



## Andrzej Bełzowski\*, Przemysław Stróżyk

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

\* Corresponding author. E-mail: bełzowski@pwr.wroc.pl

Otrzymano (Received) 12.02.2008

# OCENA WZMOCNIENIA NAPRAWCZEGO RURY POLIESTROWO-SZKLANEJ

Kompozyty polimerowe są podatne na degradację, która polega na rozwoju uszkodzeń wpływających na trwałość konstrukcji. Uszkodzenia mogą powstawać również podczas transportu i montażu. W artykule omówiono zagadnienie napraw przemysłowych instalacji kompozytowych wysokiego ryzyka oraz rurociągów komunalnych niskiego ryzyka. Istniejące normy amerykańskie i międzynarodowe opisują naprawy instalacji chemoodpornych wysokiego ryzyka, gdzie kryteria oceny konstrukcji cechuje duża ostrożność. Naprawy rurociągów kompozytowych niskiego ryzyka (wodociągi, kanalizacja) są rzadko oceniane pod względem trwałości. Omówiono przypadek naprawy rur kompozytowych kanalizacji grawitacyjnej o dużej średnicy, w których lokalne uszkodzenia montażowe objęły warstwy strukturalne. W celu odtworzenia nośności i sztywności wykonano wewnątrz rury obwodowy pierścień wzmocniony matą szklaną CSM. Naprawa powinna odtworzyć wspomniane parametry rury w zakładanym okresie trwałości rurociągu. Odcinek rury zawierający wzmocnienie zbliżone do zastosowanego zamodelowano w programie ANSYS z pominięciem efektu brzegowego. Obliczenia przeprowadzone metodą FEM wykazały, że wzmocnienie naprawcze umożliwia odtworzenie sztywności i nośności rury. Największe odkształcenia obwodowe przekraczały wartości przyjmowane w projektowaniu urządzeń chemoodpornych wysokiego ryzyka (0,2%), ale współczynniki bezpieczeństwa wymagane dla podobnych instalacji niskiego ryzyka były spełnione. Przytoczone wyniki obliczeń numerycznych wariantu rekonstrukcji rury za pomocą laminatu wzmocnionego tkaniną szklaną wykazały wzrost sztywności obwodowej, co ukazuje możliwości optymalizacji zastosowanej metody naprawy.

Słowa kluczowe: kompozyty polimerowe, naprawa rurociągu kompozytowego, MES

## ASSESSMENT OF REPAIR REINFORCEMENT OF POLYESTER-GLASS FIBRE PIPE

Polymer composites are subject to degradation which consists in progressive damage affecting the durability of the construction. Damage may also occur during transport and assembly. The paper deals with repairs of high-risk composite process piping systems and low-risk drainage/sewerage piping systems. The current American and international standards describe repairs of high-risk chemical resistant piping systems where the criteria for assessing constructions are highly conservative. Whereas repairs of low-risk composite piping systems (for water supply or sewerage) are seldom assessed with regard to durability. A repair of large-diameter pipes in a sewerage piping system without pressure, whose structural layers were locally damaged during assembly is discussed here. In order to restore load-bearing capacity and stiffness, a circumferential ring reinforced with fibreglass chopped strand mat (CSM) was made inside the pipe. The aim of the repair was to restore the pipe parameters for the anticipated piping system lifetime. A pipe segment with a reinforcement similar to the one which was actually used was modelled (without edge effect) in ANSYS. FEM calculations showed that the repair reinforcement restores the stiffness and load-bearing capacity of the pipe. The largest hoop strains exceeded (by 0.2%) the limit design values for high-risk chemical resistant facilities but the safety factors for similar low-risk piping systems were met. The results of numerical computations for a reconstruction of the pipe by means of a laminate reinforced with fibreglass fabric showed an increase in hoop stiffness. This means that the proposed repair method can be optimized.

Keywords: polymer composites, composite repair for pipework, FEM

## WPROWADZENIE

Do najważniejszych zalet polimerowych kompozytów konstrukcyjnych (PKK) zalicza się ich względną lekkość i sztywność oraz odporność na korozję. W instalacjach przemysłowych i rurociągach infrastruktury komunalnej szczególnie ważna jest odporność materiału na korozję wywoływaną przez środowisko oraz ewentualnie chemoodporność, będąca odpornością

na działanie substancji żrących. Kompozyty chemoodporne wytwarza się przeważnie z żywic poliestrowych lub winyloestrowych wzmocnionych włóknem szklanym. Długość okresów użytkowania instalacji z PKK wynosi:

- 50 lat dla rurociągów infrastruktury miejskiej (wodociągi, kanalizacja) [1, 2],

- 40 lat dla rurociągów w elektrowniach jądrowych [3], 20 lat dla instalacji petrochemicznych [4],
- 10-35 lat dla zbiorników do magazynowania substancji żrących [5].

W literaturze używa się podziału na instalacje wysokiego i niskiego ryzyka. Rurociągi sieci zaopatrzenia w wodę i kanalizacyjne są instalacjami niskiego ryzyka. Zbiorniki magazynowe do paliw i substancji żrących oraz rurociągi technologiczne w przemyśle chemicznym i energetyce są instalacjami wysokiego ryzyka. Przytoczona klasyfikacja jest zbliżona do stosowanego niekiedy w kraju podziału na instalacje poddostawcze oraz niepodlegające dozorowi UDT.

Kompozyty polimerowe są podatne na degradację, która oznacza nieodwracalne zmiany struktury i właściwości materiału spowodowane przez działanie obciążeń, substancji chemicznych (rozpuszczalniki, woda) i czynników fizycznych (promieniowanie, temperatura) [6]. W zastosowaniach konstrukcyjnych szczególnie niepokojące są spadki wytrzymałości i sztywności PKK, mogące sięgać 30÷60% w całym okresie planowanej eksploatacji. Trudność wyeliminowania degradacji sprawia, że instalacje kompozytowe - szczególnie wysokiego ryzyka - są monitorowane i w razie potrzeby poddaje się je naprawom. Uszkodzenia wymagające napraw mogą powstawać również podczas transportu i montażu elementów.

W artykule omówiono zagadnienie napraw rurociągów kompozytowych oraz przedstawiono analizę numeryczną sztywności i wyężenia przypadku wzmocnienia zastosowanego podczas naprawy rur poliostrowo-szklanych uszkodzonych podczas montażu rurociągu o dużej średnicy.

## MONITOROWANIE I NAPRAWY INSTALACJI KOMPOZYTOWYCH

Częstotliwość inspekcji instalacji wysokiego ryzyka zależy od warunków eksploatacji, potencjalnego zagrożenia itp. czynników. Techniki stosowane do monitorowania urządzeń kompozytowych obejmują:

- oględziny powierzchni zewnętrznej i wewnętrznej urządzenia [7],
- pomiary twardości Barcola dokonywane dla kontroli prawidłowości utwardzenia żywicy nowego urządzenia (np. zbiornika) lub oceny degradacji chemicznej wywołanej przez eksploatację [8],
- pomiary emisji akustycznej dla kontroli degradacji lub wykrywania przeciążeń nowych elementów.

W przypadku stwierdzenia uszkodzeń spowodowanych przez degradację lub inne czynniki urządzenie można naprawić. Wykonane w USA w latach 50. ubiegłego wieku naprawy skorodowanych rur stalowych metodą laminowania zewnętrznych pierścieni uszczelniających było pierwszym takim zastosowaniem PKK.

W [5] omówiono analizę eksploatacji 190 urządzeń kompozytowych używanych w dużym zakładzie chemicznym. Okazało się, że z 25 urządzeń eksploatowanych od ponad 20 lat 13 poddano naprawom. Przeważnie wymieniano króćce i regenerowano warstwy ochronne. Naprawę warstw ochronnych wykonywano po 15 latach. Doniesienia o naprawach instalacji kompozytowych wysokiego ryzyka wykonywanych w celu przedłużenia eksploatacji publikuje się rzadko i bez informacji o regułach planowania takich prac. W szczególności dotyczy to oceny uszkodzeń, kryteriów kwalifikowania elementu do naprawy, projektowania wzmocnienia naprawczego oraz prognozy trwałości i bezpieczeństwa eksploatacji. Do niedawna nie istniały żadne procedury napraw instalacji z PKK o statusie norm ponadnarodowych (ASME, ISO, EN).

W wielu przepisach do projektowania zbiorników chemoodpornych z PKK [9-15] zagadnienie napraw instalacji pomija się całkowicie. Nową jakość wniosły dopiero normy ASME RTP-1 [16] i EN 13121 [17]. W przepisach EN 13121 naprawom poświęca się niewiele miejsca i są to zalecenia ogólne, ale norma ASME RTP-1 zawiera szczegółową klasyfikację defektów występujących w kompozytach chemoodpornych oraz kryteria dopuszczalnej wielkości i nasilenia występowania. Na tej podstawie w [16] zdefiniowano kilka typów napraw urządzeń chemoodpornych wysokiego ryzyka:

- Typ 1 - naprawy skrajnej warstwy wewnętrznej o grubości 0,25÷0,50 mm (inner surface repairs),
- Typ 2 - naprawy ochronnej warstwy wewnętrznej o grubości 2,5÷4,0 mm (interior layer repairs),
- Typ 3 - naprawy warstw nośnych (structural layer repair),
- Typ 4 - naprawy związane z odstępstwami wymiarowymi,
- Typ 5 - naprawy związane z niedostateczną twardością Barcola laminatu.

Naprawy instalacji kompozytowych niskiego ryzyka opisuje się rzadziej niż instalacji wysokiego ryzyka. Rury do budowy rurociągów zaopatrzenia w wodę i kanalizacji są opisane w normach EN 1796 [1] i EN 14364 [2], gdzie problem napraw został całkowicie pominięty. Ogólne wskazówki odnośnie do napraw takich instalacji podano w [18]. Więcej szczegółów na temat napraw rurociągów zawiera opublikowana niedawno norma ASME PCC-2 Repair Standard [19], ale przepisy te dotyczą głównie stosowania PKK w naprawach rurociągów stalowych. Wymieniana wcześniej norma ASME RTP-1 opisuje instalacje wysokiego ryzyka i używanie jej do napraw rurociągów niskiego ryzyka byłoby mało zasadne ekonomicznie.

Określając stan konstrukcji chemoodpornej, sposób naprawy i ocenę jej skuteczności, należy uwzględnić:

- ocenę rozległości uszkodzeń - w szczególności warstwy ochronnej i warstw strukturalnych,

- dobór sposobu naprawy z oszacowaniem stopnia odtworzenia sztywności i nośności,
- sposób kontroli jakości wykonania prac naprawczych i ocenę trwałość urządzenia po naprawie.

Szczególnie trudne jest oszacowanie trwałości. Okresy eksploatacji rurociągów wynoszą 20-50 lat. Prognozowanie zmian wytrzymałości i sztywności dla takich okresów bazuje na badaniach laboratoryjnych trwających 14 miesięcy ( $10^4$  h) [20, 21]. Ze względu na interwencyjny charakter napraw dobrym wyjściem jest walidacja procedur naprawczych dla typowych uszkodzeń. Takie podejście opisano w [22]. Innym rozwiązaniem są badania naprawy zaproponowanej dla konkretnego przypadku, ale są one kosztowniejsze.

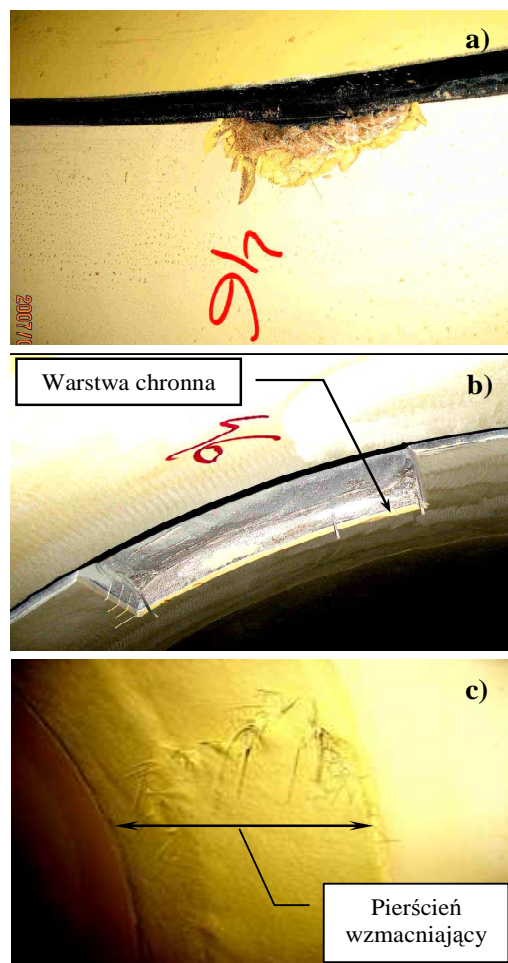
## OPIS USZKODZEŃ I NAPRAWY ANALIZOWANEGO RUROCIĄGU

Uszkodzenia powstały podczas montażu rurociągu kanalizacji deszczowej z rur poliestrowo-szkłanych DN1400 o długości 6 m, grubości ścianki  $g = 34$  mm i masie 1750 kg. Rury przesuвано w wykopie, przykładając siłę skupioną, co spowodowało uszkodzenia w postaci pęknięć i odprysków materiału. Według kryteriów ASME RTP-1 (uznawanych za ostre), większość powstałych uszkodzeń nie kwalifikowała się do naprawy ze względu na rozmiary. Rurociąg kanalizacji deszczowej zalicza się jednak do instalacji niskiego ryzyka i problem jego naprawy powinien podlegać głównie uwarunkowaniom ekonomicznym.

Elementy kompozytowe przeznaczone do magazynowania i przesyłania płynów powinny posiadać wewnętrzną warstwę ochronną, zabezpieczającą warstwy strukturalne przed przenikaniem medium (wody, ścieków, kwasu, paliwa itp.) z wnętrza instalacji do strefy warstw nośnych. Naprawa powinna polegać na ocenie uszkodzenia, usunięciu uszkodzonego (spękanego) materiału i rekonstrukcji struktury w sposób zapewniający uzyskanie wymaganych parametrów elementu (nośności, sztywności, odporności na korozję).

Niewielkie odpryski poddano naprawom „kosmetycznym” z zastosowaniem szpachli. Większe uszkodzenia obejmowały warstwy ochronne i strukturalne. Ich naprawy polegały na usunięciu materiału uszkodzonego (spękanego), wypełnieniu ubytku szpachlą żywiczną i wykonaniu wewnętrznego pierścienia wzmocniającego, złożonego z pięciu warstw laminatu poliestrowego z matą szklaną o gramaturze  $600 \text{ g/m}^2$ . Różne etapy takiej naprawy przedstawiono na rysunku 1. Jak obrazuje rysunek 1b, grubość usuniętego materiału jest 5-6 razy większa od grubości warstwy ochronnej rury, wynoszącej około 2 mm.

Ostatnia położona warstwa, wzmocniona matą powierzchniową, miała pełnić rolę warstwy ochronnej.

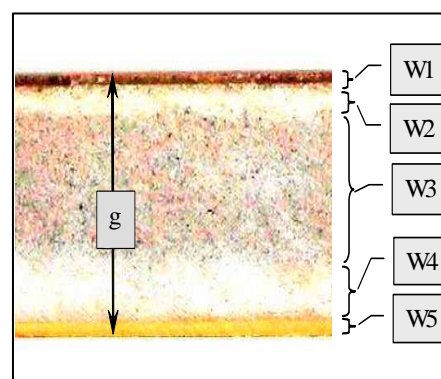


Rys. 1. Przykład uszkodzenia przed naprawą (a), po usunięciu materiału uszkodzonego (b) oraz w trakcie wykonywania wewnętrznego pierścienia wzmocniającego (c)

Fig. 1. Example of damage before repair (a), after damaged material was removed (b) and while circumferential ring was being made (c)

## MODELOWANIE NUMERYCZNE WZMOCNIENIA NAPRAWCZEGO

Na rysunku 2 zamieszczono przekrój poprzeczny rury DN1400, ukazujący jej strukturę.



Rys. 2. Przekrój ścianki rury: grubość  $g = 34$  mm; warstwy zgodnie z tabelami 2 i 3

Fig. 2. Cross section of pipe wall: thickness  $g = 34$  mm; layers according to tables 2 and 3

Wgłębienie po usunięciu materiału widoczne na rysunku 1 obejmowało warstwy oznaczone na rysunku 2 jako W4 i W5. Wgłębienie to wypełniono szpachlą żywiczną. Przeznaczenie i strukturę poszczególnych warstw podano w tabeli 1. Z danych tych wynika, że większość uwzględnionych w rozważaniach warstw można uznać za izotropowe w objętości (W1, W3, W5, W6) lub płaszczyźnie (W2, W4, W7). Tylko warstwa W8, będąca propozycją udoskonalenia wzmocnienia pierścienia naprawczego, jest umiarkowanie anizotropowa. Przyjęte wartości współczynników Poissona i modułów sprężystości Younga warstw podano w tabeli 2.

TABELA 1. Składniki i struktura warstw  
TABLE 1. Components and structure of layers

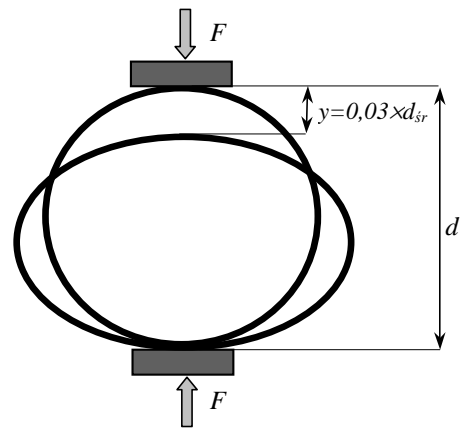
Symbol warst.	Funkcja warstwy	Składniki i struktura
W1	Zewnętrzna ochronna	Żywica z piaskiem
W2	Zewnętrzna strukturalna	Żywica z ciętym włóknem
W3	Warstwa rdzeniowa	Żywica z piaskiem
W4	Warstwa strukturalna	Jak W2
W5	Wewnętrzna ochronna	Żywica poliestrowa
W6	Szpachla żywiczna	Żywica poliestrowa
W7	Pierścień naprawczy	Żywica z matą (CSM)
W8	Piers. napr. - wariant	Tkanina rowingowa

TABELA 2. Grubość warstw i przyjęte właściwości mechaniczne  
TABLE 2. Layer thickness and adopted mechanical properties

Symbol warstwy	Grubość mm	Moduł Younga $E$ GPa	Współczynnik Poissona $\nu$
W1	1,9	12,8	0,23
W2	2,4	8,8	0,30
W3	19,6	10,5	0,23
W4	7,7	8,8	0,30
W5	2,4	3,0	0,3
W6	10,1	3,0	0,4
W7	7,25	8,0	0,2
W8	7,25	18,0	0,13

W pierwszej kolejności zamodelowano w programie ANSYS odcinek nieuszkodzonej rury o długości 300 mm. Za pomocą elementów SOLID 45 o 8 węzłach zamodelowano 1/4 próbki cylindrycznej o układzie warstw W1/W2/W3/W4/W5, idąc od zewnątrz ku powierzchni wewnętrznej ścianki. Właściwości i grubości poszczególnych warstw podano w tabelach 1 i 2. Liczba elementów wynosiła 36 000. Celem tych obliczeń było sprawdzenie doboru grubości i właściwości ( $E$ ,  $\nu$ ) poszczególnych warstw tak, aby uzyskać sztywność obwodową zbliżoną do katalogowej ( $SN10000 \text{ N/m}^2$ ). W próbie wyznaczania sztywności obwodowej pierścienia odcięty z rury jest uginany jak na rysunku 3 do

osiągnięcia ugięcia równego  $0,03 \times d_{sr}$ , gdzie  $d_{sr}$  jest średnią średnicą takiej próbki. Ugięcia dopuszczalne takich rur są dwukrotnie większe ( $0,06 \times d_{sr}$ ). Dla rozważanej rury  $0,03 \times d_{sr} = 42 \text{ mm}$ , a  $0,06 \times d_{sr} = 84 \text{ mm}$ . Podstawiając własności warstw W1-W5 według tabeli 2 oraz obciążenie dwukrotnie większe od odpowiadającego wartości nominalnej sztywności obwodowej, uzyskano ugięcie maksymalne równe 75 mm. Ponieważ jest to mniej od wartości 84 mm, sztywność obwodowa zamodelowanej rury jest większa od nominalnej ( $10\,000 \text{ N/m}^2$ ). Oszacowano, że jest to około  $11\,100 \text{ N/m}^2$ . Jest regułą, że rzeczywista sztywność nowych rur jest większa od nominalnej.



Rys. 3. Schemat obciążania próbki podczas wyznaczania sztywności obwodowej

Fig. 3. Diagram of specimen loading during hoop stiffness determination

Określone przy tym ugięciu (75 mm) wartości ekstremalnych odkształceń obwodowych wynosiły:  $\epsilon_{max} = 0,607\%$  i  $\epsilon_{min} = -0,598\%$ . Przyjmując odkształcenie niszczące przy zginaniu materiału rury  $\epsilon_r = 1,6 \div 2,2\%$  (wg Hobas Pipeline Textbook, s. 2.1), widać, że odkształceniowy współczynnik bezpieczeństwa wynosi  $0,606/1,6 = 2,64$  i jest zbliżony do wymaganego w normie EN 14364 (tab. 3). Określone numerycznie odkształcenie obwodowe  $\epsilon_{max} = 0,607\%$  przekracza wprawdzie wartości przyjmowane w instalacjach wysokiego ryzyka (np. wg [9-11]  $\epsilon \leq 0,2\%$ ), ale analizowany rurociąg nie zalicza się do tej klasy urządzeń.

W następnym etapie oceny wzmocnienia naprawczego zamodelowano sytuację przedstawioną na rysunku 1b - ubytek o wymiarach  $200 \times 200 \text{ mm}$  i głębokości równej sumie grubości warstw W4 i W5, usytuowany w najwyższym miejscu rury. Przy obciążeniu działającym jak na rysunku 3 jest to obszar największego momentu zginającego. Ubytek ten wypełniono materiałem o właściwościach warstwy W6. Następnie dodano od wewnątrz pierścień wzmocnienia naprawczego o szerokości  $b = 300 \text{ mm}$  i grubości  $g_1 = 7,25 \text{ mm}$  wykonany z materiału o właściwościach warstwy W7 (rys. rys. 4, 5). Według normy ASME RTP-1 [15], taką grubość uzyskuje się, laminując ręcznie pięć kolejnych warstw wzmocnionych matą CSM o gramaturze

600 g/m<sup>2</sup>, co odpowiada strukturze pierścieni wytwarzanych podczas naprawy rurociągu. Warstwa ochronna złożona z żywicy i maty powierzchniowej - położona jako ostatnia - nie została uwzględniona w obliczeniach.

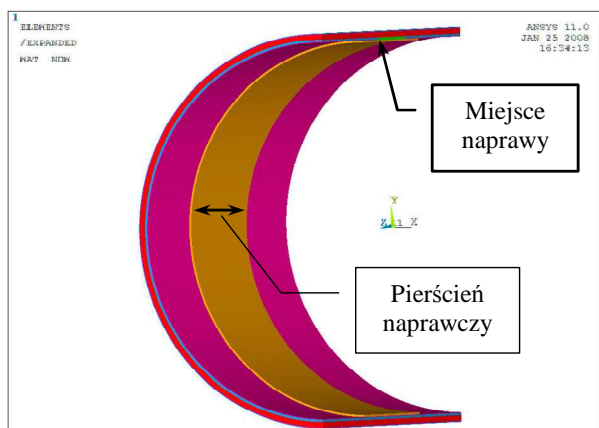
TABELA 3. Wymagane wartości doraźnej ( $y_{2,struct}/d_m$ ) i długotrwałej ( $y_{u,wet,x}/d_m$ ) odporności na zginanie pierścieniowe rur kompozytowych wg EN 14364 oraz współczynniki bezpieczeństwa dla ugięcia dopuszczalnego (6% średniej średnicy)

TABLE 3. Required temporary ( $y_{2,struct}/d_m$ ) and long-term ( $y_{u,wet,x}/d_m$ ) annular bending resistance of composite pipes according to EN 14364 and safety factors for allowable deflection (6% of average diameter)

Sztywność nominalna rury, N/m <sup>2</sup>	10 000
Początkowe ugięcie powodujące pierwsze uszkodzenia rury ( $y_{u,bore}/d_m$ ) <sub>min</sub> , %	9
Początkowe ugięcie niszczące ( $y_{u,struct}/d_m$ ) <sub>min</sub> , %	15
Długotrwała odporność na ugięcie $y_{u,wet,x}/d_m$ , %	9
Początkowy współczynnik bezpieczeństwa dla ugięcia dopuszczalnego 6%	2,5
Współczynnik bezpieczeństwa po 50 latach	1,5

W analizowanym modelu naprawianej rury przyjęto pewne uproszczenia:

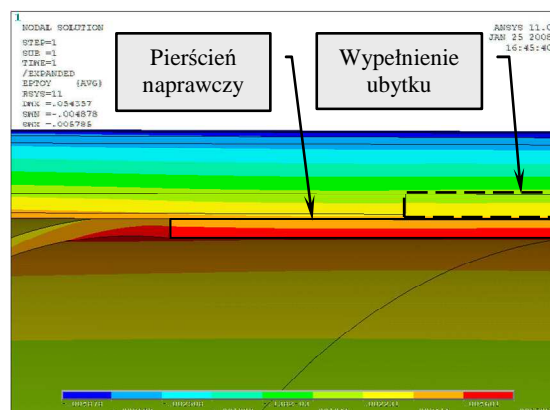
- pominięto wpływ lokalizacji naprawianych uszkodzeń przy końcach rur, co wyeliminowało z rozważań problem efektu brzegowego i wzajemnego oddziaływania sąsiednich rur,
- przyjmowano schemat obciążeń stosowanych przy wyznaczaniu sztywności obwodowej (rys. 3).



Rys. 4. Widok zamodelowanego pierścienia wzmocnienia naprawczego  
Fig. 4. View of modelled repair reinforcement ring

Obliczone wartości ekstremalnych odkształceń obwodowych w rurze z zamodelowaną naprawą w wariantcie wykonania pierścienia wzmacniającego z materiału o właściwościach warstwy W7 (tab. 1) wyniosły:  $\epsilon_{max} = 0,0058$  i  $\epsilon_{min} = -0,0049$  przy wartości ugięcia równej 55 mm. Analogiczne wartości wyznaczone dla wariantu wykonania pierścienia wzmacniającego

z materiału o właściwościach warstwy W8 wyniosły:  $\epsilon_{max} = 0,0042$  i  $\epsilon_{min} = -0,0046$  przy ugięciu równym 44 mm.



Rys. 5. Rozkład odkształceń obwodowych w rejonie uszkodzenia po naprawie

Fig. 5. Hoop strain distribution in damage area after repair

## PODSUMOWANIE

Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że zastosowana metoda naprawy umożliwia odtworzenie początkowej nośności i sztywności uszkodzonych rur kompozytowych. Ponadto istnieją duże możliwości optymalizacji zastosowanego wzmocnienia naprawczego. Ważnym aspektem analiz jest ocena trwałości naprawy, wymagająca badań walidacyjnych długotrwałych (z reguły 18 próbek z czasami obciążenia sięgającymi 14 miesięcy) lub średniookresowych (kilka próbek z czasami obciążania rzędu 1000 h). W ekspertyzie stanowiącej inspirację do napisania artykułu korzystano z wyników długotrwałych badań laboratoryjnych wykazujących wystarczającą trwałość napraw modelowych uszkodzeń podobnych rur o mniejszej średnicy.

W analizowanym przypadku ewentualne niepowodzenie napraw może mieć konsekwencje wyłącznie ekonomiczne. Większy problem wiąże się z naprawami instalacji wysokiego ryzyka eksploatowanymi w przemyśle. Z obserwacji autorów wynika, że w kraju podejmuje się nieoparte obliczeniami wytrzymałościowymi naprawy instalacji wysokiego ryzyka o znacznym stopniu degradacji. Urządzenia, których projektowanie, wytwarzanie i eksploatacja są szczegółowo opisane w obszernych opracowaniach o statusie norm międzynarodowych, poddaje się naprawom bez dokonania oceny stopnia degradacji, oszacowania stopnia odtworzenia nośności, sztywności, odporności na korozję, trwałości. Zdarzające się nieprofesjonalne naprawy instalacji wysokiego ryzyka rodzą możliwość wystąpienia dużych katastrof przemysłowych.

Wydane niedawno przepisy UDT [23], odnoszące się do modernizacji zbiorników magazynowych, stanowią krok w dobrym kierunku, ale jest on niewystarczający. Przepisy [23] skupiają się na wymaganiach biuro-

kratycznych z uszczerbkiem dla technicznych aspektów planowania, realizacji i oceny napraw.

Omawiane zagadnienie napraw łączy w sobie problematykę kwantyfikowania uszkodzeń kompozytów polimerowych, obliczeń wytrzymałościowych elementów zawierających zaburzenia natury geometrycznej i materiałowej, prognozowania trwałości i niezawodności w warunkach narażenia na długotrwałe działanie środowiska i obciążeń z ogólnie rozumianymi zagadnieniami efektywności ekonomicznej i bezpieczeństwa infrastruktury przemysłu i miast. Autorzy planują kontynuację opisanych badań zagadnienia rozwoju i optymalizacji napraw elementów z uwzględnieniem specyfiki obydwu typów instalacji.

## LITERATURA

- [1] EN 1796 Plastic piping systems for water supply with or without pressure, Glass-reinforced thermosetting plastics (GRP) based on unsaturated polyester resin (UP), CEN, 2006.
- [2] EN 14364 Plastic piping systems for drainage or sewerage with or without pressure, Glass-reinforced thermosetting plastics (GRP) based on unsaturated polyester resin (UP). Specification for pipes, fittings and joints, CEN, 2006.
- [3] Le Courtois T., PWR Composite Material Use: A Particular Case of Safety-Related Service Water Pipes, Proc. of Enercomp 95, Ed. Technomic Pub., Montreal 1995, 835-843.
- [4] PN-EN ISO 14692 Przemysł naftowy i gazowniczy - Rurociągi plastikowe wzmocnione włóknem szklanym, 2003.
- [5] Kelly P., Epoxy vinyl ester and other resins in chemical process equipment, Reinforced plastics durability, Woodhead Pub. Ltd. 1999, 282-321.
- [6] Tuttle M.T., A framework for long-term durability predictions of polymeric composites, Progress in Durability Analysis of Composite Systems, Balkema, Rotterdam 1996, 169-176.
- [7] Bełzowski A., Rechul Z., Stasieńko J., Ocena jakości chemoodpornych zbiorników kompozytowych, INSTAL 2006, 12, 42-48.
- [8] Bełzowski A., Rechul Z., Bąkowski D., Mierzwiak A., Ocena degradacji laminatów chemoodpornych na podstawie pomiarów twardości, IV Symp. KOMPOZYTY I KONSTRUKCJE WARSTWOWE, PTMTiS, Wrocław-Karpacz 2006, 9-16.
- [9] BS 4994 Specification for design and construction of vessels and tanks in reinforced plastics, 1987.
- [10] NFT 57900, Réservoirs et appareils en plastiques renforcés, 1987.
- [11] ASTM D4097 Specification for Contact-Molded Glass-Fiber-Reinforced Thermoset Resin Corrosion-Resistant Tanks, 1995.
- [12] AD 2000-Merkblatt, Pressure vessels in glass fibre reinforced thermosetting plastics, 2000.
- [13] BS 7159 Code of practice for design and construction of GRP piping systems, 1989.
- [14] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section X, FRP Pressure Vessel, 1992.
- [15] Urząd Dozoru Technicznego. Urządzenia ciśnieniowe. Stałe zbiorniki ciśnieniowe z tworzyw sztucznych wzmocnionych włóknem szklanym. WUDT-UC-UTS/01, 2003.
- [16] ASME RTP-1 Reinforced thermoset plastic corrosion resistant equipment, 2000.
- [17] EN 13121 GRP tanks and vessels for use above ground, 2001.
- [18] Cheremisinoff N.P., Cheremisinoff P.N., Fiberglass reinforced plastics, Noyes Pub., USA, 1995.
- [19] PCC-2, Repair Standard, Non-metallic composite repair systems for pipelines and pipework: Low risk applications. Projekt normy, 2004.
- [20] Bełzowski A., Metody oceny wytrzymałości długotrwałej kompozytów żywicznych, Gaz Woda Tech. San. 2003, 77, 3, 308-313.
- [21] Bełzowski A., Analiza niektórych aspektów rozwoju inżynierii laminatów chemoodpornych, Prace Nauk. Politechniki Warszawskiej, Mechanika 2007, 219, 7-30.
- [22] Design of Composite Repairs for Pipework, AEA Technology, January 2005.
- [23] WUDT-ZB. Zbiorniki bezciśnieniowe i niskociśnieniowe. Wymagania ogólne. Modernizacja. 2004.