

Piotr Szewczyk  
*Instytut Nafty i Gazu, Kraków*

# Badania odporności na zewnętrzne oddziaływania mechaniczne rur z materiałów kompozytowych przeznaczonych do rozprowadzania gazu płynnego

## Wprowadzenie

Jednym z czynników ograniczających przewodowe rozprowadzanie gazu płynnego do odbiorców jest technologia budowy rurociągów oparta na stosowaniu głównie rur stalowych. Wiąże się to z koniecznością zabezpieczania rur przed korozją, a także wysokimi kosztami montażu, związanymi z wykonywaniem połączeń spawanych. Istotną zmianą, która mogłaby spowodować poprawę bezpieczeństwa użytkowania rurociągów oraz obniżenie kosztów budowy i eksploatacji jest wprowadzenie rur z materiałów kompozytowych. Rury te charakteryzują

się dużą odpornością na działanie węglowodorów oraz wysokimi parametrami wytrzymałościowymi, zależnymi od zastosowanych składników. Brak jednak w literaturze danych dotyczących odporności tego typu rur na zewnętrzne oddziaływania mechaniczne, które mogą powstać na placu budowy oraz w trakcie układania rurociągu.

W ramach prac realizowanych w Instytucie Nafty i Gazu w Krakowie przewidziano przeprowadzenie badań rur z materiałów kompozytowych, w celu określenia ich odporności na zewnętrzne obciążenia punktowe oraz zarysowania.

## Charakterystyka rur z materiałów kompozytowych

Rury z materiałów kompozytowych to połączenie dwóch lub większej liczby materiałów, z których jeden jest wiążącym, a inne spełniają rolę wzmacniającą. Zestawianie ich w różnych kombinacjach daje możliwość uzyskania założonych właściwości, niemożliwych do osiągnięcia w materiałach wyjściowych.

Kompozyty składają się z osnowy i z rozmieszczonego w rurze drugiego składnika – o znacznie wyższych właściwościach wytrzymałościowych lub o większej twardości – zwanego zbrojeniem. Osnową są najczęściej polimery, ze względu na ich mały ciężar właściwy i łatwość kształtowania. Jako materiał osnowy stosuje się również żywice syntetyczne, które w powiązaniu z wieloma warstwami z różnych materiałów tworzą tzw. laminaty. Zbrojenie poprawiające własności wytrzymałościowe kompozytu może mieć postać proszkową lub włóknistą. Materiałami najczęściej stosowanymi jako zbrojenie są włókna szklane,

aramidowe i poliestrowe, które mogą być rozmieszczane w sposób regularny lub chaotyczny. Od rodzaju zbrojenia, jego kształtu i sposobu rozmieszczenia będą zależały właściwości kompozytu.

Kompozyty zbrojone proszkami, bądź statystycznie rozmieszczonymi włóknami ciętymi, zatopionymi w osnowie, mają właściwości jednakowe w każdym kierunku, a przyrost wytrzymałości kompozytu w stosunku do osnowy nie jest znaczący. Wzmocnienie tego typu najczęściej występuje w kompozytach z osnową termoplastyczną i jest wykonywane metodą wtrysku. Kompozyty zbrojone włóknami ciągłymi charakteryzują się wyższą wytrzymałością w kierunku wzdłuż ich ułożenia (mogą przekroczyć nawet 1000 MPa) oraz około 15–30 razy niższą w kierunku poprzecznym do włókien [7].

Do najważniejszych zalet rur produkowanych z materiałów kompozytowych należą:

- łatwa możliwość dostosowania własności wytrzymałościowych i odpornościowych,
- niski ciężar konstrukcji kompozytowych,
- odporność na korozję,
- łatwa technologia montażu,
- gładkie powierzchnie wewnętrzne rur.

### **Analiza danych literaturowych dotyczących właściwości mechanicznych oraz aktualnego stanu w zakresie normalizacji systemów rurociągowych z materiałów kompozytowych do rozprowadzania paliw węglowodorowych**

W systemach rurociągowych wysokiego ciśnienia kompozyty znajdują zastosowanie do wzmacniania rur stalowych (CRLP) – *composite reinforced line pipe*, lub do produkcji rur przewodowych [5]. Rury z materiałów kompozytowych na osnowie z żywic chemoutwardzalnych są produkowane najczęściej w następujących odmianach:

- GRP (*Glass – fibre – reinforced polyester*) – żywica poliestrowa wzmacniana włóknem szklanym,
- GRE (*Glass – fibre – reinforced epoxy*) – żywica epoksydowa wzmacniana włóknem szklanym.

Przykładem wzmocnienia rur stalowych materiałem kompozytowym jest opracowany przez NCF Industries Inc. system hybrydowy (stal/kompozyt) [1].

W systemie tym materiał kompozytowy stanowi zewnętrzne wzmocnienie rury stalowej. Współpraca ww. materiałów umożliwia przenoszenie przez rurę znacznie wyższych naprężeń obwodowych – w stosunku do przenoszonych przez monolityczną rurę stalową. System ten został opatentowany, a licencję na jego stosowanie posiada na zasadach wyłączności firma Trans Canada. Stanowi on idealne rozwiązanie w przypadku budowy gazociągów dużych średnic o znacznej długości i pozwala na stosowanie ciśnień roboczych w przedziale od 83 do 248 bar, a w porównaniu z rurociągiem stalowym o tej samej średnicy i grubości ścianki rur, umożliwia zwiększenie zdolności przepustowej o około 6% [1].

Innym rozwiązaniem w zakresie rur kompozytowych jest opracowany przez firmę Solvay system Hexel One [2]. Technologia produkcji rur w tym systemie polega na wzmacnianiu standardowej rury polietylenowej taśmą z polietylenu PE MD (średniej gęstości), nawijaną krzyżowo. Uzyskane w ten sposób wzmocnienie rur umożliwia ich stosowanie do rozprowadzania gazu lub wody pod ciśnieniem do 25 bar. Przetestowano również wariant High Pressure dla zakresu do 50 bar [2].

Zastosowanie w Polsce rur z materiałów kompozytowych do przesyłania paliw gazowych (nie dotyczy skroplonych gazów węglowodorowych C<sub>3</sub>-C<sub>4</sub>) ograniczone jest przez rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 30 lipca 2001 r., w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać sieci gazowe, które w części dotyczącej rur z tworzyw sztucznych uwzględnia tylko rury polietylenowe i poliamidowe. Nie ma natomiast ograniczeń w zakresie stosowania rur z materiałów kompozytowych do przesyłania dwutlenku węgla celem jego sekwestracji, lub do przesyłania metanu pochodzącego z odmetanowania kopalń, na terenach zakładów górniczych, co jest już realizowane.

W rozporządzeniu Ministra Gospodarki z dnia 21 listopada 2005 r. z późniejszymi zmianami, w sprawie warunków technicznych jakim powinny odpowiadać bazy i stacje paliw płynnych, rurociągi przesyłowe dalekosiężne służące do transportu ropy naftowej i produktów naftowych i ich usytuowanie – zaleca się stosowanie rur stalowych. Dopuszcza się także wykonywanie rurociągów przesyłowych dalekosiężnych z innych materiałów, np. kompozytowych, o niezbędnych właściwościach wytrzymałościowych. Muszą one jednak spełnić warunek odporności na działanie ognia. Instalacje technologiczne natomiast mogą być wykonywane z rur z tworzyw sztucznych lub innych materiałów, pod warunkiem zapewnienia skutecznego odprowadzenia ładunków elektryczności statycznej.

W zakresie normalizacji systemów rurociągowych z materiałów kompozytowych do rozprowadzania paliw węglowodorowych, wymagania odnośnie rur wielowarstwowych zawarte są w dokumencie ISO/FDIS 18225 [4], a rury wzmacniane włóknem szklanym są przedmiotem normy systemowej ISO 14692 [3]. Składa się ona z czterech części, dotyczących: słownictwa, symboli, zastosowania, materiałów, kwalifikacji i wytwarzania, projektowania systemu, produkcji, instalowania i użytkowania.

### **Badania laboratoryjne odporności próbek rurowych z materiałów kompozytowych na obciążenia punktowe i zarysowania**

Ze względu na brak w literaturze przedmiotu danych dotyczących odporności rur z materiałów kompozytowych na obciążenia punktowe i zarysowania, przeprowadzone

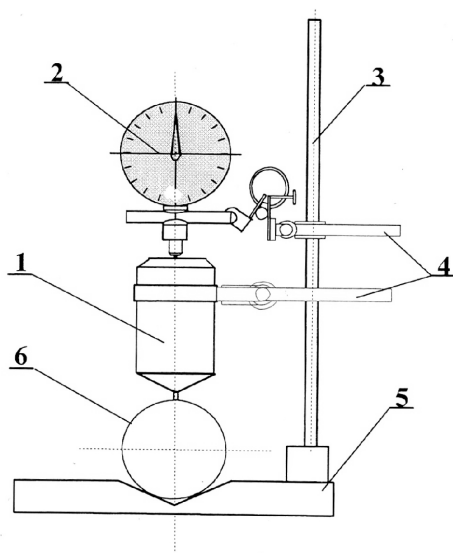
zostały badania, których głównym celem było porównanie ich właściwości na tego typu oddziaływania, z rurami polietylenowymi.

Badaniami objęto próbki o następującej charakterystyce:

- rury GRP o średnicy wewnętrznej 104 mm i grubości ścianki 8 mm, maksymalne ciśnienie robocze 2 MPa [6],
- rury polimerowe wielowarstwowe o średnicy wewnętrznej 27 mm i grubości ścianki 4,6 mm, maksymalne ciśnienie robocze 2,5 MPa [6],
- rury PE 100 o średnicy zewnętrznej 110 mm o grubości ścianki 10 mm, maksymalne ciśnienie robocze 1 MPa.

Badania laboratoryjne odporności próbek rurowych na obciążenia punktowe przeprowadzono na stanowisku przedstawionym schematycznie na rysunku 1.

Badane próbki poddawano oddziaływaniu obciążnika o masie 2,5 kg, zakończonemu trzpieniem o powierzchni czołowej 2,5 mm<sup>2</sup>, przez 24 h w temperaturze 23°C. Miarą odporności rur z badanych materiałów była wielkość zagłębienia trzpienia. Wyniki badań przedstawiono w tabelicy 1.



Rys. 1. Stanowisko do badania odporności rur na obciążenia punktowe

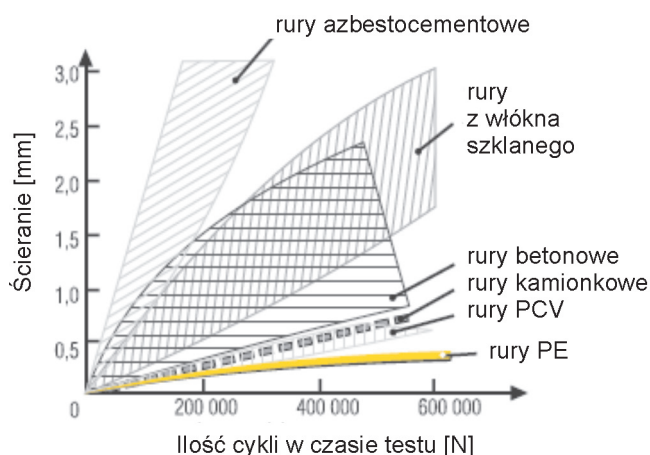
- 1 – obciążnik, 2 – czujnik, 3 – statyw, 4 – uchwyt, 5 – przysma, 6 – badana rura

Tabela 1. Odporność próbek rurowych na obciążenia punktowe

Lp.	Rura PE 100		Rura GRP		Rura polimerowa wielowarstwowa	
	Zagłębienie trzpienia obciążnika					
	[mm]	grubość ścianki [%]	[mm]	grubość ścianki [%]	[mm]	grubość ścianki [%]
1.	0,05	0,5	0,33	7,2	0,00	0,0
2.	0,04	0,4	0,32	7,0	0,00	0,0
3.	0,05	0,5	0,30	6,5	0,00	0,0

Według danych literaturowych, odporność rur z materiałów kompozytowych na abrazyjne oddziaływanie ośrodka gruntowego zależy od rodzaju materiału warstwy zewnętrznej rury [5].

Wykres przedstawiony na rysunku 2 pokazuje, że najwyższą odporność na abrazję wykazuje polietylen, a rury z włókna szklanego (GRP) znajdują się pośrodku porównywanych materiałów. Należy zaznaczyć, że wykres prezentuje wyniki uzyskane w trakcie badań odporności rur na abrazyjne oddziaływanie transportowanego medium, a nie na czynniki działające na zewnętrzną powierzchnię rury.



Rys. 2. Odporność rur na abrazję

W prowadzonych badaniach symulowane uszkodzenie zewnętrznej powierzchni rury poprzez jej zarysowanie wykonano w oparciu o normę PN-EN ISO 13479:2001 [8], która wykorzystywana jest w badaniach rur polietylenowych stosowanych do przesyłania gazu.

Na zewnętrznej powierzchni rury co 90° wykonano cztery karby w kształcie litery „V”, o długości równej średnicy zewnętrznej rury, na głębokość równą 20% grubości ścianki. W celu określenia wpływu osłabienia rury przez nacięte karby, przeprowadzono badanie wytrzymałości na ciśnienie wewnętrzne przy próbie niszczącej w 20°C.

W pierwszej kolejności wykonano badanie na próbkach bez symulowanych uszkodzeń, a następnie na próbkach osłabionych naciętymi karbami.

Uzyskane wyniki maksymalnego ciśnienia rozrywającego przedstawiono w tabelicy 2.

W wyniku działania ciśnienia wewnętrznego, w ściankach badanych rur powstają naprężenia obwodowe ( $\sigma_1$ ) oraz wzdłużne ( $\sigma_2$ ), które można określić z zależności:

$$\sigma_1 = \frac{p(d_w + e)}{2e} \text{ [MPa]}$$

$$\sigma_2 = \frac{p(d_w + e)}{4e} \text{ [MPa]}$$

gdzie:

$p$  – ciśnienie wewnętrzne [MPa],

$d_w$  – średnica wewnętrzna rury [mm],

$e$  – grubość ścianki rury [mm].

Tablica 2. Odporność rur na ciśnienie wewnętrzne przy próbie niszczącej – maksymalne ciśnienie rozrywające

	Rura GRP	Rura polimerowa wielowarstwowa	Rura PE 100
	Maksymalne ciśnienie rozrywające [bar]		
Próbka bez karbu	> 97,5 (brak pęknięcia)	95,0	55,0
Próbka z karbem	> 96,5 (brak pęknięcia)	83,6	49,2

Tablica 3. Odporność rur na ciśnienie wewnętrzne przy próbie niszczącej (naprężenia obwodowe  $\sigma_1$  przy maksymalnym ciśnieniu rozrywającym)

	Rura GRP	Rura polimerowa wielowarstwowa	Rura PE 100
	Naprężenia obwodowe $\sigma_1$ przy maksymalnym ciśnieniu rozrywającym [MPa]		
Próbka bez karbu	> 68,6 (brak pęknięcia)	33,3	27,5
Próbka z karbem	> 67,9 (brak pęknięcia)	29,4	24,5

Tablica 4. Naprężenia obwodowe przy maksymalnym dopuszczalnym ciśnieniu roboczym

Rura GRP $p_{max} = 2 \text{ MPa}$	Rura polimerowa wielowarstwowa $p_{max} = 2,5 \text{ MPa}$	Rura PE 100 $p_{max} = 1 \text{ MPa}$
Naprężenia obwodowe $\sigma_1$ [MPa]		
14,0	8,8	5,0

W prowadzonych badaniach istotna była zdolność rury do przeniesienia naprężeń obwodowych  $\sigma_1$  w czasie ciśnieniowej próby niszczącej. W tablicy 3 zestawiono wartości naprężeń obwodowych wytworzonych w ściance rury, dla maksymalnego ciśnienia rozrywającego.

Analizując otrzymane wyniki odporności badanych próbek na zarysowania można zaobserwować, że osłabienie rur poprzez zarysowane karby nie spowodowało znacznego obniżenia ich wytrzymałości na ciśnienie wewnętrzne. Z uwagi na wysoką wytrzymałość rur GRP, w trakcie prowadzonych badań zarówno próbki bez karbu, jak i z karbem nie uległy zniszczeniu przy ciśnieniu maksymalnym, które można było uzyskać na stanowisku badawczym.

Wartość naprężeń obwodowych w ściance rury GRP, wywoływanych maksymalnym dopuszczalnym ciśnieniem roboczym, wynosi 14 MPa (tablica 4). Stanowi to 20% wartości naprężeń obwodowych rury osłabionej karbem, przy maksymalnym ciśnieniu możliwym do osiągnięcia przez aparaturę badawczą. Udział ten w odniesieniu do naprężeń obwodowych przy ciśnieniu rozrywającym będzie mniejszy, co świadczy o wysokiej odporności rur GRP na zarysowania.

Obniżenie wytrzymałości na ciśnienie wewnętrzne polimerowych rur wielowarstwowych i rur polietylenowych PE 100 po zastosowaniu karbów jest porównywalne i wynosi około 12% w stosunku do naprężeń obwodowych dla ciśnienia rozrywającego w ściankach rur nieuszkodzonych. Świadczy to również o dużej odporności rur na tego typu zjawiska.

## Wnioski

Analiza przeprowadzonych badań dotyczących odporności wytypowanych rur na zewnętrzne obciążenia punktowe i zarysowania pozwala wysnuć następujące wnioski:

- przy przesyłaniu gazu płynnego rury z materiałów kompozytowych stanowią alternatywę dla rur stalowych; charakteryzując się niskim ciężarem, dużą trwałością, niezawodnością, łatwością montażu i brakiem korozji,
- w świetle krajowych przepisów, stosowanie rur z materiałów kompozytowych do przesyłania paliw płynnych jest uwarunkowane ich odpornością na działanie ognia,

a w instalacjach technologicznych – skutecznym odprowadzeniem ładunku elektrostatycznego,

- badania odporności na obciążenia punktowe wykazały dużą odporność badanych rur na tego typu oddziaływanie. W żadnym z analizowanych przypadków uszkodzenie nie przekroczyło 10% grubości ścianki, co jest wartością dopuszczalną w przypadku uszkodzeń zewnętrznej powierzchni rur polietylenowych stosowanych do przesyłania gazu,
- badania próbek rurowych osłabionych naciętymi karba-



mi wykazały bardzo wysoką odporność rur GRP na tego typu uszkodzenia. Polimerowe rury wielowarstwowe charakteryzowały się porównywalną wytrzymałością na zarysowania z rurami polietylenowymi PE 100,

- wyniki przeprowadzonych badań mogą być wykorzystane przez projektantów układów rurowych do przesyłania gazu płynnego, przy określaniu warunków posadowienia rurociągów w gruncie.

Artykuł nadesłano do Redakcji 7.06.2010 r. Przyjęto do druku 23.06.2010 r.

Recenzent: doc. dr inż. Andrzej Froński

## Literatura

- [http://www.aoc-resins.com/images/uploads/article\\_Corr\\_Transcanada\\_1.pdf](http://www.aoc-resins.com/images/uploads/article_Corr_Transcanada_1.pdf)
- <http://www.solvaypress.com/pressreleases/0,,44365-2-0,00.htm>
- ISO 14692 *Petroleum and natural gas industries – Glass-reinforced plastics (GRP) piping*:
  - ISO 14692-1:2002 *Vocabulary, symbols, applications and materials*,
  - ISO 14692-2:2002 *Qualification and manufacture*,
  - ISO 14692-3:2002 *System design*,
  - ISO 14692-4:2002 *Fabrication, installation and operation*.
- ISO/FDIS 18225 *Plastics piping systems – Multilayer piping systems for outdoor gas installations – Specifications for systems*.
- Laney P.: *Use of Composite Materials in the Transportation of Natural Gas*. Idaho National Engineering and Environmental Laboratory. Bechtel, Idaho, July 2002.
- Materiały katalogowe producentów rur kompozytowych zastosowanych w badaniach.
- Philips L.N.: *Design with Advanced Composite Materials*. Springer-Verlag, 1989.
- PN-EN ISO 13479:2001 *Rury z poliolefin do przesyłania płynów – Oznaczenie odporności na propagację pęknięć – Metoda badania powolnego wzrostu pęknięć na rurach z karbem (próba z karbem)*.



Mgr inż. Piotr SZEWCZYK – absolwent Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Kierownik Laboratorium Tworzyw Sztucznych Instytutu Nafty i Gazu. Zajmuje się zagadnieniami związanymi z badaniem wyrobów z tworzyw sztucznych stosowanych do budowy sieci gazowych.

## ZAKŁAD PRZESYŁANIA I DYSTRYBUCJI GAZU

Zakres działania:

- badania laboratoryjne rur, kształtek i armatury z tworzyw sztucznych do przesyłania gazu na zgodność z normą systemową PN-EN 1555,
- badania laboratoryjne rur, kształtek i armatury z tworzyw sztucznych do przesyłania wody na zgodność z normami systemowymi PN-EN 12201, PN-EN ISO 15874, PN-EN ISO 15875, PN-EN ISO 15876,
- badania laboratoryjne systemów rur wielowarstwowych do wody ciepłej i zimnej oraz centralnego ogrzewania na zgodność z normą systemową PN-EN ISO 21003,
- badania laboratoryjne armatury metalowej i powłok antykorozyjnych, prowadzone dla potrzeb certyfikacji i aprobat technicznych,
- ocena stopnia zagrożenia korozyjnego gazociągów stalowych oraz ocena stanu technicznego izolacji gazociągów stalowych metodami bezwykopowymi,
- ocena efektywności metod rekonstrukcji sieci dystrybucyjnych gazu,
- opracowanie projektów przepisów związanych z budową i użytkowaniem sieci gazowych,
- opracowanie lub opiniowanie projektów norm dotyczących sieci i instalacji gazowych,
- badania z zakresu współpracy ośrodka gruntowego z siecią gazową na terenach górniczych,
- prowadzenie specjalistycznego szkolenia kadr, głównie w zakresie budowy sieci gazowych z polietylenu,
- wspomaganie przemysłu we wdrażaniu nowych rozwiązań technicznych oraz opracowywanie ekspertyz i analiz,
- badania laboratoryjne metalowej armatury odcinającej do systemów i instalacji wodociągowych oraz baterii mechanicznych, natrysków i przewodów natryskowych.

**Kierownik:** mgr inż. Janusz Neider

**Adres:** ul. Bagrowa 1, 30-733 Kraków

**Faks:** 12 653-16-65

**Telefon:** 12 653-25-12 wew. 142

**E-mail:** janusz.neider@inig.pl