https://doi.org/10.62753/ctp.2001.10.1.1

Andrzej Bełzowski[1]

Politechnika Wrocławska, Instytut Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej, ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

METODA OCENY WYTRZYMAŁOŚCI DŁUGOTRWAŁEJ KOMPOZYTÓW POLIMEROWYCH

Wykorzystywanie kompozytów polimerowych w budowie rurociągów wiąże się z koniecznością oceny ich własności mechanicznych w całym okresie planowanej eksploatacji. Metody określania wytrzymałości długotrwałej elementów rurociągów stosowane obecnie są kosztowne, trudne technicznie i czasochłonne. Przedstawiona koncepcja metody oceny kompozytów pod względem ich przydatności do pracy przy długotrwałych obciążeniach, oparta na badaniach wytrzymałości resztkowej materiału oraz szacunkach uwzględniających efekt skali, jest potencjalnie szybsza, tańsza oraz wolna od problemów związanych z dużymi rozmiarami próbek.

A METHOD FOR EVALUATING LONG-TERM STRENGTH OF POLYMER COMPOSITES

Degradation processes in polymer composites (PC) induced by load and various physical/chemical effects result in decreasing mechanical properties. At present the long-term strength of PC pipework is determined according to the *ASTM D 2992* standard. The test consisting in long-term loading of a large lot (at least 18) of big samples is expensive, difficult to perform and lasts up to two years. That is why a simpler and cheaper method is highly desirable. The presented method of evaluating the long-term strength of PC is based on the presumption that mechanical degradation induced by dynamic or prolonged static loading may be looked at through changes in the mean strength value of a material and its dispersion (Fig. 1). A greater degree of strength scatter due to fatigue degradation may lead to reduced residual strength (Fig. 2). The autor's research makes him state that a higher strength scatter affects the safety factor in degree that is by one order of magnitude higher than the influence of decreasing mean strength. Another noteworthy phenomenon affecting structural integrity of pipework is the size effect (SE) predicted by the Weibull theory (formula (1)). The SE manifests itself by material strength values becoming lower with increasing volume of a structure and increasing strength value dispersion. Rough calculations by the present author who used data from cyclic 3-point bending of UD composite samples showed that a similarly loaded actual structural member with mass 10^3 higher could undergo a 26.4% decrease in strength after 10^5 cycles. This value may be considered as a sum of the following contributions: 1.5% - a decrease in mean strength, 17% - a decrease due a initial SE, 7.9% - a decrease due to the degradation-related SE (increased scatter). For 3.1×10^5 cycles the above contributions are as follows: 38% = 2.7% + 17% + 18.3%. The results are presented in Fig. 3. They reveal the dependence of material strength values on characteristics of scatter.

The proposed method for evaluating long-term strength of PC may be presented as a sequence of three steps:

1. **Analysis of service conditions of a structure and stress variation at critical points to design tests that would approximate most closely the actual degradation process.**
2. **Determination of the tensile stress (R_m) from as many as 8÷10 specimens and determination of the residual degradation curve $\Delta R_{(1)}$ along with the corresponding standard deviation value.**
3. **Determination of the strength decrease due to ES ($\Delta R_{(2)}$) and to increased scatter ($\Delta R_{(3)}$, see formula (1)) and determination of the final strength $R_k = R_m - (\Delta R_{(1)} + \Delta R_{(2)} + \Delta R_{(3)})$.**

The method is faster, cheaper and easier to use than that conforming to the *ASTM D 2992* recommendations. The significance of size effects requires that the use of the method should be restricted to comparative assessments.

WPROWADZENIE

Procesy degradacji rozwijające się w kompozytach polimerowych (KP) pod wpływem obciążeń oraz różnych czynników fizykochemicznych powodują stopniowe zmiany własności mechanicznych materiału. Podczas prób zmęczeniowych wartości modułów sprężystości oraz wytrzymałości resztkowej mogą obniżyć się nawet o kilkadziesiąt procent. Nie ogranicza to stosowania kompozytów w budowie najbardziej odpowiedzialnych konstrukcji. Doświadczenia z eksploatacji urządzeń z KP gromadzi się od ponad 40 lat i są one zdecydowanie pozytywne.

Do najważniejszych zastosowań KP należy wytwarzanie rur. Wymagane okresy eksploatacji rurociągów są długie, np. dla sieci miejskich wynoszą one co najmniej 50 lat. Ze względu na znaczenie gospodarcze sieci rurociągów ocena przydatności KP do długotrwałej pracy pod obciążeniem jest ważnym problemem praktycznym. Celem takich badań jest określanie wytrzymałości długotrwałej na potrzeby projektowania lub ocena porównawcza konkurujących materiałów. Dobór materiału może silnie wpływać na trwałość wyrobu. W pracy [1] opisano badania rur ciśnieniowych, w których zmiana preparacji włókien spowodowała 30-krot-

[1] dr inż.

ny wzrost trwałości zmęczeniowej. Pokazuje to, ile można zyskać lub stracić przy wyborze materiału.

Wytrzymałość długotrwałą rur z KP określa się np. wg amerykańskiej normy *ASTM D 2992* [2]. Zależnie od warunków eksploatacji stosuje się cykliczne obciążanie ciśnieniem (procedura *A*) lub długotrwałe ciśnienie o stałej wartości (procedura *B*). W każdej procedurze obciąża się szereg próbek na kilku poziomach obciążenia aż do zniszczenia. Wartości obciążeń powinny zapewnić rozkład punktów pomiarowych opisany w tabeli 1. Uzyskane wyniki przedstawia się w układach współrzędnych: oś odciętych - log(n) lub log(t), oś rzędnych - log(σ) lub log(P), gdzie σ oznacza naprężenie obwodowe. Podane zależności pozwalają określić prostą regresji oraz wytrzymałość długotrwałą *LTHS* (*long term hydrostatic strength*). Jest to naprężenie obwodowe w ściance, które powoduje zniszczenie próbki po $150 \cdot 10^6$ cykli (*A*) lub 10^5 h, tj. 11,4 latach (*B*). Wartość *LTHS* służy do określenia naprężeń dopuszczalnych dla przewidywanego okresu eksploatacji (metodą ekstrapolacji liniowej).

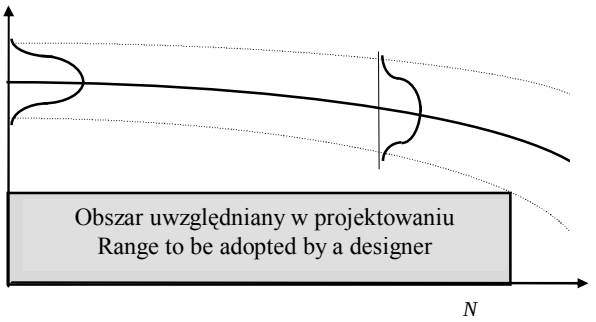
Badania wg *ASTM D2992* realizuje się na dużych próbkach (np. rurach o średnicy 200÷400 mm i długości 1÷2 m), co podnosi ich wiarygodność. Określenie *LTHS* trwa do dwóch lat i jest kosztowne. Wyniki można ekstrapolować o 1,5 dekady poza okres prób (tj. do 40÷50 lat). Norma *ASTM D 2992* opisuje jedną z kilku metod oceny wytrzymałości długotrwałej rur z KP [3, 4].

TABELA 1. **Wymagania normy *ASTM D2992* dotyczące rozkładu punktów doświadczalnych**
TABLE 1. ***ASTM D 2992* recommendation for the test**

Procedura *A*		Procedura *B*	
Liczba cykli do zniszczenia n Number of cycles n to fracture	Ilość próbek zniszczonych Number of fractured samples	Czas do zniszczenia próbki, h Time to fracture, hr	Ilość próbek zniszcz. Number of fract. sample
1000÷10 000	≥ 3	10÷1000	≥ 4
10 000÷100 000	≥ 3	1000÷6000	≥ 3
100 000÷1 000 000	≥ 3	≥ 6000	≥ 3
≥ 15 000 000	≥ 1	≥10 000	≥ 1
Razem (Total)	≥ 18	Razem	≥ 18

KONCEPCJA METODY OCENY WYTRZYMAŁOŚĆI DŁUGOTRWAŁEJ

Procesy degradacji mechanicznej KP, zachodzące pod wpływem długotrwałych obciążeń zmęczeniowych lub statycznych, powodują m.in. spadek wartości średniej wytrzymałości materiału $R_m(n)$, a często również wzrost pola jej rozrzutu statystycznego (tj. odchylenia standardowego OS) [5]. Taki charakter zmian wytrzymałości jest przedstawiony na rysunku 1. Opublikowane dane doświadczalne potwierdzają na ogół charakter krzywej (rys. 1) [6, 7].



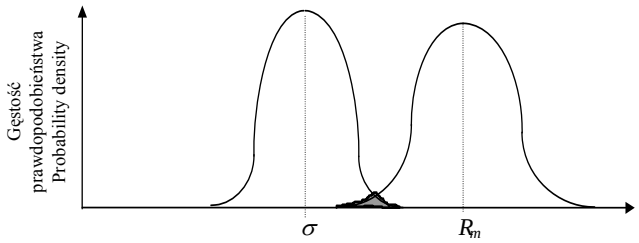
Rys. 1. Przypadek degradacji zmęczeniowej charakteryzujący się stopniowym spadkiem wartości średniej wytrzymałości $R_m(n)$ oraz wzrostem jej rozrzutu statystycznego

Fig. 1. Fatigue degradation characterised by gradually lower mean tensile strength values accompanied by higher scatter

Ponieważ szybkość spadku krzywej $R_m(n)$ jest zwykle mniejsza niż szybkość degradacji modułów sprężystości, wielu autorów uznaje, że wytrzymałość resztkowa jest parametrem mniej przydatnym do oceny trwałości i stopnia uszkodzenia materiału niż np. moduły sprężystości. Jest to pogląd uproszczony, ponieważ nie uwzględnia on wpływu zmian pola statystycznego rozrzutu wartości wytrzymałości (rys. 1), które mogą mieć bardzo istotny wpływ na trwałość i niezawodność elementu (tj. prawdopodobieństwo awarii). Współczes-ne podejście do oceny wytrzymałości materiałów i konstrukcji uwzględnia zależność pomiędzy wartościami średnimi przyłożonego naprężenia i wytrzymałości oraz ich rozrzutem a prawdopodobieństwem zniszczenia (rys. 2). Wspólne (zaciemnione) pole pod wykre-sami gęstości prawdopodobieństwa oznacza prawdopodobieństwo awarii. Jak wynika z rysunku 2, degradacja materiału polegająca tylko na wzroście rozrzutu statystycznego wytrzymałości (spłaszczenie i poszerzenie prawego wykresu na rys. 2) bez równoczesnego obniżenia jej wartości średniej (co odpowiadałoby przesunięciu prawego wykresu w lewo) również może zwiększać prawdopodobieństwo zniszczenia. Rozrzut statys-tyczny wytrzymałości może zatem istotnie wpływać na niezawodność elementu. Ilość publikowanych wyników pozwalających ocenić zakres zmian degradacyjnych zarówno wartości średniej, jak i rozrzutu statystycznego wytrzymałości jest niewielka. Zwykle liczba próbek na punkt pomiarowy nie przekracza 5, co pozwala ocenić wartość średnią, lecz nie wystarcza do dokładnego oszacowania odchylenia standardowego (OS). W pracy [6] opisano przykłady badań własnych nad degradacją zmęczeniową kompozytu UD, w których zmiany OS wytrzymałości wpływały na współczynnik bezpieczeństwa w stopniu nawet o rząd większym niż zmiany jej wartości średniej. Pomimo tak dużego wpływu rozrzutu wytrzymałości na niezawodność problem ten jest podejmowany niezwykle rzadko.

Istnieje jeszcze jeden aspekt rozrzutu wytrzymałości związany z efektem skali (ES). Z teorii Weibulla wynika, że wytrzymałość elementu zależy od jego objętości, co wyraża zależność

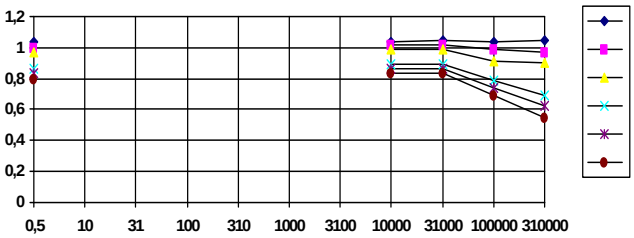
$$\frac{R_1}{R_0} = \left(\frac{V_0}{V_1}\right)^{1/m} \tag{1}$$



Rys. 2. Probabilistyczne ujęcie zagadnienia wytrzymałości. Powierzchnia wspólna wykresów (ciemne pole) przedstawia prawdopodobieństwo zniszczenia elementu o wytrzymałości R_m obciążonego naprężeniem σ

Fig. 2. Probabilistic approach to the strength concept. The common area of the graphs is the probability that a component loaded by a stress σ shall fracture if material's strength is R_m

Można przyjąć, że R_0 oraz V_0 oznaczają wytrzymałość i objętość próbki a R_1 oraz V_1 - wytrzymałość i objętość elementu konstrukcji zachowującego podobieństwo geometrii i obciążenia. Parametr m, tzw. moduł Weibulla, jest związany z rozrzutem statystycznym wytrzymałości i można go oszacować ze wzoru $m = 1{,}2/C_V$ [8], gdzie C_V oznacza współczynnik zmienności wytrzymałości materiału, określony jako stosunek odchylenia standardowego do wartości średniej. Wartości C_V określone w próbach wytrzymałości KP wynoszą zazwyczaj kilka procent. Zależność (1) pozwala oszacować wytrzymałość elementu konstrukcyjnego o objętości $V_1/V_0 = k$ razy większej od objętości próbki przy zachowaniu warunków dotyczących podobieństwa geometrii i sposobu obciążania. Jeżeli np. masa próbki wynosi 100 g, a elementu 100 kg, to $k = 10^3$. Zakładając wyjściowy współczynnik zmienności $C_V = 0{,}05$ (co jest wartością typową dla materiałów o dobrej jakości), można obliczyć wartość modułu Weibulla $m = 1{,}2/0{,}05 = 24$. Ze wzoru (1) otrzymujemy $R_1 = 0{,}75R_0$, a zatem wytrzymałość materiału w rozważanym elemencie o masie 100 kg jest o 25% obniżona w stosunku do wytrzymałości określonej na próbkach o masie 100 g. Dla masy elementu równej 1000 kg ($k = 10^4$) wytrzymałość będzie niższa o 32%. Zakładając $C_V = 2{,}5\%$, spadek wytrzymałości wynosi 13,4% dla masy 100 kg i 17,5% dla masy 1000 kg. Dla $C_V = 10\%$ spadki wytrzymałości elementu wynoszą: 44% dla masy 100 kg i 53,6% dla masy 1000 kg. Z przytoczonych szacunków wynika, że rozrzut statystyczny stwierdzony w badaniach materiałowych ma bardzo znaczący wpływ na zdolność konstrukcji do przenoszenia obciążeń, szczególnie w przypadku elementów wielkogabarytowych. Na rysunku 3 są przedstawione zmiany wytrzymałości próbek z kompozytu UD epoksydowo-szklanego, poddanego cyklicznemu trójpunktowemu zginaniu w zakresie do $0{,}6R_m$ oraz zmiany wytrzymałości elementu o masie 10^3 razy większej, oszacowane wg zależności (1). Oszacowany spadek wytrzymałości konstrukcji wynosi 17% w próbie statycznej i 38% po zastosowaniu $n = 310\,000$ cykli obciążenia. Tylko 2,7% ze wspomnianych 38% wynika ze spadku średniej wytrzymałości materiału spowodowanej zmęczeniem, 17% jest wyjściowym ES, a około 18,3% spadku wynika ze sprzężenia degradacji zmęczeniowej z ES (tj. z uwzględnienia w zal. (1) wzrostu rozrzutu). Dla $n = 10^5$ (mniejsza degradacja) udział różnych składników w spadku wytrzymałości wynosi: 1,5% (spadek średniej) + 17% (wyjściowy ES) + 7,9% (sprzężenie) = 26,4%.



Rys. 3. Zmiany unormowanej wytrzymałości na zginanie kompozytu UD po cyklicznym trójpunktowym zginaniu (rozstaw podpór $L/h = 16$). Pasmo górne przedstawia $R_m \pm$ OS określone na próbkach. Pasmo dolne przedstawia wytrzymałość resztkową materiału ± OS dla elementu o masie 1000 razy większej

Fig. 3. Variation of normalized bending strength of UD composite in cyclic 3-point bending (distance between supports L/h = 16). The top band represents the $R_m \pm$ SD (standard deviation) values found from specimens. The lower band stands for the total material strength ±OS for a component with mass 10^3 times higher

Jak wiadomo, rozrzut wytrzymałości materiału poddanego działaniu obciążeń zmęczeniowych lub innych czynników powodujących degradację może stopniowo wzrastać. Jeżeli wystąpi to w badaniach prowadzonych na próbkach, to zgodnie ze wzorem (1) nawet przy braku spadku wartości średniej wytrzymałości wystąpi zmniejszenie nośności konstrukcji. Jeżeli równocześnie wystąpi spadek wartości średniej, to spadek końcowy jest sumą obydwu składowych spadków.

Przeglądy publikacji potwierdzają występowanie ES w KP [8, 9]. W badaniach laboratoryjnych osiąga się często dobrą zgodność ilościową. Nieliczne badania konstrukcji potwierdzają występowanie ES co najmniej w sensie jakościowym [9]. Podczas oceny porównawczej KP można przyjąć spełnianie zależności (1). Jeżeli degradacja materiału przebiega podobnie jak na rysunku 1, to proponuje się następującą procedurę oceny porównawczej KP do budowy konstrukcji pracujących przy

długotrwałych obciążeniach statycznych lub zmęczeniowych:

1. Analiza warunków pracy oraz przebiegów naprężeń w punktach krytycznych elementu w celu ustalenia warunków realizacji prób materiałowych zapewniających podobny przebieg degradacji materiału i konstrukcji (mechanizmy na poziomie mezo, kinetyka procesu).
2. Określenie wytrzymałości doraźnej R_m na zwiększonej liczbie próbek (8-10) oraz przebiegu krzywej degradacji $R_m - \Delta R_{(1)}$, tj. wartości średniej wytrzymałości resztkowej próbek wraz z jej odchyleniem standardowym (np. 3-4 punkty pomiarowe z min. 8 próbkami na punkt).
3. Określenie spadku wytrzymałości elementu związanego z ES - $\Delta R_{(2)}$, ze wzrostem rozrzutu - $\Delta R_{(3)}$ (zal. (1)) oraz wytrzymałości końcowej elementu $R_k = R_m - (\Delta R_{(1)} + \Delta R_{(2)} + \Delta R_{(3)})$.

Przedstawiona procedura umożliwia tworzenie „list rankingowych" materiałów pod względem ich przydatności do budowy konstrukcji przeznaczonych do długotrwałej pracy pod obciążeniem. W porównaniu do metod stosowanych obecnie (np. *ASTM D2992*) badania można przeprowadzić taniej i szybciej w przeciętnie wyposażonym laboratorium wytrzymałościowym. Stanowi to znaczne ułatwienie w stosunku do normy *ASTM D2992*, która wymaga kosztownego wyposażenia, obecnego tylko w nielicznych laboratoriach europejskich.

PODSUMOWANIE

W ostatnich latach KP są wprowadzane na szeroką skalę w budowie rurociągów komunalnych i przemysłowych. Ponieważ wymagane okresy trwałości tych kosztownych urządzeń są wyjątkowo długie, dużego znaczenia nabiera problem optymalnego wyboru producenta materiału. Obecnie obserwuje się brak niezależnych danych umożliwiających porównywanie materiałów ze względu na możliwość osiągnięcia maksymalnej trwałości rurociągu. Przedstawiona propozycja metody badań porównawczych KP umożliwia ustalanie rankingów oferowanych materiałów na podstawie aktualnej wiedzy o procesach degradacji kompozytów oraz opis zjawiska zwanego efektem skali. Proponowana procedura umożliwia ominięcie problemów technicznych związanych z badaniami próbek wielkogabarytowych oraz pozwala na znaczne skrócenie czasu prób w porównaniu z badaniami wg normy *ASTM D2992*. Przedstawiona koncepcja jest dosyć ogólna i wymaga dalszych badań. Zakres stosowania metody może obejmować inne materiały.

LITERATURA

[1] Pabiot J. i in., Influence of the fibre/matrix interface on the long-term behaviour of filament wound epoxy/ glass tubing systems, Composite Polymers 1991, 4, 5, 299-315.

[2] ASTM D 2992 (1991), Standard Practice for Obtaining Hydro- static or Pressure Design Basis for „Fiberglass" (Glass-Fiber-
-Reinforced Thermosetting-Resin) Pipe and Fittings.

[3] Bełzowski A., Krawczak P., Pabiot J., Zagadnienie wytrzymałości długotrwałej rur z kompozytów polimerowych, Dozór Techniczny 2000, 2(188), 31-36.

[4] Marques Torres A., De Brito Martins F., Comparaison of methodologies for prediction of long-term properties of GRP pipes, Conf. Proc. Progress in Durability Analysis of Composite Systems, eds Reifsnider & Cardon Balkema, Rotterdam 1998, 289-294.

[5] Beaumont P.W.R., The failure of fibre composites: an overviev, J. Str. Anal. 1989, 24, 4, 189-205.

[6] Bełzowski A., Badanie degradacji mechanicznej oraz ocena stopnia uszkodzenia polimerowych kompozytów włóknistych, II International Congress of Technical Diagnostics, Warszawa 2000, 10.

[7] Andersons J., Korsgaard J., Residual strength of GRP at high cycle fatigue, ICCM11 1997, SII-135-144.

[8] Zweben C., Is there a size effect in composites? Composites 1994, 25, 6, 451-454.

[9] Wisnom M.R., Size effects in the testing of fibre-composite materials, Comp. Sci. Technol. 1999, 59, 1937-1957.

Recenzent
Andrzej P. Wilczyński