1,14 \right\} \quad (4)$$

dla obu kompozycji oraz

a) dla kompozycji E-51-S

$$z = 0,266 \ln V_w + 0,842 \quad (5)$$

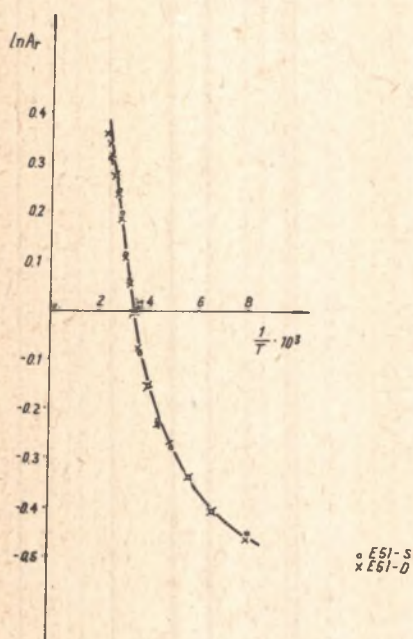
b) dla kompozycji E-51-D

$$z = 0,214 \ln V_w + 0,887 \quad (6)$$

gdzie:

T - temperatura, K,

V_w - udział objętościowy włókien zbrojących.



Rys. 6. Zależność współczynnika A_T od temperatury dla wszystkich udziałów wzmocnienia badanych kompozycji E 51-D i E 51-S

Przyjmując następujące stałe dla komponentów: osnowy $E_0 = 35 \cdot 10^3 \text{ daN/cm}^2$, wzmocnienia - $E_{szkl} = 7 \cdot 10^6 \text{ daN/cm}^2$ i $E_{stali} = 2,15 \cdot 10^6 \text{ daN/cm}^2$ wyznaczono wartość S_T (rys. 7) równą:

a) dla kompozycji E-51-S

$$S_T = 109095 \left(\frac{1}{T}\right)^{2,053} \quad (9)$$

b) dla kompozycji E-51-D

$$S_T = 1097 \left(\frac{1}{T}\right)^{1,293} \quad (10)$$

Przeprowadzone pomiary wykazały, że korekcyjny współczynnik dynamiczny dla kompozycji E51-D wynosi $\eta = 0,035$, natomiast dla kompozycji E51-S $\eta = 0,75$.

Wykorzystując wyznaczone współczynniki, można ostatecznie przedstawić wzory końcowe do wyznaczania modułu sprężystości materiału kompozytowego E_k względnie jego logarytmicznego dekrementu tłumienia Δ_k , będących funk-

Na rys. 6 przedstawiono zależność współczynnika A_T od temperatury dla obu kompozycji. Otrzymane wyniki sugerują, że nie jest on funkcją rodzaju zbrojenia, a zatem zależy przede wszystkim od własności osnowy.

Moduł sprężystości można natomiast opisać zależnością

$$E_K = S_T (E_0 V_0 + \eta E_w V_w) \quad (7)$$

gdzie:

V_0, V_w - udział objętościowy osnowy i wzmocnienia,

E_0, E_w - moduły sprężystości osnowy i wzmocnienia,

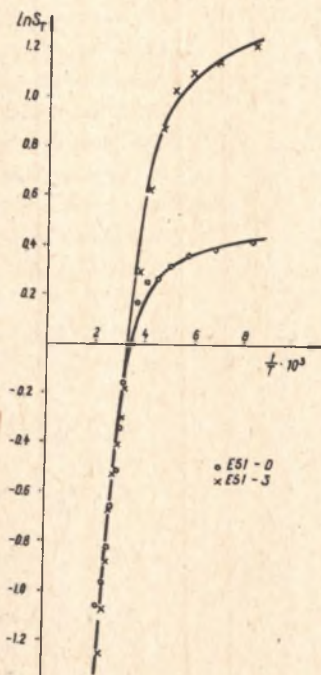
η - korekcyjny współczynnik dynamiczny,

S_T - współczynnik temperatury równy,

$$S_T = \theta_1 \left(\frac{1}{T}\right)^{\theta_2} \quad (8)$$

T - temperatura, K,

θ_1, θ_2 - stałe dla określonych typów wzmocnienia i osnowy.



Rys. 7. Zmiana współczynnika S_T od temperatury dla wszystkich udziałów wzmocnienia badanych kompozycji E51-D i E51-S

cyjami zarówno udziału objętościowego zbrojenia jak i temperatury, w następującej postaci:

a) dla kompozycji E-51-S

$$E_k = 109095 \left(\frac{1}{T}\right)^{2,053} (E_0 V_0 + 0,75 E_w V_w) \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \Lambda_k = 0,016 + 0,334 \cdot \exp\left\{\frac{27300}{T^2} - \frac{418,4}{T} + 1,14\right\} \cdot \\ \cdot [1 - \operatorname{erf}(0,266 \ln V_w + 0,842)] \quad (12) \end{aligned}$$

b) dla kompozycji E-51-D

$$E_k = 1097 \left(\frac{1}{T}\right)^{1,283} (E_0 V_0 + 0,035 E_w V_w) \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \Lambda_k = 0,12 + 0,23 \cdot \exp\left\{\frac{27300}{T^2} - \frac{418,4}{T} + 1,14\right\} \cdot [1 - \operatorname{erf}(0,214 \ln V_w + 0,887)] \quad (14) \end{aligned}$$

5. Wnioski końcowe

Przedstawione opracowanie dostarcza pewne gotowe zależności, które mogą być w dużym stopniu przydatne przy projektowaniu materiału o określonym module sprężystości E i logarytmicznym dekrementie tłumienia Δ w różnych temperaturach pracy.

Zastosowana metoda pozwoliła wyznaczyć niezbędne współczynniki jedynie dla wybranych, poddanych uprzednio badaniom materiałów, co automatycznie ogranicza zastosowanie wzorów końcowych do tych właśnie kompozycji. Niemniej, nawet biorąc pod uwagę to ograniczenie, przytoczone zależności mogą okazać się bardzo pomocne przy projektowaniu materiałów kompozytowych przeznaczonych do pracy w temperaturach różnych od temperatury otoczenia.

Wartości otrzymane z równań (11) do (14) wykazują bardzo dobrą zgodność z analogicznymi wielkościami uzyskanymi na drodze eksperymentalnej.

LITERATURA

- [1] Kmitta S.: Kunststoffe Bd 64.H7. 1974.
- [2] Kriształ M.A., Gołowin S.A.: Wnutrenije trenie i struktura metaliów, Moskwa, Metalurgia 1976.
- [3] Saechtling S., Zebrowski W.: Kunststoffe Taschenbuch Carl Hauser Verlag - München.
- [4] Brojer Z., Hertz Z., Paneczek P.: Żywice epoksydowe. WNT, Warszawa 1972.
- [5] Chomka W.: Postępy fizyki, Nr 5, 1967.
- [6] Pietrzyk I., Górczyca S.: Hutnik Nr 5, 1969.
- [7] Vorläufige Gerätebeschreibung und Bedienungsanleitung Elastomat R 1.024 Institut Dr Förster.

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ДЕМПФИРАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ЭПОКСИДНОЙ СМОЛЫ АРМИРОВАННОЙ НЕПРЕРЫВНЫМИ ВОЛОКНАМИ

Резюме

В статье представлены результаты исследований и эмпирические формулы, позволяющие установить модули упругости E и логари-ф-мический декремент затухания композиции: смола - стеклянное волокно и смола - стальная проволока в широком диапазоне температур.

Исследования касались эпоксидной смолы E-51, армированной непрерывными волокнами.

INFLUENCE OF TEMPERATURE ON DAMPING PROPERTIES
OF EPOXIDE RESIN REINFORCED WITH CONTINUOUS FILAMENT

S u m m a r y

The results of the research and empirical formula that allow to adopt moduli of elasticity E and logarithmic decrements of damping the composites: resin-fibre glass and resin-steel wire, in a wide range of temperature, have been presented in the paper.

The research dealt with epoxide resin E-51 reinforced with continuous fibres.