

Badanie wpływu kompozytowych rękawów naprawczych na wytrzymałość i stan naprężenia–odkształcenia odcinka rurociągu

Research on the influence of the repair sleeves on the strength and the stress-strain state of the pipeline section

Oleg Vytyaz¹, Orest Ivasiv², Ruslan Rachkevych¹, Ruslan Deynega¹

¹ *Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ukraine*

² *SPC TD „Tekhdiagas” JSC „Ukrtransgas”, Ukraine*

STRESZCZENIE: Na Ukrainie do transportu ropy i gazu wykorzystuje się tysiące kilometrów rurociągów stalowych. Są one stale narażone na działanie środowiska, zewnętrznych krótko- i długoterminowych obciążeń przesyłanych produktów. Wszystko to powoduje uszkodzenia materiału rurociągów, co skutkuje m.in. ubytkiem metalu na powierzchni, pojawieniem się wgnieceń, rys czy zagłębień. Wady te mogą znacznie skrócić żywotność uszkodzonych odcinków, a w niektórych przypadkach prowadzić do wypadków wiążących się z utratą przesyłanego produktu i szkodami w środowisku. Aby temu zapobiec, w praktyce rozpowszechniły się różne metody naprawy rurociągów w miejscach uszkodzeń, w tym stosowanie specjalnych rękawów naprawczych na rurociągach. Te ostatnie są wykonane zarówno ze stali, jak i z materiałów polimerowych, mają różnorodną konstrukcję i złożoność. Naukowcy i inżynierowie koncentrują się na rozwoju złączy rurowych. Jednocześnie, jak wykazał przegląd osiągnięć naukowych w tej dziedzinie, wymagają one dodatkowej uwagi w zakresie badania stanu naprężenia–odkształcenia uszkodzonych odcinków rurociągów w miejscach montażu rękawów naprawczych. Artykuł poświęcony jest temu problemowi. W szczególności przeprowadzono badania eksperymentalne wytrzymałości rurociągu w dwóch przypadkach: 1) bez istniejących wad; 2) z wadą i rękawem naprawczym. Ponadto, korzystając z podobnych danych początkowych, wykonano obliczenia przy użyciu trójwymiarowego modelowania ciała stałego oraz metody elementów skończonych. W rezultacie ustalono wyraźną korelację między wynikami doświadczeń polowych a modelowaniem matematycznym. Może to wskazywać na możliwość wykorzystania tego ostatniego do celów praktycznych jako prostszej metody realizacji. Ustalono, że montaż rękawa zmniejsza poziom naprężeń normalnych w sąsiedztwie wady o co najmniej 16%, a poziom naprężeń lokalnych przed frontem wady – do 86%. Jednocześnie montaż rękawa naprawczego może zwiększyć naprężenia obok wady nawet o 50%. Należy to uwzględnić podczas wykonywania prac naprawczych.

Słowa kluczowe: odcinek rurociągu, rękaw naprawczy, wytrzymałość, stan naprężenia–odkształcenia.

ABSTRACT: Thousand kilometers of the steel pipelines are used in the Ukraine for the transportation of oil and gas. The influence of the environment, as well as long-term and short-term loads from piped product, have an effect on the pipelines. All these factors cause the destruction of the pipeline materials. As a result, the pipeline loses steel, becomes dented and scratched, and holes appear. These defects can significantly decrease the time of the exploitation of the damaged sections or can be the reason for emergency situations with the loss of the piped product, causing damage to the environment. There are different methods for the prevention of the above mentioned negative effects, such as using special sleeves for the repairing of the pipelines. These sleeves are made of steel or polymer materials and have different constructions and levels of complexity. The attention of researchers and engineers have been focused on designing the sleeves. But a review of the scientific works in the above mentioned direction shows that the research of the stress-strain state of the damaged sections of the pipelines with sleeves needs to be examined in more detail. This article shows a solution to this problem. Experimental research of the strength of a pipeline was done for two cases: 1) without defects; 2) with a defect and a sleeve. In addition, the calculation using 3D modeling and a finite elements method was done with similar input data. As a result, a clear correlation between the results of an experiment and mathematical modeling is shown. This shows that a method of mathematical modeling can be used for practical needs more simply. The mounting of sleeves decreases the level of the normal stresses around a defect at a 16% minimum; the level of local stresses in front of a defect is decreased by a maximum of 86%. At the same time, the mounting of a sleeve can increase the level of stress near to a 50% minimum. This fact should be considered during the repairing of the pipelines.

Key words: pipeline section; repair sleeve; strength; stress-strain state.

Autor do korespondencji: O. Vytyaz, e-mail: o.vytyaz@gmail.com

Artykuł nadesłano do Redakcji: 14.06.2022 r. Zatwierdzono do druku: 04.10.2022 r.

Wstęp

Na terytorium Ukrainy ułożono ponad 42 000 km głównych rurociągów gazowych, naftowych i produktowych, z których trzy czwarte działa od ponad 30 lat. Podczas eksploatacji metal tych rurociągów jest stale narażony na obciążenia robocze i środowisko, co prowadzi do zmian jego właściwości mechanicznych. Ponadto izolacja ochronna tych rurociągów również stopniowo traci swoje właściwości użytkowe, co powoduje powstawanie ubytków korozyjno-zmęczeniowych w postaci wżerów, wgnieceń czy pęknięć, które z czasem zwiększają się, co wpływa na ich oddziaływanie (Kryzhaniv's'kyi et al., 2013, 2015, 2018). Dlatego problem zapewnienia niezawodności rurociągów jest niezwykle ważny i aktualny. Jednym ze sposobów jego rozwiązania jest opracowanie rozwiązań konstrukcyjnych i technologii mających na celu zwiększenie wytrzymałości odcinków z lokalnymi wadami w postaci mikropęknięć, rys, wżerów korozyjnych i erozyjnych. Można to zrealizować poprzez zastosowanie złączek naprawczych o różnej konstrukcji i technologii. Rozważmy wyniki rozwoju naukowego i praktycznego w tej dziedzinie.

Jak wspomniano powyżej, podczas eksploatacji na ściankach rurociągów mogą wystąpić wady, takie jak rysy, wgniecenia, pofałdowania, korozja, pęknięcia, rozwarstwienia,

uszkodzenia spoin itp. Oczywiście w takich miejscach nastąpi spadek wytrzymałości rury. Wzmocnienie rury za pomocą rękawów naprawczych jest jednym ze sposobów rozwiązania tego problemu.

W tym celu rozpowszechniło się stosowanie złączy stalowych o różnych konstrukcjach (rysunki 1–2) (Mazel et al., 1996a, 1996b). W praktyce stosuje się również wzmocniające złączki kompozytowe, które ściskają zewnętrzną powierzchnię rury i za pomocą połączeń śrubowych wytwarzają siłę niezbędną do przywrócenia wytrzymałości uszkodzonego odcinka rurociągu (rysunek 3) (Ivasiv et al., 2020).

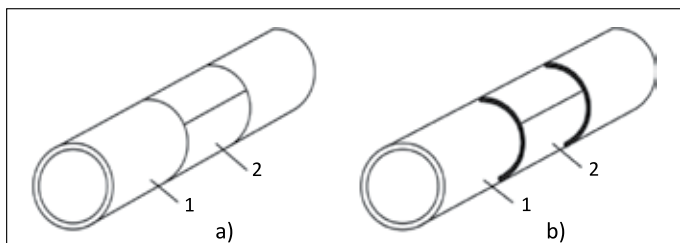
Zastosowano również urządzenia, które mogą podać dokładną wartość obliczonych i sterujących sił dzięki zastosowaniu ochronnej uszczelki w kształcie sierpa (rysunek 4), która równomiernie dociska do powierzchni uszkodzone miejsce rurociągu (Patent nr 100455).

Naprawa wadliwych odcinków rurociągów odbywa się również poprzez nawijanie elastycznej taśmy kompozytowej „ClockSpring” (Clock-Spring) (rysunek 5) oraz zastosowanie zagniatanej złączki z włókna szklanego PCM (rysunek 6) (Jakowlew et al., 2016).

Opracowywane są projekty urządzeń do uszczelniania wad przelotowych w rurociągach (rysunek 7) (Patent nr 89225). Takie obejmy na przykład zwiększają bezpieczeństwo pracy, eliminując wyciek transportowanych produktów wybuchowych.

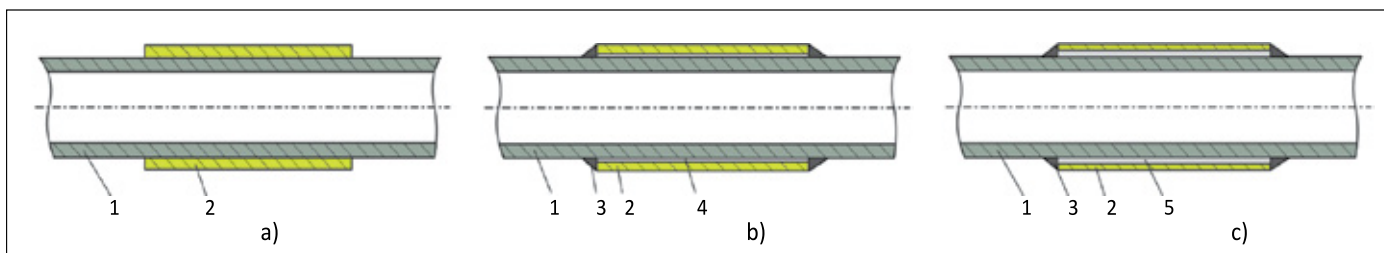
Należy jednak zauważyć, że każda z wyżej wymienionych metod naprawy wadliwego odcinka rurociągu doprowadzi do redystrybucji naprężeń zarówno w nim, jak i w samym rękawie naprawczym. To z kolei wpłynie na żywotność uszkodzonego odcinka rury.

Jak widać z przeglądu literatury, główne wysiłki naukowców i inżynierów mają na celu opracowanie i udoskonalenie konstrukcji samych rękawów, dobór optymalnych materiałów do ich produkcji. Natomiast stan naprężenia–odkształcenia systemu „wadliwy odcinek rurociągu – rękaw” stanowi niezbędną informację źródłową do podejmowania dalszych decyzji o możliwości i czasie ich dalszej eksploatacji i jest krytyczny.



Rysunek 1. Rurowo-kołnierzowe złączki stalowe: a) złączka z niespawanymi końcami rękawa; b) złączka ze spawanymi końcami rękawa; 1 – rura; 2 – rękaw

Figure 1. Embracing steel couplings: a) – coupler with non-welded sleeve ends; b) – nipple with welded ends of the sleeve; 1 – pipe; 2 – sleeve

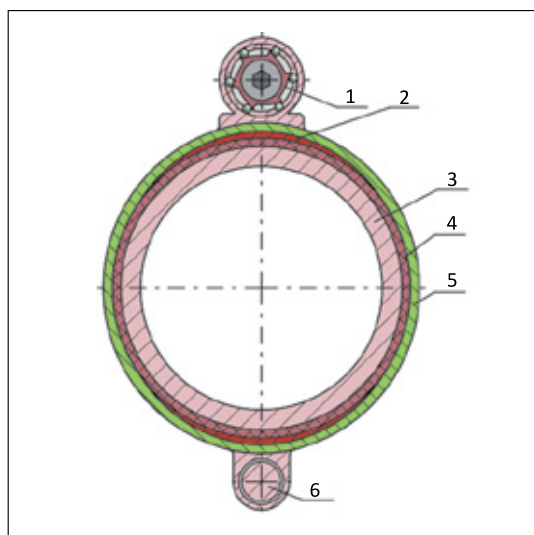


Rysunek 2. Wzmocniające konstrukcje złączy: a) złączka rurowo-kołnierzowa typu „A”; b) złączka naprawcza typu „B” (ze szczeliną technologiczną); c) złączka naprawcza typu „B” z wnęką wypełnioną płynem antykorozyjnym; 1 – rura; 2 – złączka; 3 – spoina; 4 – szczelina technologiczna; 5 – płyn antykorozyjny

Figure 2. Reinforcing coupling structures: a) “A”-type fully embracing repair coupling; b) “B”-type repair coupling (with a technological clearance); c) “B”-type repair coupling with a cavity filled with anti-corrosion fluid; 1 – pipe; 2 – coupling; 3 – welding seam; 4 – technological clearance; 5 – anti-corrosion fluid



Rysunek 3. Wzmacniająca złączka kompozytowa
Figure 3. Reinforcing composite coupling



Rysunek 4. Urządzenie do uszczelniania i wzmacniania rurociągu:
1 – mechanizm zapadkowy; 2 – bieżnikowa uszczelka rurowa w kształcie sierpa; 3 – uszkodzony odcinek rury; 4 – podłoża stalowe; 5 – taśma metalowa; 6 – mechanizm obrotowy

Figure 4. Device for sealing and strengthening the pipeline:
1 – ratchet mechanism; 2 – tread sickle-shaped tubular gasket;
3 – damaged pipe section; 4 – steel substrates; 5 – metal tape;
6 – rotary mechanisms



Rysunek 5. Montaż elastycznej taśmy kompozytowej ClockSpring
Figure 5. Installation of the ClockSpring flexible composite tape



Rysunek 6. Złącze z włókna szklanego RSM
Figure 6. RSM glass fiber connector

Podsumowując powyższe, formułujemy cel niniejszego artykułu: opracowanie metod oceny stanu naprężenia–odkształcenia wadliwego odcinka rurociągu z rękawem z wykorzystaniem ich modelowania fizycznego i matematycznego.

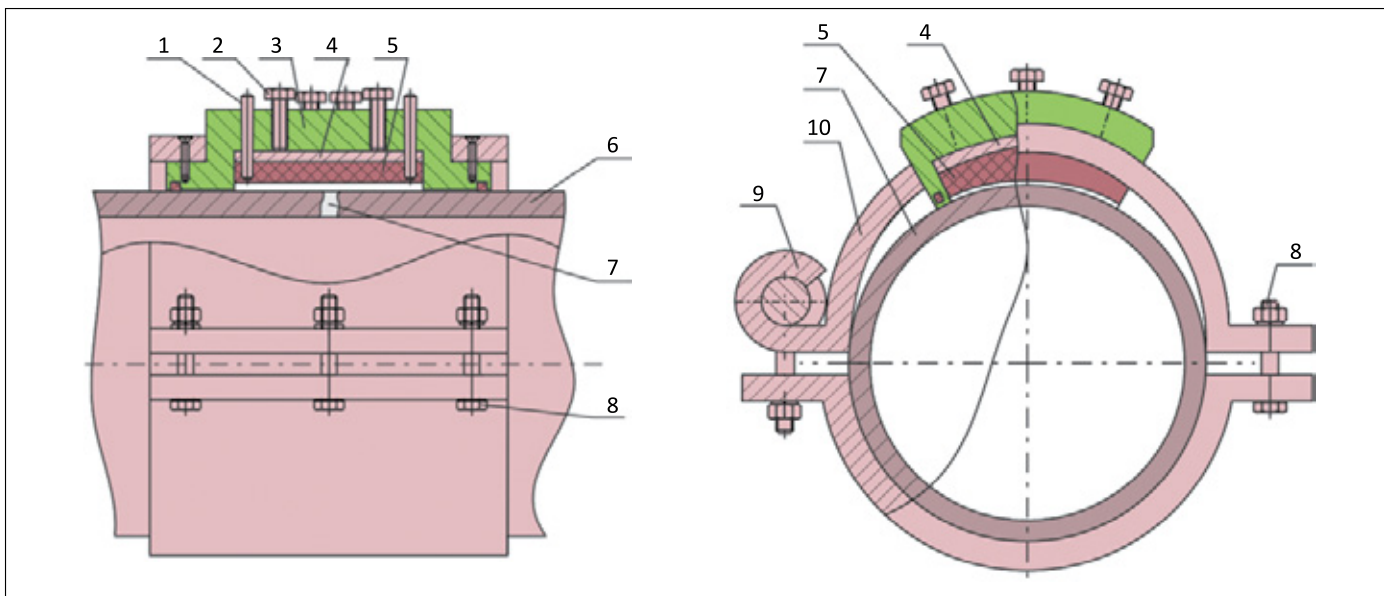
Część eksperymentalna i jej wyniki

Jak wspomniano powyżej, naprawa uszkodzonych odcinków rurociągów za pomocą rękawów naprawczych jest w praktyce niezwykle powszechna. Przed rozpoczęciem takich prac należy oczywiście ocenić stosowność ich realizacji. Zatem istnieje potrzeba określenia wymiarów geometrycznych i instalacji rękawa w celu zapewnienia pożądanej redukcji naprężenia–odkształcenia uszkodzonego odcinka rurociągu, aby zapobiec jego zniszczeniu. Problem ten, podobnie jak większość problemów w mechanice, rozwiązuje się poprzez modelowanie fizyczne i matematyczne przedmiotu badań. W tym artykule opisano oba podejścia. Zaczniemy od pierwszego.

W celu eksperymentalnego potwierdzenia skuteczności wzmocnienia odcinka rurociągu za pomocą bandażu opracowano i wykonano stanowisko badawcze przedstawione na rysunku 8.

Ciśnienie zostało wytworzone za pomocą agregatu pompy cementującej. Ciśnienie mierzono za pomocą przetwornika ciśnienia STG97L firmy Honeywell.

W pierwszym etapie przetestowano odcinek rurociągu o średnicy 325 mm i grubości ścianki 8 mm bez rękawa. Wcześniej na powierzchni próbki doświadczalnej utworzono sztuczną wadę o długości 110 mm i głębokości 3 mm. Podwyższenie ciśnienia prowadzono aż do całkowitego zniszczenia rurociągu w miejscu wspomnianej wcześniej wady



Rysunek 7. Urządzenie do uszczelniania wad przelotowych rurociągu: 1 – prowadnik; 2 – śruby; 3 – korpus; 4 – metalowa płyta dociskowa; 5 – uszczelka elastyczna; 6 – rurociąg; 7 – wada przelotowa; 8 – połączenia śrubowe; 9 – zawiasy; 10 – kołnierz

Figure 7. Device for sealing through defects of a pipeline: 1 – conductor; 2 – bolts; 3 – body; 4 – metal pressure plate; 5 – flexible seal; 6 – pipeline; 7 – through defect; 8 – screw connections; 9 – hinges; 10 – collar



Rysunek 8. Stanowisko doświadczalne do badań hydraulicznych uszkodzonych odcinków rurociągów pod kątem wytrzymałości

Figure 8. Experimental stand for hydraulic testing of damaged sections of pipelines for strength



Rysunek 9. Zniszczony odcinek rurociągu o średnicy 325 mm bez rękawa z wadą sztuczną

Figure 9. A damaged section of a pipeline with a diameter of 325 mm without a sleeve with an artificial defect

(rysunek 9). Ciśnienie, przy którym rurociąg uległ zniszczeniu, wyniosło 16,4 MPa.

Kolejnym etapem badań było przetestowanie odcinka rurociągu z rękawem, w którym wykorzystano taśmę stalową o grubości 0,5 mm i szerokości 200 mm. Została nawinięta w 6 warstwach w miejscu z wcześniej wspomnianą wadą mechaniczną. Każdy kolejny zwój metodą zgrzewania punktowego był mocowany do poprzedniego. Ponadto w trakcie nawijania taśma stalowa została podgrzana w celu ciaśniejszego dopasowania. Podobnie jak w poprzednim eksperymencie odcinek rurociągu został zniszczony ciśnieniem 27 MPa (rysunek 10).

Generalnie, jak widać z doświadczenia polowego, obecność rękawa znacznie wzmacnia odcinek rurociągu. Różnica ciśnień podczas pierwszego i drugiego etapu testu wyniosła 65%.

Należy jednak zauważyć, że opisane powyżej badania eksperymentalne nie są łatwe do wdrożenia. Jeżeli np. trzeba dobrać wymiary geometryczne rękawa w celu maksymalnej efektywności jego użytkowania, konieczne jest przeprowadzenie badań hydraulicznych dla każdej kombinacji szerokości taśmy stalowej i liczby jej warstw. W związku z tym interesujące jest opracowanie metod, w których powyższy problem jest rozwiązywany za pomocą obliczeń.



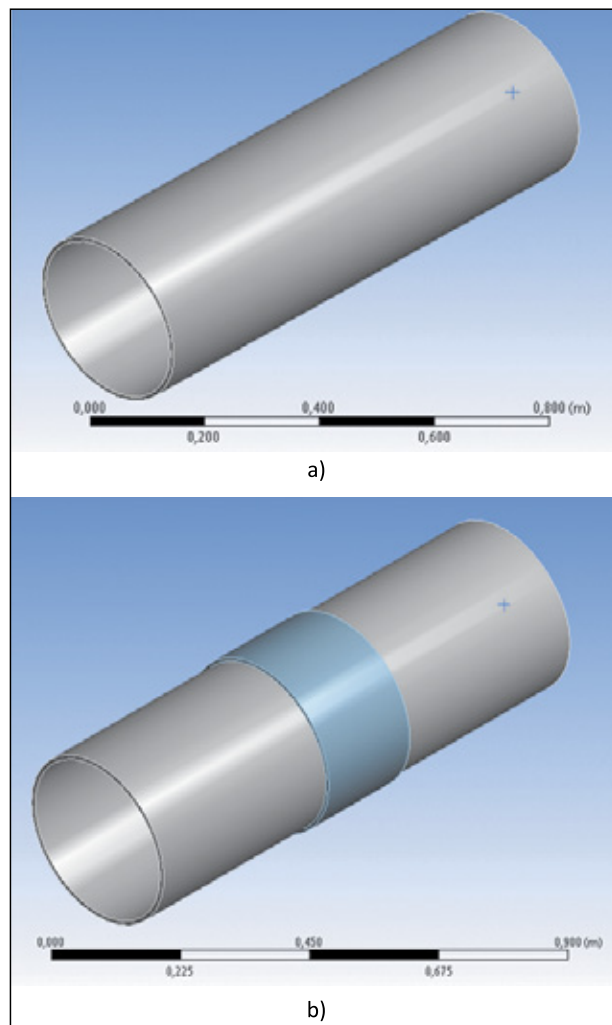
Rysunek 10. Zniszczony odcinek rurociągu o średnicy 325 mm z rękawem i wadą sztuczną

Figure 10. A damaged section of the pipeline, 325 mm in diameter, with a sleeve and an artificial defect

Analiza teoretyczna i jej wyniki

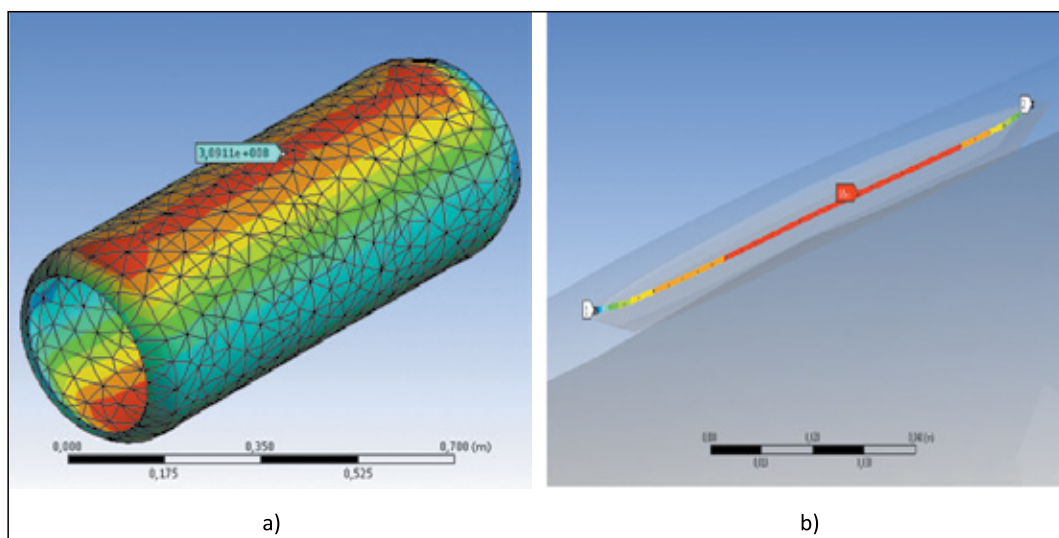
Do matematycznego modelowania stanu naprężenia–odkształcenia uszkodzonego odcinka rurociągu wykorzystano metodę elementów skończonych zaimplementowaną w systemie automatyzacji obliczeń inżynierskich (SAOI).

Do analizy stworzono dwa trójwymiarowe modele półprzewodnikowe potencjalnie uszkodzonego odcinka rurociągu: a) bez rękawa; b) z rękawem (rysunek 11). Oś symetrii modelu pokrywa się z kierunkiem osi „Z” globalnego układu współrzędnych środowiska pracy SAOI. Średnica zewnętrzna odcinka rurociągu wynosi 325 mm, grubość ścianki: 8 mm.



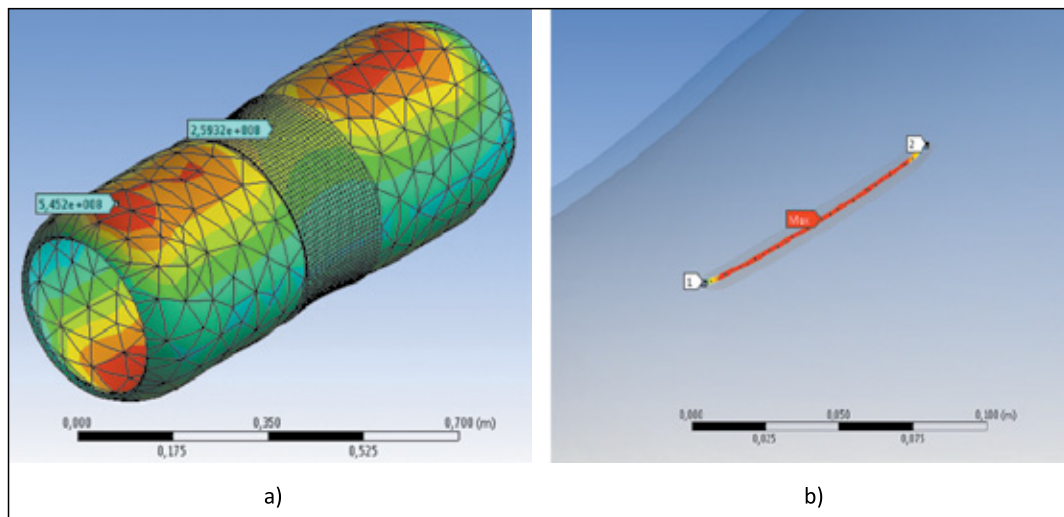
Rysunek 11. Model trójwymiarowy w stanie stałym uszkodzonego odcinka rurociągu: a) bez rękawa; b) z rękawem

Figure 11. Three-dimensional solid-state model of the damaged section of the pipeline: a) without a sleeve; b) with a sleeve



Rysunek 12. Połączony wykres naprężeń i odkształceń: a) modele uszkodzonego odcinka rurociągu bez rękawa; b) wzdłuż czoła pęknięcia

Figure 12. Combined stress-strain diagram: a) models of the damaged section of the pipeline without a sleeve; b) along the front of the fracture



Rysunek 13. Łączny wykres naprężeń i odkształceń: a) modele uszkodzonego odcinka rurociągu z rękawem; b) wzdłuż czoła pęknięcia
Figure 13. Total stress and strain diagram: a) models of the damaged section of the pipeline with a sleeve; b) along the front of the fracture

Rękaw wmodelowano za pomocą osłony w postaci rurki o grubości ścianki 3 mm. Kontakt między modelami uszkodzonego odcinka rurociągu a rękawem określono jako „nierozłączne połączenie”. Do obliczeń całkowicie ograniczono przemieszczenia liniowe i kątowe jednego końca modelu rury, natomiast przeciwny koniec mógł poruszać się tylko wzdłuż osi „Z” globalnego układu współrzędnych SAOI. Na wewnętrzną powierzchnię modelu uszkodzonego odcinka rurociągu przyłożono nacisk. W obliczeniach uwzględniono również działanie siły grawitacji w kierunku przeciwnym do osi „Y” globalnego układu współrzędnych SAOI.

Według badań terenowych w trójwymiarowym modelu uszkodzonego odcinka rurociągu wykonano pęknięcie o długości w osi Z 110 mm i głębokości 3 mm.

Początkowo obliczenia przeprowadzono zgodnie z pierwszym etapem badań terenowych. Model został obciążony ciśnieniem 16,4 MPa. Połączony wykres naprężeń i odkształceń pokazano na rysunku 12.

Jak widać, w miejscu pęknięcia normalne naprężenie wynosi 309 MPa. Wartość współczynnika intensywności naprężeń (KIC) w środku wady sztucznej wynosi $34,4 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.

Następnie, zgodnie z drugim etapem badań terenowych, oceniono stan naprężeniowo-odkształceniowy uszkodzonego odcinka rurociągu z rękawem. Wizualizację wyników przedstawiono na rysunku 13.

Normalne naprężenie w środku rurociągu bezpośrednio pod rękawem wynosi 259 MPa. Jednak maksymalna wartość naprężeń normalnych obserwowana jest po lewej stronie rękawa i sięga 545 MPa. KIC przed wierzchołkiem wady sztucznej pod bandażem wynosi $18,5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.

Wskazuje to, że nawet przy ciśnieniu niszczącym wyższym o 65% normalne naprężenie na powierzchni rurociągu pod

rękawem jest o 16% mniejsze w porównaniu z wartością uzyskaną w obliczeniach bez rękawa. Należy również zauważyć, że naprężenia normalne na powierzchni rurociągu dla przypadku nr 1 wynoszą 90% granicy plastyczności stali 09G2S, a dla przypadku nr 2 są większe od tej ostatniej o 9%.

Jeśli chodzi o lokalny stan naprężenia przed sztucznie wywołaną wadą, to KIC w przypadku obciążenia bez rękawa jest wyższy niż KIC w przypadku obciążenia rękawem o 86%.

Podsumowanie

Ogólnie, analizując wyniki zarówno fizycznego, jak i matematycznego modelowania stanu naprężenia–odkształcenia odcinka rurociągu z rękawem i bez rękawa, możemy zwrócić uwagę na następujące kwestie.

Po pierwsze, istnieje wyraźna korelacja między wynikami eksperymentu polowego a symulacją. Wskazuje to na stosowność wykorzystania tej ostatniej do wstępnej oceny miejsca instalacji i rozmiaru rękawów. Po drugie, zgodnie z oczekiwaniami obecność rękawa zmniejsza poziom naprężeń pod nim zarówno na powierzchni rurociągu, jak i przed pęknięciami, które mogą powstać podczas eksploatacji. Po trzecie, stosowanie rękawów może zwiększyć poziom naprężeń w pobliżu miejsca ich instalacji. Nasze obliczenia wykazały, że wielkość przyrostu może wynosić ponad 50% w stosunku do wartości, które wystąpiły przed zastosowaniem rękawa. Należy to uwzględnić podczas prac naprawczych.

Literatura

Clock-Spring. <https://www.cs-nri.com/case_study/clock-spring-repairs-24-inch-crude-oil-pipeline> (dostęp: 03.04.2022).

- Ivasiv V., Deynega R., Faflei O., Mikhailyuk V., Bui V., Govdyak R., 2020. Dalsze badania defektów korozyjnych dotyczących trwałości głównych rurociągów naftowych. *Energia Naftohazu*, 2(26): 67–74. DOI: 10.31471/1993-9868-2020-2(34)-67-74.
- Jakowlew A., Romantsev S., Sharygin V., Sharygin A., Kazankov S., 2016. Złącza metalowo-szklane do naprawy rurociągów – zalety i perspektywy zastosowania. *Territoriya Neftegaz*, 12: 30–33.
- Kryzhanivs'kyi E.I., Hrabovs'kyi R.S., Fedorovych I.Y., Barna R.A., 2015. Evaluation of the Kinetics of Fracture of Elements of a Gas Pipeline After Operation. *Materials Science*, 51(1): 7–14. DOI: 10.1007/s11003-015-9804-1.
- Kryzhanivs'kyi E.I., Hrabovs'kyi R.S., Mandryk O.M., 2013. Estimation of the serviceability of oil and gas pipelines after long-term operation according to the parameters of their defectiveness. *Materials Science*, 49(1): 117–123. DOI: 10.1007/s11003-013-9590-6.
- Kryzhanivs'kyi E.I., Hrabovs'kyi R.S., Vytyaz' O.Y., 2018. Consideration of the geometry of corrosion-fatigue cracks in assessing residual life of long-term operation objects. *Materials Science*, 54(5): 647–655. DOI: 10.1007/s11003-019-00229-8.
- Mazel A., Gobarev L., Golovin S.V., 1996a. Skuteczność muf spawanych do naprawy uszkodzeń rurociągów pod ciśnieniem. *Budowa rurociągów*, 1: 16–22.
- Mazel A., Gobarev L., Nagornov K., Rybakov A., 1996b. Złącza spawane do naprawy rurociągów. *Gazownictwo*, 9–10: 55–57.

Akty prawne i dokumenty normatywne

- Patent nr 100455, Ukraina, F16L 55/16. Przystawka do opieczętowania i uszczelniania rurociągu / Kryzhanivs'kyi E.I., Ivasiv V.M., Nogach M.M., Slobodyan V.I., Deinega R.O. Nr a201106740; data wniosku: 30 maja 2011 r.; data wydania 25 grudnia 2012, Bull. nr 24. 4 pkt.
- Patent nr 89225, Ukraina, F16L 55/00. Przystawka do uszczelniania wad rurociągu / Kryzhanivs'kyi E.I., Slobodyan V.I., Dzhus A.P., Ivasiv O.V., Nogach M.M., Kutenets V.O., Basarab R.M., Deinega R.O. Nr u201313777; data wniosku: 27.11.2013; data wydania: 04.10.2014, Bull. nr 7. 4 pkt.



Oleg VYTYAZ, Ph.D.
Director of the Institute of Petroleum Engineering
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil
and Gas
Karpatska str. 15, Ivano-Frankivsk, Ukraine, 76019
E-mail: o.vytyaz@gmail.com



Ruslan RACHKEVYCH, Prof., Ph.D.
Professor at the Department of Engineering Mechanics
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil
and Gas
Karpatska str. 15, Ivano-Frankivsk, Ukraine, 76019
E-mail: ruslan.rachkevych@nung.edu.ua



Orest IVASIV
Director of the Diagnostic Department
Joint Stock Company "Ukrtransgaz"
Branch Center of Technical Inspection "Techdiagaz"
Volynska str. 56, Kyiv, Ukraine, 03151
E-mail: ivasivov@ukr.net



Ruslan DEINEHA, Ph.D. candidate
Associate Professor of the Department of Oil
and Gas Field Machinery and Equipment
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil
and Gas
Karpatska str. 15, Ivano-Frankivsk, Ukraine, 76019
E-mail: ruslan.deineha@nung.edu.ua