

Prof. AGH Jan Szybka, dr inż. Zdzisław Broniec, dr inż. Robert Pilch

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki
Katedra Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn
Al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
E-mail: szybja@agh.edu.pl

Prognozowanie uszkodzenia ciepłociągu na podstawie oceny ryzyka eksploatacji

Słowa kluczowe: ciepłociąg, uszkodzenie, wytrzymałość rurociągu, ryzyko eksploatacji, prognozowanie uszkodzenia

Streszczenie: W artykule przedstawiono procedurę postępowania w wyznaczeniu okresu użytkowania ciepłociągu eksploatowanego w zakładach górniczych. Na podstawie badań przeprowadzonych w warunkach rzeczywistej eksploatacji prognozowano awarię rurociągu, która może być spowodowana pęknięciem na skutek przekroczenia jego wytrzymałości. Opisano warunki eksploatacji ciepłociągu i czynniki wpływające na jego degradację. W ujęciu probabilistycznym oszacowano ryzyko eksploatacji i wyznaczono okres użytkowania, po którym powinna nastąpić wymiana rurociągów.

1. Wstęp

Zapewnienie bezawaryjnej pracy badanego ciepłociągu jest zadaniem priorytetowym dla przedsiębiorstwa na terenie, którego jest on eksploatowany. Nawet krótkie przerwy w dostawie wody gorącej mogą spowodować poważne komplikacje w funkcjonowaniu zakładu i znaczące straty finansowe. Ocena zagrożenia awarią jest istotną informacją, ponieważ w systemie eksploatacji można przygotować działania prewencyjne, przeciwdziałając uszkodzeniom, które mogą wystąpić w niedalekiej przyszłości.

Problemy oceny niezawodności i ryzyka eksploatacji rurociągów analizowano w artykułach [5,8,9]. Aktualna literatura skupia się głównie na wpływie korozji i starzenia się elementów rurociągów [3,4,6].

Ważnym problemem związanym z prognozowaniem awarii ciepłociągu jest również odnawianie profilaktyczne [13], a w analizowanym przypadku wyznaczenie terminu budowy dodatkowej, rezerwowej linii ciepłowniczej stanowiącej nadmiarowy rurociąg, który będzie użytkowany w miejsce istniejącego. Dotychczas eksploatowany ciepłociąg po wyremontowaniu będzie wykorzystywany jako rezerwowy w sytuacjach awaryjnych i w planowanych pracach remontowych.

Dwa ciepłociągi wzajemnie rezerwujące się w eksploatacji stanowią gwarancję wysokiej niezawodności w dostarczaniu gorącej wody.

Autorzy w niniejszym opracowaniu przedstawili metodykę prognozowania awarii i wyznaczania okresu użytkowania ciepłociągu w warunkach rzeczywistej eksploatacji.

2. Charakterystyka konstrukcyjno-eksploatacyjna oraz identyfikacja uszkodzeń ciepłociągu

Analizowany obiekt w postaci rurociągu jest wykorzystywany do transportu wody gorącej o średniej temperaturze około 463 [K]. Wartości ciśnień roboczych przesyłanej wody wahają się w granicach 1,33÷2,44 [MPa] w ciągu doby a maksymalny wydatek przepływu osiąga wartości 700 [t/h]. Rurociąg zbudowany jest z rur stalowych bez szwu, wykonanych ze stali niskowęglowej R35 (P235GH)–PN-80/H-74219. Wymagana minimalna wartość granicy plastyczności materiału rur w temp. 473 [K] wynosi $R_{et} \geq 185$ [MPa]. Rurociąg jest zabezpieczony izolacją cieplną o grubości 25 [cm], na którą składają się warstwy waty szklanej, owinięte płaszczem ochronnym z papy i blachy aluminiowej.

Na ocenę stanu technicznego i występujące uszkodzenia rurociągu największy wpływ ma zmiana grubości ścianek rur będąca skutkiem występujących wżerów materiałowych [3,4,10]. Badany rurociąg jest pod wpływem niekorzystnych oddziaływań środowiska chemicznego transportowanego medium i występujących równocześnie impulsowych obciążeń dynamicznych. Postępująca degradacja mikrostruktury stali zachodzi w wyniku działania agresywnych chemicznie związków oraz występujących naprężeń, wysokiej temperatury i czasu. Podstawową przyczyną zmiany grubości ścianek rur jest przede wszystkim korozja elektrochemiczna, której źródłem jest wysoki stopień zmineralizowania użytkowanej wody. Dodatkowym czynnikiem szybkiego utleniania się powierzchni rur jest sprzyjająca korozji wysoka temperatura wody. Obecność w wodzie wielu związków chemicznych, cząstek stałych i podwyższona temperatura przyczyniają się do przyspieszonego procesu utleniania na powierzchni metalu jak również do pewnego zużycia ściernego warstwy wierzchniej rurociągu [10]. Z przeprowadzonych badań grubości ścianek rurociągu wynika, że ubytki korozyjne w rurach osiągają wartości kilku milimetrów. Powoduje to obniżanie pola powierzchni niebezpiecznych przekrojów rurociągu i wzrostu poziomu sumarycznych naprężeń złożonych. Inny rodzaj oddziaływania destrukcyjnego korozji chemicznej, to powstawanie na powierzchni metalu głębokich wżerów. Skutkiem lokalnych zmian grubości ścianki są odkształcenia rury proporcjonalne do różnicy temperatur. Stosując zasadę superpozycji do odkształceń wywołanych obciążeniami eksploatacyjnymi (ciśnienie medium i jego zmiany w czasie) należy również dodać odkształcenia wywołane przez naprężenia cieplne. Zmienny stan obciążeń rurociągu uwidacznia się również dużą wartością przemieszczeń rur w stosunku do wykonanych konstrukcji wsporczych i podpór. Na podstawie wielokrotnych obserwacji potwierdza się także zmienność przemieszczeń konstrukcji we wszystkich kierunkach x , y , z .

Te dochodzące do kilkudziesięciu centymetrów przesunięcia rurociągu są przyczyną powstawania zmian jego położenia, a w jednym z odnotowanych przypadków zaobserwowano jego zsuniecie z betonowej podpory.

Powstające pod wpływem przemieszczeń odkształcenia rurociągu są szczególnie niebezpieczne dla przekrojów o osłabionych ściankach.

3. Ocena naprężeń w wytypowanych odcinkach rurociągu

W rurach cienkościennych poddanych działaniu ciśnienia wewnętrznego p (warunek cienkościenności $h/r \leq 0,2$ jest spełniony) powstają naprężenia obwodowe σ i mają one jednakową wartość na całej grubości (w danym przekroju) rury [7]:

$$\sigma = \frac{r \cdot p}{h} \quad (1)$$

$$r = \frac{D_z + D_w}{4} \quad (2)$$

gdzie:

h – grubość ścianki rury [mm],

r – średni promień rury [mm],

D_z – średnica zewnętrzna rury [mm],

D_w – średnica wewnętrzna rury [mm],

R – średni promień gięcia rury [mm].

Dla zmian ciśnienia określonych na podstawie wieloletnich badań :

$p_{sr} = 1,75795$ [MPa], $p_{min} = 1,33457$ [MPa], $p_{max} = 2,44297$ [MPa] oraz dla zmian grubości rury ($\phi 508 \times 11$) w wybranych punktach pomiarowych i wyznaczono przebieg zmian naprężeń obwodowych σ .

W przypadku przejścia rury z odcinka prostego w odcinek zakrzywiony zmianie ulegają naprężenia obwodowe (wywołane działaniem ciśnienia wewnętrznego) wzdłuż obwodu rury.

Średnie naprężenie obwodowe w ściance rury zakrzywionej po stronie wewnętrznej:

$$\sigma_{wew} = \frac{\sigma \cdot (R - 0,5 \cdot r)}{(R - r)} \quad (3)$$

oraz po stronie zewnętrznej :

$$\sigma_{zew} = \frac{\sigma \cdot (R + 0,5 \cdot r)}{(R + r)} \quad (4)$$

Dla rury $\phi 508 \times 11$ oraz średniego promienia gięcia $R = 750$ [mm] otrzymano wartości naprężeń:

$$\sigma_{wew} = 1,247 \cdot \sigma \quad (5)$$

$$\sigma_{zew} = 0,876 \cdot \sigma \quad (6)$$

Naprężenia obwodowe w prostym odcinku rury ($\phi 508 \times 11$) wynoszą dla podanych zmian ciśnienia:

$$\sigma = \frac{248,5 \cdot p}{11} \quad (7)$$

Uwzględniając notowane wartości ciśnień otrzymano:

$$\sigma_{min} = 30,1493 \text{ [MPa]}, \quad \sigma_{sr} = 39,7139 \text{ [MPa]}, \quad \sigma_{max} = 55,1891 \text{ [MPa]}$$

Biorąc pod uwagę wzór na średnie naprężenie obwodowe w ściance rury zakrzywionej po wewnętrznej stronie otrzymano:

$$\sigma_{wew, min} = 37,5962 \text{ [MPa]}, \quad \sigma_{wew, sr} = 49,5225 \text{ [MPa]}, \quad \sigma_{wew, max} = 68,8208 \text{ [MPa]}$$

Impulsowe (dynamiczne) działanie ciśnienia może powodować dwukrotny wzrost przemieszczenia rurociągu [2] w stosunku do statycznego działania ciśnienia. Wynikiem tego są przemieszczenia rurociągu na podporach i destabilizacja jego zamocowania (podparcia). Uzasadnionym rozwiązaniem inżynierskim jest w tym przypadku zmiana konstrukcyjna w sposobie zawieszenia i podparcia kompensatora.

Również skutkiem działania impulsowego obciążenia [2] w kierunku podłużnym bądź poprzecznym jest dwukrotny wzrost naprężeń obwodowych w stosunku do naprężeń obwodowych wywołanych statycznym działaniem obciążenia.

Właściwości materiałów wykazują rozrzut danych doświadczalnych uzyskanych w czasie badań własności mechanicznych. Rozrzut ten występuje zarówno przy badaniach wytrzymałości zmęczeniowej jak i statycznej wytrzymałości, np. granicy plastyczności R_e lub wytrzymałości doraźnej R_m , czyli możemy wytrzymałość materiału traktować jako zmienną losową. Współczynniki zmienności v_R charakteryzujące rozrzut własności mechanicznych uzyskuje się z badań statystycznych, wg Warszńskiego [12], dla stali $v_R = 0,05 \div 0,1$ i jest on wskaźnikiem jakości materiału zależącym od warunków wytwarzania i obróbki.

Można oszacować wartość średnią $R_{e, \text{sr}}$ i wartość minimalną $R_{e, \text{min}}$ granicy plastyczności korzystając ze wzoru:

$$R_{e, \text{min}} = R_{e, \text{sr}} \cdot \left[-u \cdot v_R \right] \quad (8)$$

gdzie u przyjmowane jest $u = 2 \div 3$, tj. zapewniające większe niż 0,98 prawdopodobieństwo, że wytrzymałość będzie większa od $R_{e, \text{min}}$. Korzystając z powyższych zaleceń i wzorów w dalszej części wyznaczono parametry rozkładu granicy plastyczności R_e .

4. Ocena prawdopodobieństwa uszkodzenia rurociągu

Analizowany ciepłociąg eksploatowany jest w trudnych i zmiennych warunkach. Zarówno ciśnienie jak i temperatura czynnika transportowanego zmieniają się w czasie. Ponadto transportowany czynnik charakteryzuje się składem chemicznym, który w połączeniu z wysoką temperaturą powoduje szybki proces korozji ścianek ciepłociągu. Zmniejszające się grubości ścianek oraz dynamiczny charakter obciążenia powodują ciągły wzrost ryzyka przekroczenia stanów granicznych i pojawiania się uszkodzenia.

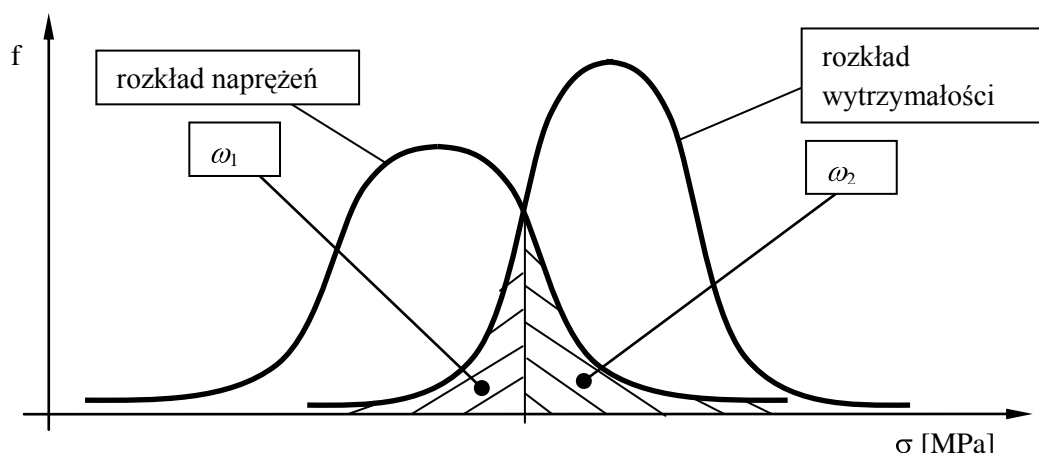
Prawdopodobieństwo uszkodzenia ciepłociągu może zostać wyznaczone przy wykorzystaniu wyników pomiarów grubości ścianek ciepłociągu oraz wyników notowanych zmian obciążenia ciepłociągu (ciśnienie i temperatura).

Przybliżone oszacowanie prawdopodobieństwa uszkodzenia konstrukcji można wyznaczyć za pomocą metody Strieleckiego. Prawdopodobieństwo uszkodzenia P wyznaczone jest w oparciu o rozkłady obciążenia oraz wytrzymałości konstrukcji (rys. 1) i dane jest zależnością [1]:

$$\omega_1 \cdot \omega_2 < P < \omega_1 + \omega_2 - \omega_1 \cdot \omega_2 \quad (9)$$

gdzie:

ω_1 i ω_2 – pola powierzchni pod krzywymi gęstości rozkładu wytrzymałości i wynikającego z obciążeń rozkładu naprężeń, przedstawione na rysunku 1.



Rys. 1. Rozkłady wytrzymałości i naprężeń [11]

Na podstawie danych wytrzymałościowych materiału, z którego wykonano analizowany rurociąg (dane w punkcie 2 i 3), opisano rozkład jego granicy plastyczności jako rozkład wytrzymałości – rozkładem normalnym $N(264; 39,5)$. Rozkłady naprężeń wyznaczono na podstawie zmierzonych grubości ścianek i notowanych zmian ciśnienia. W tabeli 1 zamieszczono prawdopodobieństwa uszkodzenia ciepłociągu wg metody Strieleckiego, wyznaczone dla średniej z pomiarów grubości ścianek oraz dla najgorszego zmierzonego punktu w różnych latach eksploatacji. Ze względu na niewielkie wartości prawdopodobieństwa uszkodzenia wyrażone zostały w procentach.

Tab. 1. Prawdopodobieństwa uszkodzenia ciepłociągu wg metody Strieleckiego [11]

Rok pomiaru	Średnia z pomiarów			Najgorszy punkt		
	1999	2001	2010	1999	2001	2010
Rok eksploatacji	6	8	17	6	8	17
ω_1	0,002476	0,003127	0,007031	0,00195	0,01895	0,04033
ω_2	0,001656	0,002314	0,005385	0,00119	0,01743	0,04704
Prawdopodobieństwo uszkodzenia P [%] >	0,00041	0,000723	0,00379	0,00023	0,033	0,19

Wyznaczone powyżej prawdopodobieństwo uszkodzenia zarówno dla średniej grubości ścianek z punktów mierzonych jak i dla najgorszego zmierzonego punktu daje jedynie ocenę punktową. Na badanym rurociągu mogą znajdować się jednak punkty znacznie bardziej niebezpieczne, w których grubości ścianek mogą być mniejsze.

W związku z tym dodatkowo zaproponowano inną metodę oceny ryzyka. Według tej metody należy wyznaczyć rozkłady grubości ścianek zmierzonych w danym terminie i odnieść do wyznaczonej minimalnej grubości ścianki ciepłociągu. Na podstawie warunku wytrzymałościowego:

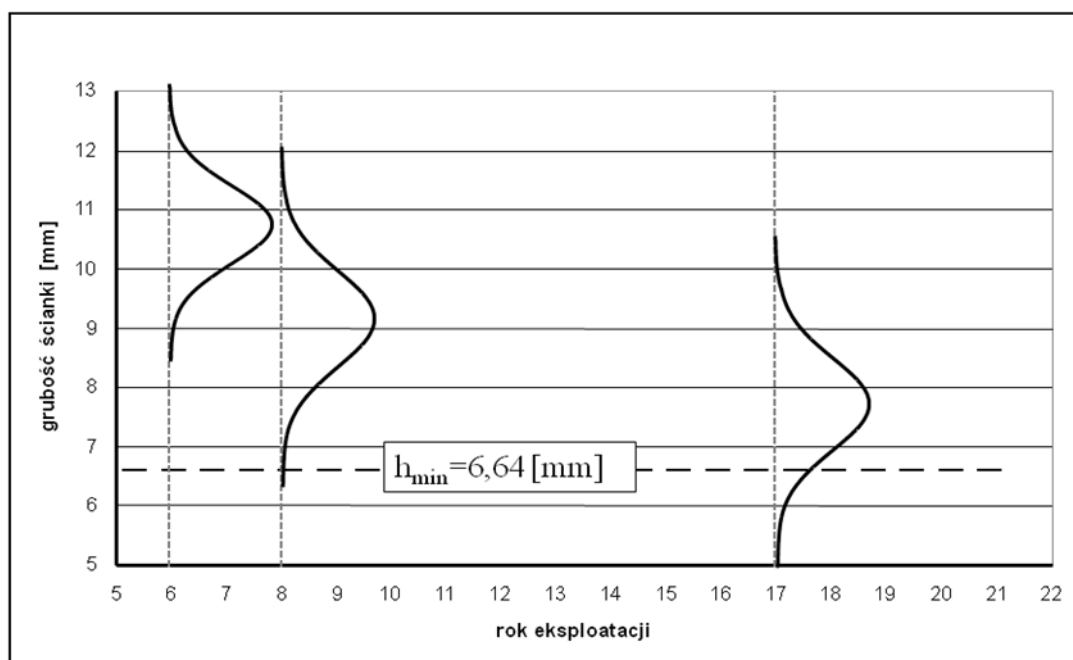
$$\sigma = \frac{r \cdot p}{h} \leq R_{e,\min} \quad (10)$$

można więc zapisać:

$$h_{\min} = \frac{D_z \cdot p}{2 \cdot R_{e,\min} + p} \quad (11)$$

Uwzględniając maksymalne mierzone ciśnienie w rurociągu oraz jego dynamiczne działanie wyznaczono $h_{\min}=6,64$ [mm]. Następnie wyznaczono rozkłady mierzonych grubości ścianek rurociągu w różnych terminach i określono prawdopodobieństwo, że w rozkładzie tym wystąpi wartość mniejsza bądź równa wartości h_{\min} (rys. 2). Prawdopodobieństwo to

określa możliwość wystąpienia na rurociągu ścianki o grubości równej bądź mniejszej od wymaganej wartości minimalnej. Przyjęto że jest to również ryzyko wystąpienia uszkodzenia.



Rys. 2. Rozkłady grubości ścianek ciepłociągu zmierzone w różnych terminach

Wyznaczone wartości prawdopodobieństw wystąpienia uszkodzenia według proponowanej metody zamieszczono w tabeli 2.

Tab. 2. Prawdopodobieństwa uszkodzenia ciepłociągu [11]

Rok pomiaru	1999	2001	2010
Rok eksploatacji	6	8	17
Rozkład grubości ścianek	$N(12,8; 0,9)$	$N(8,85; 1,46)$	$N(7,5; 1,13)$
Prawdopodobieństwo uszkodzenia P	$P \approx 0$	$P = 0,065$	$P = 0,223$

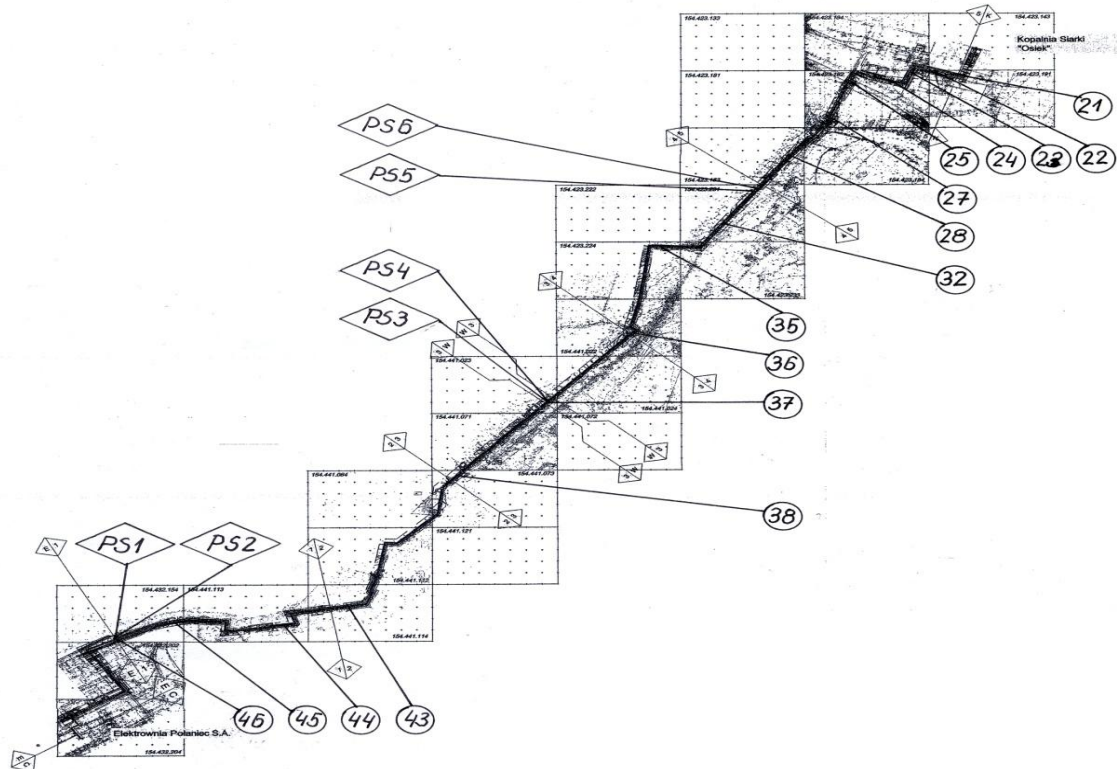
Otrzymane według proponowanej metody wartości prawdopodobieństwa wystąpienia uszkodzeń są znacznie większe od wyznaczonych wg metody Strieleckiego. Wynika to z faktu, że zgodnie z określonymi rozkładami grubości ścianek możliwe jest również występowanie ścianek o mniejszej grubości niż otrzymane z pomiarów w wybranych punktach. Podejście takie lepiej odzwierciedla badany rzeczywisty przypadek ciepłociągu, na którym w czasie pomiarów przebadano tylko znikomy procent jego powierzchni rzeczywistej.

5. Prognozowanie uszkodzenia ciepłociągu

Prawdopodobieństwo uszkodzenia ciepłociągu w rozdziale 4-tym wyznaczono dla punktu na rurociągu, w którym na podstawie pomiarów nastąpiło największe ścienienie ścianki. To miejsce, oznaczone numerem 21 (rys. 3), potraktowano jako najbardziej niebezpieczne. Pomiary grubości ścianki rurociągu wykonano w szesnastu punktach

oznaczonych na rysunku 3 numerami od 21 do 46. W czterech przypadkach zmniejszenie grubości ścianki można potraktować jako niebezpieczne ze względu na osłabienie wytrzymałości rurociągu i w tych miejscach mogą one w niedalekiej przyszłości wystąpić awarie. Te miejsca, szczególnego zagrożenia, stanowią 25% w porównaniu do wszystkich przeprowadzonych pomiarów.

Dokładna ocena stanu technicznego rurociągu nie jest możliwa ze względu na zaizolowanie ciepłociągu. Zakładając, że wykonane pomiary grubości ścianki są reprezentatywne można przyjąć, że prowadząc dalsze badania otrzymano by więcej punktów, które są potencjalnymi źródłami awarii.



Rys. 3. Lokalizacja punktów pomiarowych grubości ścianek i badań termowizyjnych magistrali wody gorącej (21, ..., 46 – punkty pomiaru grubości ścianek)

Dokładna ocena stanu technicznego rurociągu nie jest możliwa ze względu na zaizolowanie ciepłociągu. Można również przyjąć, że kontynuując pomiary, proporcje miejsc szczególnie zagrożonych do ogólnej liczby badanych punktów będzie podobna.

Uszkodzenie ciepłociągu jest poważnym zagrożeniem dla funkcjonowania przedsiębiorstwa i dlatego podejmowane są wszelkie możliwe działania techniczne, przeciwdziałające wystąpieniu awarii. Biorąc pod uwagę zwiększającą się z upływem czasu utratę wytrzymałości rurociągu, w zakładzie planowane jest wybudowanie dodatkowego ciepłociągu, który zastąpi istniejący. W ten sposób może powstać układ wzajemnie rezerwujących się dwóch rurociągów, gwarantujących wysoką niezawodność funkcjonowania.

Istotny staje się problem, kiedy zagrożenie wystąpienia awarii będzie na tyle wysokie, że dalsza eksploatacja może być ryzykowna i konieczne będzie wybudowanie dodatkowej nitki ciepłociągu. Biorąc pod uwagę rozważania przedstawione w rozdziale 4-tym oceniono, że dla zidentyfikowanego, najsłabszego miejsca na rurociągu (pkt nr 21) uszkodzenie wystąpi po przekroczeniu 20 lat eksploatacji [11].

Wniosek taki potwierdza rozkład częstości uszkodzeń dla 17 roku eksploatacji ciepłociągu przedstawiony na rysunku 2, gdzie około 22% wartości funkcji gęstości może przekroczyć wartość graniczną grubości $h_{\min} = 6,64$ [mm].

Dodatkowym kryterium determinującym wymianę ciepłociągu są względy ekonomiczne. Można oszacować wartość oczekiwaną wystąpienia uszkodzenia na podstawie funkcji odnowy:

$$N(t) = \int_0^t (1 - F(x)) dx \quad (12)$$

gdzie:

$N(t)$ – funkcja odnowy,

$t-x$ – resztkowy czas eksploatacji po wystąpieniu pierwszego uszkodzenia,

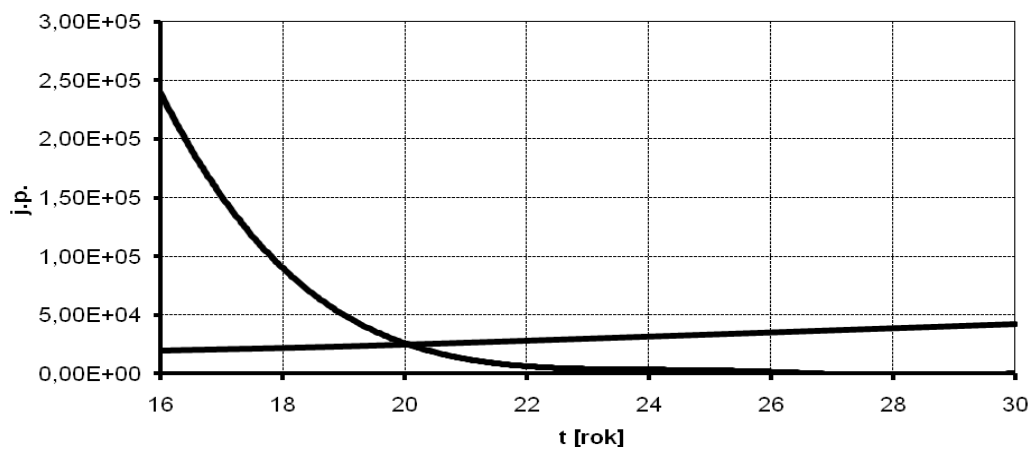
t – czas eksploatacji,

$F(x)$ – dystrybuanta zmiennej losowej, którą jest czas pracy rurociągu.

Wystąpienie uszkodzenia zmusza do podjęcia działań remontowych, których koszty można oszacować. Pierwsze uszkodzenie będące skutkiem procesów korozyjnych jest sygnałem, że kolejne awarie mogą powtórzyć się w najbliższej przyszłości w różnych miejscach ciepłociągu. Jest to sygnał utraty wytrzymałości rurociągu i odpowiednia chwila do podjęcia decyzji o jego wymianie.

Kontynuując eksploatację rurociągu pomimo zagrożenia awarią można mieć zysk, którego wartość można obliczyć. W analizowanym przypadku proporcje zysku z eksploatacji i strat finansowych z uwzględnieniem kosztów naprawy kształtują się w proporcjach jak 90 do 1. Uwzględniając te proporcje, przedstawiono poniżej na rysunku nr 4 prawdopodobieństwo osiągnięcia zysku oraz ryzyko poniesienia strat i w punkcie przecięcia się krzywych wyznaczono czas eksploatacji, po którym dalsza eksploatacja jest nieopłacalna. W analizowanym przypadku ten okres wyniósł 20 lat.

Na rysunku nr 4 przedstawiono fragment prawdopodobieństwa osiągnięcia zysku oraz ryzyko poniesienia strat po 16 roku eksploatacji ciepłociągu. Ten fragment pokazuje okres eksploatacji przed i po wystąpieniu pierwszego uszkodzenia, którego prawdopodobieństwo oszacowano na podstawie wartości funkcji odnowy. Jest to okres newralgiczny w użytkowaniu rurociągu sygnalizujący potrzebę jego wymiany.



Rys. 4. Wyznaczenie okresu eksploatacji ciepłociągu

Wyznaczenie terminu wymiany ciepłociągu przeprowadzono w ujęciu probabilistycznym. Uwzględniono najniekorzystniejsze przypadki i przedstawiona wersja jest oceną pesymistyczną. Zastosowany, znaczny margines bezpieczeństwa wynika z faktu, że wybudowanie nowego ciepłociągu jest czasochłonnym przedsięwzięciem techniczno-ekonomicznym, które nie jest możliwe do przeprowadzenia w krótkim czasie.

6. Podsumowanie

W procesach eksploatacji wyznaczenie czasu eksploatacji urządzeń jest istotnym zagadnieniem decyzyjnym. Nieuzasadnione przedłużanie czasu eksploatacji prowadzi najczęściej do znacznych strat ekonomicznych i zagrożenia ekologicznego. Nie zawsze tego typu decyzja jest prosta do podjęcia.

Przedstawiona w artykule propozycja zastosowania metod oceny niezawodności ma charakter uniwersalny i może być wykorzystywana do rozwiązywania tego typu problemów w różnych branżach przemysłu maszynowego.

Literatura

1. Bołotin W., W.: Metody statystyczne w mechanice budowli, Wydawnictwo Arkady, Warszawa, 1968.
2. Brodny J.: Wyznaczanie współczynnika dynamicznego przy impulsowym działaniu siły. Prace naukowe GIG. Górnictwo i Środowisko. Wyd. spec. nr 7, Katowice 2008.
3. Caley F., Gonzalez J., L., Hallen J., M.: A study on the reliability assessment methodology for pipelines with active corrosion defects. *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 2002; 79: 77-86.
4. Guian Qian, Markus Niffenegger, Shuxin Li: Probabilistic analysis of pipelines with corrosion defects by using FITNET FSS procedure. *Corrosion Science* 2011; 53: 855-861.
5. Kahaleel M. A., Simonen F. A.: Effect of through-wall stress gradients on piping failure probabilities. *Nuclear Engineering and Design* 2000; 197: 89-106.
6. Kołowrocki K., Kwiatkowska-Sarnecka B.: Reliability and risk analysis of large systems with ageing components. *Reliability Engineering and Systems Safety* 2008; 93: 1821-1829.
7. Niezgodziński M.E., Niezgodziński T.: Wzory, wykresy i tablice wytrzymałościowe, WNT, Warszawa, 2006.
8. Shiaw-Wen Tien, Wen-Tsung Hwang, Chih-Hung Tsai: Study of risk-based piping inspection guideline system. *ISA Transactions* 2007; 46: 119-126.
9. Soszyńska J.: Reliability and risk evaluation of a port oil pipeline transportation system in variable operations conditions. *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 2010; 87: 81-87.
10. Stachowiak A., Zwierzycki W.: Verification of computational model for corrosive and mechanical wear. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2009; 4(44): 28-36.

11. Szybka J., Pilch R., Broniec Z., Tarnowski J.: Ocena ryzyka eksploatacji ciepłociągu. Problemy Eksploatacji – Zeszyty Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji - PIB nr 1. Radom, 2011; 80: 175-183.
12. Warszyński M.: Niezawodność w obliczeniach konstrukcyjnych, PWN, Warszawa, 1988.
13. Yong Song, Lin Ma, Jon Morris: A practical approach for reliability prediction of pipeline systems. European Journal of Operational Research 2009; 198: 210-214.