

Kazimierz Walczak¹

Politechnika Śląska, Gliwice, Główny Instytut Górnictwa, pl. Gwarków 1, 40-166 Katowice

Jacek Mamos²

Główny Instytut Górnictwa, pl. Gwarków 1, 40-166 Katowice

WYTRZYMAŁOŚĆ ZMĘCZENIOWA RUR LAMINATOWYCH (GRP) STOSOWANYCH W GÓRNICTWIE

Zaprezentowano wyniki testów rur szklano-poliestrowych poddanych cyklicznemu, zmiennemu ciśnieniu wewnętrznemu. Wyniki przedstawiono w postaci wykresu Wohlera, pokazującym wytrzymałość zmęczeniową rur nawijanych spiralnie, wykonanych z rowingu szklanego i różnych rodzajów żywicy poliestrowych, takich jak żywice trudnopalne i antyelektrostatyczne, których parametry pozwoliły na ich dopuszczenie do stosowania w przemyśle górnictwem. Próbki badawcze stanowiły rury o średnicy wewnętrznej 90 mm i grubości ścianki 4 mm, na którą składały się: 1) warstwa wewnętrzna (ochronna) bogata w żywicę i wykonana na bazie maty szklanej powierzchniowej o gramaturze 30 g/m² i maty konstrukcyjnej o gramaturze 300 g/m² o łącznej grubości ok. 0,5 mm; 2) warstwa nośna (konstrukcyjna) składająca się z 3 warstw spiralnie ułożonego rowingu o łącznej grubości 3,5 mm. Kąt ułożenia włókien w stosunku do osi wzdłużnej rury wynosił 54°45' i był optymalny z warunku obciążenia rury ciśnieniem wewnętrznym. Schemat rozłożenia pasm rowingu w warstwie konstrukcyjnej przedstawia rysunek 1. Badania zmęczeniowe prowadzono przy obciążeniach ciśnieniem wewnętrznym cyklicznie zmiennym o przebiegu prostokątnym, którego charakterystykę przedstawia rysunek 2. Parametry cyklu podano w tabeli 3. Badania przeprowadzono na urządzeniu, którego schemat przedstawia rysunek 3, na którym podano również rzeczywisty przebieg impulsów ciśnienia, rejestrowany w próbkach badawczych manometrami tensometrycznymi i oscylografem. Wyniki badań podano w tabelach 1, 4 i 5, oraz na rysunkach 4 i 5, a zbiorczo na rysunku 6. Postać graficzną wyników badań stanowią wykresy Wohlera, zależności $\sigma_{1max} = f(N)$, gdzie N oznacza liczbę cykli do zniszczenia. Badania prowadzono na 5-6 poziomach naprężeń σ_{1max} . Poziomy te zostały tak dobrane, aby można było uzyskać liczbę cykli (N) do zniszczenia na poziomie 10⁶ cykli zmian obciążenia, która jest powszechnie uznawana za granicę długotrwałej wytrzymałości zmęczeniowej. Na wykresach podano zależność liniową $y = f(x)$, co jest równoznaczne z $\sigma_1 = f(N)$, oddzielnie dla górnego i dolnego poziomu naprężeń σ_{1max} cyklu, oraz wyznaczono tzw. krzywe trendu. Najbardziej istotny jest przebieg tej zależności na dolnym poziomie naprężeń, który obrazuje zachowanie się rur przy dużej liczbie cykli zmęczeniowych, zmierzającej do naprężeń oznaczających wytrzymałość zmęczeniową.

Słowa kluczowe: tworzywa sztuczne, kompozyty, rury, wytrzymałość zmęczeniowa

FATIGUE STRENGTH OF LAMINATE PIPES (GRP) FOR MINING INDUSTRY

The publication discusses test results of glass-polyester pipes submitted to a cyclically variable internal pressure. The results have been presented in the form of Wohler's charts showing fatigue strength of spirally wound pipes made from glass roving and different types of polyester resins such as slow-burning and anti-electrostatic resins approved in the mining industry. Tests have been run on pipes of internal diameter of 90 mm and wall thickness of 4 mm, made from:

- 1) internal protective layer, rich in resin, made from surface glass mat of 30 g/m² and construction mat of 300 g/m², 0.5 mm thick in total,
- 2) load-bearing (construction) layer, made of three spirally wound roving layers, approximately 3.5 mm thick in total.

The angle between roving fibers and pipe's longitudinal axis equaled 54°45' and was optimal for pipe's internal pressure load ratio. Figure 1 shows placement of roving fibers in the construction layer. Fatigue strength tests have been conducted with rectangular cyclic variable internal pressure, as presented in Figure 2. The cycle parameters have been listed in Table 3. Tests have been carried out on the equipment presented in Figure 3, which shows also the actual pattern of pressure impulses. The actual impulses in the samples have been registered by tensometric manometers and an oscillograph. Tests results have been presented in Tables 1, 4, 5, Figures 4, 5 and summarized in Figure 6. Tests results have been shown graphically as Wohler's charts and ratios $\sigma_{1max} = f(N)$, where N represents a number of cycles before breakage occurs. Tests have been conducted at 5 to 6 levels of load pressure σ_{1max} . The levels have been determined in such a way as to obtain a number of cycles (N) equivalent to pressure changes of 10⁶, which is commonly recognized as the maximum long-term fatigue strength. The charts show linear ratio $y = f(x)$ which is equal to $\sigma_1 = f(N)$, separately for lower and upper levels of σ_{1max} and determine the trend lines. The most important interdependence is at the lower level of pressure, which shows pipe's behavior when a big number of fatigue cycles approaches pressures which determine fatigue strength.

Key words: plastics, composites, pipes, fatigue strength

WPROWADZENIE

Kompozyty włókniste są materiałami wieloskładnikowymi, o składnikach wzajemnie ze sobą powiązanych, tworzących jednolity makroskopowo materiał konstrukcyjny.

¹ dr inż., ² mgr inż.

cyjny. Do najbardziej popularnych i ważnych technicznie należą kompozyty zbudowane na bazie żywic syntetycznych i włókna szklanego GRP (Glass-reinforced thermosetting plastics, wg PN-EN 637/99).

Wytrzymałość statyczna takiego materiału zależy od właściwości włókna wzmacniającego oraz osnowy i ich procentowych zawartości w laminacie (reguła mieszanin) [4]. Laminat taki jest najczęściej materiałem anizotropowym, a jego wytrzymałość będzie zależać od kąta ułożenia wzmocnienia w stosunku do osi głównych. Klasycznym tego przykładem są rury laminatowe spiralnie nawijane rowingiem, pracujące pod działaniem ciśnienia wewnętrznego. Optymalnym rozwiązaniem takich rur byłoby układanie wzmocnienia obwodowo i wzdłużnie (ortotropowo) ze stosunkiem ilości wzmocnienia 2:1, co w praktyce jest trudne do zrealizowania. Taki rodzaj wzmocnienia zastępuje się najczęściej nawijaniem krzyżowym (śrubowym) układanym pod kątem $\pm\alpha$ do osi rury. Nawijanie krzyżowe, niezbędne w przypadku wyrobów cylindrycznych o dużych średnicach, wywołuje w kompozycie złożony stan naprężenia związany z występowaniem nieciągłości struktur, krzyżowaniem i przeginaniem włókien w kierunku promieniowym, szczególnie przy stosowaniu do nawijania wstęgi rowingu o dużej grubości, co powoduje rozbieżności wyników eksperymentalnych od obliczeń teoretycznych [5].

Rury takie są stosowane coraz częściej w kopalniach do transportu wody i gazów, w tym metanu, a ich główne zalety to: mała gęstość (ok. $1,8 \text{ g/cm}^3$), odporność na korozję i zarastanie, niskie i niezmiennie w okresie eksploatacji oporu przepływu, wysoka wytrzymałość mechaniczna, łatwość montażu i niskie jego koszty.

Stosowanie rur laminatowych poliestrowo-szklanych w podziemiach kopalń o zagrożeniu wybuchu metanu wymaga, oprócz wysokich właściwości wytrzymałościowych, również specyficznych właściwości fizycznych, które dotyczą głównie trudnopalności i antyelektrostatyczności (czas palenia i samogaśnięcia < 8 sekund, a oporność powierzchniowa $< 10^6 \Omega$). Wymaga to modyfikowania istniejących na rynku materiałów polimerowych (żywica syntetycznych) przez dodawanie wypełniaczy antypirogennych i antyelektrostatycznych, które powodują zmiany właściwości kompozycji żywicznej. Zagadnienia te są trudne do określenia na drodze teoretycznej i wymagają zmuśnych oraz długotrwałych badań.

Rury takie w warunkach eksploatacji górniczej podlegają z reguły zmiennym obciążeniom ciśnieniem wewnętrznym. Spowodowane jest to pracą pomp, zasuw itp. Takie warunki obciążenia powodują zjawiska zmęczeniowe w rurach laminatowych i są główną przyczyną utraty szczelności.

Doniesienia literaturowe dowodzą, że istotnym czynnikiem wpływającym na wytrzymałość zmęczeniową laminatu są właściwości osnowy polimerowej. Mechanizmy uszkodzeń przy rozciąganiu zmęczeniowym lami-

natów wzdłuż włókien mogą być trojakiemu rodzaju: przerwanie wzmocnienia przy naprężeniu przekraczającym wytrzymałość najsłabszego włókna w kompozycie, międzyfazowe rozwarstwienie i pęknięcie osnowy. Badania prowadzone przez Owena (1974), Dharana (1975) potwierdziły, że dominującym czynnikiem uszkodzenia są maksymalne odkształcenia.

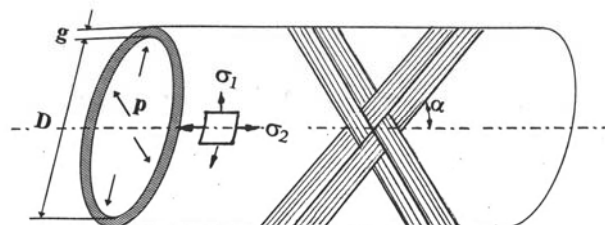
Dla laminatów krzyżowych badania prowadzili m.in. Brautman i Sahu (1969), Grimes (1977), Hahn i Kim (1976), którzy stwierdzili, że pierwsze uszkodzenia są wynikiem rozwarstwiania kompozytu. Pęknięcia rosną w kierunku powierzchni międzyfazowych (włókno-osnowa), a po spotkaniu się z nimi powodują spiętrzenie naprężeń i zniszczenie materiału.

PRZEDMIOT BADAŃ

Przedmiotem badań były rury laminatowe (GRP) wykonane na bazie żywic poliestrowych, stanowiących osnowę laminatu, wzmocnionych włóknami szklanymi, rozłożonymi krzyżowo w warstwach konstrukcyjnych, pod kątem $\pm\alpha$ w stosunku do osi wzdłużnej rury [3].

Naprężenie obwodowe σ_1 oraz osiowe σ_2 określa się z zależności

$$\sigma_1 = \frac{p(D + g)}{2g}, \quad \sigma_2 = \frac{p(D + g)}{4g} \quad (1)$$



Rys. 1. Schemat budowy rury oraz rozkładu naprężeń od ciśnienia wewnętrznego p

Fig. 1. Pipe composition and strain distribution from internal pressure p

Do badań wykorzystano rury laminatowe o średnicy $D = 90$ mm, grubości ścianki $g = 4$ mm i kącie nawijania $\alpha = \sim 54^\circ$ oraz zawartości włókien szklanych w laminacie $\varphi = 55\%$ obj. Sposób zamocowania próbek do badań i warunki badań przyjęto wg PN-EN 921/94.

W warunkach krajowych wybór osnowy polimerowej i jej właściwości mechanicznych jest ograniczony, ponieważ produkuje się w zasadzie jeden gatunek żywicy trudnopalnej - Polimal 160 modyfikowany chlorem, inne gatunki żywic należy dodatkowo uszlachetniać. Dla spełnienia wymogów górniczych należy je dodatkowo modyfikować, np. utlenionym wodorotlenkiem glinu, trójtlenkiem antymonu, a także sadzą techniczną dla zapewnienia antyelektrostatyczności. Gatunki żywic wybrane do badań właściwości zmęczeniowych rur

wykonanych na ich bazie zawiera tabela 1. Podane podstawowe gatunki żywic w zasadzie wyczerpują możliwości użycia żywic poliestrowych produkcji krajowej do wytwarzania rur dla górnictwa.

Spośród dostępnych gatunków rowingu wybrano do badań dwa, różniące się grubością wstęgi, a mianowicie: rowing 60-pasmowy, Tex 2400, oraz rowing 30-pasmowy Tex 1200. (Tex - masa w gramach wstęgi rowingu o długości 1000 m). Średnia wytrzymałość na rozciąganie wstęgi włókna szklanego wynosi ok. 1200 MPa, natomiast żywic syntetycznych Polimal 103÷55 MPa i Polimal 160÷44 MPa. Do wykonania wewnętrznej powłoki użyto maty szklanej powierzchniowej o gramaturze 30 g/m² (importowanej) oraz maty konstrukcyjnej o gramaturze 300 g/m².

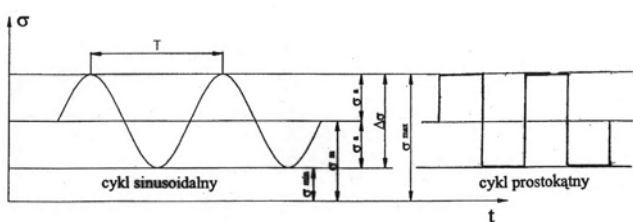
CHARAKTERYSTYKA METODY I STANOWISKA BADAWCZEGO

Badania zmęczeniowe można prowadzić przy założonym cyklu zmian obciążenia, który zdeterminowany jest konstrukcją stanowiska badawczego, np. cykl sinusoidalny, trójkątny, prostokątny, odzerowy itd. [1].

W rurociągach ciśnieniowych najbardziej odpowiadającym rzeczywistości jest cykl prostokątny. W cyklu naprężeń zmiennych wyróżniamy: naprężenia maksymalne cyklu σ_{max} , minimalne σ_{min} , średnie σ_m , amplitudę σ_a , częstotliwość cyklu f , współczynnik asymetrii cyklu R , współczynnik stałości obciążeń k :

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}; \quad \sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2};$$

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}; \quad k = \frac{\sigma_m}{\sigma_a}$$

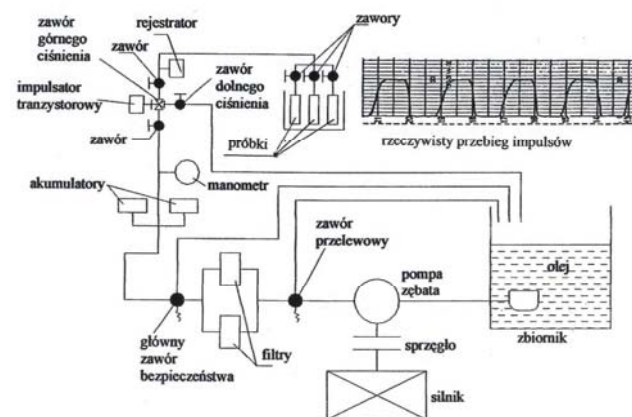


Rys. 2. Ogólny charakter naprężeń zmiennych
Fig. 2. General characteristics of variable strains

W przypadku rur, które są tematem badań, naprężenia te dotyczą naprężeń obwodowych w rurze σ_1 .

Badania prowadzono na specjalnie skonstruowanym urządzeniu ciśnieniowym, które zapewnia cykliczny przebieg zmian ciśnienia wewnętrznego w badanych próbkach o przebiegach prostokątnych, poprzez impulsator tranzystorowy i zawory elektromagnetyczne, a rzeczywisty przebieg ciśnienia w badanych próbkach rejestrowany był przez czujnik tensometryczny wprowadzony do wnętrza próbki badawczej (rys. 3). Parametry

cyklu zmian obciążeń podczas badań przedstawia tabela 3. Stałość temperatury badań zapewniona była poprzez termostatowanie próbek umieszczonych w wanie z wodą oraz chłodzenie płynu hydraulicznego.



Rys. 3. Schemat stanowiska badawczego
Fig. 3. Scheme of test station

WYNIKI BADAŃ

Wyniki badań przedstawiono w tabelach 1, 4 i 5 dla poszczególnych rodzajów próbek typ 1 i 3 ujętych w tabeli 2 oraz graficznie w formie wykresów Wohlera na rysunkach 4, 5, a zbiorczo na rysunku 6, na którym ujęto wyniki badań wszystkich typów próbek. Pierwszy wiersz w tabelach odnosi się do określenia doraźnej wytrzymałości na ciśnienie wewnętrzne próbek rurowych, dla $N = 1$ cykl. Podane w następnych wierszach naprężenia σ_{1max} dotyczą naprężeń maksymalnych poszczególnych poziomów przyjętych w badaniach. Na wykresach naniesiono charakterystyczne odcinki dotyczące wytrzymałości zmęczeniowej, opisując matematycznie zależność $\sigma_{1max} = f(N)$ dla dolnego i górnego poziomu naprężeń.

TABELA 1. Kompozycje żywic poliestrowych stosowane w badaniach i ich właściwości fizyczne
TABLE 1. Compositions of polyester resins used for tests and their physical characteristics

Nr	Skład kompozycji polimerowej	Palność (s)/wskaźnik tlenowy (%) wg PN-C-89020/92	Oporność powierzchniowa i wskrośna w Ω wg PN-E-05204/94
1	Polimal 103 + 6% PBEB + 3% Sb ₂ O ₃ + 2% sadzy technicznej	4,2/28,9	$< 10^6$ $< 10^8$
2	Polimal 160 + 5% Sb ₂ O ₃ + 2% sadzy technicznej	3,6/29,6	$< 10^6$ $< 10^8$

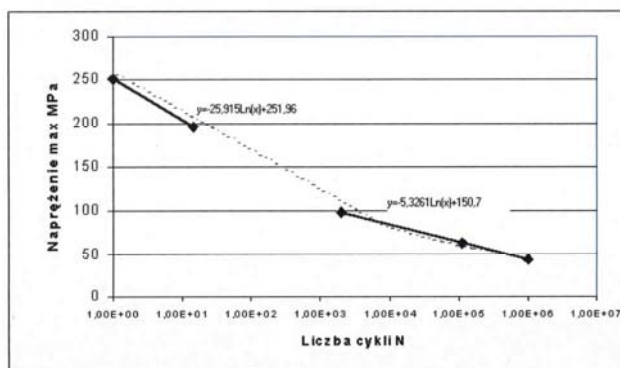
Uwaga: Podane składki spełniają również wymagania pochłaniaczy górniczych (POG) w odniesieniu do produktów rozkładu termicznego

TABELA 2. Typy badanych próbek
TABLE 2. Types of test samples

Typ 1	Typ 2	Typ 3	Typ 4
Kompozycja 1 + rowing 30-pasmowy Tex 1200	Kompozycja 1 + rowing 60-pasmowy Tex 2400	Kompozycja 2 + rowing 30-pasmowy Tex 1200	Kompozycja 2 + rowing 60-pasmowy Tex 2400

TABELA 3. Parametry badań
TABLE 3. Test parameters

Współczynnik asymetrii cyklu	Współczynnik stałości obciążeń	Częstotliwość zmian impulsów	Temperatura
$R = 0,5$	$k = 3$	$F = 0,5$ Hz	otoczenia



Rys. 4. Przebieg wytrzymałości zmęczeniowej próbek 1 typu ($\sigma_{1max} = f(N)$)
Fig. 4. Distribution of fatigue strength for samples of type 1 ($\sigma_{1max} = f(N)$)

Opracowanie statystyczne przeprowadzono na po-

TABELA 4. Wyniki badań zmęczeniowych rur laminatowych na bazie żywicy Polimal 103, rowingu szklanego 30-pasmowego (Tex 1200). Próbkki 1 typu

TABLE 4. Fatigue strength test results of laminate pipes based on Polimal 103 resin, 30 band glass roving (Tex 1200). Samples of type 1

Nr próby	Napięcie σ_{1max} MPa	Liczba cykli do zniszczenia N	$\log \sigma_{1sr, (1)}$ $\log N_{sr(2-5)}$	Odchylenie standardowe $S_{\log \sigma_1}, S_{\log N}$	Średni błąd standard. \bar{S}	Przedział ufności t-studenta P
1	243,3; 251,5; 252,5; 256; 256,7	1	2,4014	0,009293	0,004156	$\pm 0,011567$
2	196,2	8; 9; 12; 17; 25	0,7429	0,028018	0,01253	$\pm 0,034783$
3	98,1	1893; 1927; 1994; 2103; 2123	3,3023	0,022204	0,00992	$\pm 0,027537$
4	63	109878; 111160; 111356; 111654; 112898	5,0468	0,004219	0,00188	$\pm 0,005219$
5	43,5	985432; 992184; 1000857; 1042142; 1058120	6,0067	0,0137	0,00615	2,67567E-05

$$\log \sigma_{1sr} = \frac{\sum_{i=1}^n \log \sigma_{1i}}{n}, \quad S_{\log \sigma_1} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\log \sigma_{1i} - \log \sigma_{1sr})^2}{n-1}} \quad \text{lub} \quad S_{\log N} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\log N_i - \log N_{sr})^2}{n-1}}$$

$$\bar{S} = \frac{S_{\log N}}{\sqrt{n}} \quad \text{lub} \quad \bar{S} = \frac{S_{\log \sigma_1}}{\sqrt{n}}, \quad P = \log N_{sr} \pm t_{\alpha} \bar{S} \quad n = 5$$

$$P = \log \sigma_{1sr} \pm t_{\alpha} \bar{S} \quad t_{\alpha} = 2,776$$

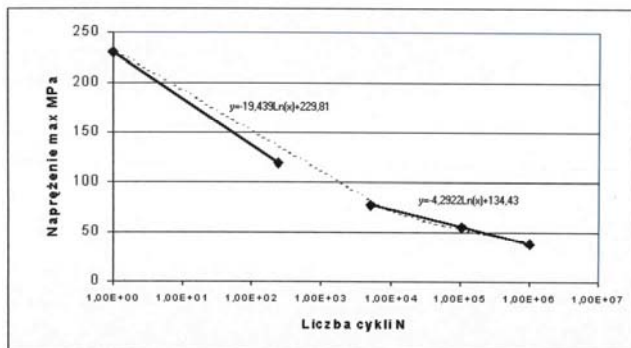
TABELA 5. Wyniki badań zmęczeniowych rur laminatowych na bazie żywicy Polimal 160, rowingu szklanego 30-pasmowego (Tex 1200). Próbkki 3 typu

TABLE 5. Fatigue strength test results of laminate pipes based on Polimal 160 resin, 30 band glass roving (Tex 1200). Samples of type 3

Nr próby	Napięcie σ_{1max} MPa	Liczba cykli do zniszczenia N	$\log \sigma_{1sr, (1)}$ $\log N_{sr(2-5)}$	Odchylenie standardowe $S_{\log \sigma_1}, S_{\log N}$	Średni błąd standard. \bar{S}	Przedział ufności t-studenta P
1	224,4; 228,5; 230,1; 231,1; 235	1	2,36135	0,0073	0,003264	$\pm 0,00906$
2	119	227; 229; 231; 248; 252	2,375	0,02118	0,009472	$\pm 0,0263$
3	77,8	4844; 4975; 5113; 5195; 5345	3,7068	0,0165	0,007379	$\pm 0,0205$
4	55	97934; 100014; 102592; 102842; 110203	5,01129	0,0193	0,008631	$\pm 0,02396$
5	38,5	987148; 987148; 998232; 102032; 103147; 104853	6,00524	0,010834	0,004845	$\pm 0,00091$

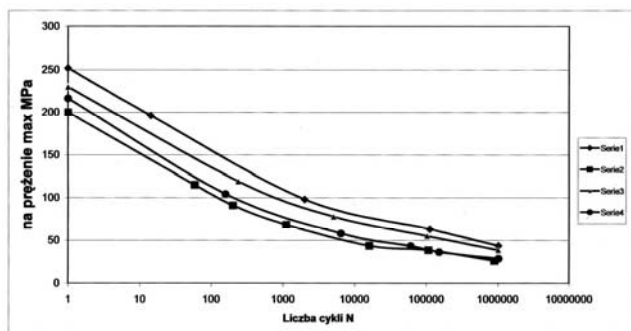
ziomie prawdopodobieństwa zniszczenia $\alpha = 0,05$ i dotyczy w przypadku wytrzymałości doraźnej oszacowania

wania naprężeń niszczących, natomiast w dalszych etapach badań ilości cykli (N) > 1 na danym poziomie naprężeń. Na wykresach naniesiono również tzw. krzywe trendu, czyli najbardziej prawdopodobne ich przebiegi wyznaczone komputerowo.



Rys. 5. Przebieg wytrzymałości zmęczeniowej próbek 3 typu ($\sigma_{\max} = f(N)$)

Fig. 5. Distribution of fatigue strength for samples of type 3 ($\sigma_{\max} = f(N)$)



Rys. 6. Przybliżone przebiegi wytrzymałości zmęczeniowej dla ogółu badanych typów próbek

Fig. 6. Approximate distributions of fatigue strength for all types of samples

OMÓWIENIE WYNIKÓW

Z przeprowadzonych badań wynika, że przyjęte do badań receptury żywic poliestrowych z antypirenami i antyelektrostatykami, podane w tabeli 1, spełniają wymagania bezpieczeństwa górniczego i mogą być stosowane w kopalniach w instalacjach wodnych i gazowych, w tym również metanu.

Wytrzymałość statyczna takich rur jest wysoka, wartość naprężeń obwodowych przekracza 250 MPa, obrazują to wyniki dla $N = 1$ cykl. Wytrzymałość teoretyczna laminatu wzdłuż włókien wynikająca z tzw. teorii mieszanin: $R_{mL} = R_{mw} \cdot \varphi + R_{mz}(1 - \varphi)$ (indeks L dotyczy laminatu, w - włókna, z - żywicy, φ - zawartość objętościowa włókien w laminacie) daje w przeliczeniu wartość naprężeń obwodowych w rurach na poziomie 300 MPa. Różnica wynika z nieciągłości struktury kompozytu, nierównomierności naciągu włókien itp.

Właściwości zmęczeniowe rur laminatowych są podstawą oceny ich przydatności do budowy instalacji przepływowych szczególnie wodnych, gdzie występują pul-

sacje obciążeń. Wyniki badań przedstawione są w postaci wykresów Wohlera z podaniem równań prostych przechodzącej przez dwa punkty, na poziomie $N = 10^5$ i 10^6 cykli. Na wykresach tych naniesiono również komputerowe linie trendu (linie przerywane), które charakteryzują najbardziej prawdopodobne przebiegi krzywych zmęczeniowych. Wytrzymałość zmęczeniowa rur laminatowych wykonanych na bazie podanych receptur (kompozycji) żywic zależy od rodzaju lepiszcza (żywicy) oraz grubości wstęgi rowingu szklanego użytego do ich wytwarzania. Rury wykonane na bazie rowingu 60-pasmowego o wartości Tex 2400 posiadają niższe właściwości w stosunku do wykonanych na bazie rowingu 30-pasmowego o Tex 1200. Spadki te wynoszą około 20% dla wytrzymałości statycznej (przy $N=1$ cykli na wykresach) oraz około 30% do wytrzymałości zmęczeniowej. Porównując właściwości rur wykonanych na bazie różnych żywic, należy podkreślić, że oba gatunki przyjęte w badaniach są porównywalne. Przyjęcie ich nie jest przypadkowe, lecz poparte wieloma badaniami i zostały one wybrane spośród ogółu żywic poliestrowych prod. krajowej. Lepsze nasycenie włókien i większa adhezja żywicy Polimal 160 do włókien sprawiają, że wytrzymałość zmęczeniowa rur jest wyższa. Żywica Polimal 103 wymaga dodania większej ilości dodatków antypirogennych, które pogarszają adhezję do włókien. Potwierdzone to zostało w innych badaniach na ścinanie międzywarstwowe laminatów. Badania zakończono na poziomie 10^6 cykli, co przyjmowane jest za poziom wytrzymałości zmęczeniowej, a same badania są czasochłonne. Przebiegi krzywych trendu zbliżają się do określonych asymptot poziomych w sposób widoczny, co potwierdza osiągnięcie poziomu wytrzymałości zmęczeniowej.

Reasumując, stwierdzić należy, że rury laminatowe spiralnie nawijane rowingiem posiadają wytrzymałość zmęczeniową na poziomie 30 MPa przy zastosowaniu rowingu 60-pasmowego oraz 40 MPa dla rowingu 30-pasmowego. Takie wartości naprężeń obwodowych należy przyjmować przy projektowaniu rurociągów, co zagwarantuje ich długi okres eksploatacji w zmiennych warunkach obciążeń, jakie występują w rurociągach.

LITERATURA

- [1] Kocańda S., Szabla J., Podstawy obliczeń zmęczeniowych, PWN, Warszawa 1985.
- [2] Ochelski S., Prace badawcze Instytutu Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej Wojskowej Akademii Technicznej, Materiały III Szkoły Kompozytów, Wisła 2001.
- [3] Rosato W., Grove K., Filament Winding, Interscience Publishers, J. Wiley, New York, London, Sydney 1969.
- [4] Hyla I., Elementy mechaniki kompozytów, skrypt Nr 1945, Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 1995.

- [5] Walczak K., Criteria of decrease in mechanical resistance of spirally wound laminated tubes under internal pressure, Materials and mechanicals engineering, ed. L. Dobrzański Gliwice 2000.
- [6] Kelly A., Encyclopedias, Composite Materials, Oxford 0x51gb, England 1994.
- [7] Nowak M., Jerzyk I., Wpływ anizotropii struktury rur epoksydowo-szklanych na ich właściwości zmęczeniowe, Inżynieria Materiałowa 1984, 3.
- [8] Polański Z., Planowanie doświadczeń w technice, PWN, Warszawa 1984.

Recenzent
Andrzej P. Wilczyński