

Problemy związane z oceną stanu technicznego rurociągów gazowych

Problems related to the assessment of the technical state of gas pipelines

Streszczenie

Aktualne przepisy nie precyzują w zadowalający sposób zakresu monitorowania integralności rurociągów gazowych i dają jedynie ogólne wytyczne odnośnie monitorowania zjawisk korozyjnych w rurociągach, dopuszczając stosowanie prostych wzorów wytrzymałościowych bazujących na płaskim stanie naprężenia, podczas gdy rzeczywiste obiekty mają zwykle złożoną trójwymiarową strukturę. Takie podejście może być przyczyną znacznych błędów obliczeniowych naprężeń, co w połączeniu z brakiem odpowiednich kryteriów dopuszczenia, stanowi znaczny problem dla służb odpowiedzialnych za bezpieczeństwo eksploatacji takich rurociągów. W pracy zaproponowano program kontroli integralności konstrukcji rurociągów, bazujący na wykonaniu kompleksowych pomiarów ubytków grubości, w połączeniu z badaniami nieniszczącymi. Wyniki pomiarów i badań nieniszczących stanowią podstawę do przeprowadzenia analizy wytrzymałościowej MES, opartej na rzeczywistej geometrii i sposobie podparcia rurociągów. Uzyskane na tej podstawie informacje odnośnie najbardziej wyężonych obszarów konstrukcji rurociągów, stanowią podstawę do wytypowania obszarów krytycznych konstrukcji rurociągów, dla których opracować należy program ich monitoringu.

Słowa kluczowe: rurociągi gazowe; integralność konstrukcji; wytrzymałość; MES; badania nieniszczące

Abstract

Current regulations do not specify a satisfactory range of monitoring the integrity of gas pipelines and only give general guidelines for the monitoring of corrosion in pipes, allowing the use of simple strength designs based on a flat stress state, while the actual objects usually have a complex three-dimensional structure. Such an approach can lead to significant errors of calculation of stress, which in combination with the lack of appropriate criteria for admission, is a significant problem for the emergency services operating such pipelines. The paper proposes a control program for the structural integrity of pipelines, based on the performance of complex measurements of thickness defects, in conjunction with the non-destructive testing. The results of measurements and non-destructive testing are the basis for the stress analysis FEM, based on the actual geometry and manner of support the pipelines. Obtained on the basis of information on the most strenuous areas of the construction of pipelines, are the basis to bet on critical areas of the construction of pipelines for which should be developed monitoring program.

Keywords: gas pipes; structural integrity; strength; FEM; non-destructive testing

Wstęp

Projektowanie i wykonawstwo rurociągów dla przemysłu gazowniczego prowadzone jest aktualnie w naszym kraju zwykle w oparciu o normy [1÷3]. Eksploatowana jest jednak znaczna liczba rurociągów, których okres pracy przekraczającej 30-40 lat, zaprojektowanych i wykonanych w oparciu o wcześniejsze przepisy bazujące na znacznie uproszczonych metodach obliczeniowych. W przepisach tych brak dokładniejszych wskazówek odnośnie monitorowania stanu technicznego rurociągów. Również aktualne przepisy [1] precyzują tylko w bardzo ogólny sposób, zakres niezbędne-

go monitoringu stanu technicznego rurociągów, który stawia w trudnej sytuacji służby techniczne odpowiedzialne za bezpieczeństwo eksploatacji rurociągów.

W pracy przedyskutowano aktualne wymagania eksploatacyjne sformułowane w w/w przepisach, poddając je krytycznej analizie. Jednocześnie zaproponowano niezbędny zakres monitoringu, omówiony na przykładzie kilkunastu rurociągów gazu poddanych stosownemu zakresowi pomiarów i badań nieniszczących, wraz z przeprowadzeniem odpowiedniej analizy wytrzymałościowej konstrukcji.

Dr inż. Bogusław Ładecki, dr inż. Filip Matachowski – AGH w Krakowie.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: boglad@uci.agh.edu.pl

Wymagania eksploatacyjne zgodnie z PN-EN 14161

W normie [1] określone są podstawowe minimalne wymagania dotyczące użytkowania i utrzymania rurociągów, w których wymagane jest zarządzanie korozją i monitorowanie stanu, przy czym integralność i serwisowalność konstrukcji rurociągów mogą być utrzymane w okresie żywotności projektowej. W projektowaniu stosować można metodę stanów granicznych na bazie niezawodności, gdzie stany graniczne związane są zwykle z utratą integralności konstrukcji, np. poprzez powstanie pęknięć, złamań, zmęczenia itp.

W normie tej dopuszcza się stosowanie modeli analitycznych, empirycznych lub kombinacji tych metod.

W podstawowych obliczeniach analitycznych naprężenia obwodowe σ_{hp} wywoływane tylko ciśnieniem płynu oblicza się zgodnie z równaniem (1):

$$\sigma_{hp} = (p_{id} - p_{od}) \times \frac{(D_o - t_{min})}{2t_{min}} \quad 1)$$

gdzie:

p_{id} – ciśnienie projektowe,

p_{od} – minimalne zewnętrzne ciśnienie hydrostatyczne,

D_o – nominalna średnica zewnętrzna,

t_{min} – minimalna grubość ścianki z uwzględnieniem nadatku na korozję.

W dokładniejszych obliczeniach analitycznych uwzględnia się: naprężenia obwodowe, wzdłużne oraz ścinające, biorąc pod uwagę wszystkie istotne obciążenia funkcjonalne, środowiskowe, budowlane i przypadkowe. Obliczenia te przeprowadzić należy dla pełnej projektowej geometrii rurociągu wraz z zamocowaniami, z uwzględnieniem obszarów karbu i tarcia spowodowanego prowadnicami.

Naprężenia zredukowanych σ_{eq} , należy obliczać z pomocą hipotezy Hubera-Misesa, zgodnie ze wzorem (2):

$$\sigma_{eq} = (\sigma_h^2 + \sigma_l^2 - \sigma_h \sigma_l + 3\tau^2)^{1/2} \quad 2)$$

gdzie:

σ_h – naprężenie obwodowe,

σ_l – naprężenie wzdłużne,

τ – naprężenie ścinające.

Kryteria wytrzymałościowe uwzględniają wystąpienie uszkodzeń mechanicznych i nadmiernych deformacji spowodowanych występowaniem: wyboczenia, zmęczenia, płynięcia, nadmiernych ugięć (stabilność) i owalizacji.

Stosowanie podejścia uproszczonego prowadzi zwykle do występowania znacznych błędów w ocenie poziomów naprężeń. Naprężenia określane zgodnie ze wzorem (2) pozwalają na uwzględnienie jedynie płaskich pól naprężeń, których składowe określane są na podstawie prostych wzorów wytrzymałościowych wyprowadzonych dla elementarnych modeli typu: pręt, belka, tarcza, płyta. W rzeczywistości mamy do czynienia z trójwymiarową geometrią konstrukcji rurociągów, zamocowaną i obciążoną w sposób przestrzenny (ciężar własny, wiatr, obciążenia termiczne i szereg innych), dla której uwzględnić należy jeszcze efekt karbu geometrycznego.

Zadawalającą dokładność obliczeń wytrzymałościowych uzyskać można jedynie po zastosowaniu odpowiednich programów komputerowych, w których modeluje się rzeczywistą trójwymiarową geometrię i obciążenia konstrukcji rurociągów.

Monitorowanie integralności konstrukcji rurociągów

Zgodnie z wymaganiami normy [1] wymagane jest monitorowanie integralności konstrukcji rurociągów, które może obejmować: monitorowanie korozji, wykonywanie kontroli oraz wykrywanie nieszczelności, co ustalone powinno zostać na etapie projektowania.

Monitorowanie i kontrola korozji powinno się odbywać w oparciu o zdefiniowane wymagania oparte na odpowiednim doświadczeniu eksploatacyjnym, uwzględniające występowanie: lokalnie korozji typu wżery czy ekspansja szczelinowa, korozji wywołanej mikrobiologiczne, pęknięcia naprężeniowego, pęknięcia wodorowego lub stopniowego spękania, naprężeniowego pęknięcia wodorowego, erozji i erozji z korozją, korozji zmęczeniowej, ogniw bimetalicznych/galwanicznych, oraz preferencyjnej korozji spoin.

Wymagania dotyczące programów monitorowania korozji należy ustalać na podstawie przewidywanych mechanizmów i szybkości korozji. Zaleca się przeprowadzenie kontroli rurociągu wkrótce po oddaniu, aby stworzyć punkt odniesienia dla interpretacji przyszłych wskazań.

Możliwe jest instalowanie urządzeń takich jak próbniki lub sondy do sygnalizowania wystąpienia korozji w systemie rurociągów, które zlokalizowane powinny zostać w miejscach, gdzie możliwe jest uzyskanie reprezentatywnych wskazań dotyczących korozji.

Monitorowanie korozji na powierzchni rurociągów prowadzić należy poprzez okresowe wykonywanie badań wizualnych.

W przypadku stwierdzenia występowania defektów lub uszkodzeń rurociągów, przeprowadzić należy ocenę konieczności wykonania naprawy lub dopuszczenia rurociągu do eksploatacji, przy uwzględnieniu możliwości monitorowania ewentualnego zwiększenia rozmiaru wady, z ewentualnym określeniem dodatkowych wymagań dotyczących np. ograniczenia ciśnienia lub innych czynności korygujących.

Jak widać zestawione powyżej wymagania odnośnie monitorowania integralności konstrukcji rurociągów są niewystarczające i nie precyzują niezbędnych działań, które podjęte powinny zostać w celu zapewnienia bezpiecznej eksploatacji rurociągów w długiej perspektywie czasowej.

Program kontroli integralności konstrukcji rurociągów

W związku z brakiem precyzyjnych zapisów w dokumentach normatywnych, jak również zwykle brakiem stosownych instrukcji eksploatacji wraz z określeniem kryteriów dopuszczenia, opracowano program kontroli integralności rurociągów gazu, który zastosowano w odniesieniu do rurociągów eksploatowanych w jednym z polskich zakładów przemysłowych w perspektywie czasowej wynoszącej ok. 40 lat [4÷6].

Wobec długiego okresu eksploatacji rozważanych rurociągów, braku prowadzenia kompleksowych pomiarów ubytków grubości, jak również braku prowadzenia odpowiednich badań nieniszczących, przyjęto wykonanie:

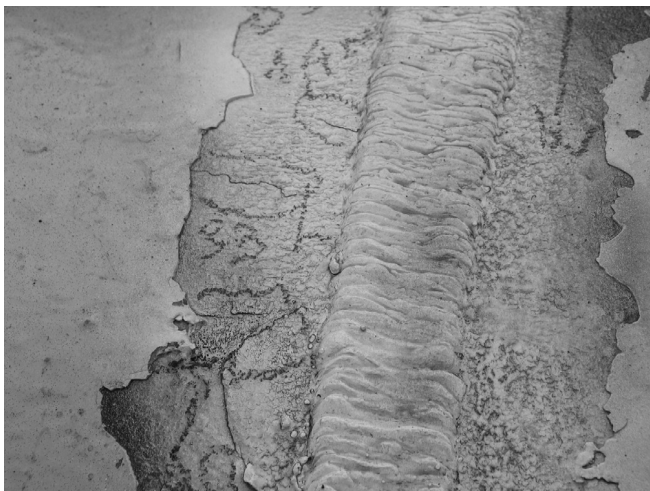
- kontroli wizualnej rurociągów;
- pomiarów ubytków grubości techniką ultradźwiękową, w ośmiu punktach na całym obwodzie rurociągów, po obu stronach każdego połączenia spawanego, przy uwzględnieniu kolan, łuków, trójkątów, zaworów i zwężeń;
- badań defektoskopowych metodą magnetyczno-proszkową wszystkich obwodowych złączy spawanych

rurociągów na całej ich długości, z przyległymi pasami materiału rodzimego rur o szerokości ok. 40 mm po każdej stronie spoiny;

- analizy wytrzymałościowej metodą elementów skończonych (MES), przeprowadzonej dla określonej aktualnej geometrii rurociągów z podparciami;
- określenie najbardziej wyężonych obszarów konstrukcji rurociągów, wytypowanych jako obszary krytyczne, w aspekcie ewentualnego pojawienia się uszkodzeń;
- opracowanie programu monitoringu dla obszarów krytycznych, na który składa się regularne prowadzenie pomiarów ubytków grubości, w połączeniu z wykonywaniem odpowiednich badań defektoskopowych.

Zgodnie z zaproponowanym programem kontroli integralności wykonano pomiary ubytków grubości, badania nieniszczące i analizy numeryczne MES w odniesieniu do 12 szt. rurociągów gazu, o średnicach na różnych odcinkach wynoszących: $\varnothing 300$, 250 i 200 mm, o różnej złożonej geometrii. Dla każdego z rurociągów określono jego aktualną geometrię wraz ze sposobem podparcia, uwzględniając występujące trwałe deformacje skutkujące niekiedy zmianą warunków podparcia rurociągu, w porównaniu z dokumentacją projektową.

Wykonane badania defektoskopowe wykazały występowanie w kilku przypadkach defektów powierzchniowych, z których przykładowe wykryte w obszarze złącza spawanego dla jednego z kolan pokazano na rysunku 1.



Rys. 1. Trzy pęknięcia w kierunku osi rury wykryte w obszarze złącza spawanego kolana [4]

Fig. 1. Three cracks in the tube axis direction detected in the area of the knee welded joint [4]

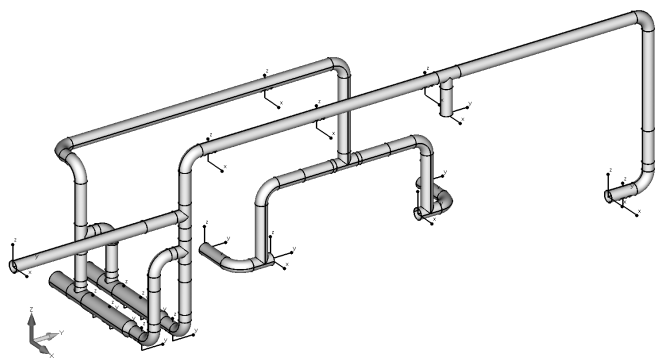
Analiza wytrzymałościowa MES konstrukcji rurociągów

Celem podjętej analizy wytrzymałościowej rurociągów było uzyskanie pełnej informacji o stanie naprężeń i odkształceń, jaki powstaje w różnych obszarach rurociągów pod wpływem obciążeń eksploatacyjnych. Znajomość wartości składowych stanu naprężenia dla ekstremalnie wyężonych obszarów rurociągów, stanowiło podstawę do oceny ich wytrzymałości. Informacje uzyskane odnośnie wartości i rozkładu naprężeń umożliwiło wytypowanie tzw. obszarów krytycznych rurociągów, które z uwagi na poziom naprężeń mogą doznawać uszkodzeń i powinny podlegać odpowiednim okresowym badaniom nieniszczącym.

W związku z powyższym wykonano analizę wytrzymałościową dla 12 szt. rozważanych rurociągów, przy wykorzystaniu numerycznych metod analizy konstrukcji. Zastosowano

metodę elementów skończonych [7], przy wykorzystaniu programów komputerowych FEMAP/NXNastran, w oparciu o opracowane modele obliczeniowe konstrukcji, w których rurociągi zamodelowano elementami powierzchniowymi o grubości ścianki odpowiadającej średniej wartości grubości zmierzonej metodą ultradźwiękową na długości rury, lub średnią wartością grubości dla innych elementów tj. kolana, łuki, trójniki, zwężki. Elementy wsporcze, tj. słupy zamodelowano również elementami powierzchniowymi. Rozmiar elementów skończonych został przyjęty pomiędzy 2 a 3 cm. W modelach rurociągów pominięto zawory nie będące przedmiotem pomiarów grubości, zastępując je odcinkami rurociągu o grubościach odpowiadających sąsiadującym odcinkom. Końce rurociągów potraktowano jako nieprzesuwne, czyli odebrano im wszystkie trzy przemieszczenia, odpowiednio w kierunku osi X, Y i Z.

Przykładowy analizowany rurociąg pokazano na rysunku 2, na którym podparcia oznaczono jako odebrane stopnie swobody (czarne pinezki), czyli kierunki w których dany punkt nie może ulec przemieszczeniu. Na rysunku tym pokazano również lokalizację złączy spawanych.



Rys. 2. Model MES rurociągu z zaznaczonym sposobem podparcia oraz spoinami [6]

Fig. 2. FEM model of the pipeline with a marked method of support and welded joints [6]

Na podstawie analizy warunków pracy rurociągów określono czynniki stanowiące obciążenie konstrukcji, które zestawiono w tablicy I.

Tablica I. Obciążenia składowe rurociągu

Table I. Basic loads of pipeline

Obciążenie	Wartość	Uwagi
Ciśnienie gazu	$p_{\max} = 5,6 \text{ MPa}$	Dane ekspl.
Ciężar własny konstrukcji	$\rho_{\text{stali}} = 7850 \text{ kg/m}^3$	Zg. z [10]
Temperatura czynnika	$t_{\text{lato}} = 18\text{-}20^\circ\text{C}$ $t_{\text{zima}} = 5^\circ\text{C}$	Dane ekspl.
Wiatr (I strefa)	$p_{\text{nom}} = 250 \text{ Pa}$ $p_{\text{obl}} = 750 \text{ Pa}$	Zg. z [8]
Śnieg	$p_{\text{śniegu}} = 98 \text{ N/m}^2$ $= 1 \text{ kg/m}^2$	Zg. z [9]

W obliczeniach wytrzymałościowych zostały uwzględnione wszystkie powyższe obciążenia jako występujące wspólnie. Pomimo że rurociągi nie są całą powierzchnią eksponowane na wiatr (przesłonięte innymi odcinkami rurociągów), do obliczeń przyjęto, że cały rurociąg jest nieosłonięty i działa na niego ciśnienie wiatru wybrane dla najbardziej

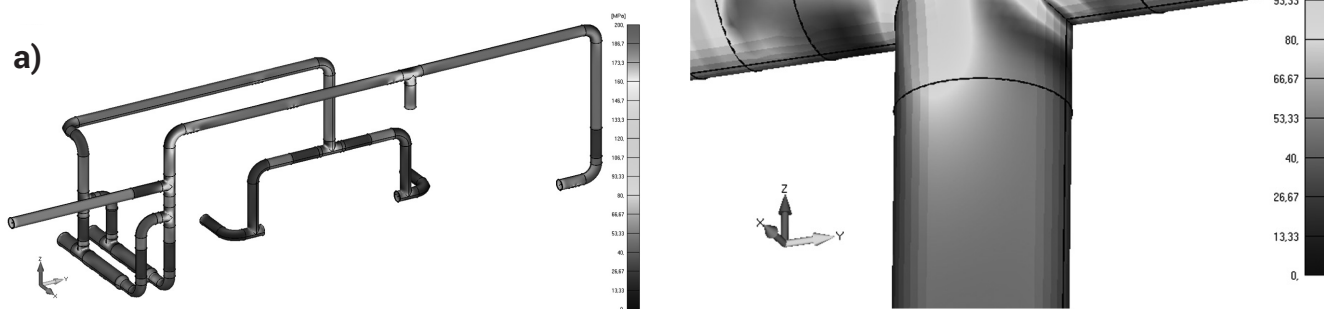
niekorzystnego przypadku obciążenia odpowiadającego zazwyczaj największej powierzchni nawietrznej. Ze względu na zmienność kierunku wiatru dokonano analiz dla kierunku 0° (oś +X), 45°, 90° (oś +Y), 135°, 180° (oś -X), 225°, 270° (oś -Y) oraz 315°.

Ponieważ rurociągi wykonano ze stali gatunku S235 o grubościach zawierających się w przedziale od 16 do 40mm dla odcinków $\Phi 250-300$ mm, oraz ≤ 16 mm dla odcinków $\Phi 200$ mm, wytrzymałość obliczeniową stali f_d zg. z [10] przyjęto odpowiednio jako: $f_d = 205\text{MPa}$ i $f_d = 215\text{MPa}$.

Określone ekstremalne wartości naprężeń zredukowanych σ_{eq} dla poszczególnych modeli rurociągów zostały odniesione do wartości f_d zgodnie z zależnością:

$$\frac{\sigma_{eq}}{f_d} 100\% \quad 3)$$

określającą jaki procent maksymalnych dopuszczalnych naprężeń stanowią uzyskane naprężenia zredukowane w danym obszarze rurociągu. Przykładowy rozkład naprężeń zredukowanych uzyskany dla rurociągu z rysunku 2, z obszarem ekstremalnych naprężeń uzyskanych dla trójkątnika pokazano na rysunku 3. W przypadku trójkątnika z rysunku 3b, wartość obliczona ze wzoru (3) wynosi 119,7% czyli naprężenia dopuszczalne przekroczone zostały o prawie 20%.



Rys. 3. Rozkład naprężeń zredukowanych σ_{eq} w [MPa] uzyskany dla rurociągu z rys. 2: a – widok całości rurociągu, b – ekstremalne naprężenia stwierdzone w obszarze karbu górnego trójkątnika [6]

Fig. 3. Reduced stress σ_{eq} distribution in [MPa] obtained for pipeline Fig. 2: a – general pipeline view, b - extreme stresses found in the area of tee top notch acc. to [6]

Wnioski końcowe

Aktualne przepisy nie precyzują w zadowalający sposób zakresu monitorowania integralności rurociągów gazowych. Określone w normie [1] zalecenia, dają jedynie ogólne wytyczne odnośnie monitorowania zjawisk korozyjnych w rurociągach, dopuszczając stosowanie prostych wzorów wytrzymałościowych (1,2) opracowanych dla uproszczonych modeli konstrukcyjnych bazujących na płaskim stanie naprężenia, podczas gdy rurociągi gazowe mają zwykle złożoną trójwymiarową geometrię oraz są zamocowane i obciążone przestrzennie, co powodować może występowanie znacznych błędów obliczeniowych.

Stanowi to szczególny problem w przypadku rurociągów eksploatowanych w długiej perspektywie czasowej przekraczającej często 30-40 lat, o znaczących ubytkach grubości, poddawanych niekiedy naprawom i modernizacjom [11÷13].

W związku z powyższym zaproponowano program kontroli integralności konstrukcji rurociągów gazowych, który bazuje na wykonaniu kompleksowych pomiarów ubytków grubości rurociągów, w połączeniu z badaniami defektoskopowymi wykonywanymi w obszarze złączy spawanych. Wyniki wykonanych pomiarów i badań nieniszczących stanowią podstawę do przeprowadzenia analizy wytrzymałościowej MES konstrukcji rurociągów, opartej na geometrii i sposobie podparcia rurociągów, zweryfikowanej pomiarami na obiekcie rzeczywistym. Uzyskane na podstawie przeprowadzonej analizy MES informacje odnośnie najbardziej wyciężonych obszarów konstrukcji rurociągów, stanowią podstawę do wytypowania obszarów krytycznych konstrukcji rurociągów, które poddane powinny zostać naprawie, lub dla których opra-

Wyniki analizy MES

Analiza MES wykonana dla 12 szt. rurociągów, w przypadku 5 szt. rurociągów wykazała przekroczenie dopuszczalnych wartości naprężeń w 11 obszarach rurociągów, głównie w obszarze karbu dla trójkątników. Obszary te uznano jako obszary krytyczne, dla których należy przeprowadzić wymianę nadmiernie wyciężonych fragmentów konstrukcji. Dla obszarów tych oraz dla pewnej liczby obszarów, dla których naprężenia zredukowane osiągnęły wartości bliskie wytrzymałości obliczeniowej stali f_d , opracowano program monitoringu, na który składa się regularne prowadzenie pomiarów ubytków grubości, w połączeniu z wykonywaniem odpowiednich badań defektoskopowych.

cowany powinien zostać program monitoringu, na który składa się regularne prowadzenie pomiarów ubytków grubości, w połączeniu z wykonywaniem odpowiednich badań defektoskopowych.

Planowane jest przeprowadzenie pomiarów tensometrycznych odkształceń, mających na celu zweryfikowanie wyników uzyskanych na podstawie analizy wytrzymałościowej MES.

**Praca została wykonana w ramach działalności statutowej Katedry Wytrzymałości,
Zmęczenia Materiałów i Konstrukcji WIMiR AGH nr.11.11.130.375.**

Literatura

- [1] PN-EN 14161+A1:2015 – Przemysł naftowy i gazowniczy. Rurociągowo systemy transportowe.
- [2] PN-EN 13480-1,2,3,4,5:2012 – Rurociągi przemysłowe metalowe.
- [3] PN-EN 12732+A1:2014 – Systemy dostawy gazu. Spawanie stalowych układów rurowych. Wymagania funkcjonalne.
- [4] S. Bednarz, B. Ładecki, F. Matachowski: Ocena stanu technicznego dwóch kolektorów DN 500 doprowadzających gaz z separacji do ciągu I i ciągu II. Stowarzyszenie Naukowo Techniczne Inżynierów i Techników Przemysłu Naftowego i Gazowniczego. Kraków 2012.
- [5] S. Bednarz, B. Ładecki, F. Matachowski: Ocena stanu technicznego rurociągów DN 300 instalacji ciągu II. SITPNIg. Kraków 2013.
- [6] S. Bednarz, B. Ładecki, F. Matachowski: Ocena stanu technicznego rurociągów DN 300 instalacji ciągu I. SITPNIg. Kraków 2015.
- [7] O.C. Zienkiewicz, R.L. Taylor: Finite Element Method (5th Edition). Elsevier, 2000.
- [8] PN-B-02011:1977 Obciążenia w obliczeniach statycznych. Obciążenie wiatrem.
- [9] PN-B-02010:1980 Obciążenia w obliczeniach statycznych. Obciążenia śniegiem.
- [10] PN-EN 1993: Eurokod 3. Projektowanie konstrukcji stalowych.
- [11] J. Ślania, K. Kołacza: porównanie metod spawania rurociągów preizolowanych, Przegląd Spawalnictwa, Vol 87, nr 11.
- [12] M. Marczak: Polerowanie magnetyczno-ściernie spoin doczołowych elementów rurowych, Przegląd Spawalnictwa, Vol 88, nr 3.
- [13] B. Wyględacz, T. Kik: Symulacja numeryczna wpływu zmian warunków technologicznych na rozkład naprężeń i odkształceń wymienników ciepła, Przegląd Spawalnictwa, Vol 88, nr 5.