

Izabella Hyla
Instytut Inżynierii Materiałowej

PROBLEM CHARAKTERYSTYK MECHANICZNYCH
POLIMERÓW ZBROJONYCH WŁÓKNAMI

Streszczenie. W pracy omówiono krótko niektóre metody wyznaczania charakterystyk mechanicznych kompozytów złożonych z polimerów i włókien szklanych oraz stalowych. Podano odpowiednie wzory, wykresy i zestawienia danych zarówno literaturowych jak i badań własnych.

Materiały kompozytowe znajdują się obecnie w fazie rozwoju, w związku z czym, obok licznych już ich zastosowań praktycznych, obserwuje się równocześnie rozwój prac badawczych i teoretycznych zmierzających do określenia racjonalnych metod obliczeń i oceny ich wytrzymałości, odkształcalności, efektów zniszczenia, zużycia i starzenia, a zwłaszcza pewności i współczynników bezpieczeństwa.

Zagadnienie prognozowania własności mechanicznych materiałów kompozytowych, zbrojonych włóknami o znanych charakterystykach mechanicznych, okazuje się jednym z ważniejszych przy opracowywaniu receptury dla nowo powstających kompozycji.

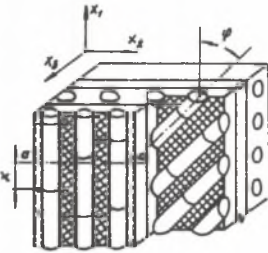
Materiały kompozytowe obejmują olbrzymi wachlarz różnego rodzaju kompozycji. W przedstawionej pracy zajęto się jedynie kompozytami, w których polimerową osnowę zbrojono włóknami. Rozpatrzono następujące przypadki zbrojenia:

- 1) zbrojenie krótkimi włóknami szklanymi rozmieszczonymi chaotycznie w stosunku do kierunku obciążenia,
- 2) zbrojenie włóknami stalowymi ciągłymi, ułożonymi względem siebie równolegle i skierowanymi zgodnie z kierunkami obciążeń,
- 3) zbrojenie mieszane, składające się zarówno z włókien szklanych jak i stalowych.

Przedstawiona praca jest fragmentem badań prowadzonych w zakresie projektowania nowych materiałów o odpowiednich charakterystykach mechanicznych i obejmuje jedynie niektóre zagadnienia związane z modułami sprężystości kompozytów zbrojonych włóknami. Wykorzystując modele obliczeniowe przytoczone w pracach [2] i [4], można określić charakterystyki mechaniczne polimerów zbrojonych zarówno włóknami krótkimi, ułożonymi jednokierunkowo lub chaotycznie, jak również zbrojonych włóknami ciągłymi.

W przypadku zbrojenia krótkimi włóknami szklanymi, materiał badany zamo-

delować można ośrodkiem warstwowym [2]. Poszczególne warstwy charakteryzują się tym, że zawierają zbrojenie jednokierunkowe, natomiast kierunki włókien w warstwach sąsiednich są przesunięte względem siebie o pewien kąt. Ilustruje to rys. 1 [2].



Rys. 1. Model do analizy własności mechanicznych tworzyw polimerowych zbrojonych krótkimi włóknami szklanymi

Zakłada się ponadto, że włókna zbrojące są ciałem sprężystym, izotropowym, że przekazywanie obciążeń od osnowy do włókien odbywa się poprzez naprężenie tnące na płaszczyznach rozdźwięku oraz że przy rozciąganiu w kierunku osi x_1 (rys. 1), wszystkie warstwy mają jednakowe średnie odkształcenie ε_1 i ε_2 . Wykorzystując poczynione założenia oraz stosując metodę przecięć, otrzymuje się następujące wyrażenia do określenia składowych macierzy podatności dla przypadku, gdy oś zbrojenia pokrywa się z kierunkiem osi x_1 [2].

$$a_{11} = \frac{1}{E_1} = \frac{1}{E_w \Gamma \beta; \varepsilon} \quad (1a)$$

$$a_{22} = \frac{1}{E_2} = \frac{(1 - \sqrt{\psi})E_w + \sqrt{\psi}E_o}{E_o [E_w (1 - \sqrt{\psi} + \psi) + (\sqrt{\psi} - \psi)E_o]} - \frac{(\nu_o E_w - \nu_w E_o)^2 (1 - \psi) \psi}{E_o E_w [\psi E_w + (1 - \psi)E_o]} \quad (1b)$$

$$a_{12} = a_{21} = -\frac{\nu_{12}}{E_2} = -\frac{\nu_{21}}{E_1} = \frac{(1 - \psi)\nu_o + \psi \nu_w}{E_w \Gamma \beta; \varepsilon} \quad (1c)$$

$$f_{\beta; \varepsilon} \left\{ \begin{array}{l} \frac{E_2}{E_w} \text{ przy } 0 \leq \beta \leq \frac{E_2}{E_w} \frac{\varepsilon}{\varepsilon_w} \\ \frac{1}{2} \beta \psi + (1 - \psi) \frac{E_o}{E_w} \text{ przy } \frac{E_2}{E_w} \frac{\varepsilon}{\varepsilon_w} \leq \beta \leq \frac{\varepsilon}{\varepsilon_w} \\ \psi \frac{\varepsilon}{E_w} (2\beta)^{-1} + \psi (1 - \frac{\varepsilon}{E_w} \beta^{-1}) + (1 + \psi) \frac{E_o}{E_w} \text{ przy } \beta \geq \frac{\varepsilon}{\varepsilon_w} \end{array} \right. \quad (2)$$

$$\beta = \frac{2l}{kd} \quad (3)$$

$$k = \frac{G_w}{l}, \quad (4)$$

gdzie:

E_1 - moduł sprężystości warstwy w kierunku osi x_1 ,

l - długość włókna,

G_w - wytrzymałość na rozciąganie włókna,

- τ - naprężenie styczne na płaszczyźnie rozdziału,
- \bar{d} - średnica włókna,
- ϵ - odkształcenie względne kompozycji przy rozciąganiu,
- ϵ_w - graniczne wydłużenie względne włókna przy rozciąganiu,
- ψ - udział objętościowy włókien zbrojących w kompozycji,
- E_o - moduł sprężystości polimerowej osnowy,
- E_2 - moduł sprężystości rozpatrywanej warstwy w kierunku osi x_2 ,
- ν_o - liczba Poissona dla osnowy,
- ν_w - liczba Poissona dla włókna.

Dla warstwy, której oś zbrojenia nachylona jest pod kątem φ do kierunku osi x_1 , odpowiednie współczynniki konieczne do analizy stanu naprężeń mają następującą postać [5]:

$$a_{\varphi 11} = \frac{1}{E_{\varphi 1}} = \frac{\cos^4 \varphi}{E_1} + \left(\frac{1}{G_{12}} - \frac{2\nu_{21}}{E_1} \right) \cos^2 \varphi \sin^2 \varphi + \frac{\sin^4 \varphi}{E_2} \quad (5a)$$

$$a_{\varphi 22} = \frac{1}{E_{\varphi 2}} = \frac{\sin^4 \varphi}{E_1} + \left(\frac{1}{G_{12}} - \frac{2\nu_{21}}{E_1} \right) \cos^2 \varphi \sin^2 \varphi + \frac{\cos^4 \varphi}{E_2} \quad (5b)$$

$$a_{\varphi 12} = \frac{-\nu_{\varphi 21}}{E_{\varphi 1}} = -\frac{\nu_{\varphi 12}}{E_{\varphi 2}} = \frac{1}{4} \left(\frac{1+\nu_{21}}{E_1} + \frac{1+\nu_{12}}{E_2} - \frac{1}{G_{12}} \right) \sin^2 2\varphi - \frac{\nu_{21}}{E_1} \quad (5c)$$

Na skutek różnic we własnościach sprężystych poszczególnych warstw przy wspólnym odkształceniu w kierunku osi x_1 , każda warstwa znajduje się będzie pod działaniem naprężeń, które powiązane są zależnością

$$\epsilon_i = \epsilon_{\varphi i} = \sum_{j=1}^2 a_{\varphi ij} \sigma_{\varphi j}, \quad (i=1,2) \quad (6)$$

przy tym winny być spełnione równości

$$\sigma_1 = \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sigma_{\varphi 1} d\varphi \quad (7)$$

$$0 = \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sigma_{\varphi 2} d\varphi, \quad (8)$$

gdzie:

σ_1 - naprężenie rozciągające w kierunku osi x_1 .

Oznaczając

$$\bar{a}_{ij} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{a_{\varphi ij} d\varphi}{a_{\varphi 11} a_{\varphi 22} - a_{\varphi 12}^2}, \quad (i,j=1,2) \quad (9)$$

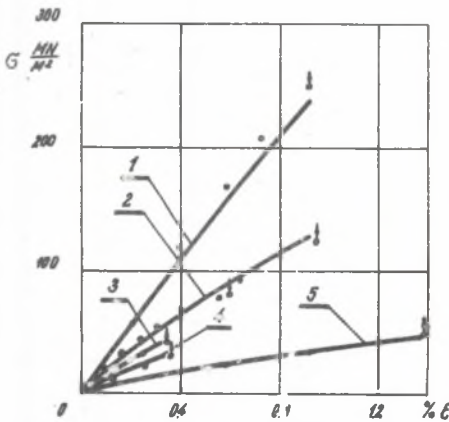
otrzymujemy wyrażenie, pozwalające obliczyć moduł sprężystości kompozycji zbrojonej chaotycznie w płaszczyźnie izotropii $x_1 - x_2$.

$$\bar{E}_1 = \bar{a}_{11}^{-1} \left[\bar{a}_{22} \bar{a}_{11} - \bar{a}_{12}^2 \right] \quad (10)$$

Obliczenia szczegółowe charakterystyk mechanicznych przy zastosowaniu omówionej metody wymagają użycia maszyny cyfrowej. Przebieg krzywych rozciągania dla zbrojenia włóknami krótkimi, skierowanymi pod różnym kątem w stosunku do osi kierunku obciążenia, ilustruje rys. 2 [2]. Przedstawione

na nim krzywe rozciągania 1-4, narysowane w oparciu o obliczenia przeprowadzone na maszynie cyfrowej, wykazują dużą zgodność z danymi eksperymentalnymi [2].

Przy zbrojeniu włóknami ciągłymi rozkład naprężeń w kompozycie można ustalić, posługując się również metodą przecięć. Rys. 3 ilustruje model obliczeniowy omawianego kompozytu [4]. Zastosowana tutaj metoda przecięć, dzieląca wybrany, powtarzający się element przekroju, na cienkie warstwy równoległe do płaszczyzny $x_1 x_2$ (przy układzie osi jak na rys. 3), prowadzi przy założeniu, że odkształcenie wszystkich warstw jest jednakowe, do układu równań pozwalających opisać stan naprężeniowo-odkształceniowy w poszczególnych warstwach, a następnie w całym kompozycie [4]. Do obliczenia modułu sprężystości kompozytu zbrojonego włóknami ciągłymi stosowany bywa jednak w praktyce najczęściej wzór Dietza [6]:



Rys. 2. Wykresy rozciągania σ - ϵ dla kompozytów zbrojonych włóknami krótkimi

1 - orientacja włókien zgodna z kierunkiem osi x_1 , 2 - włókna rozmieszczone chaotycznie, 3 - włókna nachylone pod kątem 45° w stosunku do kierunku obciążenia, 4 - włókna nachylone pod kątem 90° w stosunku do kierunku obciążenia, 5 - osnowa polimerowa niezbrojona P-2M

$$\bar{E}_1 = \bar{E}_{1w} \psi + \bar{E}_0 (1 - \psi) \quad (11)$$

Jeżeli uwzględni się jednak bardzo niski moduł sprężystości osnowy w stosunku do modułu sprężystości zbrojenia, to wzór ten przyjmie postać jeszcze bardziej uproszczona

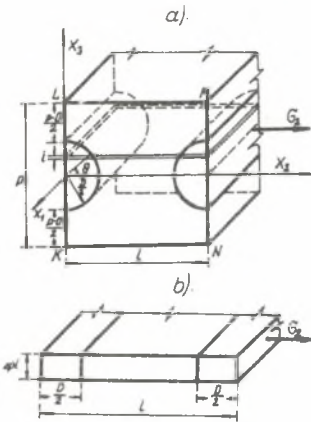
$$\bar{E}_1 \approx \psi \bar{E}_{w1} \quad (11a)$$

gdzie:

E_{w1} - średni moduł sprężystości włókien wzmacniających,

E_1 - średni moduł sprężystości kompozytu,

ψ - procentowy udział objętościowy fazy zbrojeniowej.



Rys. 3. Element obliczeniowy przekroju poprzecznego kompozytu zbrojonego włóknami ciągłymi

Moduły sprężystości E_1 , obliczone wg wzoru (11a), wykazują stosunkowo dużą zgodność z eksperymentem. Ilustrują to dane zebrane w tabelicy 1 [4].

Coraz częściej jednak spotkać można kompozycje o zbrojeniu mieszanym. Osnowy polimerowe zbroi się równocześnie włóknami szklanymi i stalowymi, bowiem kompozycja stal-szkło-żywica prowadzi do laminatów sztywniejszych od laminatów zbrojonych tylko włóknem szklanym i lżejszych od zbrojonych tylko włóknem stalowym.

Zwiększenie sztywności materiałów o zbrojeniu mieszanym wyrazić można zmianę współczynnika δ , wyrażającego stosunek modułu sprężystości kompozytu o zbrojeniu mieszanym do modułu sprężystości materiału wzmocnionego tylko włóknem szklanym [6]

$$\delta = \frac{E_{w/s}}{E_s} = \frac{\psi_w E_w + \psi_s E_s + \psi_o E_o}{\psi_w E_w + \psi_o E_o} \quad (12)$$

gdzie:

E - moduł sprężystości

ψ - procentowy udział objętościowy

symbole: w , o , s oznaczają kolejno: włókno stalowe, osnowę, włókno szklane.

Indeks w/s dotyczy zbrojenia mieszanego (włókno stalowe i włókno szklane) Zmianę powyższego współczynnika w zależności od udziału objętościowego fazy zbrojącej dla drutów stalowych o różnych modułach sprężystości ilustrują wykresy na rys. 4.

Porównawcze wartości eksperymentalne otrzymano w wyniku przeprowadzonych badań wytrzymałościowych dla różnego rodzaju kompozycji.

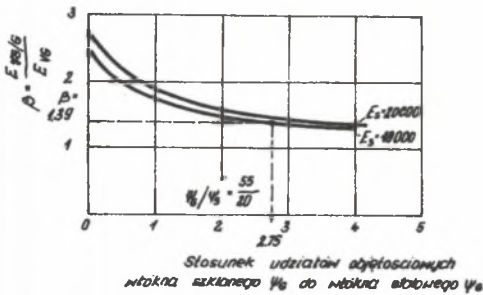
Badane próbki obejmowały czystą osnowę polimerową, włókno stalowe oraz laminat zbrojony tylko matą szklaną, tylko włóknem stalowym oraz równocześnie jednym i drugim włóknem, przy różnych udziałach objętościowych zbrojenia.

Próbki wykonane w kształcie prętów o wymiarach 8,5 x 3 x 150 mm poddano statycznej próbie rozciągania na maszynie wytrzymałościowej f-my INSTRON, stosując szybkości obciążeń $V=5$ mm/min. Temperatura pomiaru wynosiła 21°C

Tablica 1

Wpływ zbrojenia ciągłymi włóknami grafitowymi
na moduł sprężystości kompozytu 4

Zbrojenie		Osnowa			Kompozyt	
Nazwa	Moduł E_w 10^{-5} N/mm^2	Nazwa	Moduł E_o 10^{-6} N/mm^2	Udział zbro- jenia	$E_1 \cdot 10^{-6}$ N/mm^2	
					eks- per.	wg r. 10
Thornel-25	17,6	ERL 2256/MPDA	0,400	0,5	7,78	9,00
Thornel-40	28,2	ERL 2256/MPDA	0,400	0,65	17,30	18,40
"	"	ERLA 4617	0,546	0,47	13,85	13,56
"	"	EPON 828/1031	0,355	0,68	18,60	19,30
"	"	"	0,0355	0,59	15,45	16,80
Thornel-50	35,0	EPON 828	0,350	0,50	15,80	17,67



Rys. 4. Zależność stosunku modułów sprężystości kompozytu o zbrojeniu mieszanym i zbrojeniu włóknem szklanym od udziałów objętościowych poszczególnych komponentów

Jak widać z uzyskanych wyników, stosowanie zbrojenia mieszanego pozwala otrzymywać materiały o stosunkowo wysokich własnościach wytrzymałościowych i niskich ciężarach właściwych. O ciężarze właściwym kompozytu decyduje bowiem przede wszystkim wysokość udziału objętościowego w zbrojeniu drutów stalowych. W jakim zakresie wpływają poszczególne rodzaje zbrojenia na zmianę modułu sprężystości kompozytu w porównaniu z modułem sprężystości osnowy ilustrują najlepiej wykresy na rys. 5 [1]. Przytoczone wy-

Próbki wykonane zostały na bazie żywicy poliestrowej nienasyconej o symbolu G-UP.AS23 33. Jako zbrojenia użyto drutów stalowych o średnicy $\phi = 250$ mm oraz maty szklanej. Stosowano różne udziały objętościowe zbrojenia, co przykładowo zilustrowano w tablicy 2.

W tablicy tej zebrano średnie wartości wielkości mechanicznych, uzyskanych w statycznej próbie rozciągania dla niektórych spośród badanych materiałów.

Stosowanie zbrojenia mieszanego, jak widać z zestawienia w tablicy 2, znacznie poszerzają możliwości sterowania charakterystykami mechanicznymi materiału finalnego poprzez zwiększenie ilości kombinacji przy doborze odpowiednich proporcji w udziałach poszczególnych komponentów.

LITERATURA

- [1] Knauer B.: Maschinenbautechnik 1973 nr 11, s. 501.
- [2] Motawkin A.M., Kalinka A., Zeleszow W.A.: Mech. Polimerow 1974 nr 1, s. 47.
- [3] Skudra A.M., Buławs F.: Połzuczet i statističeskaja ustałost armirovannyh płaistikow, Riga 1971.
- [4] Buławs F., Auzukałus W., Skudra A.M.: Mech. Polimerow 1972 nr 4, s.47.
- [5] Ambareumjan S.A.: Teoria anizotropnyh płastin, Moskwa 1967.
- [6] Kleinholz R.: VDI - Z 1974 nr 5, s. 386.
- [7] Knauer B.: Jahresbericht 1971, Dresden T.U.

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛИМЕРОВ АРМИРОВАННЫХ ВОЛОКНАМИ

Р е з ю м е

В данной работе коротко рассматриваются некоторые методы определения механических характеристик композиционных материалов на основе полимерной матрицы армированной стекловолокном и стальным волокном.

Приводятся соответствующие расчетные формулы, графики и сопоставления литературных данных и данных полученных в результате собственных экспериментов.

SOME PROBLEMS OF THE MECHANICAL CHARACTERISTICS OF FIBRE REINFORCED COMPOSITES WITH POLIMER MATRICES

S u m m a r y

Some methods of determining the mechanical characteristics of glass and steel fibre reinforced composites with polimer matrices have been discussed.

The adequate formulae, graphs and comparisons of data taken from literature and own experiments have been given.