

Rury z materiałów kompozytowych stosowane do transportu paliw gazowych

Composite pipes used for the transport of gaseous fuels

Marcin Krutczenko^{*}

Słowa kluczowe: rury kompozytowe, transport gazu, sieci gazowe.

Streszczenie

W artykule omówiono rodzaje rur kompozytowych, ich zalety w stosunku aktualnie stosowanych w polskim gazownictwie rur z polietylenu i rur stalowych. Scharakteryzowano różne technologie wykonywania rur kompozytowych.

Keywords: composite pipes, gas transport, gas networks.

Abstract

The article discusses the types of composite pipes, their advantages over the polyethylene and steel pipes currently used in the polish gas industry. Different technologies for making composite pipes are characterized.

1. Wstęp

Materiały kompozytowe znane są ludzkości od bardzo dawna. Jednak prawdziwy przyrost popularności na materiały kompozytowe nastąpił w latach 50-tych XX wieku. Związany był z rosnącym zapotrzebowaniem przemysłu lotniczego, kosmicznego i motoryzacyjnego na lekkie i wytrzymałe materiały, którymi dałoby się zastąpić stal i inne metale.

Pojęcie „materiał kompozytowy” odnosi się do materiału składającego się z dwóch lub więcej różnych składników, które są połączone w celu utworzenia nowego materiału o specyficznych właściwościach. Jeden materiał pełni funkcję wiążącą, a pozostałe, wprowadzone w postaci ziarnistej, włóknistej, bądź warstwowej, służą jego wzmocnieniu. [13]

Kompozyty mogą być zbudowane z różnych kombinacji materiałów, takich jak: polimery (na przykład żywica epoksydowa, poliestrowa), włókna wzmocnienia (włókna szklane, węglowe, aramidowe), a także inne dodatki.

Inna definicja „kompozytu” mówi, że jest to materiał, który został stworzony sztucznie (tzn. dzięki działaniu człowieka, a nie przez naturę), z co najmniej dwóch chemicznie różnych materiałów, których granica rozdziału zostaje w kompozycie zachowana i którego własności różnią się od własności łączonych ze sobą komponentów w zależności od ich udziałów objętościowych lub masowych.

Do najbardziej niezwykłych cech materiałów kompozytowych jest możliwość projektowania jego właściwości, można dostosowywać je do konkretnych potrzeb.

Zainteresowanie kompozytami znalazło także odzwierciedlenie w poszukiwaniu nowych materiałów i rozwiązań w przemyśle związanych z transportem cieczy i gazów. Elementy w nich wykorzystywane, a więc stosowane dotychczas rury metalowe, betonowe i polietylenowe są ciężkie i mało odporne na zmienność parametrów obciążenia. Powodowało to trudności podczas eksploatacji, transportu i montażu rur. Wysokie koszty w eksploatacji systemów

rurowych (stal, beton) spowodowane były ich dużą awaryjnością, co skutkowało koniecznością ich wymiany bądź naprawy. Problemy te wymusiły na inżynierach poszukiwanie nowych rozwiązań materiałowych i konstrukcyjnych. Za cel postawiono sobie zmniejszenie masy i redukcję kosztów utrzymania systemów rurowych. Obniżenie kosztów można było osiągnąć poprzez zwiększenie wytrzymałości materiałowej i odporności korozyjnej, czyli wydłużenie czasu eksploatacji danego elementu.

2. Normy i dokumenty

2.1. Normy PN-EN

- PN-EN ISO 14692-4:2017-11 – Przemysł naftowy i gazowniczy – Rurociągi z tworzyw sztucznych wzmocnione włóknem szklanym (GRP) – Część 4: Wytwarzanie, instalowanie i eksploatacja
- PN-EN ISO 3183 – Przemysł naftowy i gazowniczy – Rury stalowe do rurowodowych systemów transportowych
- PN-EN ISO 14692-3:2017-11 – Przemysł naftowy i gazowniczy – Rurociągi z tworzyw sztucznych wzmocnione włóknem szklanym (GRP) – Część 3: Projektowanie systemu
- PN-EN 288-3:1994 – Wymagania dotyczące technologii spawania metali i jej uznawanie – Badania technologii spawania łukowego stali
- PN-EN 12327:2013-02 – Infrastruktura gazowa – Próby ciśnieniowe, procedury uruchamiania i unieruchamiania – Wymagania funkcjonalne
- PN-EN 12732+A1:2014 – Infrastruktura gazowa – Spawanie stalowych układów rurowych – Wymagania funkcjonalne
- PN-EN ISO 9080:2013-04: Systemy przewodów rurowych i rur osłonowych z tworzyw sztucznych – Oznaczanie przez ekstrapolację długotrwałej wytrzymałości hydrostatycznej materiałów termoplastycznych w postaci rur

^{*} Marcin Krutczenko, Inż., Państwowa Akademia Nauk Stosowanych w Ciechanowie, e-mail: marcin.krutczenko@gmail.com

2.3. Standardy Izby Gospodarczej Gazownictwa (IGG)

Wytyczne techniczne AT-IGG-3401:2019. Rurociągi kompozytowe ze wzmocnionych materiałów termoplastycznych do transportu węglowodorów.

2.4. Terminy i definicje

Przytoczone terminy i definicje opierają się na normach dotyczących zagadnień transportu węglowodorów i systemów rurowych. W artykule stosuje się terminy i definicje wymienione niżej.

- **paliwo gazowe** – mieszanina wieloskładnikowa gazów palnych i niepalnych, pochodzenia naturalnego lub sztucznego. Według polskiego Prawa energetycznego jest to gaz ziemny wysokometanowy lub zaazotowany, w tym skroplony gaz ziemny oraz propan-butan lub inne rodzaje gazu palnego, dostarczane za pomocą sieci gazowej, a także biogaz rolniczy, niezależnie od ich przeznaczenia.
- **gaz ziemny** – rodzaj paliwa kopalnego pochodzenia organicznego, skład chemiczny: głównie metan (CH₄), ale może zawierać także niewielkie ilości etanu, propanu, butanu i innych gazów. Bezbarwny, bezzapachowy, lżejszy od powietrza.
- **Skroplony Gaz Naftowy (LPG) (skrót od ang. Liquefied Petroleum Gas)** – mieszanina propanu (C₃H₈) z butanem (C₄H₁₀). Cięższy od powietrza, bezzapachowy, cięższy od powietrza.
- **gaz LNG (ang. liquefied natural gas)** – gaz ziemny w ciekłym stanie skupienia, tj. w temperaturze poniżej –162 °C (temperatura wrzenia metanu, głównego składnika LNG). Bezbarwny, bezzapachowy, zapach dodawany w celach bezpieczeństwa, lżejszy od powietrza.
- **ciśnienie nominalne PN** – ciśnienie medium roboczego na ściankę rury podane przez producenta w ustalonych warunkach, nieprzekraczające maksymalnego ciśnienia znamionowego
- **cykliczne obciążenie rury** – warunki użytkowania, w których ciśnienie medium roboczego nie utrzymuje stałej wartości (fluktuuje, pulsuje)
- **długotrwały test ciśnienia hydrostatycznego** – LTHT, test mający na celu określenie maksymalnego ciśnienia znamionowego rury kompozytowej RTP (Reinforced Thermoplastic Pipe)
- **maksymalne ciśnienie pracy** – MSP, maksymalne ciśnienie, zależne od zastosowania i warunków pracy systemu rur kompozytowych RTP, przy którym system może pracować w sposób ciągły i bez zakłóceń w przepływie transportowanego medium. Wartość maksymalnego ciśnienia pracy uzyskuje się przez iloczyn wartości maksymalnego ciśnienia znamionowego i współczynników uwzględniających warunki pracy systemu rur kompozytowych RTP.
- **minimalna wymagana wytrzymałość** – MRS, prognozowana wytrzymałość hydrostatyczna rur z materiałów termoplastycznych po 50 latach użytkowania ich w temperaturze 293,15 K (20°C), określona zgodnie z wymogami PN-EN ISO 9080:2013-04 i zaokrąglona w dół zgodnie z wymogami PN-EN ISO 12162:2010
- **minimalny promień gięcia** – promień, poniżej którego nie powinno się giąć rury, oraz który nie powoduje utraty jej parametrów lub uszkodzenia
- **promieniowanie ultrafioletowe** – UV, promieniowanie elektromagnetyczne w paśmie o częstotliwości wyższej od częstotliwości pasma widzialnego mające wpływ na zmianę właściwości materiału
- **rura kompozytowa** – rura złożona z dwóch lub więcej komponentów, charakteryzująca się właściwościami, jakich nie posiadają poszczególne komponenty osobno
- **system rurowy/system rur kompozytowych** – zespół rur, kształtek, złąbek i innych elementów połączonych ze sobą, umożliwiający transport medium
- **termoplastyczny materiał polimerowy** – termoplastyczny tworzywo sztuczne inaczej termoplastyczny materiał

polimerowy przechodzący w stan plastyczny pod wpływem ciepła a po ochłodzeniu wracający do stanu stałego, z uwzględnieniem, iż proces ten można powtarzać wielokrotnie

- **współczynnik projektowy** – współczynnik określany przez producenta systemu rur kompozytowych RTP na potrzeby określenia maksymalnego ciśnienia znamionowego
- **włókna aramidowe** – grupa włókien organicznych o wysokiej wytrzymałości, tworzonych w wyniku przedzenia poliamidów włóknotwórczych o strukturach sieciowanych przestrzennie
- **włókna szklane** – włókna otrzymywane ze szkła jako wzmocnienie oparte na szkłe klasy E lub S
- **włókna węglowe** – włókna powstające w wyniku kontrolowanej pirolizy poliakrylonitrylu i innych polimerów organicznych, składające się prawie wyłącznie z rozciągniętych struktur węglowych
- **moduł Younga** – inaczej moduł odkształcalności liniowej albo moduł (współczynnik) sprężystości podłużnej

3. Technologia powstawania rur kompozytowych

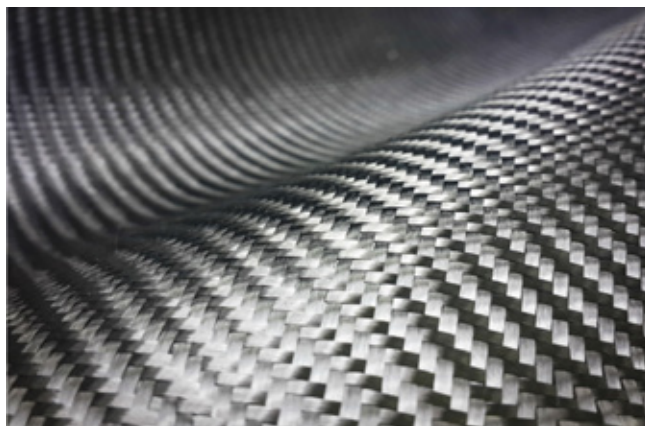
3.1. Ogólna charakterystyka materiałów kompozytowych

W literaturze występuje wiele podziałów kompozytów. Wynika to z samej definicji kompozytów i brakiem dokładnego opisu tej grupy materiałów.

Wytwarzanie kompozytów polega na łączeniu różnych komponentów w celu uzyskania lepszych właściwości sumarycznych od właściwości poszczególnych składników. Kompozyty warstwowe mogą zawierać różne kombinacje materiałów podstawowych, tj. metali, ceramiki lub polimerów. Przy ich projektowaniu i otrzymywaniu oczekuje się przede wszystkim zwiększenia wytrzymałości na rozciąganie, modułu sprężystości, wytrzymałości zmęczeniowej, odporności na zużycie tribologiczne (zużycie spowodowane procesami tarcia), udarności czy odporności balistycznej.

Należy zauważyć, że właściwości kompozytów nigdy nie są sumą, czy średnią właściwości jego składników, ponieważ najczęściej jeden z komponentów stanowi lepsze, które gwarantuje jego spójność, twardość, elastyczność i odporność na ściskanie, a drugi, tzw. komponent konstrukcyjny zapewnia większość pozostałych własności mechanicznych kompozytu. Największymi zaletami kompozytów są ich doskonałe parametry mechaniczne i wytrzymałościowe połączone z małym ciężarem właściwym.

Wytwarzanie materiałów kompozytowych obejmuje różnorodną technologię, które pozwalają na łączenie różnych składników w celu uzyskania właściwości, które są korzystne w danym zastosowaniu. Poniżej przedstawiono kilka kluczowych technologii wytwarzania materiałów kompozytowych.



Rys 1. Mata z włókna węglowego (źródło: <https://scitechdaily.com/a-new-way-to-make-carbon-fiber-could-we-make-cars-out-of-petroleum-residue/>)

Fig. 1 Carbon fibre mat.

Pierwotnie do wytwarzania materiałów kompozytowych używano żywicy i wzmocnienia w postaci włókien szklanych. W chwili obecnej, jako materiały kompozytowe stosuje się rury stalowe z zewnętrzną powłoką wzmacniającą z materiału kompozytowego, rury stalowe z wewnętrzną wykładziną kompozytową, czy rury polietylenowe z materiałem wzmacniającym w osnowie.

Jako osnowy kompozytów najczęściej używane są żywice epoksydowe i poliestrowe, natomiast najpopularniejszymi wzmocnieniami są włókna szklane i włókna węglowe. Kompozyty o osnowie polimerowej stanowią największą grupę materiałów kompozytowych [1].

Klasyfikacja materiałów kompozytowych obejmuje głównie podział ze względu na osnowę i rodzaj fazy zbrojącej.

Osnowa w materiałach kompozytowych odgrywa kluczową rolę, wpływając na właściwości i wydajność ostatecznego produktu. Materiały kompozytowe składają się z dwóch głównych składników: matrycy (materiału podstawowego) i osnowy (materiału wzmocnienia). Osnowa pełni funkcję wzmacniającą, poprawiając wytrzymałość, sztywność i inne właściwości mechaniczne kompozytu. Istnieje kilka rodzajów osnowy stosowanych w materiałach kompozytowych [2].

W zależności od rodzaju osnowy materiałów kompozytowych można podzielić na:

- kompozyty o osnowie metalowej
 - kompozyty o osnowie niemetalowej: ceramicznej, polimerowej
- Ze względu na rodzaj fazy zbrojącej wyróżniamy kompozyty:
- zbrojone włóknami: ciągłymi, krótkimi
 - zbrojone cząsteczkami

a) osnowy włókniste:

- **Włókna szklane:** Wykonane z rozwiniętego szkła, są stosunkowo tanie i oferują dobrą wytrzymałość na rozciąganie.
- **Włókna węglowe:** Charakteryzują się wysoką sztywnością, wytrzymałością i lekkością. Są droższe niż włókna szklane.
- **Włókna aramidowe** (np. Kevlar): Posiadają wysoką odporność na ścieranie i wytrzymałość na rozciąganie przy niskiej masie.

b) osnowy cząstkowe:

- **Cząstki metalu lub ceramiki:** Cząstki te są wbudowywane w matrycę kompozytu, dodając mu lepsze właściwości mechaniczne, termiczne lub elektryczne. Związki chemiczne typu tlenków, węglików (SiC, TiC), grafitu, miki, popiół lotny.
- **Nanorurki węglowe:** Nanostruktury węglowe dodawane są do matrycy kompozytu w celu poprawy właściwości mechanicznych i elektrycznych.

c) osnowy laminarne:

- **Warstwy:** Składają się z warstw różnych materiałów kompozytowych, co pozwala na uzyskanie różnych właściwości w różnych kierunkach.
- **Maty włókninowe:** Tworzone są przez przypadkowe rozlokowanie włókien w różnych kierunkach, co daje kompozytowi równomierne właściwości mechaniczne.

d) osnowy polimerowe:

- **Tworzywa sztuczne:** Matrycę kompozytu stanowią polimery, takie jak epoksy, poliestry czy poliuretany. Mogą być wzmocnione włóknami lub cząstkami.
- **Kompozyty termoutwardzalne:** Wymagają utwardzenia pod wpływem ciepła, co zapewnia doskonałą wytrzymałość mechaniczną.

Zadaniem osnowy jest utrzymanie fazy zbrojącej w określonym miejscu w przestrzeni tworzywa oraz deformacja pod wpływem obciążeń, przenosząc naprężenia na składniki fazy zbrojącej.

W materiałach kompozytowych fazę zbrojącą stanowią cząsteczki bądź włókna.

3.2. Właściwości materiałów kompozytowych

Właściwości materiałów kompozytowych zależą od wielu czynników. Te czynniki to między innymi rodzaj włókien i osnowy, ich udziału objętościowego, sposobu ułożenia włókien (tzw. struktury).

Właściwości kompozytów można praktycznie kształtować i projektować w zależności od wymaganych potrzeb. Materiały kompozytowe charakteryzują się właściwościami nieosiągalnymi dla konwencjonalnych monolitycznych materiałów. Wyróżniają się na tle konwencjonalnych materiałów zwiększoną: wytrzymałością, modulem Younga, charakterystyką zmęczeniową, odpornością na zużycie, charakterystyką ślizgową, wysoką odpornością na korozję, zarówno w temperaturze pokojowej jak i w podwyższonej [2].

Z ekonomicznego punktu widzenia wyroby z materiałów kompozytowych można podzielić na dwie grupy:

- powszechnego użytku – są to materiały kompozytowe, które z założenia mają konkurować z materiałami tradycyjnymi stosowanymi dotychczas w wytwarzaniu rur, zbiorników, kadłubów jednostek pływających, elementów pojazdów itp.;
- zaawansowane technologicznie – materiały kompozytowe stosowane są w wyrobach, których najważniejszym zadaniem jest sprostanie stawianym wymaganiom, a cena wytworzenia materiału odgrywa rolę drugorzędną. Do tej kategorii możemy zaliczyć m.in. elementy konstrukcji lotniczych, wyczynowy sprzęt sportowy, urządzenia medyczne.

Kompozyty powszechnego użytku stanowią obecnie około 95% zastosowań kompozytów polimerowych. Ze względu na niską cenę, wyroby kompozytowe powszechnego użytku najczęściej wykonuje się z żywicy poliestrowych oraz włókna szklanego. Wyroby o wysokim zaawansowaniu technologicznym najczęściej wytwarza się przede wszystkim z żywicy epoksydowych i włókna węglowego lub grafitowego.

Poniżej kilka istotnych cech materiałów kompozytowych:

Wysoka wytrzymałość mechaniczna

Materiały kompozytowe są znane z doskonałej wytrzymałości na rozciąganie, ściskanie i zginanie, co sprawia, że są używane w aplikacjach wymagających lekkich, a jednocześnie wytrzymałych struktur.

Niska masa

Dzięki lekkim osnowom, takim jak włókna węglowe czy szklane, kompozyty charakteryzują się niską masą własną, co jest korzystne dla zastosowań, gdzie istotna jest redukcja masy.

Wysoka sztywność

Włókna w kompozytach nadają im wysoką sztywność, co sprawia, że są one stosowane w konstrukcjach wymagających odporności na odkształcenia i ugięcia.

Odporność na korozję i ścieranie

W zależności od rodzaju osnowy i matrycy, kompozyty mogą być odporne na korozję chemiczną oraz ścieranie, co czyni je atrakcyjnymi w warunkach agresywnych środowisk.

Doskonałe właściwości termiczne

Niektóre kompozyty posiadają doskonałe właściwości termiczne, dzięki czemu są używane w aplikacjach, gdzie istotna jest odporność na wysokie lub niskie temperatury.

Izolacyjność elektryczna lub przewodnictwo

W zależności od rodzaju osnowy i matrycy, kompozyty mogą wykazywać różne właściwości elektryczne, co pozwala na ich zastosowanie w różnorodnych dziedzinach, od izolacji elektrycznej po przewodnictwo.

Dobra odporność na zmęczenie

Materiały kompozytowe często wykazują dobrą odporność na zmęczenie, co jest ważne w przypadku struktur poddawanych cyklicznym obciążeniom.

Tabela 1. Właściwości kompozytów na osnowie żywicy poliestrowej lub epoksydowej, zbrojonych włóknem szklanym [13]
Table 1. Properties of composites based on polyester or epoxy resin reinforced with glass fibre

Żywica	Gęstość [kg/m ³]	Wytrzymałość [MPa]		Moduł sprężystości [GPa]	
		rozciąganie	zginanie	rozciąganie	zginanie
Poliestrowa	1600–1900	225–541 196–392	245–480,6 182,6–294	13,43–34,56 8,82–12,74	14,70–24,58 10,78–13,72
Epoksydowa	1750–2100	568,4–882 343–617,4	441–882 245–529,2	23,52–54,20 18,62–28,42	24,50–56,84 20,58–34,30

Źródło: Klupa A.: Rury z materiałów kompozytowych do przesyłania paliw gazowych. „Nafta-Gaz” 2010, nr 9

Formowalność i kształtowalność

Kompozyty mogą być formowane w różne kształty, co pozwala na dostosowanie ich do konkretnych projektów i wymagań.

Odporność chemiczna

W zależności od składu chemicznego osnowy i matrycy, kompozyty mogą być odporne na różne substancje chemiczne, co jest korzystne w wielu branżach.

3.3. Technologie wytwarzania materiałów kompozytowych

Struktura materiałów kompozytowych zależy od:

- technologii wytwarzania
- właściwości materiału osnowy
- właściwości, rodzaju i udziału zbrojenia
- rozkładu zbrojenia
- strefy połączenia osnowa – zbrojenia

Wytwarzanie materiałów kompozytowych to proces, który wymaga precyzyjnych technologii i zaawansowanych technik. Poniżej przedstawiono kilka głównych technologii stosowanych w produkcji materiałów kompozytowych:

Laminacja

- **Laminowanie ręczne:** To tradycyjna metoda, gdzie warstwy osnowy i matrycy układane są ręcznie na formie. Następnie nakładana jest żywica, a całość jest utwardzana.
- **Laminowanie natryskowe:** W tej metodzie, osnowa i matryca są rozpylane na formę za pomocą pistoletów do rozpylania. Po nałożeniu żywicy następuje utwardzenie.

Infuzja żywicy

Proces ten polega na ułożeniu warstw osnowy i matrycy na formie, a następnie wciągnięciu żywicy pod ciśnieniem, dzięki czemu wypełnia ona przestrzeń między warstwami.

Prasowanie, formowanie ciśnieniowe

Warstwy osnowy i matrycy są umieszczane w formie, a następnie poddawane są wysokiemu ciśnieniu i temperaturze. To pozwala na uzyskanie wysokiej gęstości i doskonałej adhezji warstw.

Wtryskiwanie

Metoda ta jest stosowana głównie w produkcji kompozytów termoplastycznych. Włókna i granulki osnowy są wstrzykiwane do formy, gdzie następnie są formowane pod wpływem wysokiego ciśnienia i temperatury.

Obróbka na podgrzewanej formie

Proces ten obejmuje umieszczenie warstw osnowy i matrycy na podgrzewanej formie, co umożliwia utwardzenie żywicy i formowanie kompozytu.

Modelowanie w autoklawie

Po nałożeniu warstw osnowy i matrycy, forma jest umieszczana w autoklawie, gdzie poddawana jest kontrolowanym warunkom ciśnienia i temperatury, co przyspiesza proces utwardzania.

Filtracja strukturalna

W tej technice włókna osnowy nawijane są na formę w odpowiednim kierunku, tworząc strukturę, która następnie jest nasączana żywicą.

Wytwarzanie kompozytów z nanokompozytów

Nanomateriały, takie jak nanorurki węglowe czy nanocząstki, są dodawane do osnowy lub matrycy w celu poprawy właściwości kompozytu.

Inne technologie

W miarę postępu technologicznego pojawiają się nowe metody, takie jak druk 3D kompozytów, które umożliwiają precyzyjne tworzenie skomplikowanych struktur.

Każda z tych technologii ma swoje zastosowanie w zależności od rodzaju kompozytu, wymagań projektowych oraz kosztów produkcji. Wybór odpowiedniej metody zależy także od oczekiwanych właściwości końcowego produktu kompozytowego.

4. Rury kompozytowe do przesyłu paliw gazowych

4.1. Rury do przesyłu cieczy i gazów w Polsce

Transport rurociągowy jest obecnie najbardziej bezpieczną i przyjazną dla środowiska formą przesyłu energii. Jego ogromną zaletą jest pewność dostaw jak i ograniczenie do minimum ryzyka negatywnego oddziaływania na środowisko.

Prognozy wzrostu zapotrzebowania na gaz przewidują dynamiczne zwiększenie jego zużycia w najbliższej przyszłości a preferowanym kierunkiem użytkowania gazu będzie sektor energetyczny i komunalno-bytowy.

Aby sprostać rosnącemu popytowi na gaz ziemny, infrastruktura gazowa wymaga dynamicznego rozwoju równoległe w wielu obszarach, w tym m.in.: gazociągów przesyłowych i dystrybucyjnych, terminalu LNG, podziemnych magazynów gazu i połączeń między-systemowych.

W chwili obecnej, w Polsce projektowanie i budowa sieci gazowych, oparta jest o Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 26 kwietnia 2013 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać sieci gazowe i ich usytuowanie (Dz.U. z 2013 r., poz. 640). Rozporządzenie nie dotyczy rurociągów technologicznych znajdujących się na terenie zakładów górniczych wydobywających gaz ziemny. Przepisów rozporządzenia nie stosuje się również w przypadku doświadczalnych sieci gazowych.

Rozporządzenie nie dopuszcza do budowy gazociągów rur z innych materiałów niż stal i polietylen, z tym że polietylen może być stosowany do budowy gazociągów o maksymalnym ciśnieniu roboczym MOP 1,0 MPa. Budowa gazociągów powyżej tego ciśnienia wykonywana jest wyłącznie z rur stalowych.

Projektowana nowelizacja rozporządzenia przewiduje dopuszczenie do budowy sieci gazowych nowych materiałów (materiały kompozytowe) oraz określenie wymagań, jakie powinny spełniać gazociągi budowane z kompozytów.

W Polsce, sieci dystrybucyjne średniego i niskiego ciśnienia gazu budowane są obecnie prawie wyłącznie z rur polietylenowych. Wła-

ściwości wytrzymałościowe rur polietylenowych stosowanych do rozprowadzania paliw gazowych ulegają systematycznemu podwyższeniu i przy zastosowaniu polietylenu klasy PE100, o minimalnej wytrzymałości hydrostatycznej 10 MPa, umożliwiają rozprowadzanie gazu pod ciśnieniem 10 bar (1,0 MPa) przy współczynniku bezpieczeństwa równym 2.

Zalety rur PE 100 to:

- wysoka odporność na korozję naprężeniową (działanie karbu)
- zwiększa przepustowość hydrauliczną
- zwiększony zakres ciśnienia roboczego
- wyższe naprężenie obliczeniowe PE 100 pozwala na znaczne zredukowanie grubości ścianek rury (mniejszy ciężar)
- odporność na powolny wzrost sprężen oraz szybką propagację spękań
- większa odporność na długotrwałe ciśnienia hydrauliczne
- niższe koszty montażu
- bardzo wysoki stopień bezawaryjności
- bardzo szeroki zakres zastosowań, zwłaszcza dla renowacji rurociągów

Gazociągi wysokiego ciśnienia do 8,4 MPa budowane są wyłącznie z rur stalowych. Do budowy gazociągów wysokiego ciśnienia stosowane są rury stalowe przewodowe dla mediów palnych, zgodnie z wymaganiami określonymi w normie PN-EN 10208-2 lub PN-EN ISO 3183.

Rury stalowe mają zdecydowanie większą wytrzymałość od rur z PE, jednak posiadają dużo wad:

- duża waga
- wysoka cena
- skomplikowana procedura montażu (konieczność łączenia poprzez spawanie na budowie)
- korozyjność rur
- duże opory własne materiału.

Różnorodność rur, tak pod względem materiałowym jak i metod wytwarzania powoduje, że rynek produkcji rur jest bardzo szeroki. Jednak niezmiennie, na świecie produkuje się najwięcej rur stalowych. Przez ostatnie lata jednak struktura rynku uległa zmianie. Nastąpił wzrost produkcji rur polimerowych, w tym rur kompozytowych.

W przemyśle dostępnych jest wiele metod wytwarzania rur zależnych od sposobu ich wytwarzania. Podział na rury ze szwem, lub bezszwowe łączy wszystkie grupy. W konstrukcjach wysokociśnieniowych wykorzystuje się rury bez szwu. Spowodowane jest to występowaniem koncentracji naprężeń w miejscu łączenia, a w konsekwencji małej odporności na ciśnienie wewnętrzne.

Zainteresowanie rynkiem rur z tworzyw sztucznych stale rośnie. Jednym z aspektów przyczyniających się do zainteresowania nowymi rozwiązaniami jest wymiana już zużytych stalowych systemów rurowych na lżejsze z tworzyw sztucznych. Powoduje to ukierunkowanie badań nad rozwojem i produkcją m.in. rur wzmacnianych włóknem szklanym.

W celu pokrycia zwiększonego zapotrzebowania na gaz potrzebna będzie rozbudowa systemu gazociągów przesyłowych oraz sieci dystrybucyjnych. W trakcie budowy i użytkowania systemów sieci gazociągów należy brać pod uwagę następujące kryteria:

- zapewnienie bezpieczeństwa użytkowania gazociągów
- utrzymanie wymaganego poziomu niezawodności funkcjonowania
- spełnienie wymagań w zakresie ochrony środowiska
- dużą trwałość
- łatwą technologię montażu rur
- obniżanie kosztów użytkowania i konserwacji
- wzrost efektywności funkcjonowania.

W pracach badawczych obejmujących rury do przesyłania paliw gazowych przy wysokich ciśnieniach roboczych utrzymują się dwa zasadnicze kierunki badań: pierwszy z nich obejmuje opracowywanie

nowych odmian stali o wysokich parametrach wytrzymałościowych, natomiast drugi jest związany z zastosowaniem materiałów kompozytowych.

4.2. Rury kompozytowe do transportu gazu

Polski sektor gazu ziemnego należy do najszybciej rozwijających się w UE w ostatnich latach. Światowe doświadczenia dotyczące stosowania materiałów kompozytowych na elementy sieci gazociągowej oraz wyniki doświadczalne z testów wykonanych na gazociągu z materiałów kompozytowych wskazują na możliwość zastosowania nowych materiałów w krajowym gazownictwie. Nowe materiały i nowe technologie mogą być kluczowe dla realizacji planów związanych z intensywną rozbudową gazowej sieci przesyłowej i dystrybucyjnej.

W chwili obecnej w Polsce mamy tylko pojedyncze odcinki rurociągów z kompozytów, ale w Stanach Zjednoczonych i w Europie stają się one coraz bardziej popularne.

Innowacyjność rur kompozytowych to:

- doskonała elastyczność
- ograniczenie ilości koniecznych połączeń i uproszczenie technologii ich wykonywania
- całkowita odporność na korozję
- znacznie niższa waga
- możliwość monitorowania stanu technicznego pracującego rurociągu w czasie rzeczywistym
- prosta, efektywna technologia montażu
- redukcja kosztów transportu.

Poza Polską, istnieją opracowane wymagania techniczne w zakresie projektowania, produkcji i zastosowania rur kompozytowych. I tak, dla rur wzmacnianych oplotem, można się oprzeć na specyfikacji opracowanej przez American Petroleum Institute (API) API RP 15 S, zgodnie z którą, to producent dobiera materiały rury w zależności od składu chemicznego przesyłanego medium, jego temperatury oraz zakresu stosowanych ciśnień.

Dla rur wzmacnianych taśmą stalową, można wzorować się na specyfikacji API 17J. W oparciu o wymagania zawarte w specyfikacji, opracowano normę ISO 13628-2 zawierającą wymagania dotyczące projektowania, doboru materiałów, produkcji i badań. Norma ta została opublikowana jako Polska Norma PN-EN ISO 13628.

Zgodnie z wymaganiami powyższych specyfikacji i norm możliwość zastosowania rur o wybranej konstrukcji należy poprzedzić dokładną oceną oddziaływań i obciążeń wywieranych na dany rurociąg. Ocenę należy przeprowadzić na etapie opracowania założeń projektowych.

Wraz z opracowaniem technologii produkcji wytrzymałych na wysokie ciśnienie rur kompozytowych, jak również techniki ich łączenia wraz z odpowiednim osprzętem, pojawiła się alternatywna do stosowanych powszechnie rur stalowych. Montaż i ułożenie rurociągu składają-



Rys. 2. Montaż rurociągu kompozytowego RTP (źródło: http://fartrouven.pt/en/articles/art_2.html)

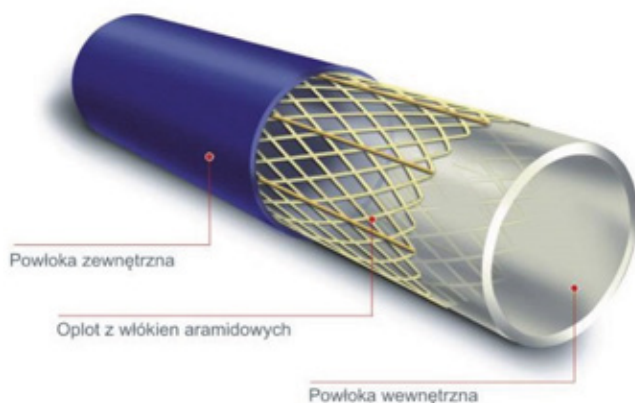
Fig.2 Installation of composite piping

cego się z rur kompozytowych jest znacznie prostsze – rurę rozwija się ze szpuli. Opracowane technologie pozwalają na bezproblemowe łączenie rur. Pozwala to na skrócenie o 40 – 80 % czasu przy układaniu rurociągu (można ułożyć do 5 – 6 km rurociągu dziennie), a także zmniejszenie kosztów całej budowy o 35 – 65 %. Wykonanie prac montażowych wymaga zatrudnienia mniejszej liczby pracowników. Nie jest wymagane zastosowanie radiografii do sprawdzania połączeń spawanych. Dzięki niższej wadze rur kompozytowych w porównaniu z rurami stalowymi, magazynowanie, załadunek i transport są znacznie łatwiejsze i tańsze. Bezporną zaletą jest brak korozji w rurach kompozytowych. Brak korozji jest korzystny z punktu widzenia potencjalnego zniszczenia rurociągu w środowisku pracy.

4.2.1. Rury kompozytowe RTP

Właściwości rur z materiałów kompozytowych zależą od właściwości włókien, z których zostały wykonane materiały do ich wzmocnienia, a podstawą doboru odpowiedniego układu osnowa – zbrojenie, musi być przede wszystkim przewidywane zastosowanie produktu.

Rura kompozytowa typu RTP (Reinforced Thermoplastic Pipes) składa się co najmniej z trzech podstawowych warstw: wewnętrznej, środkowej (wzmacniającej) i zewnętrznej. Producent produkujący rury kompozytowe odpowiada za dobór materiałów tworzących warstwy, gwarantując spełnienie odpowiednich wymagań i norm.



Rys. 3. Struktura rurociągu kompozytowego (źródło: <https://cgh.com.pl/cgh-rtp-pipe/konstrukcja-cgh-rtp-pipe>)

Fig.3 Composite pipeline structure



Rys.4. Montaż rur RTP w wykopie otwartym. (źródło: <https://cgh.com.pl/cgh-rtp-pipe/instalacja-thermoflex>)

Fig.4 Pipe installation in the open trench

Plaszcz zewnętrzny i wewnętrzny jest wykonany z tworzywa termoplastycznego (np. polietylenu wysokiej gęstości – HDPE). Wewnętrzną warstwę stanowi struktura wzmacniająca, która może być wykonana w postaci żywicy wzmacnianej włóknem szklanym albo w postaci wzmacniającej siatki z drutu stalowego. Wzmocnienie siatką stalową jest rozwiązaniem tańszym, przy czym nie ma zagrożenia korozji siatki, ze względu na brak dostępu medium czy atmosfery zewnętrznej rurociągu. Dodatkowo, siatka stalowa zapewnia ciągłość połączenia elektrycznego, co jest istotne dla przyszłej lokalizacji rurociągu. W przypadku wzmocnienia włóknem szklanym razem z rurociągiem prowadzi się specjalny przewód, umożliwiając lokalizację miejsca położenia rurociągu.

Produkcja rur kompozytowych obejmuje zastosowanie specjalnych technologii, które pozwalają na uzyskanie wytrzymałych, lekkich i odpornych na korozję struktur. Przykładowy proces produkcji rur kompozytowych składa się z etapów:

Projektowanie

Pierwszym krokiem jest zaprojektowanie rury kompozytowej, uwzględniając wymagania mechaniczne, chemiczne i aplikacyjne. Projekt obejmuje dobór odpowiednich materiałów osnowy i matrycy, a także określenie struktury kompozytu.

Przygotowanie osnowy

Włókna osnowy, które mogą być włóknami szklanymi, węglowymi lub innymi, są przygotowywane do produkcji rur. Mogą być one w postaci tkanin, mat, włóknin lub innych form, w zależności od preferencji producenta i wymaganych właściwości.

Przygotowanie matrycy termoplastycznej

Wybierana jest odpowiednia matryca termoplastyczna, która może być polipropylenem (PP), polietylenem (PE), poliamidem (PA) lub innym termoplastycznym materiałem. Matryca stanowi warstwę, w której utwardza się cała struktura kompozytowa.

Laminacja

Warstwy osnowy i matrycy są laminowane w odpowiedniej kolejności i nałożone na formę w kształcie rury. Warstwy te są następnie utwardzane w procesie laminacji.

Wytwarzanie warstw wewnętrznych i zewnętrznych

Rury RTP często posiadają warstwy wewnętrzne i zewnętrzne o różnych właściwościach. Warstwa wewnętrzna jest często zaprojektowana tak, aby była odporna na korozję i ścieranie, podczas gdy warstwa zewnętrzna może być wzmocniona dla zwiększenia odporności mechanicznej.

Wytwarzanie zbrojenia

W celu uzyskania odpowiedniej wytrzymałości mechanicznej, wewnętrzna warstwa może być wzmocniona zbrojeniem, na przykład włóknami szklanymi lub węglowymi.

Spiekanie lub Wtryskiwanie

W zależności od procesu produkcyjnego, rury RTP mogą być formowane poprzez spiekanie warstw w formie lub wtryskiwanie materiału w formie. To zapewnia, że wszystkie warstwy są ściśle połączone.

Chłodzenie i obróbka

Po formowaniu rury, ta jest schładzana, a następnie poddawana obróbce, takiej jak przycinanie, aby uzyskać wymagane długości.

Kontrola jakości

Rury są poddawane różnym testom, takim jak testy nienaruszalności, testy wytrzymałościowe, testy chemiczne, aby zapewnić, że spełniają normy i wymagania jakościowe.

Oznakowanie i pakowanie

Gotowe rury są oznakowane zgodnie z normami branżowymi, a następnie pakowane do transportu i dostawy.

Proces produkcji rur kompozytowych RTP wymaga zaawansowanych technologii, a dokładne etapy mogą się różnić w zależności od konkretnego producenta i jego technologii. Ważne jest, aby dostosować proces do specyfiki danego zastosowania, a także dbać o jakość surowców i precyzję wykonania, aby uzyskać optymalne właściwości kompozytu.

Aktualne tendencje w zakresie technologii przesyłania gazu ziemnego idą się w kierunku zwiększania średnic gazociągów i podwyższania ciśnień roboczych.

Bardzo innowacyjne rozwiązania dla rur kompozytowych zastosowała firma Egeplast. Jej system HexelOne polega na wzmocnieniu standardowej rury polietylenowej taśmą z polietylenu PE MD (o średniej gęstości). Taśma nawijana jest krzyżowo. Taka budowa rur umożliwia ich zastosowanie do rozprowadzania gazu ziemnego i wody pod ciśnieniem 25 bar. Przeprowadzono badania tego systemu rur dla zastosowania pod ciśnieniem 50 bar [4]

Innym sposobem uzyskania wyższej wytrzymałości rur polietylenowych jest ich zbrojenie drutem ze stali o wysokiej wytrzymałości – Steel-wire Reinforced Thermoplastics (PE) Composite-Pipe. Rury wytwarzane przy zastosowaniu tej technologii charakteryzują się wysoką odpornością na ciśnienie wewnętrzne, ograniczonym pełzaniem, większą sztywnością obwodową oraz mniejszym współczynnikiem rozszerzalności liniowej. [13]

Bardzo dobre perspektywy dla zastosowań rur z tworzyw sztucznych przy wysokich ciśnieniach daje zastosowanie na rurach oplotu z żywicy epoksydowej lub wzmocnienie włóknem szklanym lub węglowym.

W Polsce dostępne są już rury z kompozytów RTP (Reinforced Thermoplastic Pipe). Rury RTP są elastycznymi konstrukcjami spajanymi, zaś kompozyty, z których są wykonywane, są laminatami wzmocnionymi włóknami w osnowie z tworzywa termoplastycznego. Rury te są podobne do rur wielowarstwowych z kompozytów termoutwardzalnych wzmocnianych włóknami. Dzięki swej wytrzymałości i wydajności przeznaczone są do przesyłu ropy naftowej, gazu ziemnego, wody złożowej, CO₂ oraz LPG. Technologia RTP pozwala na łączenie rur wysokiego ciśnienia bez spawania lub gwintowania. Przykładem tego typu technologii dostępnej w naszym kraju, jest produkt firmy CGH Polska sp. z o.o. rura CGH RTP PIPE oraz produkt firmy SPYRA PRIME Sp. z o.o. [16]

Rura CGH RTP PIPE składa się z 3 warstw:

Powłoka wewnętrzna

- NYLON (odporny chemicznie materiał nylonowy)
- FORTON (PPS=polisarczek fenylu)

Oplot z włókien aramidowych

- Splot promienisty (krzyżowy) zwiększający odporność na ciśnienie
- Splot wzdłużny do minimalizacji wydłużenia.

Powłoka zewnętrzna

- Powłoka ochronna dla plecionki wykonana z PP lub Nylonu.

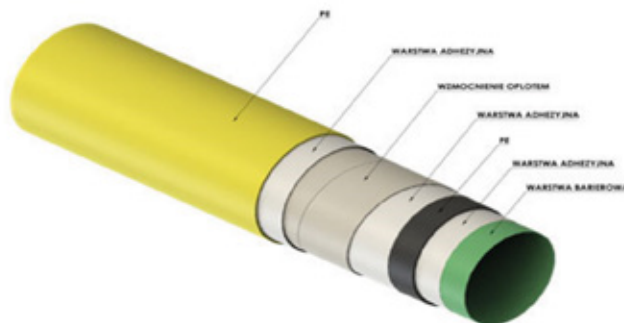
Parametry zastosowania:

- ciśnienie operacyjne: do 206 bar (w zależności od średnicy rury)
- temperatura pracy: do 121°C
- maksymalna siła ciągnięcia: do 3.400 kg
- zgodność chemiczna: kwasy, zasady, nafta, gaz, H₂S, CO₂, solanki, skropliny, substancje, aromatyczne, gaz płynny
- zewnętrzna średnica rury: do 152 mm
- długość zwoju: między 300 m, a 3500 m

Rury kompozytowe systemu SPYRA PRIME Poland.

System rur kompozytowych przeznaczony jest do przesyłania mediów pod średnim i wysokim ciśnieniem. Stosowany może być

do transportu rurociągowego na ciśnienie do 10 MPa, renowacji istniejących gazociągów przesyłowych i dystrybucyjnych. Rury RTP są rurami wielowarstwowymi (7 warstwowymi), są elastycznymi konstrukcjami spajanymi, zaś kompozyty, z których są wykonywane, są laminatami wzmocnionymi włóknami w osnowie z tworzywa termoplastycznego. Rury te są podobne do rur wielowarstwowych z kompozytów termoutwardzalnych wzmocnianych włóknami. Jednakże tworzywo termoplastyczne w przypadku przedmiotowych rur jest bardziej elastyczne, co umożliwi stosowanie rur termoplastycznych w warunkach wyższych naprężeń zginających. Nowością jest tutaj połączenie warunków technicznych z niektórymi aspektami unikalnymi dla spajanych elastycznych rur z tworzyw termoplastycznych, oraz związanych ogólnie z tworzywami termoplastycznymi.[16]



Rys 5. Rura kompozytowa firmy SPYRA PRIME Poland (źródło: <https://spyraprime.pl/>)

Fig.5. Composite pipe from SPYRA PRIME Poland

Gładka powierzchnia wewnętrzna rur Firmy SPYRO zmniejsza straty hydrauliczne. Dzięki temu, straty te są minimalne, a gładka powierzchnia wewnętrzna utrzymuje się przez cały okres użytkowania.

Innym ciekawym przykładem rur kompozytowych są rury systemu Flexstrong™ (termoplastyczna rura kompozytowa) firmy Future Pipe Industries. Zjednoczone Emiraty Arabskie.

Wyprodukowany przez Future Pipe Industries system Flexstrong™ jest najnowszą technologią na rynku i łączy w sobie termoplastyczną wykładzinę z polietylenu o wysokiej gęstości (HDPE), wzmocnioną taśmą owiniętą spiralnie zawierającą włókna ciągłe (jednokierunkowe) w matrycy HDPE i chronioną przez termoplastyczną powłokę zewnętrzną (tzw. „płaszcz” z HDPE). Wszystkie trzy warstwy są ze sobą stopione, stanowiąc zwartą strukturę. W rezultacie otrzymujemy bardzo solidną, elastyczną, lekką i odporną na korozję rurę. Produkt ten, oferowany jest w postaci zwojów nawiniętych na szpule, jest w pełni odporny na przenikanie mediów przez ściankę rury i rozwarstwiania, co czyni go bardzo skutecznym rozwiązaniem dla wysoce korozyjnych zastosowań w przemyśle naftowym i gazowym. Rury produkowane są w odcinkach ciągłych o długościach do 1000 m (w zależności od średnicy). Rura jest elastyczna i jest nawijana na szpule, które są wygodne i wydajne w transporcie. Bębny umożliwiają szybką i łatwą instalację, zmniejszając koszty instalacji nawet o jedną trzecią w porównaniu z innymi materiałami rurowymi. System jest dostępny w różnych średnicach i dla różnych temperatur i ciśnień, aby dopasować się do indywidualnych potrzeb aplikacji i stanowić wartość dla projektów i użytkowników końcowych. [6]

Innym przykładem producenta rur kompozytowych jest założona w 2015 r. firma Specialty RTP, Inc. Jest międzynarodowym producentem wzmocnionych rur termoplastycznych (RTP) z doświadczeniem na rynku offshore i onshore w Stanach Zjednoczonych, na Bliskim Wschodzie, w Ameryce Południowej, Europie i Azji. Wewnętrzna wykładzina rur została zaprojektowana tak, aby wytrzymać środowisko przepływu ropy naftowej i gazu bez korozji

i utrzymać niski poziom przenikania. Specjalistyczny RTP wykorzystuje różne polimery w zależności od temperatury, stężenia H_2S , CO_2 i węglowodorów. Wykorzystując polimery takie jak polisiarczek fenylenu (PPS), polifluorek winylidenu (PVDF) i poliamid (nylon), Specjalty RTP tworzy rury i przewody rurowe, które wytrzymują zastosowania do $105^{\circ}C$ ($221^{\circ}F$) i dowolnego poziomu CO_2 , H_2S , solanki i węglowodorów. Szybki i tani montaż zmniejsza całkowite koszty inwestycyjne, a 4-krotnie krótszy czas montażu w porównaniu ze stalą prowadzi do szybszego zwrotu z inwestycji. Firma posiada w produkcji rury do montażu liniowego typ SRTP® Pipe oraz rury typ RTP-Rehab do rehabilitacji starych rurociągów [15].

Poprzez zastosowanie czujników światłowodowych, przewodów miedzianych i kabli zasilających, które mogą być wbudowane w kompozytowy rurociąg, umożliwiają jego funkcjonowanie jako elementów inteligentnej struktury.

4.2.2. Rury kompozytowe stalowe.

Do rur kompozytowych zaliczamy obecnie rury stalowe z zewnętrzną powłoką wzmacniającą z materiału kompozytowego i rury stalowe z wewnętrzną wykładziną kompozytową.

Bardzo obiecująco przebiegają badania nad opracowaniem rur przesyłowych wysokiego ciśnienia o dużych średnicach, prowadzone przez Future Pipe Industries Inc. [8]. Firma stworzyła system hybrydowy – stal/kompozyt.

W opracowanym systemie materiał kompozytowy stanowi zewnętrzne wzmocnienie rury stalowej. Połączenie wszystkich materiałów umożliwia przenoszenie przez rurę kompozytową znacznie wyższych naprężeń obwodowych – w stosunku do obciążeń przenoszonych przez rurę stalową monolityczną. Zastosowanie takich rur to idealne rozwiązanie w przypadku budowy gazociągów dużych średnic. Możliwa będzie budowa sieci przesyłowych o znacznej długości i zastosowanie ciśnień roboczych w przedziale od 83 do 248 bar. W porównaniu z rurociągiem stalowym o tej samej średnicy i grubości ścianki rur, umożliwia zwiększenie zdolności przepustowej o około 6%.

Polska firma Izostal S.A. oferuje oprócz zabezpieczenia izolacją antykorozyjną zewnętrzną rur stalowych nowy produkt – epoksydową powłokę wewnętrzną, obniżającą zdecydowanie wartość współczynnika oporu hydraulicznego rurociągu [11]. W zależności od rodzaju medium dobierana jest odpowiednia grubość powłoki wewnętrznej oraz rodzaj materiału i jego skład chemiczny.

Zastosowano powłokę wewnętrzną LAYTEC® wg PN-EN 10301:2006 oraz API RP 5L2:2002

Zakres średnic rur od 219,1 do 1220 mm, długość od 8 do 18 m. Wykonanie wg. EN 10301 oraz API RP 5L2 lub specyfikacji klienta.

- Proces malowania wewnętrznej powierzchni rur przewodowych
- oczyszczenie poprzez obróbkę strumieniowo-ścianą powierzchni rury do stopnia czystości Sa 2½ zgodnie z normą PN-EN ISO 8501-1:2008 oraz chropowatości $Ry5 = 25 \div 60 \mu m$ zgodnie z PN-EN ISO 8503-4:2012.
- natrysk na powierzchnię rury w sposób ciągły i jednolity przygotowanej mieszanki; grubość powłoki uwarunkowana jest wymaganiami klienta lub normy przedmiotowej.
- składowanie rur w celu osiągnięcia suchości dotykowej – w temperaturze otoczenia bądź przez podgrzewanie
- składowanie i sezonowanie w celu uzyskania suchości transportowej.

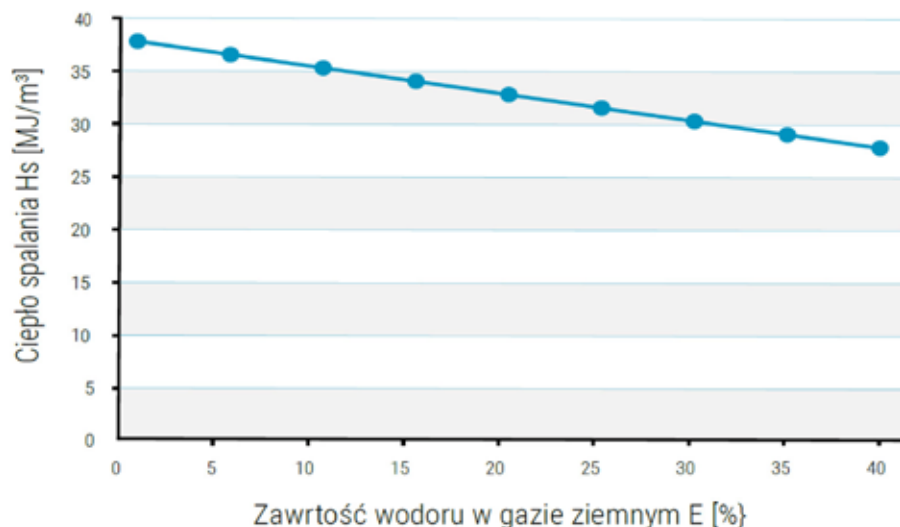
Zastosowanie epoksydowej powłoki wewnętrznej w rurach przewodowych do przesyłania gazu i innych paliw ma wpływ na:

- zmniejszenie oporów przepływu gazu w rurach
- zmniejszenie chropowatości bezwzględnej wewnętrznej powierzchni rur, dla rur stalowych bez izolacji wewnętrznej chropowatość wynosi $k= 0,5 \text{ mm}$, dla rur z izolacją epoksydową $k= 0,0015 \text{ mm}$
- zmniejszenie liniowych strat ciśnienia gazu w gazociągach co jest szczególnie ważne przy dużych natężeniach przepływu i mniejszych średnicach rur
- zwiększenie równomierności przepływu przesyłanego medium
- podwyższenie zdolności przepustowej rurociągu, co daje możliwość zastosowania rur o mniejszej średnicy w miejsce rur bez powłoki o większej średnicy
- doskonała ochrona antykorozyjna podczas magazynowania
- usprawnienie inspekcji rur, rozwarstwienia i inne uszkodzenia rur są łatwo zauważalne i wyraźnie widoczne dzięki refleksyjnym właściwościom stosowanych powłok wewnętrznych
- wyeliminowanie zjawiska rdzy i zendry
- wzrost o 5-20%, przepustowości rurociągu.

Minimalna grubość wewnętrznej powłoki epoksydowej wynosi $38 \mu m$.

4.3. Rury kompozytowe do transportu mieszanki wodoru z gazem ziemnym.

Obecnie powszechnie stosuje się sieć rurociągów do transportu takich mediów jak: gaz ziemny, ropa naftowa czy paliwa płynne. Śmiało można stwierdzić, że współczesny świat nie mógłby funkcjonować bez sprawnej sieci rurociągów. Ciągły postęp technologiczny i coraz ostrzejsze normy bezpieczeństwa powodują stały wzrost wymagań w zakresie efektywności ekonomicznej i trwałości wytwarzanych elementów rurociągów [13].



Rys 6. Zależność ciepła spalania gazu ziemnego od zawartości wodoru (Źródło: Nafta-Gaz, 2019, nr 10, s. 625-632)

Fig. 6 Dependence of the heat of combustion of natural gas on the hydrogen content

Aby pomóc ograniczyć emisje gazów cieplarnianych w Unii Europejskiej, Parlament Unii prowadzi prace nad pakietem dotyczącym zastosowania wodoru i innych gazów odnawialnych. Obecna polityka Unii Europejskiej w przypadku gazu ziemnego dopuszcza stosowanie dodatku w postaci wodoru. Zastosowanie wodoru dodatkowo wprowadza ograniczenia związane z korozją wodorową i wysokimi ciśnieniami transportu gazu. Dodanie wodoru do gazu ziemnego, a następnie jego spalanie, spowoduje mniejszą emisję dwutlenku węgla, a przez to paliwo to stanie się bardziej przyjazne środowisku. W przeciwieństwie do paliw węglowych, przy spalaniu wodoru powstaje tylko energia i czysta woda [3].

Mieszanka gazu ziemnego z wodorem może być przesyłana gazociągami przesyłowymi, a następnie poprzez sieci dystrybucyjne docierać do odbiorców przemysłowych i indywidualnych. Ze względu na znacznie mniejszą gęstość wodoru od gazu ziemnego istotne jest zachowanie szczelności połączeń mechanicznych elementów sieci i instalacji gazowych. Gęstość wodoru wynosi $0,082 \text{ kg/m}^3$, podczas gdy gęstość gazu ziemnego wysokometanowego to ok. $0,75 \text{ kg/m}^3$.

Z powodu mniejszej gęstości wodoru od gazu ziemnego, konieczne jest zastosowanie większego ciśnienia. Dodatek objętościowo ok. 10 % wodoru do gazu ziemnego obniża wartość energetyczną przesyłanego gazu o około 7 %.

Z tego też powodu, rurociągi do transportu mieszanki metanu z wodorem muszą się charakteryzować odpornością na wysokie ciśnienia i temperaturę oraz posiadać niską przepuszczalność gazu.

W chwili obecnej w Polsce, powszechnie stosowane do przesyłu gazu ziemnego są rury stalowe (wysokie ciśnienie) i rury polietylenowe PE100 (niskie i średnie ciśnienie). Dodatkowo polietylen typu HDPE charakteryzuje się dużą odpornością na przenikanie wodoru. Maksymalne ciśnienie transportu gazu rurami z PE to 1,0 MPa.

Gaz ziemny, którego głównym składnikiem jest metan, charakteryzuje się znacznie mniejszą wartością współczynnika przenikalności gazu niż wodór, stąd im większy udział wodoru w mieszaninie z gazem ziemnym, tym wyższe nadciśnienie w sieci oraz większa długość rurociągów sieci, tym większa objętość gazu przenika przez ścianki rurociągów.

Dla tych samych objętości przy tych samych zakresach ciśnienia ilość przesyłanej wodorem energii jest niższa niż w przypadku gazu ziemnego. [12]

Przeprowadzone badania sieci z polietylenu pozwalają stwierdzić, że 15 % dodatek wodoru do metanu nie powoduje wzrostu strat na skutek nieszczelności ani nie ma negatywnego wpływu na pracę reduktorów i urządzeń gazowych. [17]

Obecnie na całym świecie prowadzone są intensywne prace mające na celu zbadanie wpływu wodoru, jako dodatku do gazu ziemnego, na infrastrukturę, która obecnie jest wykorzystywana do przesyłu gazu ziemnego.

Z przeprowadzonych badań wynika, że obecność wodoru w metalach i stopach powoduje niekorzystny wpływ na ich właściwości fizyczne, mechaniczne i elektrochemiczne. Wodór powoduje m.in. zmniejszoną wytrzymałość mechaniczną i zwiększoną kruchość. Ponadto, wodór intensyfikuje proces korozji stali i stopów [14].

Prowadzone są prace nad zastosowaniem istniejących gazociągów z rur stalowych poprzez ich powlekanie od wewnątrz polimerami.

Alternatywą do transportowania gazu ziemnego z dodatkiem wodoru są rury kompozytowe. Osiągają one doskonałe współczynniki wytrzymałości w trakcie testu ciśnienia rozrywającego i niszczącego, dużą wytrzymałość na rozciąganie i ściskanie oraz doskonałą odporność chemiczną i na korozję.

4.4. Montaż rur kompozytowych

W Polsce nie dopuszcza się do budowy gazociągów rur z innych materiałów niż stal i polietylen. Rozporządzenie nie dotyczy rurociągów technologicznych znajdujących się na terenie zakładów górniczych wydobywających gaz ziemny. Przepisów rozporządzenia nie stosuje się również w przypadku doświadczalnych sieci gazowych.

Projektowana nowelizacja rozporządzenia przewiduje dopuszczenie do budowy sieci gazowych nowych materiałów (materiały kompozytowe) oraz określenie wymagań, jakie powinny spełniać gazociągi budowane z kompozytów.

Proponowana regulacja zakłada także, że elementy gazociągów z tworzyw sztucznych i kompozytowych, powinny być łączone ze sobą (między sobą) według technologii określonej przez projektanta. Projektant, musiałby także określić wymagania dla połączeń: elementów z różnych tworzyw sztucznych, elementów z tworzyw sztucznych z elementami stalowymi, a także elementów kompozytowych z elementami stalowymi. Takie wymagania mające spoczywać na projektancie wynikają z faktu, że w obecnym stanie, brak jest określonych technologii wykonywania ww. połączeń, które zostałyby określone w Polskich Normach lub innych normach lub wytycznych wydawanych przez krajowe lub międzynarodowe organizacje branżowe [10].

Niepowtarzalne i wyjątkowe właściwości oraz wymagania dotyczące poszczególnych połączeń rur kompozytowych stanowią najważniejszy aspekt budowy rurociągów z tych rur. Każdy producent rur kompozytowych powinien zagwarantować odpowiedni rodzaj łączenia, który zapewni wymagane parametry wytrzymałości i szczelności połączeń. Powinien także, zapewnić również system kontroli jakości oraz procedury związane z wykonywaniem połączeń.

Bardzo ważne jest aby parametry wytrzymałościowe zaprojektowanych połączeń były nie mniejsze niż rur kompozytowych.

Producent powinien posiadać dostosowane do wytwarzanych rur kompozytowych, opracowane szczegółowe procedury łączenia rur, które udostępni wykonawcy. Zastosowanie tych procedur powinno zapewnić szczelne połączenie, umożliwiające bezpieczny transport przesyłanego medium. Materiały opracowane przez producenta powinny zawierać szczegółowy opis i instrukcję postępowania przy wykonywaniu połączeń oraz określić dopuszczalne parametry, jakie powinny zostać spełnione podczas łączenia rur. Te parametry to między innymi:

- ograniczenia temperatury w czasie prowadzenia procesu łączenia
- czas wykonywania połączenia
- dopuszczalne zakresy tolerancji dla owalności
- sposób do określania dopuszczalności ostatecznego układu łączenia wraz z jego szczegółowym opisem i instrukcją postępowania.

Dokumentacja procesu łączenia rur opracowana przez producenta, powinna dać instalatorowi lub osobie nadzorującej możliwość dokumentowanie najważniejszych etapów procesu, w tym do rejestrowania wartości takich wielkości jak np.: temperatura topnienia, siła docisku, temperatura topnienia czy czas łączenia.

Wybór odpowiedniej metody łączenia zależy od wielu czynników, takich jak rodzaj kompozytu, środowisko pracy, wymagane właściwości mechaniczne i koszty produkcji. Ważne jest również odpowiednie przetestowanie i certyfikacja połączeń, aby zapewnić ich trwałość i bezpieczeństwo w przypadku stosowania w instalacjach gazowych.

Do połączenia rur kompozytowych najczęściej stosowane są następujące metody:

- **Łączenie spawane** umożliwia przyspawanie rury kompozytowej do innych, standardowych komponentów.
- **Łączenie kolnierkowe** jest najczęściej używane do łączenia z innymi standardowymi elementami rurociągów. Złącze rurowe są dostępne w wersjach ze stali nierdzewnej, stali ocynkowanej i stali węglowej.
- **Łączenie za pomocą tulei stalowych** jest najczęściej używane do łączenia dwóch odcinków rurociągów. Złącze rurowe są dostępne w wersjach ze stali nierdzewnej, stali ocynkowanej i stali węglowej.

Bardzo dobrym przykładem zastosowania tych metod łączenia, jest przedstawiona wcześniej rura kompozytowa systemu Flexstrong™, termoplastyczna rura kompozytowa (TCP). Firma Future Pipe Industries (Zjednoczone Emiraty Arabskie) posiada kompletną dokumentację montażu i nadzorowania połączeń rurociągów kompozytowych (maszyny do zaciskania tulei, opracowanie sposobów łączenia, promienie gięcia, głębokość wykopu, sposób ciągnięcia rur, itp.) [6].

4.5. Rury kompozytowe: zalety i wady

Wykorzystanie materiałów kompozytowych do produkcji rur pozwala na olbrzymią swobodę projektowania, pozwalając na dostosowanie ich do konkretnych obszarów zastosowania, co w konsekwencji znajduje swoje odzwierciedlenie w olbrzymim różnicowaniu tych materiałów.

Rury kompozytowe do transportu gazu posiadają wiele zalet:

Wytrzymałość na korozję

Rury kompozytowe mogą być bardziej odporne na korozję niż tradycyjne materiały, takie jak stal czy żelbet, co zmniejsza ryzyko uszkodzeń i wycieków, kluczowe dla bezpieczeństwa w transporcie gazu.

Lekkość

Rury kompozytowe są zazwyczaj lżejsze od rur stalowych, co ułatwia transport, instalację i obsługę. To również zmniejsza koszty związane z transportem i budową infrastruktury gazowej.

Odporność na zmienne warunki atmosferyczne

Materiały kompozytowe mogą być bardziej odporne na działanie czynników atmosferycznych, takich jak wilgoć, promieniowanie UV i zmiany temperatury, co przekłada się na dłuższą żywotność rur.

Inteligentne funkcje i monitorowanie

Rury kompozytowe mogą być wyposażone w sensory do monitorowania stanu rur i gazu, co umożliwia szybką detekcję wycieków, lokalizację uszkodzeń lub zmian w przepływie gazu. To zwiększa bezpieczeństwo i ułatwia konserwację infrastruktury gazowej.

Ochrona środowiska

W porównaniu ze stalowymi rurami, produkcja rur kompozytowych zmniejsza emisję gazów cieplarnianych.

Zastosowania w trudno dostępnych miejscach

Lekkość i łatwość formowania rur kompozytowych umożliwiają ich zastosowanie w trudno dostępnych miejscach, takich jak tereny podmokłe, obszary górskie czy miejsca o dużej liczbie przeszkód terenowych.

Rurociągi kompozytowe są oferowane na świecie dla średnic od DN 25 do DN 500. Ciśnienie pracy zależy od wykonania, przy czym rurociągi wzmocnione włóknem szklanym (GRE) mogą pracować przy ciśnieniach roboczych do kilkudziesięciu barów, a wzmocnione siatką stalową (SSL) mogą pracować przy ciśnieniach znacznie wyższych, przekraczających 100 barów.

Rurociągi kompozytowe można nazwać rurociągami bezobsługowymi, ponieważ nie wymagają kontroli stanu izolacji lub parametrów ochrony katodowej.

Należy jednak pamiętać, że wskutek nieprawidłowego transportu lub składowania mogą wystąpić wady w postaci nieciągłości materiału, szczeliny wzdłużnych lub poprzecznych w warstwie zewnętrznej jak i wewnętrznej. Najbardziej niebezpieczne są szczeliny wzdłużne ze względu na wysoki poziom naprężeń obwodowych, działających prostopadle do szczeliny. Powstanie szczeliny wzdłużnej na powierzchni rury może spowodować pęknięcie, które będzie się szybko propagować rozszczelniając rurociąg. Taką szybką propagacją pęknięcia (z ang. RCP – rapid crack propagation) są szczególnie zagrożone rurociągi, które pracują w niskich temperaturach (temperatury ujemne), przy których występują cechy materiału sprężysto-kruche.

Do istotnych wad zastosowania rur kompozytowych przy budowie rurociągów, należy wskazać, konieczność zastosowania indywidualnych, dostosowanych do danego typu rur, kształtek oraz zastosowania narzędzi i oprzyrządowania uwzględniających strukturę materiału rur.

5. Podsumowanie

Obserwując ostatnie dziesięciolecia widać, że spośród ogromnej liczby surowców dostępnych na światowym rynku, to właśnie kom-

pozyty są najszybciej rozwijającą się grupą materiałów. Światowe zużycie tych materiałów oraz liczba ich zastosowań stale rośnie i znajduje zastosowanie w coraz to nowych segmentach rynku.

Bardzo szerokie zastosowania mogą mieć rury kompozytowe w przesyłce mieszanek gazu ziemnego z wodorem jak i samego wodoru. Technologia rurociągów kompozytowych może potencjalnie obniżyć koszty instalacji, zwiększyć niezawodność i zapewnić bezpieczniejszą eksploatację tych rurociągów.

Rury kompozytowe będą miały coraz większe znaczenie w transporcie gazu zimnego z dodatkiem wodoru i w transporcie czystego wodoru. Materiały kompozytowe dzięki swoim właściwościom oraz możliwościom modyfikacji poprzez stosowanie różnorodnych materiałów osnowy, zbrojenia i różnego ułożenia ich względem siebie, daje wprost nieograniczoną możliwość projektowania właściwości wytwarzanych rur kompozytowych.

Posumowując należy stwierdzić, że zastosowanie rur kompozytowych do przesyłu gazu to ogromna szansa na zwiększenie wydajności, trwałości i bezpieczeństwa infrastruktury gazowniczej, przy jednoczesnym zmniejszeniu kosztów eksploatacji i wpływu na środowisko.

LITERATURA

- [1] Belzowski A., luty 2007. Podstawowe wiadomości o próbach wytrzymałości materiałów kompozytowych. Wydział Mechaniczny Politechniki Wrocławskiej, Wydziałowy Zakład Wytrzymałości Materiałów Wrocław,
- [2] Bienias J., 2002. Struktura i właściwości materiałów kompozytowych. Politechnika Lubelska Katedra Inżynierii Materiałowej
- [3] Ciechanowska M., 2020. Strategia w zakresie wodoru na rzecz Europy neutralnej dla klimatu. Nafta-Gaz. 12 : 951–954.
- [4] Egeplast Polska Sp. z o.o. <<https://www.egeplast.de/pl/zastosowanie/zaopatrzanie-w-gaz>> (dostęp: 05.01.2024)
- [5] Future Pipe Industries. <<https://futurepipe.com/>> (dostęp: 05.12.2023).
- [6] Future Pipe Industries. 2021. FlexstrongTM, Thermoplastic Composite Pipe (TCM) Installation manual
- [7] Future Pipe Industries. 2021. Broszura Future Pipe Industries – kompletne rozwiązanie systemów rur kompozytowych z włókna szklanego
- [8] Future Pipe Industries, <<https://futurepipe.com/products/>> (dostęp 12.12.2023)
- [9] Gajownik P., styczeń 2013. Praca Inżynierska
- [10] Izba Gospodarcza Gazownictwa. 2019. Wytyczne Techniczne. Rurociągi kompozytowe ze wzmocnionych materiałów termoplastycznych do transportu węgłowodorów. Standard WT-IGG-3401:2019
- [11] IZOSTAL S.A., <<https://www.izostal.com.pl/>> (dostęp: 20.12.2023).
- [12] Jaworski J., Kukulska-Zajac E., Kulaga P. 2019. Wybrane zagadnienia dotyczące wpływu dodatku wodoru do gazu ziemnego na elementy systemu gazowniczego. Nafta-Gaz, 10 : 625 – 632
- [13] Klupa A., 2010. Rury z materiałów kompozytowych do przesyłania paliw gazowych. Nafta-Gaz, 9 : 805–809
- [14] Kozikowski S., Szmyłek K., 2.2022. Wodór – zielone złoto. Infrastruktura przemysłowa i wpływ wodoru na materiały konstrukcyjne. Biuletyn Urzędu Dozoru Technicznego INSPEKTOR. 4
- [15] Specjalty RTP Inc., <<https://specialtyrtp.com/>> dostęp 05.01.2024
- [16] Spyra Prime Poland Sp. z o.o., <<https://spyraprime.pl/>> (dostęp: 12.12.2023).
- [17] Szewczyk P., Jaworski J., 2020. Analiza wpływu dodatku wodoru do gazu ziemnego na szczelność połączeń mechanicznych wybranych elementów sieci i instalacji gazowych. Prace Naukowe Instytutu Nafty i Gazu – Państwowego Instytutu Badawczego. 231

WYKAZ SKRÓTÓW

- GRP – rurociągi z tworzyw sztucznych wzmocnione włóknem szklanym
RTP – ang. reinforced thermoplastic pipes pol. rura wzmocniona termoplastyczna
LPG – ang. liquefied petroleum gas, pol. skroplony gaz petrochemiczny
LNG – ang. liquefied natural gas, pol. skroplony gaz ziemny
PN – Polska Norma
RCP – ang. rapid crack propagation, pol. szybka propagacja spękań
MSP – maksymalne ciśnienie pracy
MRS – minimalna wymagana wytrzymałość
HDPE – polietylen wysokiej gęstości
MDPE – polietylen średniej gęstości
TCP – termoplastyczna rura kompozytowa
PE – polietylen
GRE – rurociągi wzmocnione włóknem szklanym
SSL – rurociągi wzmocnione siatką stalową