

ENERGETYCZNA INTERPRETACJA DEKOHEZJI RUR Z LAMINATU EPOKSYDOWO-SZKLANEGO

MARIAN NOWAK i IRENEUSZ JERZYK (WROCLAW)

Zaproponowano metodę określania krytycznego obszaru kąta anizotropii, w którym rury z laminatu o badanej strukturze i stanie naprężenia nie powinny być eksploatowane. Metoda polega na obliczaniu energii aktywacji U_0 laminatu i porównaniu jej z analogiczną wielkością żywicy i szkła. Stwierdzono, że przy obciążeniu rury ciśnieniem wewnętrznym istnieje taki kąt anizotropii α_{gr} , poniżej którego U_0 laminatu jest mniejsze od U_0 żywicy i że w tym przypadku najslabszym ogniwem wytrzymałościowym rury jest granica faz (powierzchnia rozdziału) i warstwa graniczna.

SPIS WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

- τ żywotność,
- τ_0 stała, bliska okresowi drgań własnych atomu (w obliczeniach przyjęto $\tau_0 = 10^{-12}$ [s]),
- U_0 bariera energetyczna odpowiadająca energii aktywacji procesu termodestrukcji (zrywania wiązań chemicznych),
- γ współczynnik strukturalny, zależny od parametrów budowy wewnętrznej tworzywa i nierównomierności rozkładu naprężeń wewnętrznych,
- σ naprężenie [MPa],
- T temperatura [K],
- k stała Boltzmanna ($k = 1,38 \cdot 10^{-26}$ [kJ/K]),
- N_A liczba Avogadro ($N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ [1/mol]),
- σ_w naprężenie we włóknach,
- σ_φ naprężenie obwodowe obliczone ze wzoru

$$\sigma_\varphi = \frac{D-g}{2g} p_r = 5,7500 p_r,$$

- p_r ciśnienie rozrywające,
- $Z_{rj}(S)$ } granica zmęczenia przy próbie tętniącego rozciągania w cyklu
- $Z_{rj}(P)$ } sinusoidalnym (S) i prostokątnym (P),
- α_i kąt anizotropii (rys. 1) albo kąt nawinięcia zbrojenia,
- τ_{yz} naprężenie styczne na granicach między warstwami (warstwa = pasmo żywicy + pasmo włókien szklanych).

1. WSTĘP

Rury z tworzyw sztucznych (tablica 1) są wartościowym pod względem konstrukcyjnym substytutem rur z materiałów konwencjonalnych, a szczególnie w tych przypadkach, w których wymagana jest odporność na agresywne środki chemiczne. Najwięcej rur produkuje się z termoplastycznych tworzyw sztucznych, a następnie z tworzyw termoutwardzalnych zbrojonych (np. włóknami ciągłymi). Te ostatnie posiadają trzy ważne zalety: istnieje możliwość dostosowania własności wytrzymałościowych do danego rodzaju obciążenia przez zmianę kąta anizotropii α_i ; materiał i element konstrukcyjny (rura) powstają jednocześnie oraz wytrzymałość mechaniczna jest wysoka (tablica 2 i 3) nie tylko w porównaniu z rurami z tworzyw termoplastycznych [1-3], ale także z rurami stalowymi.

Przybliżona metoda analitycznego określania optymalnych parametrów geometryczno-technologicznych (strukturalnych) rur z laminatu o skrzyżowanych pasmach zbrojenia (wzmocnienia) jest w zasadzie znana [4]. Natomiast

Tablica 1. Materiały stosowane do produkcji rur oraz przykładowe wartości parametrów τ_0 i U_0 występujących w równaniu Żurkova [11]

Materiał	τ_0 [s]	U_0
		$\left[\frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \right]$
Polietylen	10^{-13}	109
Polichlorek winylu	10^{-12}	147
Poliamid	10^{-12}	188
Polipropylen	10^{-13}	120
Szko silikonowe	—	330-380
Włókna szklane-silikonowe	10^{-12}	350-380
Laminat	$10^{-11}-10^{-14}$	138
Żywice PN-1 i PN-2	10^{-12}	180-210

Tablica 2. Własności mechaniczne badanych rur ⁽¹⁾

Własności	Kąt anizotropii α_i			
	15°	23°	32°	45°
Wytrzymałość na rozrywanie przy ciśnieniu wewnętrznym R_p [MPa]	26,1	41,3	51,4	66,5
Wytrzymałość na rozciąganie rur w całości R_z [MPa]	680 ⁽²⁾	458	281	152
Ciśnienie rozrywające p_r [MPa]	4,54	7,13	8,94	11,57
Granica zmęczenia Z_{rj} ($5 \cdot 10^6, S$) [MPa]	9,3	18,4	28,6	43,5

⁽¹⁾ Producent rur: Instytut Elektrotechniki, Zakład Doświadczalny Elementów Elektroizolacyjnych w Międzyzlesiu (k. Kłodzka).

⁽²⁾ Brak złomu z powodu niszczenia części chwytowej próbki.

Tablica 3. Analityczny opis wyników pomiaru wytrzymałości na rozrywanie i czasowej wytrzymałości na pełzanie przy ciśnieniu wewnętrznym oraz granicy zmęczenia w cyklu sinusoidalnym i prostokątnym

Własności	n	Równania
Wytrzymałość na rozrywanie przy ciśnieniu wewnętrznym	28	$R_{\varphi} = 8,6309 + 1,3111\alpha_i$
Granica zmęczenia w cyklu sinusoidalnym ($f = 5,5$ Hz; $R = 0,2$; baza $N_G = 5 \cdot 10^6$ cykli)	73	$Z_{rj}(S) = -7,8333 + 1,1400\alpha_i$
Granica zmęczenia w cyklu prostokątnym ($f = 1$ Hz; $R = 0$; baza $N_G = 5 \cdot 10^6$ cykli)	67	$Z_{rj}(P) = -5,0477 + 0,9949\alpha_i$
Czasowa wytrzymałość na pełzanie przy ciśnieniu wewnętrznym, $N_G = 5 \cdot 10^6$ [s]	70	$R_{z/\tau} = -3,6576 + 1,2039 \alpha_i$

Przedział ważności równań $10^\circ \leq \alpha_i \leq 45^\circ$.

Wymiar naprężeń [MPa].

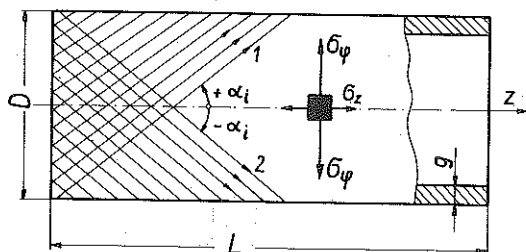
Współczynniki równań $R_{\varphi}, \dots, R_{z/\tau}$ określono metodą najmniejszych kwadratów.

Liczba badanych próbek n .

przydatną w analizie i doświadczalnictwie byłaby również taka metoda, która umożliwiłaby szybkie uzyskanie informacji wytrzymałościowych o rurach z małymi kątami anizotropii, niszczonech zmiennym naprężeniem obwodowym. Taką pożyteczną metodą oceny wartości użytkowej rur z laminatu może być, według propozycji autorów, wykres energii aktywacji, skonstruowany na podstawie badań rur na pełzanie przy ciśnieniu wewnętrznym i obliczeń wg wzoru (3.3) oraz wykresy energii aktywacji zbrojenia i osnowy.

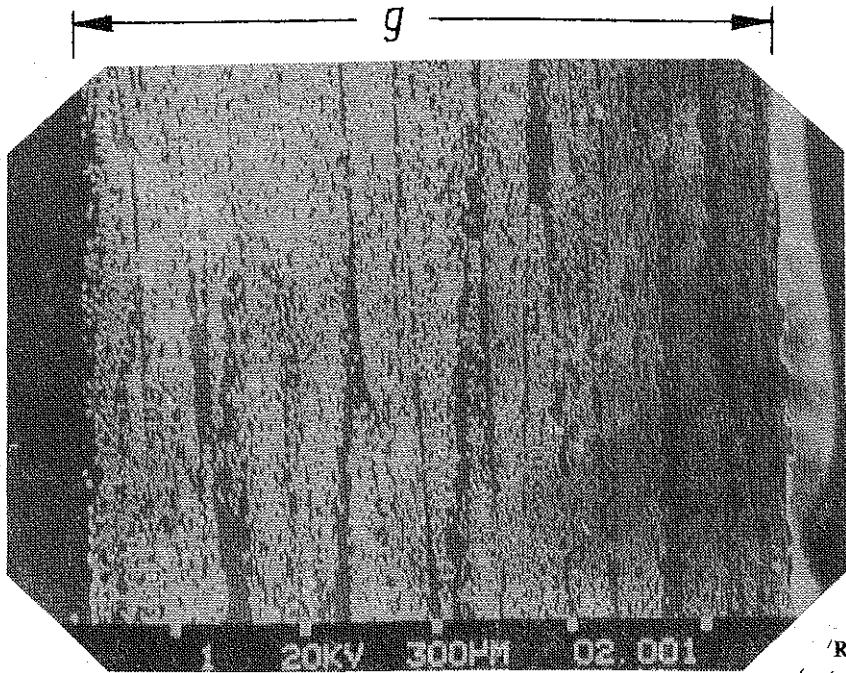
2. OPIS MATERIAŁU I BADAŃ

Wykonano cztery rodzaje rur (o stałych wymiarach $D \times g = 25 \times 2$ mm) różniące się kątem nawinięcia zbrojenia α_i — kątem anizotropii (rys. 1). Ciągłe włókna szklane o średnicy od 8 do 10 μm nawijano (na obracający

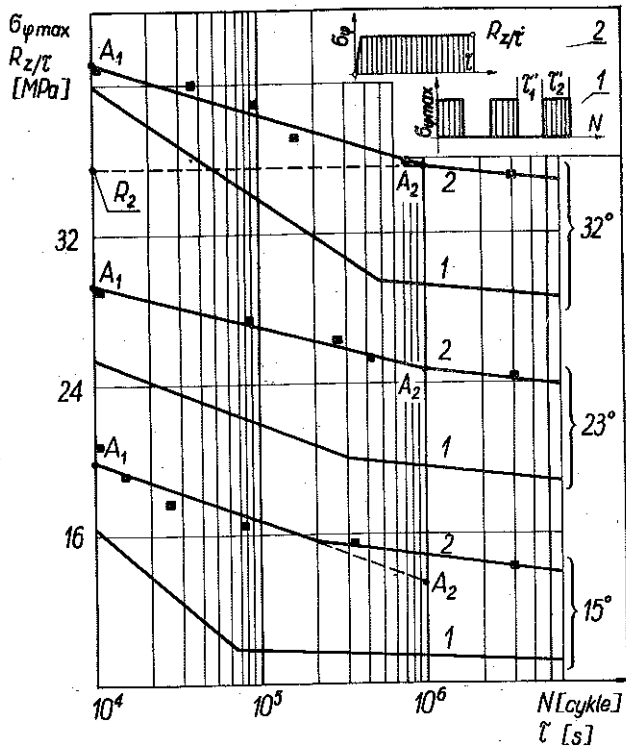


Rys. 1. Wymiary próbki do badań doraźnych oraz do badań na zmęczenie i pełzanie:

$$D \times g \times L = 25 \times 2 \times 350 \text{ mm}; \sigma_z \approx 0,05 \sigma_{\varphi}.$$



Rys. 2.
(patrz s. 105)



Rys. 3.
(patrz s. 105)

się rdzeń po linii śrubowej) pasmami o zawartości około 16 włókien. Na grubości ścianki rury znajduje się od 10 do 12 pasm (rys. 2). Udział objętościowy zbrojenia (wzmocnienia) wynosi $V_w = 0,44$.

Dla każdego kąta anizotropii α_i skonstruowano wykresy zmęczenia przy cyklu sinusoidalnym $[Z_{r,j}(S)]$ i prostokątnym $[Z_{r,j}(P)]$ oraz wykresy czasowej wytrzymałości na pełzanie przy ciśnieniu wewnętrznym $R_{z/\tau}$ (rys. 3).

Za miarę trwałości (żywności) rur przyjęto liczbę cykli N oraz czas τ do utraty zdolności pełnienia przez nie założonej funkcji, tzn. utratę szczelności.

Wykresy zmęczenia (rys. 3, program obciążenia 1) informują o wytrzymałości rur z laminatu na zmienne ciśnienie wewnętrzne oraz o zmianie granicy zmęczenia $Z_{r,j}$ w zależności od kąta nawinięcia zbrojenia. Wykresy czasowej wytrzymałości na pełzanie $R_{z/\tau}$ (rys. 3, program obciążenia 2) umożliwiają natomiast określenie wartości energii U_o aktywacji laminatu i podjęcie analizy wytrzymałościowej w aspekcie energetycznym. Równoległe prowadzenie badań na zmęczenie rur przy ciśnieniu wewnętrznym, zmieniającym się wg cyklu sinusoidalnego i prostokątnego (rys. 3, program 1), ma na celu zbadanie skali porównywalności granic zmęczenia $Z_{r,j}(S)$ i $Z_{r,j}(P)$ oraz rozszerzenie pola interpretacji wyników pomiaru.

Obserwowano rozwój pęknięć statycznych (pełzanie) i zmęczeniowych i stwierdzono, że przebiegają one od powierzchni wewnętrznej po granicach faz (rys. 4) lub przez pasma żywicy (rys. 5).

Optymalny wybór konstrukcji rury z laminatu do danego stanu naprężenia wynika z dwóch równań — pierwszej i drugiej zasady konstruowania struktur skokowo niejednorodnych o skrzyżowanych pasmach zbrojenia [4]

$$\tau_{yz} = 0, \quad \sigma_z = \sigma_\phi \operatorname{ctg}^2 \alpha_i,$$

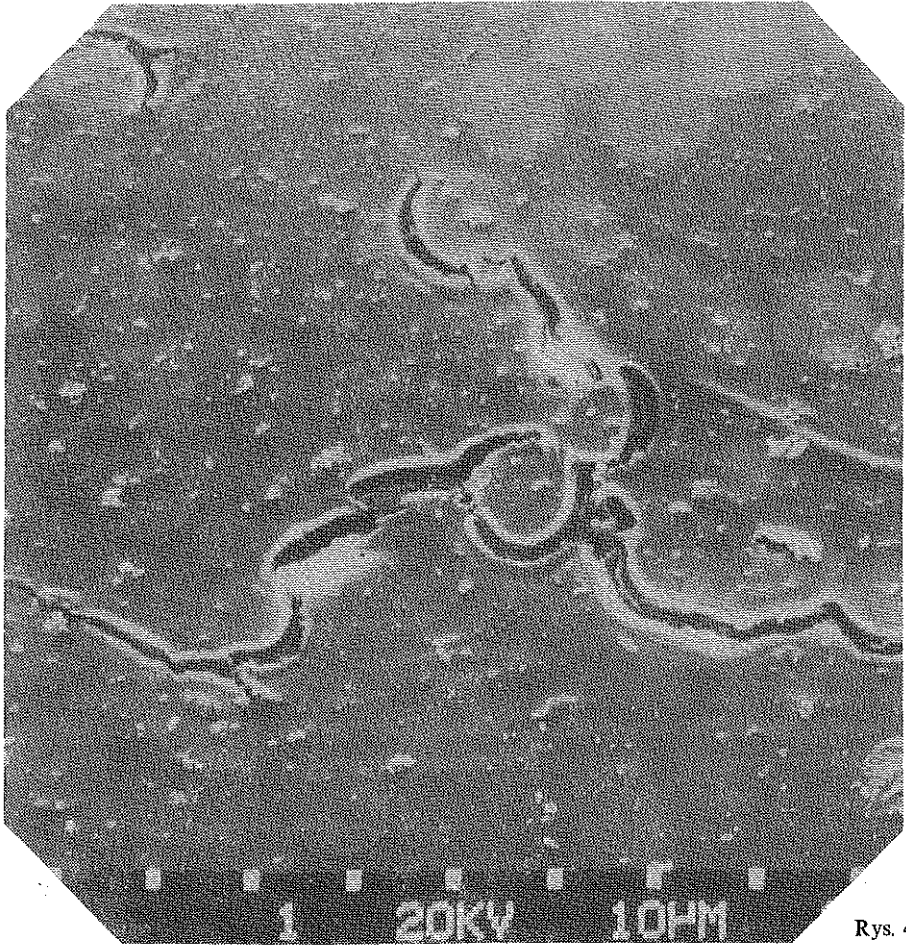
gdzie

$$\tau_{yz} = \sigma_w V_w \left(\frac{\delta_1 z_1}{\delta_1 z_1 + \delta_2 z_2} \sin \alpha_1 \cos \alpha_1 - \frac{\delta_2 z_2}{\delta_1 z_1 + \delta_2 z_2} \sin \alpha_2 \cos \alpha_2 \right).$$

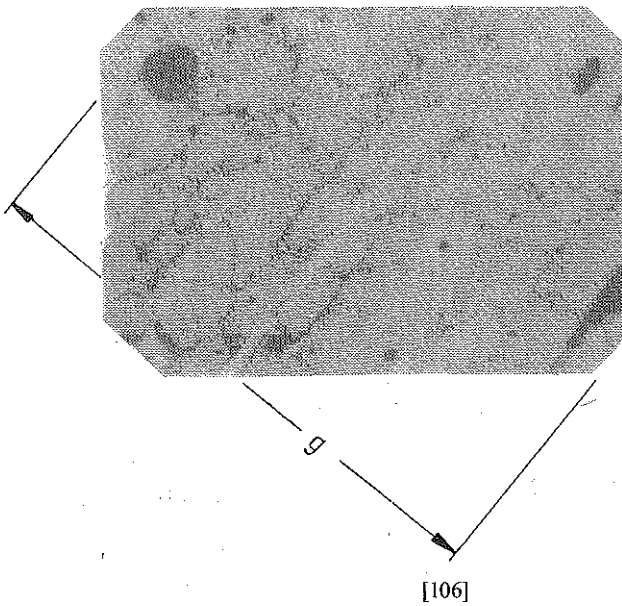
Nl przykład aby rura zamknięta ($\sigma_z = 0,5 \sigma_\phi$) obciążona ciśnieniem wewnętrznym była optymalnie skonstruowana pod względem wytrzymałościowym

Rys. 2. Struktura wewnętrzna laminatu (pow. 50 ×): nośnik — ciągłe włókno szklane typu ER-2003 P/D 30 p (z importu); lepiszcze (ciemne pasma) — żywica epoksydowa Epidian 5 z utwardzaczem Z-1 (utwardzenie na zimno); grubość ścianki rury $g = 2$ mm.

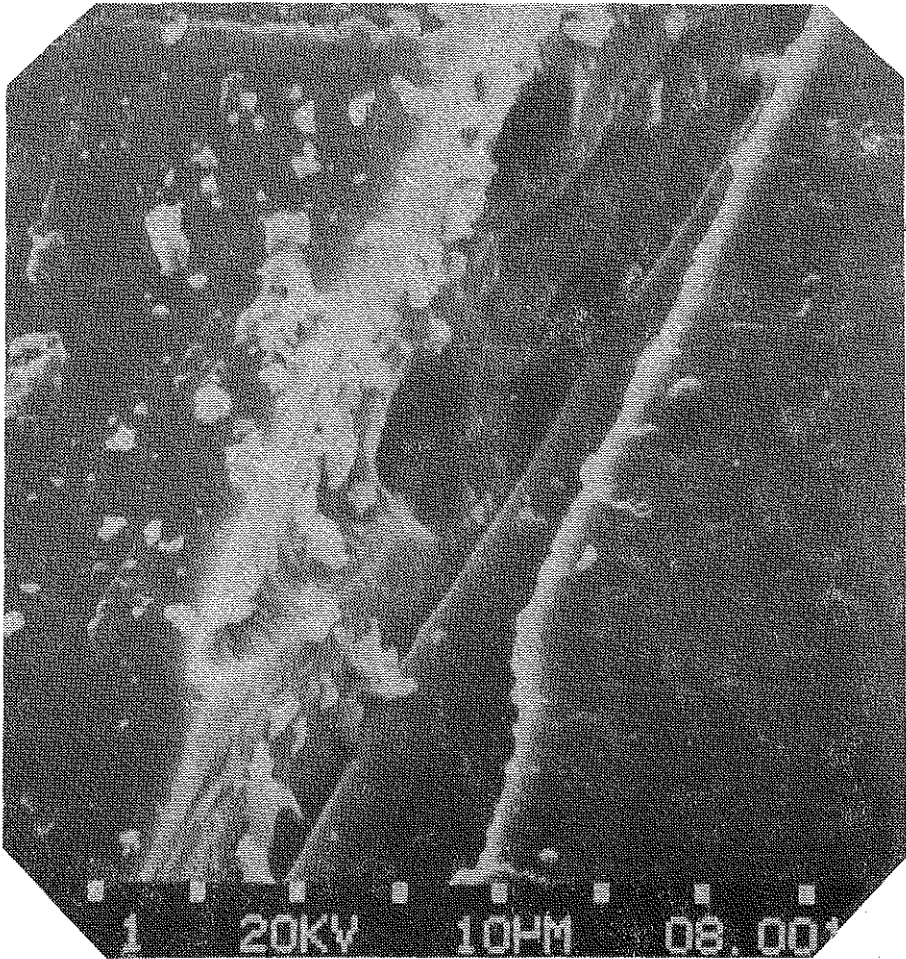
Rys. 3. Wykresy zmęczenia ($\sigma_{\phi \max} - \log N$): program obciążania 1 — ($\tau'_1 = \tau'_2 = 0,5$ [s]; baza $N_G = 5 \cdot 10^6$ cykli; T — czas trwania jednego cyklu naprężeń) i wykresy czasowej wytrzymałości na pełzanie przy ciśnieniu wewnętrznym ($R_{z/\tau} - \log \tau$); program obciążenia 2 — (baza $N_G = 5 \cdot 10^6$ [s]) dla różnych kątów anizotropii α_i : czarne kwadraciki — średnia arytmetyczna ($n = 3 - 5$) mierzonej wielkości ($R_{z/\tau}$).



Rys. 4.
(patrz s. 107)



Rys. 5.
(patrz s. 107)



Rys. 6. Pojedyncze włókno w osnowie (żywicy); widoczne przestrzenie kapilarne oraz kratery po wyciągniętych włóknach (pow. 1720 ×)

Rys. 4. Pęknięcia zmęczeniowe przebiegające po powierzchniach rozdziału włókno/żywica (pow. 1720 ×); w próbce powstaje równocześnie kilka źródeł pęknięć

Rys. 5. Przebieg pęknięć zmęczeniowych na grubości ścianki rury (ciemne żyłki) po pasmach żywicy i granicach pasm (pow. 55 ×)

powinny być spełnione następujące warunki:

jednakowe kąty skrzyżowania pasm zbrojenia (rys. 1)

$$(2.1) \quad \alpha_1 = 55^\circ,$$

$$(2.2) \quad \alpha_1 = |\alpha_2|;$$

jednakowa grubość pasm zbrojenia

$$(2.3) \quad \delta_1 = \delta_2;$$

jednakowa liczba pasm po każdej stronie (w kierunku 1 i w kierunku 2)

$$(2.4) \quad z_1 = z_2.$$

Badana struktura laminatu odpowiada warunkom (2.2), (2.3) i (2.4), a więc jest spełnione tylko równanie $\tau_{yz} = 0$.

Włókna szklane nie tworzą monolitycznego połączenia z żywicą (rys. 6 oraz [5]) i między nimi istnieją przestrzenie kapilarne. Jest to najpoważniejsza wada materiałów zbrojonych włóknem (ciętym lub ciągłym) tak pod względem bezpośrednich skutków wytrzymałościowych jak i pośrednich, fizycznych; np. aktywności sorpcyjnej i efektu kapilarnego [6-9]. Przy jednoosiowym stanie naprężenia (występuje wyłącznie naprężenie obwodowe σ_φ) tego typu wada może do tego stopnia obniżyć wytrzymałość rur, że ich stosowanie nie będzie opłacalne. Cel badań wytrzymałościowych sformułowano więc następująco: ustalić taką wartość kąta anizotropii α_i , poniżej której o wytrzymałości (szczelności) rury decydować będą siły adhezji na powierzchni rozdziału włókno/żywica. Za podstawę tego rozwiązania przyjęto termomechaniczną teorię Żurkowa [10 i 11].

Należy nadmienić, że nie chodzi w tym rozwiązaniu o ustalenie gdzie i przy jakich naprężeniach powstają pierwsze mikropeknięcia, gdyż te zagadnienia zawarte są w pracach [12 i 13], lecz o określenie roli powierzchni rozdziału w dekohezji przy obciążeniu rury ciśnieniem wewnętrznym i przy małych kątach anizotropii α_i .

3. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

Interpretację wyników pomiarów przeprowadzono opierając się na parametrach U_o i γ równania Żurkowa [10, 11 i 14]

$$(3.1) \quad \tau = \tau_o \exp \frac{U_o - \gamma\sigma}{kT}.$$

Do określenia wielkości U_o i γ wykorzystano wykresy $R_{z/\tau} - \log \tau$ (rys. 3) oraz równanie (3.1).

Na podstawie dwóch punktów

$$A_1 (\log \tau_1, R_{z/\tau} = R_1),$$

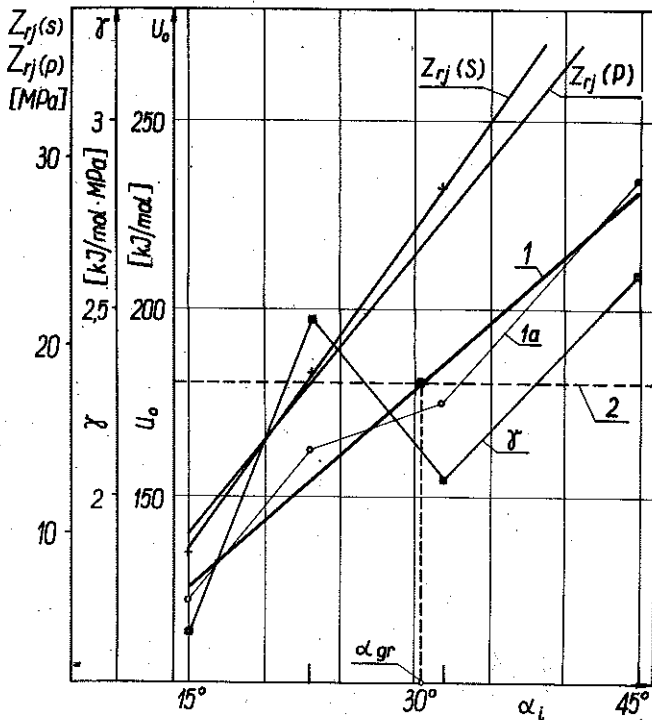
$$A_2 (\log \tau_2, R_{z/\tau} = R_2),$$

wyznaczono wzory (3.2) i (3.3) oraz dla każdej serii badanych rur obliczono U_o i γ (tablica 4):

$$(3.2) \quad \gamma = \frac{kT}{\log e} \frac{\log \tau_2 - \log \tau_1}{R_1 - R_2},$$

$$(3.3) \quad U_o = \gamma \left[\frac{\log \tau_2 - \log \tau_0}{\log \tau_2 - \log \tau_1} (R_1 - R_2) + R_2 \right].$$

Energia aktywacji dla badanych rur z laminatu epoksydowo-szklanego, jako funkcja kąta anizotropii α_i wynosi (rys. 7):



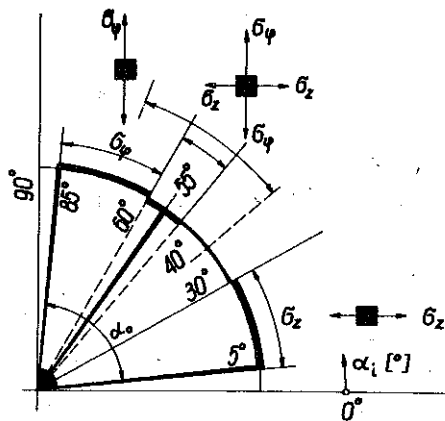
Rys. 7. Wykresy energii U_o , aktywacji laminatu — 1 oraz żywicy — 2, a także wartości współczynnika γ oraz granic zmęczenia Z_{rj} ($5 \cdot 10^6$, S), Z_{rj} ($5 \cdot 10^6$, P) funkcji kąta anizotropii α_i ; 1 — równanie prostej regresji (3.4); 1a — połączenie punktów o współrzędnych (α_i, U_o) , gdzie U_o obliczono z równania (3.4) (por. tablica 4)

Tablica 4. Analityczny opis wyników pomiaru czasowej wytrzymałości na pelzanie przy ciśnieniu wewnętrznym oraz zestawienie wyników obliczeń U_0 i γ rur z laminatu epoksydowo-szklanego

α_i	$R_{z/\tau} = a - b \log \tau$ [MPa]		$\tau_1 = 10^4$	$\tau_2 = 10^6$ [s]	U_0	γ	U_0 względne
	a	b	R_1	R_2	$\left[\frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \right]$	$\left[\frac{\text{kJ}}{\text{mol} \cdot \text{MPa}} \right]$	
15°	33,7122	3,4293	19,9950	13,1364	123	1,6398	1
23°	38,4424	2,2644	29,3848	24,8560	163	2,4836	1,3
32°	52,0781	2,7322	41,1493	35,6849	175	2,0583	1,4
45°	64,3006	2,1712	55,6158	51,2734	234	2,5902	1,9

Tablica 5. Optymalne i dopuszczalne wartości kąta anizotropii α_i rur o skrzyżowanych pasmach zbrojenia (ciągłe włókno szklane)

Stan naprężenia		Optymalne wartości α_i z uwzględnieniem tolerancji	Dopuszczalne wartości α_i
σ_z	σ_φ		
Jednoosiowy $\sigma_z > 0$	0	$5^\circ \pm 5$	$0^\circ - 30^\circ$
0	Jednoosiowy $\sigma_\varphi > 0$	$85^\circ \pm 5$	$60^\circ - 90^\circ$
Płaski $\sigma_z = 0,5 \sigma_\varphi$		$55^\circ \pm 5$	$40^\circ - 70^\circ$



Rys. 8. Schemat wyboru kąta anizotropii α_i zależnie od rodzaju stanu naprężenia rury z laminatu epoksydowo-szklanego o skrzyżowanych pasmach zbrojenia; α_0 — obszar dopuszczalnej wartości kąta anizotropii; inne wartości (por. tablica 5); $\alpha_i = 30^\circ - 40^\circ$ — obszar martwy

$$(3.4) \quad U_o(\alpha_i) = 72,8864 + 3,5083 \alpha_i,$$

$$\alpha_i = 0^\circ \Rightarrow U_o(0^\circ) \approx 73 \text{ [kJ/mol]}$$

$$\alpha_i = 90^\circ \Rightarrow U_o(90^\circ) \approx 390 \text{ [kJ/mol]}$$

Tak więc jeśli włókna szklane ułożone są równolegle do osi rury ($\alpha_i = 0^\circ$), to energia aktywacji U_o laminatu jest ponad 2,5 razy mniejsza niż żywicy (tablica 1). Oznacza to, że pęknięcia przebiegają wzdłuż granicy faz (włókno/żywica), tj. wzdłuż linii najmniejszego oporu. Badania mikroskopowe złomów (rys. 4 i 5) potwierdzają taki pogląd. Jeśli natomiast $\alpha_i = 90^\circ$, tzn. jeśli włókna szklane są nawinięte kołowo i one w głównej mierze decydują o wytrzymałości rur, to wartość U_o laminatu zbliża się do U_o włókien. Te dwa skrajne warianty są zgodne z osiągniętymi rezultatami doświadczalnymi: wytrzymałość na rozciąganie rur w całości wynosi $R_z(15^\circ) > 680 \text{ [MPa]}$ oraz $R_z(90^\circ) = 10 \text{ [MPa]}$.

Wprowadzenie do analizy wyników obliczeń energii aktywacji U_o ujawnia najslabsze ogniwo wytrzymałości rur z laminatu. Wykres $U_o(\alpha_i)$ przecina się z U_o żywicy w punkcie o odciętej $\alpha_i = \alpha_{gr} \approx 30^\circ$ (jest to wartość przybliżona, ponieważ U_o żywicy przyjęto za [11], tablica 1). A więc jeśli $\alpha_i \leq 30^\circ$, to najslabszym ogniwem jest granica faz, natomiast dla $\alpha_i > 30^\circ$ pęknięcia rozwijają się w innych rejonach laminatu, tzn. poza powierzchnią rozdziału.

Na podstawie analizy wytrzymałościowej [4, 14], obliczeń [równania (3.2) i (3.3) oraz tablica 4 i rys. 7] oraz badań doraźnych i zmęzeniowych (tablica 2 i 3, rys. 3 oraz [12]) ustalono optymalne i dopuszczalne wartości kątów anizotropii α_i rur z laminatu o skrzyżowanych pasmach zbrojenia (tablica 5, rys. 8).

Należy jeszcze zwrócić uwagę, że współczynnik γ jest zależny nie tylko od rodzaju obciążenia (rozciąganie, zginanie itp. [15]), ale również od stosunku pomiędzy składowymi tensora naprężenia. Zaburzenia w rozkładzie γ (rys. 7) potwierdzają jakościową zmianę w procesie dekohezji, tzn. że dla małych α_i ($\alpha_i < 30^\circ$) o utracie szczelności decyduje wytrzymałość powierzchni rozdziału.

4. WNIOSKI

1. Rury z laminatu epoksydowo-szklanego o kącie anizotropii $\alpha_i \leq \alpha_{gr}$ ($\alpha_{gr} \approx 30^\circ$) nie powinny być stosowane do obciążeń przy ciśnieniu wewnętrznym i jednoosiowym stanie naprężenia ($\sigma_\varphi = \sigma_1$), ponieważ najslabszym ogniwem w laminacie jest w tym przypadku granica faz (U_o laminatu $< U_o$ żywicy). Natomiast nadają się one do eksploatacji wtedy, gdy $\sigma_\varphi = 0$, $\sigma_z > 0$, tzn. do obciążeń osiowych.

2. Podstawą wstępnej eliminacji rur z laminatu epoksydowo-szklanego, przeznaczonych do badań zmęczeniowych i eksploatacji w analogicznych warunkach może być wartość energii aktywacji U_0 , do określenia której wystarczają krótkie i proste próby pełzania pod ciśnieniem wewnętrznym.

3. Zaproponowana metoda określania granicznego kąta anizotropii α_{gr} przy pomocy wykresów energii aktywacji U_0 , wyjaśnia znaczenie wytrzymałościowe powierzchni rozdziału w laminacie w zależności od rodzaju obciążenia.

LITERATURA CYTOWANA W TEKŚCIE

1. M. NOWAK, *Badania wytrzymałości zmęczeniowej rur z tworzyw sztucznych*, Pr. Nauk. Inst. Materiałoznawstwa i Mech. Techn. P. Wr., 40, Seria Monografie, 12, 1—72, Wrocław 1980.
2. J. JERZYK, M. NOWAK, *Badanie rur z polietylenu na zmienne ciśnienie wewnętrzne*, II Seminarium „Tworzywa Sztuczne w Budowie Maszyn”, P. Kr. 395—403, Kraków—Janowice 1979.
3. В. А. ШЕРСТНЕВ, А. Я. ГОЛЬМАН, *Длительная прочность полиэтилена при циклическом нагружении в условиях плоского напряженного состояния*, Механика полимеров, 1, 35—40, 1977.
4. О. Г. ЦЫПЛАКОВ, *Судовые трубопроводы из стеклопластиков*, Судостроение, Ленинград 1967.
5. L. ENGEL, H. KLINGELE, G. EHRENSTEIN, H. SCHAPER, *Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen von Kunststoffschäden*, Carl Hanser Verlag, München/Wien, 168—193, 1978.
6. M. NOWAK, *Zgięcia i nieciągłości wykresów zmęczenia tworzyw sztucznych*, Arch. Budowy Maszyn, 29, 2, 139—155, 1982.
7. M. NOWAK, *Über den Einfluss der Wasseraufnahme auf die Ermüdungsgrenze von verstärkten Polyamiden*, Plaste und Kautschuk, 28, 4, 221—224, 1981.
8. M. NOWAK, *Усталостные характеристики полиамидов, армированных стеклом*, Механика композитных материалов, 3, 439—445, 1983.
9. W. KRÓLIKOWSKI, *Granica pęknięcia tworzyw wzmocnionych włóknem szklanym*, II Seminarium „Tworzywa Sztuczne w Budowie Maszyn”, P. Kr., 200—228, Kraków—Janowice 1979.
10. С. Н. ЖУРКОВ, Э. Е. ТОМАШЕВСКИЙ, *Временная зависимость прочности при различных режимах нагружения*, Сборник „Некоторые проблемы прочности твердого тела”, АН СССР, 68—75, 1959.
11. В. Р. РЕГЕЛЬ, А. И. СЛУЦКЕР, Э. Е. ТОМАШЕВСКИЙ, *Кинетическая природа прочности твердых тел*, „Наука”, Москва, 1974.
12. J. JERZYK, *Anizotropia własności wytrzymałościowych rur z laminatu epoksydowo-szklanego*, Rozpr. doktorska, Wydz. Mech. P. Wr., Wrocław 1984.
13. J. JERZYK, M. KUMOSA, *Wpływ kąta nawinięcia włókna szklanego na charakter emisji akustycznej w rurach z kompozytu epoksydowo-szklanego*, Inst. Materiałoznawstwa i Mech. Techn. P. Wr., Raport Nr 23, Wrocław 1983.
14. П. П. ПЛДЫРЕВ, В. П. ТАМУЖ, *О разрушении стеклопластика при циклическом растяжении-сжатии*, Механика полимеров, 4, 654—662, 1971.
15. S. B. RATNER, *Stale fizyczne tworzywa sztucznego określające jego przydatność użytkową w wyrobach*, Polimery — Tworzywa Wielkocząsteczkowe, 26, 11—12, 417—425, 1981.

РЕЗЮМЕ

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДЕКОГЕЗИИ ТРУБ ИЗ ЭПОКСИДНО-СТЕКЛЯННОГО ЛАМИНАТА

Предложен метод определения критической области угла анизотропии, в которой трубы из дамината, с исследуемой структурой и напряженным состоянием, не должны эксплуатироваться. Метод заключается в расчете энергии активации U_0 ламината и сравнении ее с аналогичной величиной для смолы и стекла. Констатируется, что при нагружении трубы внутренним давлением существует такой угол анизотропии α_{gr} , ниже которого U_0 ламината меньше чем U_0 смолы и что в этом случае самым слабым прочностным звеном трубы является граница фаз (поверхность раздела) и граничный слой.

SUMMARY

ENERGY INTERPRETATION OF DECOHESION
OF EPOXY-GLASS LAMINATE PIPES

The method is proposed of determining the anisotropy angle critical region in which the laminate pipes of the structure and state of stress under investigation should not be applied. The method consist in calculating the activation energy U_0 of laminate and its comparison with the analogous quantity of resin and glass. It is found that, under internal load of the pipe, there exists an anisotropy angle α_{gr} , below which U_0 of the laminate is smaller than U_0 of resin, and that in this case the weakest strength element of the pipe is the interphase boundary and the boundary layer.

POLITECHNIKA WROCLAWSKA
INSTYTUT MATERIALOZNAWSTWA I MECHANIKI TECHNICZNEJ

Praca została złożona w Redakcji dnia 28 maja 1984 r.