

WYTRZYMAŁOŚĆ KOMPOZYTÓW EPOKSYDOWO-SZKLANYCH W ZŁOŻONYCH DŁUGOTRWAŁYCH OBCIĄŻENIACH(*)

STANISŁAW OCHELSKI (WARSZAWA)

Przedstawiono wyniki badań doświadczalnych czasowej wytrzymałości kompozytów epoksydowo-szklanych otrzymanych z komponentów produkcji krajowej. Badania dotyczyły kompozytu ortotropowego i transversalnie izotropowego w złożonych stanach naprężenia, zrealizowanych przez rozciąganie z jednoczesnym skręcaniem. Zbadano wpływ długotrwałego obciążenia na naprężenia i odkształcenia niszczące badanych kompozytów. Zaproponowano opis matematycznej długotrwałej wytrzymałości materiałów anizotropowych.

1. WSTĘP

Jak wiadomo, wytrzymałość doraźna większości materiałów konstrukcyjnych zależy od czasu trwania obciążenia oraz temperatury. Tworzywa sztuczne, należące do grupy materiałów o cechach reologicznych, są szczególnie wrażliwe na czas obciążenia i na niewielkie zmiany temperatury. Przegląd prac zagranicznych dotyczących badań wytrzymałości polimerów przy długotrwałych obciążeniach podano w pracy [1].

Jednak nieliczne wyniki tych badań należy uznać za niewystarczające. Trudności zasadnicze wynikają z konieczności prowadzenia badań w bardzo długim czasie. Natomiast zupełny jest brak prac krajowych, dotyczących badań wytrzymałości długotrwałej tworzyw produkcji krajowej — w złożonych stanach naprężenia.

Wykresy długotrwałej wytrzymałości $\sigma_0(\tau)$ z upływem czasu szybko dążą do wartości asymptotycznej zwanej granicą wytrzymałości długotrwałej σ^* . Odpowiednią funkcję krzywej według ZACHAROWA [2] można przedstawić funkcją wykładniczą typu

$$(1.1) \quad \sigma_0(\tau) = \sigma_0(B + Ce^{-a\tau}),$$

która dobrze opisuje wyniki badań w prostych stanach naprężenia. W rów-

(*) Praca wykonana w ramach problemu węzłowego 05.12.

naniu (1.1) $\sigma_0(\tau)$ oznacza granicę wytrzymałości oraz C , B , α współczynniki określone na podstawie wyników doświadczalnych, przy czym $C+B=1$.

Zacharow swoje kryterium krótkotrwałej wytrzymałości dla materiałów anizotropowych, podane między innymi w [3], uogólnił na przypadek wytrzymałości długotrwałej przez uzmiennienie w kryterium naprężeń zgodnie ze wzorem (1.1). Zakładając podobieństwo krzywych długotrwałej wytrzymałości dla różnych złożonych rodzajów obciążeń, oparte na wynikach badań [4] oraz na wynikach badań własnych [2], przedstawił prostą postać warunku długotrwałej wytrzymałości. Założenie o podobieństwie krzywych długotrwałej wytrzymałości nie wydaje się w wystarczający sposób potwierdzone doświadczalnie. Zacharow badał próbki z kompozytu otrzymanego z żywicy poliestrowej i tkaniny szklanej — w postaci rurek obciążonych siłą osiową i ciśnieniem wewnętrznym.

Jest więc uzasadnione prowadzenie badań wytrzymałości długotrwałej kompozytów szczególnie produkcji krajowej i w złożonych stanach naprężenia.

2. METODA BADAŃ DOŚWIADCZALNYCH

Badaniom doświadczalnym poddano dwa rodzaje kompozytów, różniące się między sobą stopniem i rodzajem anizotropii. Kompozyt 1 otrzymano z żywicy epoksydowej E-53 i tkaniny szklanej STR-47, a kompozyt 2 również z żywicy epoksydowej E-53 i ułożonych równolegle ciągłych włókien szklanych.

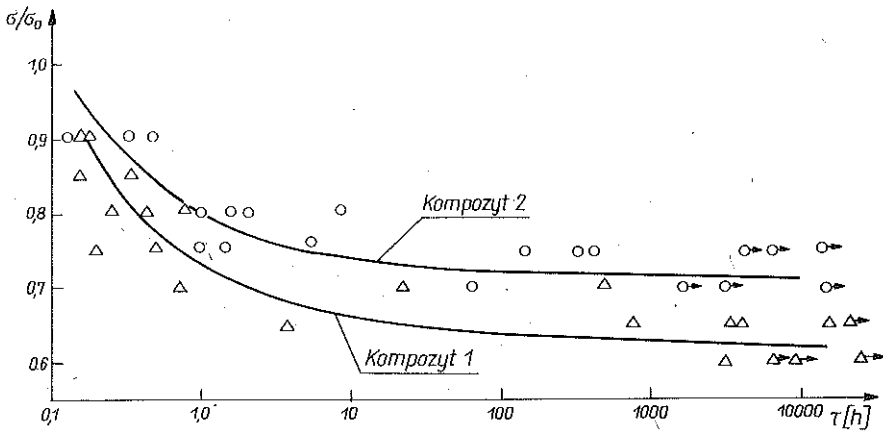
Próbki z kompozytu 1 miały kształt rurek o średnicy pomiarowej wewnętrznej 39,5 mm i zewnętrznej 43,5 mm oraz o długości pomiarowej 100 mm. Technologię wytwarzania próbek podano w pracy [5]. Natomiast z kompozytu 2 zastosowano próbki kształtu owalnego zapewniające minimalną koncentrację naprężeń w uchwytach pelzarki. Technologię wytwarzania próbek oraz opis nowych uchwytów podano w pracy [6].

Programy badań czasowej wytrzymałości obejmowały osiowe rozciąganie próbek z kompozytu 2, ściskanie i rozciąganie z jednoczesnym skręcaniem kompozytu 1. Rozciąganie z jednoczesnym skręcaniem przeprowadzono na próbkach zachowując stosunki naprężeń stycznych do normalnych $k=0; 0,25; 0,5; 1,0; \infty$. W badaniach przyjęto stałe naprężenia równe 0,5; 0,55; 0,6; 0,65; 0,7; 0,75; 0,8; 0,85; 0,9 wartości naprężeń niszczących. Próbki obciążano do chwili zniszczenia, lecz nie dłużej niż 10^4 godz. Badania czasowej wytrzymałości w płaskim stanie naprężenia przeprowadzono na pelzarce DST-5000 z dodatkowym urządzeniem opisanym w pracy [6], a rozciąganie kompozytu 2 przeprowadzono na pelzarce $Z_{st} 2/3$. Podczas badań wykonywano pomiary odkształceń. Badania przeprowadzono w temperaturze 293 ± 2 K i względnej wilgotności powietrza $0,65 \pm 0,05$.

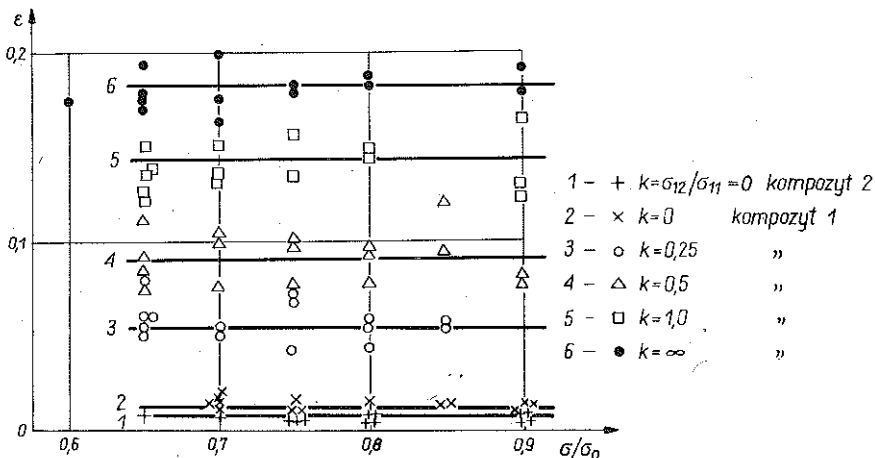
3. WYNIKI BADAŃ

W przeprowadzonych badaniach osie układu współrzędnych prostokątnych 1, 2, 3, były na stałe związane z tworzywem i pokrywały się z głównymi osiami anizotropii. Oś 1 pokrywała się z kierunkiem osnowy, 2 — z kierunkiem wątka, a 3 — z kierunkiem prostopadłym do warstw tkaniny w kompozycie.

W pracy [7] opisano szczegółowo wyniki badań podstawowych własności mechanicznych badanych kompozytów, własności anizotropowych, zależności stałych sprężystych i wytrzymałości granicznej od kierunku obciążenia oraz wyniki badań długotrwałej wytrzymałości.



Rys. 1. Krzywe długotrwałej wytrzymałości w przypadku rozciągania kompozytu 2 i skręcania kompozytu 1; Δ — kompozyt 1, \circ — kompozyt 2



Rys. 2. Zależność odkształceń niszczących od naprężeń

Na rys. 1 przedstawiono przykładowo wyniki badań w postaci krzywych wytrzymałości czasowej $\sigma/\sigma_0 = [\sigma(\tau^{1/2})]/\sigma_0$ dla przypadku skręcania kompozytu 1 i rozciągania wzdłuż włókien kompozytu 2. Punkty na wykresach są wynikami badań poszczególnych próbek.

Zależność odkształceń niszczących od naprężeń, dla przyjętych w badaniach rodzajów obciążeń dwóch kompozytów, przedstawia rys. 2. Odkształcenia niszczące w złożonych stanach naprężenia przyjęto jako maksymalne odkształcenia wyznaczone z koła odkształceń na podstawie wyników z prób ε_{11} , ε_{22} , ε_{12} . Na rys. 2 punkty przedstawiają wyniki badań poszczególnych próbek. Odkształcenia niszczące dla różnych obciążeń nieznacznie zależą od naprężeń i można je w przybliżeniu aproksymować liniami prostymi.

4. PRÓBA TEORETYCZNEGO OPISU WARUNKÓW DŁUGOTRWAŁEJ WYTRZYMAŁOŚCI W ZŁOŻONYM STANIE NAPRĘŻENIA

J. J. GOLDENBLAT i W. A. KOPNOW w pracy [3] przedstawili kryterium długotrwałej wytrzymałości dla materiałów anizotropowych w złożonym stanie naprężenia w postaci

$$(4.1) \quad A_{ik} \sigma_{ik} + (A_{pqrs} \sigma_{pq} \sigma_{rs})^{\frac{1}{2}} = e^{-\lambda \tau}$$

Z zależności (4.1) wynika, że przy $\tau = 0$ otrzymuje się kryteria wyężeniowe, opisujące natychmiastowe złożone stany naprężenia, a przy $\tau \rightarrow \infty$ wszystkie naprężenia są równe zeru; z zależności tej nie można więc wyznaczyć wytrzymałości długotrwałej.

Analiza hipotez wyężeniowych dla materiałów anizotropowych przedstawiona w pracy [8] wykazała, że doświadczalne wyniki prób krótkotrwałych wyężenia badanych kompozytów epoksydowo-szklanych najlepiej opisuje kryterium GOLDENBLATA-KOPNOWA [3]. Do matematycznego opisu czasowej wytrzymałości w złożonym stanie naprężenia wykorzystano kryterium wyężeniowe Goldenblata-Kopnowa, w którym stałe materiałowe proponuje się uzależnić od czasowej wytrzymałości. Przyjmując kryterium wytrzymałości wg [3], napiszemy

$$(4.2) \quad A_{ik} \sigma_{ik} + (A_{pqrs} \sigma_{pq} \sigma_{rs})^{\frac{1}{2}} = 1.$$

Uwzględniając przyjęte założenie, przepiszemy równanie (4.2) w postaci następującej:

$$(4.3) \quad A_{ik} (\sigma_{0ik}(\tau)) \sigma_{ik} + (A_{pqrs} (\sigma_{0pq}(\tau), \sigma_{0rs}(\tau)) \sigma_{pq} \sigma_{rs}) = 1$$

dla $i, k = 1, 2, 3$ i $p, q, r, s = 1, 2, 3$, gdzie A_{ik} , A_{pqrs} oznaczają stałe określone przez wytrzymałość przy rozciąganiu, ściskaniu i skręcaniu.

Tablica 1

	Kompozyt 1							Kompozyt 2
$k = \sigma_{12}/\sigma_{11}$	0	0,25	0,5	1,0	∞	-0	0	
σ_{011} [MPa]	311,7	208,4	128,6	67,5	—	-285,2	508,9	
σ_{012} [MPa]	—	52,1	64,3	67,5	68,1	—	—	
σ_{11}^* [MPa]	202,6	131,4	79,6	41,4	—	-178,5	361,3	
σ_{12}^* [MPa]	—	32,8	39,8	41,4	41,6	—	—	
B	0,65	0,63	0,62	0,614	0,61	0,626	0,71	
α ($\tau = 1000$ h)	0,00283	0,00361	0,00325	0,00324	0,00297	0,00353	0,0037	
α ($\tau^{\frac{1}{2}} = 1$)	1,199	1,204	1,2397	1,2993	1,361	1,21	1,1698	

Doświadczalnie wyznaczone czasowe wytrzymałości kompozytu 1 można określić za pomocą równania (1.1), uogólnionego dla przypadku złożonego stanu naprężenia

$$(4.4) \quad \sigma_{0ik}(\tau) = \sigma_{0ik} (B_{ik} + C_{ik} e^{-\alpha_{ik}\tau}).$$

Wyliczone współczynniki wzoru (4.4) przedstawiono w tabelicy 1.

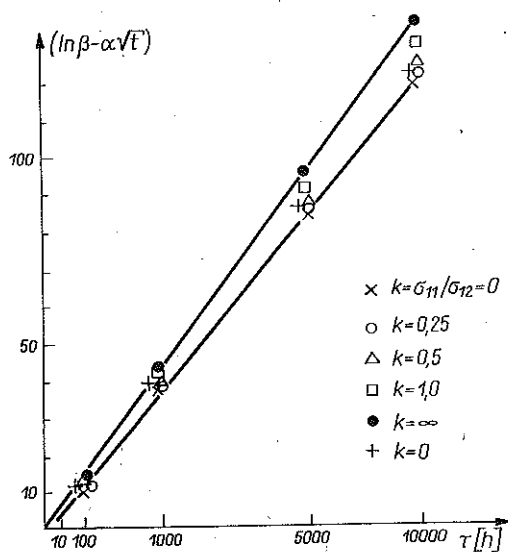
Wzór (4.4) z tak opisanymi współczynnikami dokładnie określa wytrzymałość czasową dla $\tau = 0, 1000$ [h] i ∞ , natomiast w całym przedziale czasowym dobrze opisuje wyniki doświadczalne wzór, w którym przyjmuje się $\tau^{1/2}$ zamiast τ . Wówczas zmieniają wartości tylko współczynniki α_{ik} . Zmodyfikowany wzór przyjmie postać

$$(4.5) \quad \sigma_{0ik}(\tau) = \sigma_{0ik} (B_{ik} + C_{ik} e^{-\alpha_{ik}\sqrt{\tau}}).$$

Przekształcamy wzór (4.5) do postaci

$$(4.6) \quad \ln \left(\frac{\sigma_0(\tau)}{\sigma_{0ik}} - B_{ik} \right) = \ln C_{ik} - \alpha_{ik} \sqrt{\tau}.$$

Zależność (4.6) przedstawiona jest na rys. 3; wynika z niej niewystarczające podobieństwo krzywych długotrwałej wytrzymałości, ponieważ rozrzut maksymalny wyników, uzyskanych z różnych rodzajów obciążeń, wynosi 12%. Dla zależności (4.6) w której występuje τ zamiast $\tau^{1/2}$, rozrzut wyników jest kilkanaście razy większy.



Rys. 3. Wykres funkcji $(\ln C_{ik} - \alpha_{ik} \sqrt{\tau}) = f(\sqrt{\tau})$

Dla płaskiego stanu naprężenia, zrealizowanego przez rozciąganie z jednoczesnym skręcaniem, równanie (4.3) w postaci rozwiniętej przedstawia się następująco:

$$(4.7) \quad A_{11}(\sigma_{011}(\tau))\sigma_{11} + (A_{1111}(\sigma_{011}^R(\tau), \sigma_{011}^C(\tau))\sigma_{11}^2 + 4A_{1212}(\sigma_{012}^S(\tau))\sigma_{12}^2)^{\frac{1}{2}} = 1.$$

Stałe materiałowe w równaniu (4.2) z [3] mają postać

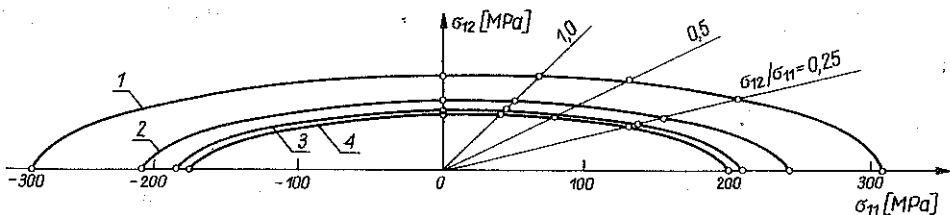
$$(4.8) \quad \begin{aligned} A_{11} &= \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\sigma_{11}^R} - \frac{1}{\sigma_{11}^C} \right), \\ A_{1111} &= \frac{1}{4} \left(\frac{1}{\sigma_{11}^R} + \frac{1}{\sigma_{11}^C} \right)^2, \\ A_{1212} &= \frac{1}{16} \left(\frac{1}{\sigma^S} + \frac{1}{\sigma^{-S}} \right)^2, \end{aligned}$$

gdzie σ_{11}^R oznacza wytrzymałość na rozciąganie tworzywa wzdłuż osi 1, σ_{11}^C wytrzymałość na ściskanie tworzywa wzdłuż osi 1 oraz σ^S wytrzymałość na skręcanie próbek rurkowych, których oś pokrywa się z kierunkiem 1.

Po podstawieniu ich do warunku wyężenia (4.7), otrzymano wytrzymałościach krótkotrwałych, wielkości (4.5), otrzymamy

$$(4.9) \quad \begin{aligned} A_{11} &= \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\sigma_{011}^R (B_{11}^R + C_{11}^R e^{-\alpha_{11}^R \sqrt{\tau}})} - \frac{1}{\sigma_{011}^C (B_{11}^C + C_{11}^C e^{-\alpha_{11}^C \sqrt{\tau}})} \right), \\ A_{1111} &= \frac{1}{4} \left(\frac{1}{\sigma_{011}^R (B_{11}^R + C_{11}^R e^{-\alpha_{11}^R \sqrt{\tau}})} + \frac{1}{\sigma_{011}^C (B_{11}^C + C_{11}^C e^{-\alpha_{11}^C \sqrt{\tau}})} \right)^2, \\ A_{1212} &= \frac{1}{4} \left(\frac{1}{\sigma_{012}^S (B_{12}^S + C_{12}^S e^{-\alpha_{12}^S \sqrt{\tau}})} \right)^2. \end{aligned}$$

Wykorzystując wartości zestawione w tabelicy 1, wyznaczono wielkości (4.9). Po podstawieniu ich do warunku wyężenia (4.7), otrzymano wytrzymałości



Rys. 4. Wytrzymałość czasowa kompozytu 1 dla płaskiego stanu naprężenia określona równaniem (4.7)

czasową kompozytu 1. Wyniki obliczeń przedstawiono na rys. 4, na którym punkty oznaczają średnie wyniki doświadczalne z 3—10 prób. Krzywa 1 przedstawia warunek wyężenia natychmiast po obciążeniu, 2 — warunek wyężenia po czasie obciążenia równym 1 [h], 3 — po czasie obciążenia 1000 [h] oraz 4 — graniczny warunek wyężenia przy długotrwałym obciążeniu.

5. WNIOSKI

1. Zmodyfikowane kryterium wyężenia materiałów anizotropowych (równanie (4.7)) dla czasowej wytrzymałości dobrze opisuje wyniki doświadczalne kompozytu 1.

2. Największą granicę długotrwałej wytrzymałości posiada kompozyt 2, który jest wzmocniony jednokierunkowo włóknami ciągłymi. Uwidacznia się tu rola włókien ciągłych jako nośnika w kompozycie.

3. Odkształcenia niszczące badanych kompozytów nieznacznie zależą od naprężeń przy długotrwałych obciążeniach, a bardzo wyraźnie zależą od rodzaju obciążenia.

LITERATURA CYTOWANA W TEKŚCIE

1. J. ZAWADZKI i in., *Problemy wyężenia i znużenia polimerów jako tworzyw konstrukcyjnych*, PWN, Warszawa 1978.
2. К. В. ЗАХАРОВ, *Длительная прочность анизотропных пластмасс в плоском напряженном состоянии*, ИЗВ, АН СССР, Механика твердого тела, Нр. 6, 1969.
3. И. И. ГОЛЬДЕНЕЛАТ, В. А. КОПНОВ, *Критерии прочности и пластичности конструкционных материалов*, Изд. Машиностроение, Москва 1968.
4. W. BEYER, *Herstellung und Eigenschaften Glasfaserverstärkter Kunststoffe*, München 1957.
5. S. OCHELSKI, *Analiza pełzania nieliniowych lepkosprężystych tworzyw anizotropowych w złożonej historii obciążenia*, Dodatek do Biul. WAT, 4, 1977.
6. S. OCHELSKI, *Metoda badań pełzania kompozytów polimerowych w złożonych stanach naprężenia*, I Sympozjum n.t. Zagadnienia Pełzania Materiałów, Białystok 1983.
7. S. OCHELSKI, *Badania długotrwałej wytrzymałości niektórych kompozytów polimerowych w płaskim stanie naprężenia*, Biul. WAT 3, 1986.
8. S. OCHELSKI, J. POLAŃSKI, *Wpływ prędkości obciążenia na powierzchnie plastyczności lepkosprężystego tworzywa ortotropowego*, Rozpr. Inż. 4, 1985.

РЕЗЮМЕ

ПРОЧНОСТЬ ЭПОКСИДНО-СТЕКЛЯННЫХ КОМПОЗИТОВ В СЛОЖНЫХ ДЛИТЕЛЬНЫХ НАГРУЖЕНИЯХ

Представлены результаты экспериментальных исследований временной прочности эпоксидно-стеклянных композитов, полученных из компонентов отечественного произ-

водства. Исследования касались ортотропного и трансверсально изотропного композита в сложных напряженных состояниях, реализованных путем растяжения с одновременным скручиванием. Исследовано влияние длительного нагружения на разрушающие напряжения и деформации исследуемых композитов. Предложено математическое описание длительной прочности анизотропных материалов.

SUMMARY

STRENGTH OF EPOXY-GLASS COMPOSITES UNDER PERMANENT
COMPLEX LOADING

Experimental results are presented concerning the strength of epoxy-glass composites produced from components of Polish production. Orthotropic and transversely isotropic composites were tested under combined loading consisting of simultaneous tension and torsion. The effect of long-lasting loading on the breaking stresses and deformations is analyzed. A mathematical description of limiting strength of anisotropic materials is proposed.

Praca została złożona w Redakcji dnia 13 czerwca 1985 r.
