

Andrzej Belzowski<sup>1</sup>

Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczny, Wydziałowy Zakład Wytrzymałości Materiałów, ul. Smoluchowskiego 25, 50-370 Wrocław

## ZASADY DOBORU WSPÓŁCZYNNIKÓW BEZPIECZEŃSTWA KONSTRUKCJI Z MATERIAŁÓW KOMPOZYTOWYCH

Przedstawiono najważniejsze koncepcje określania współczynników bezpieczeństwa  $\delta$  oraz odkształceń i naprężeń dopuszczalnych elementów konstrukcyjnych wykonanych z kompozytów polimerowych. Omówiono klasyczne podejście deterministyczne (tab. 1), w którym zaleca się minimalne wartości  $\delta$  przyjmowane względem wytrzymałości doraźnej. Ta koncepcja nie sprzyja optymalizacji konstrukcji, a jej racjonalne stosowanie wymaga od konstruktora dobrej znajomości problematyki kompozytów. Przedyskutowano zastosowanie tego podejścia w konstruowaniu zbiorników wysokociśnieniowych. Drugą omówioną koncepcją jest określanie odkształceń dopuszczalnych względem progu uszkodzeń mikrostrukturalnych FPF. Jest ona bardziej racjonalna od pierwszej, ale w zastosowaniach innych niż chemoodporne może prowadzić do nadmiernych zapasów nośności. Trzecim przedstawionym podejściem jest określanie naprężeń dopuszczalnych na podstawie wytrzymałości długotrwałej. Podejście to prowadzi do rozwiązań bezpiecznych i niezawodnych, ale wiąże się z koniecznością przeprowadzania kosztownych prób wyznaczania wytrzymałości długotrwałej (rys. rys. 1 i 2). Czwartą omówioną koncepcją jest metoda współczynników cząstkowych wywodząca się z teorii niezawodności. Przedstawiono jej podstawy teoretyczne (zależności (3)-(7)) oraz przedyskutowano opisaną w literaturze propozycję stosowania do obliczeń konstrukcji budowlanych (wzór (8)). Wskazano kilka przykładów znaczących różnic koncepcji określania zapasu wytrzymałości odnoszących się do podobnych zastosowań.

Słowa kluczowe: kompozyty polimerowe, współczynnik bezpieczeństwa

### DETERMINATION OF SAFETY FACTORS IN COMPOSITE STRUCTURES

Discussed are various concepts of determining  $\delta$  safety factors and working strains/stresses in structural components made of polymer composites. First, the classic deterministic approach is presented (Table 1) which recommends minimum values of  $\delta$  with respect to the short-term strength. This approach is not favourable to optimising attempts in the design process and presumes a designer to possess a considerable experience in a particular area of composite design and application. High-pressure vessels were chosen to show this approach in action. The second concept involves working strains as determined with respect to the threshold microstructural damage (FPF). The concept is shown to be more rational than the first one, but outside the chemically-resistant equipment it can produce designs with excessive load capacity. The third approach involves working stresses as determined with respect to the long-term strength. The resulting designs are safe and reliable, but the required reference tests are costly and time-consuming (Figs. 1, 2). The fourth concept involves partial safety factors used earlier in the reliability theory. Some essential theory behind the concept is presented (formulas (3)-(7)) along with a particular implementation concerned with civil engineering structures (formula (8)). A few examples are presented of how the remaining life estimation may differ for a given design if various approaches are used.

Key words: polymer-matrix composites, safety factor

### WSTĘP

Stosowanie kompozytów polimerowych (KP) wzmocnionych włóknami w wytwarzaniu elementów konstrukcji wymaga określenia rezerwy wytrzymałości dostosowanej do poziomu oczekiwanej trwałości, niezawodności i bezpieczeństwa eksploatacji. Jest to szczególnie ważne w urządzeniach podlegających podwyższonym standardom w zakresie wymaganej niezawodności i bezpieczeństwa eksploatacji. Do tej kategorii zastosowań zalicza się chemoodporną aparaturę przemysłową [1, 2], wysokociśnieniowe zbiorniki do sprężonych gazów [3], rurociągi w elektrowniach atomowych [4] i na platformach wiertniczych [5] oraz konstrukcje lotnicze. Podobnie dużej trwałości i niezawodności oczekuje się od kompozytów stosowanych

w energetyce wiatrowej [6] i konstrukcjach budowlanych [7].

Charakterystyczną cechą KP są stopniowe zmiany właściwości mechanicznych. W pracy [8] podano, że wytrzymałość na rozciąganie  $R_m$  kompozytów jednokierunkowych (UD) wzmocnionych włóknem szklanym po 50 latach działania stałego obciążenia obniża się do 29% jej wartości początkowej. W kompozytach UD wzmocnionych włóknem aramidowym (kevlar 49) i węglowym wytrzymałość spada do 47 i 93% wartości początkowej. Opublikowano wiele wyników badań o podobnej wymowie. Stopniowe zmiany właściwości mechanicznych w stopach metali nie występują lub są

<sup>1</sup> dr inż.

nieduże i na ogół nie stanowią problemu przy określaniu naprężeń dopuszczalnych dla potrzeb projektowania.

Przebieg degradacji i zniszczenia kompozytów polimerowych poddanych działaniu obciążeń próbnych lub eksploatacyjnych zależy głównie od struktury wzmocnienia materiału i właściwości jego składników. Klasyfikując zjawiska powodujące stopniowe zmiany właściwości kompozytów, wyróżnia się:

- degradację mechaniczną - wywołaną przez długotrwałe obciążenia stałe lub zmienne, udarowe itp.,
- degradację fizyczną,
- degradację chemiczną.

Często różne typy degradacji kompozytów występują równocześnie, wzmacniając się synergicznie. Taki przypadek stanowi korozja naprężeniowa. Ponieważ zmiany wytrzymałości i modułów sprężystości KP występują w temperaturach otoczenia już przy niedużych wartościach odkształceń (naprężeń, obciążeń), metody projektowania wytrzymałościowego muszą uwzględniać te cechy materiału.

W artykule omówiono wybrane ważniejsze sposoby określania zapasu wytrzymałości (lub nośności) elementów kompozytowych. Zwrócono uwagę na: przypadki niespójności zasad stosowanych w różnych przepisach odnoszących się do podobnych zastosowań, niedostosowanie koncepcji metod do stanu wiedzy o procesach degradacji kompozytów oraz niedostateczne uwzględnianie nowoczesnych metod wywodzących się z teorii niezawodności i odnoszących się do tej klasy problemów. W wielu monografiach i podręcznikach poświęconych mechanice i wytrzymałości materiałów kompozytowych tematyka ta nie jest poruszana.

## KLASYCZNE PODEJŚCIE DETERMINISTYCZNE

W niektórych opracowaniach [9, 10] podaje się zalecane wartości współczynników bezpieczeństwa  $\delta$  do stosowania w obliczeniach elementów kompozytowych z warunku wytrzymałości (tab. 1).

TABELA 1. Minimalne wartości współczynników bezpieczeństwa wg [9]

TABLE 1. Minimum values of safety factors, after [9]

| Rodzaj obciążenia                     | Minimalny współczynnik bezpieczeństwa $\delta$ |
|---------------------------------------|--|
| Krótkotrwałe statyczne                | 2  |
| Długotrwałe statyczne                 | 4  |
| Długotrwałe działające tylko okresowo | 4  |
| Zmęczeniowe, przemienne               | 6  |
| Udarowe                               | 10   |

Podane wartości współczynnika  $\delta$  stosuje się do określania naprężeń dopuszczalnych  $K_r$  wg zależności

$$K_r = R_m / \delta \quad (1)$$

Wartości przytoczone w tabeli 1 mogą stanowić wskazówkę dla konstruktorów, szczególnie ceną w przypadku braku norm i przepisów kodyfikujących obliczenia danego typu urządzeń. Stosowanie zależności (1) może jednakże prowadzić do nadmiernych lub niedostatecznych zapasów nośności elementów. Wytrzymałość materiału  $R_m$  określa się w próbie krótkotrwałej, podczas gdy okres użytkowania urządzeń wykonanych z materiałów kompozytowych wynosi często kilkadziesiąt lat (np. kadłubów jachtów 25-30 lat, rurociągów 20-50 lat). Z tabeli 1 wynika, że pręt epoksydowo-szkłany o wzmocnieniu UD, stanowiący element konstrukcji budowlanej, można zaprojektować ze współczynnikiem bezpieczeństwa  $\delta = 4$ . Jak podano we wstępie, w ciągu 50 lat wytrzymałość materiału takiego pręta może obniżyć się do  $0,29R_m$ . Wartość współczynnika  $\delta$  wyniosłaby wtedy  $0,29/0,25 = 1,16$ . Ponieważ oczekiwany okres użytkowania obiektów budowlanych z reguły przekracza 50 lat, wartość  $\delta = 1,16$  jest niewątpliwie zbyt mała.

Przedstawiony sposób doboru współczynnika  $\delta$  nie skłania do różnicowania jego wartości w zależności od rodzaju włókien i osnowy oraz struktury materiału kompozytowego, a wiadomo, że każdy z tych czynników może wywierać duży wpływ na szybkość degradacji materiału, determinując rzeczywistą trwałość elementu. Bezkrytyczne stosowanie zależności (1) i wartości z tabeli 1 niewątpliwie ogranicza możliwości optymalizacji konstrukcji. Chociaż podane w tabeli 1 wartości współczynników bezpieczeństwa można poddawać krytyce, to ich znajomość i rozsądne stosowanie (poparte dobrą znajomością problematyki tych materiałów) przypuszczalnie pozwoliłoby uniknąć niejednego błędu popełnionego w ocenie bezpieczeństwa konstrukcji. Można tu wymienić przypadek urządzenia przewidzianego do pracy w środowisku organicznym i przenoszącego obciążenia zmęczeniowe, którego współczynnik bezpieczeństwa  $\delta = 4,5$  uznano za wystarczający, pomimo iż ewentualna awaria stworzyłaby bezpośrednie zagrożenie życia ludzi. Aparatura procesowa, stwarzając zagrożenie porównywalne lub mniejsze, jest projektowana ze współczynnikami bezpieczeństwa nie mniejszymi niż 6 [11] lub 8 [2]. W tym przypadku zastosowanie się do zaleceń z tabeli 1 powinno spowodować przyjęcie współczynnika  $\delta$  równego nie 4,5, lecz co najmniej 6. Zwiększyłoby to istotnie bezpieczeństwo urządzenia w stosunku do zbyt optymistycznej oceny konstruktora, dokonanej przypuszczalnie w oparciu o doświadczenia wyniesione z konstruowania urządzeń stalowych.

Niekiedy uwarunkowania techniczne wymuszają stosowanie niedużych współczynników bezpieczeństwa, co

jednakże kompensuje się, intensyfikując inne sposoby zapewnienia niezawodności, takie jak: badania prototypów, kontrola jakości wyrobów, monitorowanie urządzeń podczas eksploatacji, ustalenie rezerwu itp. Przykładem takiego kompleksowego rozwiązania problemu bezpieczeństwa eksploatacji urządzeń stanowią zbiorniki wysokociśnieniowe do sprężonych gazów montowane w pojazdach oraz przenośne [3, 12-14].

W zbiornikach do sprężonego metanu stosowanego jako paliwo w pojazdach ciśnienie użytkowe  $p$  wynosi przeważnie 200 barów [2, 12]. Zbiorniki do sprężonego powietrza, tlenu itp. używane przez służby ratownicze (straż pożarną, ratownictwo medyczne) są przewidziane na ciśnienie robocze 300 barów [13, 14]. Zastosowanie KP epoksydowo-węglowych i epoksydowo-aramidowych umożliwia obniżenie masy własnej zbiorników wysokociśnieniowych nawet o 70% w stosunku do metali. Przyjęcie podejścia deterministycznego (ze swej natury schematycznego i niesprzyjającego optymalizacji konstrukcji) w ustaleniu zapasu nośności urządzeń, które cechują się dużym wyrafinowaniem technicznym i bardzo wysokim poziomem wymaganej niezawodności, jest dosyć zaskakujące.

Okolicznością ułatwiającą określenie współczynników bezpieczeństwa jest stosunkowo dobra znajomość wartości obciążeń maksymalnych (znajomość dopuszczalnego ciśnienia użytkowania) oraz liczby cykli obciążenia (równiej liczbie napełnień zbiornika). Względna lekkość zbiorników wysokociśnieniowych osiąga się, przyjmując umiarkowane wartości współczynników bezpieczeństwa. Niezawodność i bezpieczeństwo zapewnia się dzięki starannej weryfikacji nowych rozwiązań podczas skomplikowanego programu prób homologacyjnych, rygorystycznej kontroli na etapie wytwarzania, okresowemu monitorowaniu urządzeń eksploatowanych oraz ustalaniu rezerwu (15-20 lat dla zbiorników do sprężonego metanu).

Współczynniki bezpieczeństwa metalowych zbiorników do sprężonego powietrza ze wzmocnieniem kompozytowym na części cylindrycznej [14] lub pełną powłokę nośną z kompozytu [13] wynoszą 3, niezależnie od rodzaju zastosowanych włókien. Włókno węglowe jest znacznie bardziej odporne na degradację zmęczeniową od kevlaru 49 i włókna szklanego. Podobnie wypada porównanie wymienionych włókien pod względem odporności na powstawanie pęknięć poprzecznych (tzw. stan FPF [15]), gdzie włókno węglowe również jest najlepsze. Niska wartość odkształcenia FPF ułatwia rozwój korozji naprężeniowej. Opisane w literaturze dwie awarie kompozytowych zbiorników wysokociśnieniowych powstały wskutek korozji naprężeniowej wywołanej przez kontakt zbiornika z substancjami agresywnymi. Wartość współczynnika bezpieczeństwa  $\delta = 3$  podana w normach [13, 14] dowodzi, że niestety nie uwzględniają one zależności szybkości degradacji materiału od typu włókna wzmacniającego kompozyt. Jest to

dosyć zaskakujące, ponieważ wspomniane normy opublikowano stosunkowo niedawno (w 1997 roku).

Znacznie lepsze rozwiązanie, różnicujące wartości współczynnika bezpieczeństwa w zależności od typu włókien wzmacniających powłokę kompozytową przyjęto w normie ISO/DIS 11439 [12], określającej zasady konstruowania, kontroli jakości, homologacji itp. zbiorników do sprężonego metanu. Określony tam minimalny współczynnik bezpieczeństwa zbiornika z kompozytu wzmocnionego włóknem węglowym wynosi  $\delta = 2,35$ . Dla wzmocnienia aramidowego (kevlar 49 itp.) przyjęto  $\delta = 3,10$ , a dla wzmocnienia szklanego -  $\delta = 3,65$ . Przyjęte zróżnicowanie wartości  $\delta$  jest dobrze dostosowane do aktualnego stanu wiedzy o zmęczeniu i powstawaniu pęknięć poprzecznych w laminatach, chociaż takie uzasadnienie nie jest przytoczone explicite w tekście normy ISO/DIS 11439.

## OCENA ODKSZTAŁCEŃ DOPUSZCZALNYCH NA PODSTAWIE USZKODZEŃ MATERIAŁU

Koncepcją niewątpliwie lepiej dostosowaną do specyfiki polimerowych kompozytów konstrukcyjnych jest zdefiniowanie stanu niebezpiecznego w materiale na podstawie zmian jego struktury. Naprężenia lub odkształcenia dopuszczalne określa się względem tego stanu. Ideę tego podejścia w odniesieniu do kompozytów chemoodpornych stosowanych w budowie instalacji i aparatury procesowej opisał Eckold [15]. Powstanie pęknięć poprzecznych (FPF) intensyfikuje infiltrację substancji znajdującej się w urządzeniu (z założenia agresywnej chemicznie) do warstw nośnych zawierających włókna szklane E, cechujące się dużą wytrzymałością ale, zarazem dużą wrażliwością na korozję. W ściankach wielu zbiorników powstają momenty zginające, co sprzyja powstawaniu pęknięć przy powierzchni powłoki. Antykorozyjne warstwy ochronne, wytwarzane na wewnętrznej powierzchni rur itp. urządzeń z żywicy wzmocnionej matą powierzchniową (z chemoodpornego włókna szklanego C) nie dają pełnej gwarancji chemoodporności kompozytu. Każde ich uszkodzenie w postaci pęknięcia stanowi potencjalne miejsce rozwoju korozji naprężeniowej.

Eckold podaje, że progowa wartość odkształcenia  $\epsilon_{FPF}$  powodującego powstanie pierwszego pęknięcia poprzecznego w kompozytach chemoodpornych nie powinna być mniejsza niż 0,3%. Zakładając współczynnik bezpieczeństwa równy 1,5 względem progu uszkodzenia materiału określonego przez  $\epsilon_{FPF}$ , przyjęto wartość odkształcenia dopuszczalnego urządzeń z kompozytów chemoodpornych  $\epsilon_{proj} = 0,2\%$ . Taki sposób określania odkształceń dopuszczalnych dobrze uwzględnia specyfikę kompozytów chemoodpornych. W pracy [16] podano opis badań wytrzymałości długotrwa-

lej rur poliesterowych wzmocnionych matą z ciętych włókien szklanych. Rury wypełnione kwasem solnym obciążano ciśnieniem wywołującym odkształcenie obwodowe 1% (tj. pięciokrotnie większym od podanej wyżej wartości  $\varepsilon_{proj} = 0,2\%$ ). Okazało się, że rury z nieuszkodzoną warstwą ochronną ulegały zniszczeniu po upływie 1,9 roku, rury bez warstw ochronnych - po 200 minutach, a rury z popękana warstwą ochronną - po 30 minutach. Wynika z tego, że popękane warstwy ochronne nie zabezpieczają warstw nośnych i niedopuszczenie do powstania pęknięć przebiegających przez całą grubość tych warstw jest warunkiem uzyskania dużej trwałości kompozytu.

Koncepcja opisana przez Eckolda [15] została zastosowana już w 1973 roku do określania wartości odkształceń dopuszczalnych w projektowaniu zbiorników kompozytowych wg pierwszej wersji normy [2]. Ponieważ odkształcenie niszczące kompozytów stosowanych w wytwarzaniu aparatury chemooodpornej wynosi przeważnie około  $1,8\div 2\%$ , warunek  $\varepsilon_{proj} = 0,2\%$  odpowiada przyjęciu odkształceniowego współczynnika bezpieczeństwa równego około  $9\div 10$ . Podaną wartość odkształcenia  $\varepsilon_{proj} = 0,2\%$  porównuje się z odkształceniem dopuszczalnym określonym jako  $1/10$  odkształcenia niszczącego żywicy niewzmocnionej. Mniejsza z tych dwóch wartości zostaje przyjęta za odkształcenie dopuszczalne materiału.

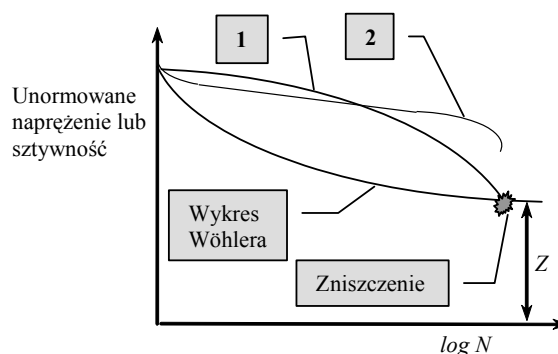
Podobne, chociaż bardziej ostrożne zasady przyjmowania odkształceń dopuszczalnych określono w normie BS 7159 [17], służącej do projektowania rurociągów kompozytowych pracujących w przemyśle chemicznym. W zależności od warunków pracy urządzenia (co odnosi się głównie do temperatury i agresywności środowiska) wyróżniono tam cztery wartości odkształceń dopuszczalnych: 0,09, 0,12, 0,15 i 0,18%. Odpowiadają one odkształceniowym współczynnikom bezpieczeństwa wynoszącym około  $10\div 20$  (przy odkształceniu niszczącym materiału równym 1,8%). Chociaż norma BS 7159 określa odkształcenia dopuszczalne podobnie jak BS 4994; tj. na podstawie odkształcenia powodującego utworzenie w materiale pęknięć niebezpiecznych, przyjęte tam wartości  $\varepsilon_{proj} = 0,09\div 0,18\%$  prowadzą do większej rezerwy wytrzymałości. Podanie wartości odkształceń dopuszczalnych jest jednym z kilku alternatywnych sposobów określenia zapasu bezpieczeństwa opisanych w BS 7159 i BS 4994.

Z punktu widzenia ogólnych zasad bezpiecznej pracy urządzeń najbardziej istotne w przedstawionej koncepcji jest odwołanie się do definicji stanu niebezpiecznego określonego na podstawie mikrostruktury materiału. Jest to niewątpliwie duży postęp w stosunku do postępowania opartego o wartości podane w tabeli 1 itp. Określenie wartości  $\varepsilon_{FPF}$  jest dość trudne technicznie. W praktyce inżynierskiej często wystąpienie pierwszych nieregularności na wykresie rozciągania (takich jak zmiana nachylenia, uskok) traktuje się jako utworzenie pęknięć po-

przecznym FPF. Symptodem wystąpienia FPF jest nasilenie emisji akustycznej rejestrowanej przez układ pomiarowy z progiem czułości na poziomie  $38\div 40$  dB. Wartości  $\varepsilon_{FPF}$  i  $\sigma_{FPF}$  zależą silnie od struktury laminatu oraz właściwości włókien, żywicy i warstwy granicznej. Ponadto cechuje je duży rozrzut statystyczny i zależność od historii obciążenia materiału, jednakże nieliczne dane na ten temat są rozproszone w różnych opracowaniach.

## OCENA NAPRĘŻEŃ DOPUSZCZALNYCH NA PODSTAWIE BADAŃ DŁUGOTRWAŁYCH

Jedną z koncepcji doboru zapasu nośności elementów wykonanych z KP polega na określeniu naprężeń lub odkształceń dopuszczalnych na podstawie wytrzymałości długotrwałej materiału. Sposób ten jest stosowany między innymi w obliczeniach rurociągów infrastruktury miejskiej i przemysłowej oraz aparatury procesowej. Na rysunku 1 pokazano schematycznie wykresy zmian wytrzymałości pozostałej (reszkowej), modułu sprężystości oraz wykres trwałości zmęczeniowej Wöhlera kompozytu zawierającego również warstwy słabe, tj. jednokierunkowe o niekorzystnej orientacji względem obciążenia (np. poprzeczne) lub warstwy o niedużej wytrzymałości (np. wzmocnione matą lub tkaniną). Wykres wytrzymałości pozostałej takiego materiału przebiega powyżej wykresu Wöhlera [18]. Idea przedstawionej koncepcji polega na określeniu naprężeń dopuszczalnych na podstawie najmniejszej wartości wytrzymałości długotrwałej oszacowanej dla przewidywanego okresu eksploatacji.

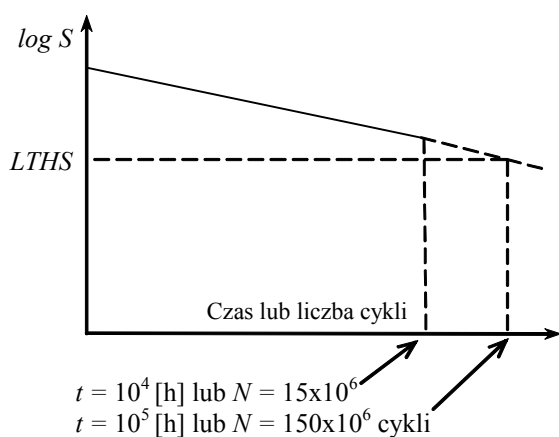


Rys. 1. Wykres Wöhlera oraz zmiany wytrzymałości (1) i modułu Younga (2) laminatu przy obciążeniach zmęczeniowych. Z oznacza wytrzymałość zmęczeniową

Fig. 1. S-N plot and variation of strength (1) and Young's modulus (2) for a fatigue tested laminate (Z - fatigue limit)

Metody określania wytrzymałości długotrwałej kompozytów chemooodpornych są opisane między innymi w normach BS 7159 [17] i ASTM D 2992 [19]. Polegają one na realizacji prób wytrzymałości na dużych próbkach rurowych (odcinkach rur) przy obciążeniu ciśnie-

niem stałym (tzw. procedura B wg ASTM D 2992) lub cyklicznie zmiennym (procedura A wg ASTM D 2992). Według ASTM D 2992 stosuje się co najmniej 18 próbek. Niektóre z nich pozostają pod obciążeniem nawet przez  $10^4$  h (około 14 miesięcy). Wartości naprężenia obwodowego określone metodą ekstrapolacji prostej regresji trwałości próbek do wartości czasu równej  $10^5$  h (około 11 lat) lub  $1,75 \times 10^5$  h (20 lat) nazywa się wytrzymałością długotrwałą *LTHS* (*Long Term Hydrostatic Strength*). Wartość naprężenia obwodowego obliczona na podstawie ekstrapolacji wyników prób do wartości czasu eksploatacji  $t = 50$  lat określa się jako *HDB* (*Hydrostatic Design Basis*). W normie BS 7159 przewiduje się badanie większej liczby próbek (25 sztuk), ale czasy trwania prób są krótsze (np. 6250 h zamiast 10 000 h). Zagadnienia te są omówione bardziej szczegółowo w pracach [20, 21].



Rys. 2. Określanie wytrzymałości długotrwałej *LTHS* przy długotrwałym obciążeniu ciśnieniem stałym lub zmiennym wg ASTM D 2992. Oś odciętych:  $\log t$  lub  $\log N$ . Oś rzędnych: logarytm naprężenia ( $\log S$ )

Fig. 2. Determination of long-term strength (*LTHS*) under long-term constant or variable pressure conditions acc. to ASTM D 2992. The abscissa is  $\log t$  or  $\log N$ , the ordinate-logarithm of stress ( $\log S$ )

Wartości wytrzymałości długotrwałej *LTHS* i *HDB* określone wg ASTM D 2992 służą do określania naprężeń dopuszczalnych w obliczeniach rurociągów i aparatury chemo odpornej. W normie ASME B31.3 [22], opisującej zasady obliczeń rurociągów i instalacji chemicznych, naprężenie dopuszczalne *HDS* (*Hydrostatic Design Stress*) podaje się jako iloraz wartości *HDB*, określonej przy długotrwałym stałym ciśnieniu przez współczynnik bezpieczeństwa równy 2. W przypadku obliczania naprężeń dopuszczalnych *HDS* na podstawie *HDB*, wyznaczonej przy długotrwałych obciążeniach cyklicznych, współczynnik bezpieczeństwa wynosi 1. Wartości te oddają relatywną „forsowność” procedur A i B opisanych w ASTM D 2992. Zarówno liczba cykli ciśnienia, jak i zakres jego zmian znacznie przekraczają wartości typowe dla instalacji przemysłowych. Częstotliwość obciążenia w badaniach prowadzonych wg

ASTM D 2992 wynosi 25 cykli/min. Próbkę obciążoną przez  $10^4$  h przenoszą  $15 \times 10^6$  cykli ciśnienia. Zakres ekstrapolacji może przekraczać  $150 \times 10^6$  cykli (*LTHS*), dochodząc do wartości  $N = 657 \times 10^6$  cykli (*HDB*). Nachylenie prostych regresji określonych na podstawie prób zmęczeniowych świadczy o większej szybkości spadku trwałości i wytrzymałości materiału<sup>1</sup> w porównaniu do wartości określonych przy długotrwałym obciążeniu statycznym. Charakterystyki rur epoksydowo-szklanych firmy Wavistrong o strukturze  $\pm 55^\circ$  obciążonych ciśnieniem z siłą osiową wynoszą: naprężenie obwodowe w chwili zniszczenia - 650 MPa, naprężenie obwodowe początku roszczenia - 250 MPa, *HDB* (wg ASTM D 2992 B) - 125 MPa, *HDS* - 63 MPa, a rur o wzmocnieniu  $\pm 63^\circ$  odpowiednio: 1000, 450, 200 i 100 MPa. Odpowiadałoby to przyjęciu we wzorze (1) wartości  $\delta = 650/63 \approx 10$ .

Według normy brytyjskiej BS 7159, wartość odkształceń dopuszczalnych określa się na podstawie wytrzymałości długotrwałej wyznaczonej przy obciążeniu statycznym z uwzględnieniem współczynnika bezpieczeństwa  $\delta = 1,3$ . Norma BS 7159 odnosi się do wytrzymałości długotrwałej określonej dla poziomu ufności 95%, podczas gdy w ASTM D 2992 określa się wartość średnią wytrzymałości długotrwałej. Ponieważ w BS 7159 uwzględniono statystyczny rozrzut wytrzymałości długotrwałej materiału, norma ta jest pod tym względem bardziej nowoczesna od ASTM D 2992.

W przepisach ASME Boiler and Pressure Vessel Code Sec. III, Article III-2200 „Fatigue Strength Criteria for All Materials” podano, że wartości współczynnika bezpieczeństwa powinny wynosić 20 względem trwałości zmęczeniowej (tj. liczby cykli) oraz 2 względem nieograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej (wg [24]). Autorzy pracy [24] wykazali niedoskonałość takiego podejścia polegającą na nieuwzględnieniu możliwości występowania różnic statystycznego rozrzutu właściwości materiału w zależności od jego indywidualnych cech, co może wpływać istotnie na niezawodność urządzenia. Badając różne materiały, ocenili oni, że przyjęcie naprężeniowego współczynnika bezpieczeństwa równego 2 prowadziło do prawdopodobieństwa zniszczenia  $10^{-14}$  w kompozycie wzmocnionym włóknem węglowym i  $10^{-8}$  w kompozycie wzmocnionym włóknem szklanym.

W pracy [25] opisano realizację projektu łopaty wirnika siłowni wiatrowej wykonanej z kompozytu. Na etapie projektowania wstępnego określono wyjściowy współczynnik bezpieczeństwa równy 5. Podstawą do wybrania tej wartości był wykres Wöhlera jednokierunkowego kompozytu epoksydowo-szklanego określony w badaniach prowadzonych do  $1,5 \times 10^7$  cykli. Wykres ten aproksymowano funkcją

<sup>1</sup> Wykresy trwałości zmęczeniowej (Wöhlera) wyznaczone w próbach realizowanych wg ASTM D 2992 utożsamia się z wykresami spadku wytrzymałości, chociaż w rzeczywistości są to różne krzywe (rys. 1).

$$\sigma/R_m = N^{-1/M} \quad (2)$$

gdzie  $\sigma$  oznacza naprężenie odpowiadające trwałości zmęczeniowej  $N$ . Wielkość  $R_m$  jest wytrzymałością statyczną materiału nieuszkodzonego, a wykładnik  $M = 13,5$ . Ekstrapolując wyniki za pomocą zależności (2) obliczono, że po 20 latach - co odpowiada liczbie cykli obciążenia równej  $3,73 \times 10^8$  - wytrzymałość materiału spadnie do  $0,2R_m$ . Na tej podstawie przyjęto współczynnik bezpieczeństwa  $\delta = 5$ . Nie była to wartość ostateczna, ponieważ konstrukcję łopaty opracowywano w kilku etapach i podlegała ona różnym modyfikacjom. Jak widać, współczynniki bezpieczeństwa przyjmowane do określenia naprężeń dopuszczalnych na podstawie wytrzymałości długotrwałej są relatywnie małe ( $\delta = 1 \div 2$ ).

Dobór zapasu wytrzymałości (lub nośności) elementu kompozytowego na podstawie wyników badań długotrwałych polega na ekstrapolacji uzyskanych krzywych doświadczalnych na cały okres przewidywanego użytkowania konstrukcji. Takie postępowanie uważa się za stosunkowo pewny, ale kosztowny sposób określania danych materiałowych potrzebnych do projektowania urządzeń. W przypadku urządzeń pracujących w podwyższonej temperaturze badania przyspieszone prowadzi się w maksymalnej temperaturze eksploatacji. Stosowanie próbek wielkogabarytowych zmniejsza wpływ efektu skali [26]. W przypadku rur można łatwo uwzględnić oddziaływanie płynu wypełniającego instalację. Wszystko to podnosi wprawdzie koszt badań materiałowych, ale pod względem przydatności do projektowania z uwzględnieniem czynnika czasu wiarygodność danych uzyskiwanych w długotrwałych badaniach przyspieszonych jest znacznie większa w porównaniu do wyników prób doraźnych (krótkotrwałych).

## CZĄSTKOWE WSPÓŁCZYNNIKI BEZPIECZEŃSTWA

Podstawą omawianej koncepcji jest założenie, że zarówno nośność elementu, jak i działające obciążenie są niezależnymi zmiennymi losowymi [27, 28]. Zakładając, że obciążenie i nośność (lub wytrzymałość) opisują rozkłady statystyczne (np. normalne), warunek bezpieczeństwa konstrukcji zapisuje się w postaci

$$P\gamma_P \leq N/\gamma_N \quad (3)$$

Wielkość  $P$  oznacza działające obciążenie,  $N$  jest nośnością, a  $\gamma_P$  oraz  $\gamma_N$  są cząstkowymi współczynnikami bezpieczeństwa nośności i obciążenia. Wzór (3) wyraża zasadę, że nośność elementu - którą mogą obniżyć różne czynniki losowe - nie może być mniejsza od działającego obciążenia. Cząstkowy współczynnik bezpieczeństwa  $\gamma_P$  wyraża niepewność modelu teoretycznego obciążenia, możliwość występowania niekorzystnych prze-

ciążeń itp. Współczynnik  $\gamma_N$  uwzględnia możliwość niekorzystnych odchyłek wytrzymałości materiału, niepewność parametrów geometrycznych, niepewność relacji pomiędzy właściwościami materiału (np. określonymi podczas prób materiałowych) i właściwościami konstrukcji.

Warunek bezpieczeństwa (3) można zapisać w postaci

$$P \leq N/\delta \quad (4)$$

Iloczyn  $\delta = \gamma_P \cdot \gamma_N$  jest globalnym (łącznym) współczynnikiem bezpieczeństwa elementu. Uwzględnia on losowe czynniki mogące obniżyć nośność elementu lub zwiększać działające obciążenie. Niekiedy symbol  $P$  zastępuje się przez działające naprężenie, a  $N$  przez wytrzymałość materiału. Wartości współczynników cząstkowych można określić teoretycznie na podstawie zależności:

$$\gamma_P = \frac{1 + t\alpha_P v_P}{1 + t_P v_P} \quad (5)$$

$$\gamma_N = \frac{1 - t_N v_N}{1 - t_N v_N \alpha_N} \quad (6)$$

Charakterystyka niezawodności  $t$  jest powiązana z prawdopodobieństwem zniszczenia i zależy od typu konstrukcji oraz potencjalnych konsekwencji awarii (w konstrukcjach budowlanych przyjmuje się  $t = 3,1 \div 5,2$ , co odpowiada prawdopodobieństwu zniszczenia  $10^{-3} \div 10^{-7}$ ). Indeksy niezawodnościowe Cornella  $t_P$  i  $t_N$  wyrażają odpowiednio prawdopodobieństwo przekroczenia przez obciążenie wartości  $P$  lub obniżenia nośności poniżej  $N$ . Wielkości  $v_P$  i  $v_N$  są współczynnikami zmienności obciążenia i nośności. Współczynniki  $\alpha_N$  i  $\alpha_P$  są funkcjami wariancji rozkładów nośności i obciążenia [27]. Znając parametry rozkładów normalnych obciążenia oraz nośności i przyjmując prawdopodobieństwa do określenia  $t$ ,  $t_P$  i  $t_N$ , można obliczyć wartość wymaganego globalnego współczynnika bezpieczeństwa elementu  $\delta$ .

Przedstawiona w skrócie metoda jest obecnie najczęściej stosowanym sposobem określania współczynników bezpieczeństwa różnych konstrukcji. Sprzyja ona optymalizacji elementów, umożliwiając zróżnicowane uwzględnienie wpływu takich czynników, jak zastosowana technologia wytworzenia (wpływająca na odchyłki wymiarowe i defekty wyrobu), jakość materiału mierzoną uzyskanym współczynnikiem zmienności wytrzymałości itp. Przyjmując wartość parametru  $t$ , można dostosować zapas nośności do potencjalnych konsekwencji awarii elementu. Uogólniając tę koncepcję, można globalny współczynnik bezpieczeństwa przedstawić jako iloczyn współczynników cząstkowych reprezentujących niezależnie różne czynniki wpływające istotnie na nie-

zawodność. Metodę tę zastosowano w normie BS 4994 do alternatywnego określania zapasu wytrzymałości w oparciu o współczynnik bezpieczeństwa  $\delta$

$$\delta = 3 \times \delta_1 \times \delta_2 \times \delta_3 \times \delta_4 \times \delta_5 \quad (7)$$

Współczynnik cząstkowy  $\delta_1$  zależy od technologii produkcji. Wynosi on 1,5 dla laminowania ręcznego i nawijania oraz 3 dla ręcznego laminowania natryskowego, co odzwierciedla ogólnie nasilenie defektów właściwe dla wspomnianych technologii i ich wpływ na wytrzymałość. Wartość współczynnika  $\delta_2 = 1,2 \div 2,0$  uwzględnia stopniowe zmiany wytrzymałości KP spowodowane przez oddziaływanie środowiska. Współczynnik  $\delta_3 = 1 \div 1,25$  zależy od odporności żywicy na działanie podwyższonych temperatur. Wartości  $\delta_4 = 1,1 \div 2,0$  zależą od liczby cykli obciążenia  $N$  ( $\delta_4 = 1,1$  dla liczby cykli  $N \leq 10^3$  i  $\delta_4 = 2,0$  dla  $N \geq 10^6$ ). Współczynnik  $\delta_5 = 1,1 \div 1,5$  zależy od temperatury utwardzania żywicy i odzwierciedla jej wpływ na właściwości kompozytu. Brak możliwości uwzględnienia wpływu wszystkich potencjalnych zagrożeń, takich jak efekty synergiczne (np. korozja naprężeniowa, intensyfikacja pęcznienia przy okresowym występowaniu obciążeń zmiennych), obciążenia udarowe, różna odporność żywic (np. poliestrowych i winylestrowych) oraz włókien (np. szklanych E i ECR) na degradację [16], efekt skali [26], jest kompensowana przez stały mnożnik 3 oraz dodatkowy wymóg  $\delta \geq 8$ . Minimalna wartość globalnego współczynnika bezpieczeństwa  $\delta = 8$  określona w normie BS 4994 jest relatywnie duża. Może zastanawiać, dlaczego w krajowych przepisach z 1990 roku [29], opisujących zasady projektowania stacjonarnych zbiorników kompozytowych, przyjęto wartości  $4 \leq \delta \leq 10$ . Jest to bardzo istotne odstępstwo również w stosunku do norm obowiązujących we Francji ( $6 \leq \delta$  wg [11]), USA ( $6 \leq \delta$ ) i zapewne w wielu innych krajach.

Karbhari [30] opisuje koncepcję określania wartości dopuszczalnych (np. naprężeń) w elementach budowlanych z KP. Wprowadza on współczynniki zmniejszające ( $\Phi = \delta^{-1}$ ) obliczane wg wzoru (8)

$$\Phi = \Phi_{mat} \cdot \Phi_{proc} \cdot 0,5(\Phi_{cure} + \Phi_{loc}) \Phi_{degr} \quad (8)$$

Poszczególne współczynniki cząstkowe uwzględniają: sposób określenia wytrzymałości materiału ( $0,5 \leq \Phi_{mat} \leq 0,97$ ), zastosowany proces technologiczny ( $0,6 \leq \Phi_{proc} \leq 1,0$ ), temperaturę utwardzania ( $0,8 \leq \Phi_{cure} \leq 1,0$ ), miejsce i warunki wykonania elementu ( $0,8 \leq \Phi_{loc} \leq 1,0$ ) oraz podatność materiału na degradację i starzenie ( $0,3 \leq \Phi_{degr} \leq 1,0$ ). Karbhari uwzględnia dobrą odporność włókien węglowych na zmęczenie ( $0,7 \leq \Phi_{degr} \leq 1,0$ ) i gorszą włókien szklanych ( $0,3 \leq \Phi_{degr} \leq 0,8$ ). Nie uwzględnia natomiast efektu wielkości, obciążeń udarowych, korozji naprężeniowej itp.

efektów synergicznych, różnej odporności poszczególnych żywic na starzenie oraz konsekwencji ewentualnej awarii. Wartości  $\Phi$  obliczone w podanych przykładach odpowiadają wartościom współczynnika bezpieczeństwa z przedziału  $1,03 \leq \delta \leq 4,0$ .

Proponowany w [30] przedział wartości współczynnika zmniejszającego  $0,25 \leq \Phi \leq 0,97$  odpowiada wartościom współczynnika bezpieczeństwa  $1,03 \leq \delta \leq 4,0$ . Uwzględniając warunki realizacji konstrukcji budowlanych (montaż w warunkach polowych), długie okresy użytkowania, występowanie różnorodnych narażeń (uderzenia, działanie środowiska) oraz możliwość zagrożenie życia ludzi w przypadku awarii, należy uznać, że ta interesująca propozycja z pewnością wymaga istotnych korekt. Można do wzoru (8) wprowadzić stały mnożnik (podobnie jak w (7)), wynoszący około  $1,5 \div 2,0$ , lub dodatkowe warunki (np.  $\Phi \leq 0,5$ ) tak, aby uzyskiwane wartości  $\delta$  rozwiązania nie odbiegały znacząco od liczb podanych w tabeli 1. Podana w [30] maksymalna wartość  $\delta = 4$  może być odpowiednia dla kompozytów wzmocnionych włóknem węglowym, ale w przypadku laminatów wzmocnionych włóknem szklanym wydaje się niedostateczna.

## PODSUMOWANIE

Zapas wytrzymałości elementu wpływa na jego efektywność ekonomiczną oraz określa poziom niezawodności i bezpieczeństwa eksploatacji. Analizując sposoby określania zapasu wytrzymałości, nośności i bezpieczeństwa chemoodpornych instalacji przemysłowych obowiązujące we Francji, Wielkiej Brytanii oraz USA, można często zauważyć podobieństwo koncepcji prowadzące do podobnych wartości przyjmowanych współczynników bezpieczeństwa  $\delta$ . Nie można natomiast powiedzieć tego o przepisach krajowych [29], według których przedział dopuszczalnych wartości współczynnika bezpieczeństwa zbiorników chemoodpornych itp. urządzeń wynosi  $4 \leq \delta \leq 10$ . Jak wspomniano wcześniej, wartości te odbiegają od rozwiązań francuskich ( $6 \leq \delta$  wg [11]), brytyjskich ( $8 \leq \delta$  wg [2]) i innych podobnych [17, 22]. Przyczyny tak znacznego obniżenia wartości współczynnika  $\delta$  w przepisach polskich [29] nie są znane.

Podobnie duże różnice wartości współczynnika bezpieczeństwa można stwierdzić, porównując normy zbiorników do sprężonego metanu (wg [12]  $2,35 \leq \delta \leq 3,65$  zależnie od rodzaju włókien) i zbiorników do sprężonego powietrza (wg [13, 14]  $\delta = 3$  niezależnie od rodzaju włókien). Porównywane kategorie zbiorników są podobne pod względem konstrukcyjnym oraz wymaganego poziomu bezpieczeństwa eksploatacji.

Propozycja doboru współczynników bezpieczeństwa konstrukcji budowlanych opisana w [30] jest bardzo

interesująca, chociaż wymaga korekty prowadzącej do zwiększenia określanych zapasów nośności.

W wielu dziedzinach techniki jesteśmy obecnie świadkami tworzenia norm projektowych nowych typów konstrukcji kompozytowych i od jakości przyjmowanych rozwiązań będzie zależał rozwój techniki opartej na stosowaniu tych materiałów. W tej sytuacji, cechującej się brakiem stabilnych standardów w zakresie norm technicznych itp., można zaobserwować podejmowanie prac konstrukcyjno-projektowych przez inżynierów niemających doświadczenia w stosowaniu materiałów kompozytowych. Dlatego problematyka poruszona w artykule zasługuje na szerszy udział w dyskusjach poświęconych inżynierii kompozytów polimerowych.

## LITERATURA

- [1] Mallinson J.H., Chemical plant design with reinforced plastics, Mc Graw Hill, 1969.
- [2] BS 4994 Specification for design and construction of vessels and tanks in reinforced plastics, 1987.
- [3] Belzowski A., Błażejowski W., Zbiorniki wysokociśnieniowe z kompozytów polimerowych montowane w pojazdach oraz przenośne, Dozór Techniczny 2001, 3, 53-57.
- [4] Le Courtois T., PWR Composite Material Use: A Particular Case of Safety-Related Service Water Pipes, Proceedings of Enercomp 95, Technomic Pub., Montreal 1995, 835-843.
- [5] Eckold G., Design and manufacture of composite structures, Woodhead Publishing, 1994.
- [6] Mayer R.M., Design of composite structures against fatigue, Applications to wind turbine blades, Antony Rowe Ltd., 1996.
- [7] Karbhari M.V., Application of composite materials to the renewal of twenty-first century infrastructure, Proceedings of ICCM-11, Gold Coast 1997, 1-88 -107.
- [8] Guide for Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars, ACI Committee 440, May 2000, 1-96.
- [9] Murphy J., The Reinforced Plastics Handbook, Elsevier Science Publishers, 1994.
- [10] Kozłowski J., Wilczopolski M., Wituszyński K., Konstrukcje okrętowe z kompozytów polimerowych, Wyd. Morskie, Gdańsk 1982.
- [11] NFT 57900, Réservoirs et appareils en matières plastiques renforcées. 1987.
- [12] ISO/DIS 11439, High pressure cylinders for the on-board storage of natural gas as a fuel for automotive vehicles. 1997.
- [13] prEN 12245, Transportable gas cylinders - Fully wrapped composite cylinder, CEN, 1997, 1-32.
- [14] prEN 12257, Transportable gas cylinders - Seamless, hoop wrapped composite cylinders. CEN, 1997, 1-25.
- [15] Eckold G., A design method for filament wound GRP pressure vessels and pipework, Composites 1985, 16, 1, 41-47.
- [16] Quinn J.A., Composites - Design Manual, Ed. 3, James Quinn Associates Ltd, 2002.
- [17] BS 7159 Code of practice for design and construction of glass-reinforced plastic piping systems, 1989.
- [18] Reifsnider K.L., Case S., Xu Y.L., A micro-kinetic approach to durability analysis: The critical element method, Progress in Durability Analysis of Composite Systems, Cardon, Fukuda, Reifsnider, Balkema 1996, 3-11.
- [19] ASTM D 2992 (1991): Standard Practice for Obtaining Hydrostatic or Pressure Design Basis for „Fiberglass” (Glass-Fiber-Reinforced Thermosetting-Resin) Pipe and Fittings.
- [20] Belzowski A., Krawczak P., Pabiot J., Zagadnienie wytrzymałości długotrwałej rur z kompozytów polimerowych, Dozór Techniczny 2000, 2, 188, 31-36.
- [21] Belzowski A., Metody oceny wytrzymałości długotrwałej kompozytów żywicznych stosowanych w budowie rurociągów ciśnieniowych, Gaz, Woda i Technika Sanitarna 2003, 9, 308-313.
- [22] ASME B31.3, Chemical Plant and Petroleum Refinery Piping, 1993.
- [23] Materiały firmy Wavistrong, <http://futurpipe.com/products/wavistrong/engineering/Guide/sectionTwo/II7.html>. 2003
- [24] Zako M., Kurashiki S., Hanaki S., On statistical method for evaluation of the fatigue test data for composite materials, Proceedings of ICCM-13, ID-1251, Pekin 2001, CD.
- [25] Kong C.D., Bang J.H., Jeong J.C., Kang M.H., Jeong S.H., Yoo J.Y., Structural design of medium scale composite wind turbine blade. Proceedings of ICCM-13, ID-1026, Pekin 2001, CD.
- [26] Belzowski A., Efekt wielkości w materiałach kompozytowych, Stan zagadnienia, Górnictwo Odkrywk. 2003, 4-5, 25-29.
- [27] Biegus A., Podstawy probabilistycznej analizy bezpieczeństwa konstrukcji, Oficyna Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1996.
- [28] Murzewski J., Niezawodność konstrukcji inżynierskich, Arkady, Warszawa 1989.
- [29] Urząd Dozoru Technicznego, Warunki techniczne dozoru technicznego, Stałe zbiorniki ciśnieniowe z tworzyw sztucznych, DT-UC-90/ZT, 1-37.
- [30] Karbhari V.M., Determination of materials design values for the use of fibre-reinforced polymer composites in civil infrastructure, Proc. Instn. Mech. Eng., 214, Part L, J. of Materials: Design & Applications, 2000, 163-171.

Recenzent  
Andrzej P. Wilczyński