

CHARAKTERYSTYKA BADAŃ ZBIORNIKÓW WYSOKOCIŚNIENIOWYCH Z TWORZYW UTWARDZALNYCH

Henryk Rydarowski

Główny Instytut Górnictwa,
Pl. Gwarków 1, 40-166 Katowice, h.rydarowski@gig.katowice.pl

Streszczenie. W artykule przedstawiono wybrane metody badań zbiorników wysokociśnieniowych z tworzyw utwardzalnych: metodę niszczącą i nieniszczącą. Metoda niszcząca polega na rozrywaniu zbiorników w umownych warunkach, natomiast metoda nieniszcząca na nieograniczonym czasie ich eksploatacji. W pracy zamieszczono opis metodyki przeprowadzenia badań zbiorników zgodnie z obowiązującymi wymaganiami technicznymi.

Słowa kluczowe: zbiorniki kompozytowe, metody badań, analiza badań

WSTĘP

Zbiorniki ciśnieniowe z tworzyw utwardzalnych wytwarza się obecnie głównie metodą nawijania włóknem ciągłym. W ten sposób produkuje się także rury, pręty, profile i inne przedmioty o wymaganych cechach konstrukcyjnych. Właściwości takiego kompozytu są wysokie (E i Rr), jeżeli istnieje możliwość automatyzacji procesu, jak również wtedy, kiedy istnieje możliwość zmiany kąta nawijania. Wysokowytrzymałe zbiorniki mogą być nawijane przy kącie zbliżonym do zera, tworząc zwój śrubowy o skoku równym szerokości wstęgi, przy kącie 54, 75° pomiędzy nimi, umożliwiając bezpośrednie łączenie wstęgą dwóch dennic.

Proces technologiczny nawijania składa się z kilku etapów. Warstwę wewnętrzną, odporną na działanie czynników agresywnych i stanowiącą szczelną powłokę, tworzy kilka warstw maty powierzchniowej przesyconej dużą ilością żywicy lub powłoka z innych materiałów. Tymi materiałami może być aluminium lub kształtka z tworzywa termoplastycznego. Bezpośrednio na wewnętrzną powłokę nakłada się warstwę nośną, złożoną z nawiniętego włókna szklanego, węglowego lub tkaniny szklanej przesyconej żywicą syntetyczną. Ilość nakładanych warstw zależy od wymaganej wytrzymałości wytwarzanego elementu. Warstwę zewnętrzną gotowego wytworu tworzy laminat na bazie maty szklanej, bogaty w żywicę lub warstwa ta wykonywana jest z czystej żywicy jako powłoka malarska. Po wykonaniu żądanej liczby warstw rdzeń jest usuwany z we-

wewnątrz gotowego wyrobu lub pozostaje w nim jako część składowa. W przypadku zamkniętej powierzchni walcowej wewnętrzna powłoka zbiornika stanowiąca jednocześnie rdzeń formujący pozostaje wewnątrz zbiornika. Utwardzanie laminatu może przebiegać na zimno lub na gorąco, zależnie od rodzajów używanych utwardzaczy i katalizatorów. Do wiązania wzmocnienia stosuje się żywice utwardzalne [Walczak 1975, Jerzyk i Nowak 1984, Królikowski 1986, 1988, Śleziona 1998, Wróbel i in. 1999]. Tak złożona struktura ścianki zbiornika wymaga wnikliwych i szerokich badań, zapewniających bezpieczeństwo użytkowania w określonym czasie.

Bardzo interesujące prace dotyczące badań zbiorników kompozytowych prowadzone są od wielu lat na Politechnice Wrocławskiej [Gasperowicz i in. 1998, Bryczkowski 1998, Błazejewski i Filipiak 1998]. Efekty tych badań (przedstawione w dużym skrócie) oraz ich krytyczna analiza poparta własnymi doświadczeniami są przedmiotem prezentowanego artykułu.

WYBRANE METODY BADAŃ

Metoda rozrywania zbiornika

Rozrywanie zbiornika za pomocą ciśnienia hydraulicznego powinno być przeprowadzone z wykorzystaniem urządzenia do prób, które umożliwia zwiększanie ciśnienia w kontrolowany sposób. Próbę należy przeprowadzić w warunkach otoczenia. Stopień zwiększania ciśnienia nie może przekraczać 1 MPa/s, natomiast czas badania powinien wynosić co najmniej 40 s. Zbiornik należy obciążyć ciśnieniem w kontrolowany sposób aż do jego rozerwania. Należy wykreślić krzywą ciśnienia w zależności od czasu lub krzywą ciśnienia w zależności od objętości. Maksymalne ciśnienie uzyskane podczas próby powinno zostać zarejestrowane jako ciśnienie rozrywające.

Tabela 1. Wyniki ciśnieniowego testu rozrywającego

Table 1. The results of pressure burst test

Nr próby	Rodzaj materiału ilość warstw	Rodzaj osnowy	Wyniki próby ciśnieniowej
1	Włókno szklane ER 3005 trzy warstwy	Żywica epoksydowa CES RL 10	17 MPa
2	Włókno węglowe SIGRAFIL NF 12 pięć warstw	Żywica epoksydowa CES RL 10	53 MPa

Pierwsze próby rozerwania zbiorników prototypowych przeprowadzone przez autora artykułu wypadły pozytywnie. Uzyskane wyniki przedstawiono w tabeli 1 oraz przykładowe dwa rodzaje zniszczenia pokazano na fotografiach 1 i 2.



Fot. 1. Zbiornik kompozytowy z żywicy i włókna szklanego po hydraulicznym ciśnieniowym teście rozrywającym

Phot. 1. The fiber glass-resin composite tank after the hydraulic pressure burst test



Fot. 2. Zbiornik kompozytowy z żywicy i włókna szklanego z widocznym pęknięciem

Phot. 2. The fiber carbon-resin composite tank with the crack

Odporność na cykle ciśnienia przy ciśnieniu próbnym (p_n) oraz w temperaturze otoczenia

1. Badania przy nieograniczonym czasie eksploatacji

Badanie cykliczne powinno być przeprowadzone z wykorzystaniem urządzenia do prób, które umożliwia zwiększanie i zmniejszanie ciśnienia w kontrolowany sposób oraz automatyczne zawieszanie badania po uszkodzeniu butli charakteryzującym się wyciekem lub pęknięciem.

Badania należy przeprowadzić z wykorzystaniem niekorozyjnej cieczy, poddając butlę następującym po sobie wzrostom i spadkom ciśnienia o wartości hydraulicznego ciśnienia próbnego (p_n). Wartość dolnego ciśnienia cyklicznego nie może przekroczyć 10% górnego ciśnienia cyklicznego i powinna mieć absolutną maksymalną wartość 3 MPa. Badania cykliczne muszą być wykonane w warunkach otoczenia, a temperatura zewnętrzna butli nie może przekraczać 50°C. Częstotliwość zmian ciśnienia nie może przekraczać 0,25 Hz (cykli na minutę). Butla powinna wytrzymać 12 tys. cykli do wartości ciśnienia próbnego (p_n) bez uszkodzeń charakteryzujących się wyciekem lub pęknięciem.

2. Badania przy ograniczonym czasie eksploatacji

To badanie należy wykonać zgodnie z procedurą opisaną w punkcie 1. Powinno składać się z dwóch części wykonywanych bezpośrednio po sobie i w sposób ciągły. Butle powinny najpierw wytrzymać N cykli do ciśnienia próbnego p_n bez rozerwania lub wystąpienia wycieków, $N = y \cdot 250$ cykli; gdzie y jest liczbą lat projektowanej żywotności i powinna być większa od 10.

Próba wytrzymałości w warunkach podwyższonej temperatury przy ciśnieniu próbnym

Dla projektowanej żywotności wynoszącej 20 lat należy hydraulicznie wytworzyć ciśnienie w dwóch butlach do wartości ciśnienia próbnego (p_h) i utrzymać to ciśnienie przez 1000 h. Dla projektowanej żywotności wynoszącej ponad 20 lat, łącznie z żywotnością nieograniczoną, badanie powinno trwać 2000 h. Badanie należy przeprowadzać przy temperaturze $70 \pm 5^\circ\text{C}$ oraz przy wilgotności względnej poniżej 50%. Po wykonaniu tych badań butle należy poddać ciśnieniu rozrywającemu, które powinno być większe niż lub równe dwukrotnej wartości ciśnienia próbnego ($p_b \geq 2,0 p_h$).

Badanie cykliczne w temperaturach ekstremalnych

1. Kondycjonowanie cykliczne w próżni

Tylko butle z wkładkami nieobciążanymi (metalowymi lub niemetalowymi) powinny być poddane kondycjonowaniu cyklicznemu w próżni przed badaniem cyklicznym w ekstremalnych temperaturach. Butle należy poddać serii badań cyklicznych – od ciśnienia atmosferycznego do próżni. Należy opróżnić butlę w celu zmniejszenia ciśnienia do ciśnienia bezwzględnego 0,02 MPa w temperaturze otoczenia. Próżnię należy utrzymać na tym poziomie przez co najmniej 1 minutę. Następnie należy przywrócić ciśnienie atmosferyczne w butli.

2. Stopnie cykli ciśnieniowych

Butlę oraz zawarte w niej medium ciśnieniowe należy poddać kondycjonowaniu przez 48 h w ciśnieniu atmosferycznym, w temperaturze pomiędzy 60 i 70°C oraz przy wilgotności względnej większej lub równej 95%. Hydrauliczne medium ciśnieniowe, umieszczone w obiegu zewnętrznym w stosunku do badanej butli, powinno rozpocząć badanie cykliczne w temperaturze otoczenia. Należy wykonać 5000 cykli w ciśnieniu zbliżonym do ciśnienia atmosferycznego, do dwóch trzecich wartości ciśnienia próbnego (p_h). Częstotliwość cykli ciśnieniowych nie powinna przekraczać 0,08 Hz (5 cykli na minutę). Po zakończeniu tych cykli należy zwolnić ciśnienie i ustabilizować butlę w temperaturze otoczenia. Następnie należy zredukować temperaturę oraz ustabilizować butlę oraz zawarte w niej medium ciśnieniowe w temperaturze pomiędzy -50 i -60°C . Należy wykonać 30 cykli od ciśnienia zbliżonego do ciśnienia atmosferycznego do ciśnienia próbnego (p_h).

Badanie odporności ogniowej

Dwie butle muszą przejść to badanie z wynikiem pozytywnym: jedna w pozycji poziomej, druga w pozycji pionowej. Należy rozpaść odpowiedni ogień, za pomocą drewna lub nafty. Jedną butlę należy umieścić w pozycji poziomej, najniższa część butli po-

winna znaleźć się ok. 0,1 m od szczytu stosu pożarowego lub 0,1 m od powierzchni cieczy palnej. Ogień musi objąć całą długość butli i zaworu, lecz w żadnym przypadku płomienie nie mogą oddziaływać bezpośrednio na urządzenie zwalniania ciśnienia.

Badanie wpływu dużej prędkości

W przypadku butli o średnicy powyżej 120 mm napełnionej powietrzem lub azotem do 2/3 ciśnienia próbnego (p_h) należy oddać strzał z broni 7,62 mm (kaliber 0,3) pociskiem przebijającym o długości nominalnej 51 mm, o prędkości ok. 850 m/s. Butla powinna być umieszczona w taki sposób, aby punkt uderzenia znajdował się w dolnej części (obszar bez owinięcia obwodowego). Strzał należy oddać pod kątem około 45° w stosunku do centralnej linii butli. Odległość od miejsca wystrzału do badanej butli nie powinna przekraczać 45 m. W przypadku butli o średnicy 120 mm i mniejszej należy zastosować pocisk 5,6 mm (kaliber 0,22) o długości nominalnej 13,6 mm. Badana butla nie może rozpaść się na kawałki, nawet wtedy, gdy pocisk przebije ściankę.

Badanie przenikalności gazu butli wyposażonych we wkładki niemetalowe lub bez wkładek

Jedną butlę należy napełnić gazem testowym do wartości 2/3 ciśnienia próbnego (p_h), po czym należy sprawdzić wizualnie zawór oraz połączenia wkładki termoplastycznej lub kompozytowej z metalowym pierścieniem pod kątem wycieków, np. za pomocą wody z mydlinami (test bąbelków).

Butle należy zważyć przed badaniem w stanie suchym. Następnie poddać je cyklowi hydraulicznemu 1000 razy – od zera do 2/3 ciśnienia próbnego (p_h). Butle napełnić do ciśnienia 2/3 ciśnienia próbnego (p_h) gazem testowym przy temperaturze 15°C, zważyć je i zapisać wagę przechowywanego w nich gazu. Następnie ponownie zważyć po 1, 7, 14, 21 i 28 dniach. Po wykonaniu badania należy ponownie zważyć butle w stanie pustym. Różnicę w wadze pomiędzy tym ważeniem oraz pomiarem początkowym należy wykorzystać w celu określenia wpływu absorpcji wilgotności oraz odpowiednio zmodyfikować wagi uzyskane podczas badań.

Badanie kompatybilności wkładek termoplastycznych z gazami utleniającymi

To badanie należy przeprowadzić w przypadku butli, których przeznaczeniem będzie przechowywanie gazów, które są bardziej utleniające niż powietrze (zgodnie z definicją w EN 720-2 lub ISO 10156). W tym przypadku należy określić temperaturę samozapłonu materiału wkładki zgodnie z EN ISO 11114-3. Temperatura zapłonu powinna być większa niż 400°C

PODSUMOWANIE

Kompozyty polimerowe ze względu na swoje właściwości anizotropowe, niejednorodność struktury i lepkosprężyste zachowanie pod obciążeniem wymagają znacznego poszerzenia programu badań. Przedstawiony program wyraźnie preferuje próby doraźne, prowadzone w krótkim okresie. Duży nacisk położono na badania w zmiennych warunkach ciśnienia i temperatury, łącząc to z czasem eksploatacji. Brakuje natomiast wyzna-

czenia minimalnej wytrzymałości ekstrapolowanej do np. 50 lat pod działaniem ciśnienia hydraulicznego w różnych temperaturach. Program badań nie uwzględnia badań udarności w skali laboratoryjnej ani sztywności obwodowej. Wydaje się zasadne podawanie liczby warstw wzmocnienia, ich kolejności i pochylenia w stosunku do osi wytworu oraz wyznaczenia naprężeń ścinających.

Badania własne przeprowadzone na pierwszych wykonanych prototypach należy uznać za zadowalające. W przeliczeniu na jedną warstwę zbiornik z włókna węglowego wykazał się dwukrotnie większą wytrzymałością.

PIŚMIENNICTWO

- Błażejowski W., Filipiak J. 1998. Odkształcenia kompozytowych butli wysokociśnieniowych. Prace Naukowe Katedry Budowy Maszyn Politechniki Śląskiej, 1.
- Bryczkowski Z. 1998. Analiza naprężeń płaszcza nośnego kompozytowej butli wysokociśnieniowej. Prace Naukowe Katedry Budowy Maszyn Politechniki Śląskiej, 1.
- Gasperowicz A., Traczewski A., Błażejowski W., Pszonka A. 1998. Badania butli wysokociśnieniowych z kompozytowym oplotem hybrydowym metodą emisji akustycznej. Prace Naukowe Katedry Budowy Maszyn Politechniki Śląskiej, 1.
- Jerzyk I., Nowak M. 1984. Wpływ anizotropii rur epoksydowo-szklanych na ich własności zmęczenia. Inż. Mat. 3.
- Królikowski W., Kłosowska-Wońkiewicz Z., Penczek P. 1986. Żywice i laminaty poliestrowe. WNT, Warszawa.
- Królikowski W. 1988. Tworzywa wzmocnione i włókna wzmacniające. WNT, Warszawa.
- Polska Norma PN-EN ISO 11623 Butle do gazów – okresowa kontrola i badania butli do gazów wykonanych z kompozytów.
- Polska Norma PN-EN 12245 Butle do gazów – butle wykonane z kompozytów całkowicie wzmocnione.
- Ślęziona J. 1998. Podstawy technologii kompozytów. Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice.
- Walczak K. 1975. Wpływ parametrów technologicznych przetwórstwa na własności rur ciśnieniowych poliestrowo-szklanych. Rozprawa doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice.
- Wróbel G., Leonowicz A., Pusz A., Rojek M., Rydarowski H., Stabik J., Walczak K. 1999. Ćwiczenia laboratoryjne z przetwórstwa tworzyw sztucznych. Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice.

RESEARCH INTO HIGH-PRESSURE TANKS MADE OF HARDENING PLASTICS

Summary. The article presents the characteristics of producing tanks by means of winding. As well as this some methods of experimental research were described, especially the ones concerning carrier coating. In the summary some methods were critically assessed and changes into the existing methods were suggested. Offers of introducing extra research methods were presented.

Key words: composite tanks, research methods, research analysis