

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

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

Wyznaczanie czasu eksploatacji ciepłociągu na podstawie identyfikacji stanów granicznych

Słowa kluczowe: ciepłociąg, korozja, stany graniczne, czas eksploatacji

Streszczenie: W artykule przedstawiono metodykę wyznaczania granicznego czasu eksploatacji rurociągu. Podstawą wyznaczenia tego czasu jest korozja wżerowa powodująca lokalne zmniejszanie grubości ścianek rurociągu. W analizie wzięto pod uwagę trzy stany graniczne decydujące o wytrzymałości rurociągu. Oszacowano, że rozkład grubości ścianek jest zgodny z rozkładem normalnym a przekroczenie granicznych wartości grubości ścianki rurociągu na zadanym poziomie prawdopodobieństwa jest podstawą do określenia czasu jego eksploatacji.

1. Wstęp

Występowanie korozji w ciepłociągach jest główną przyczyną utraty własności eksploatacyjnych i wraz z upływem czasu zmuszają użytkownika do kosztownych wymian. Proces korozji wewnątrz ciepłociągu przebiega w sposób ciągły i możliwości przeciwdziałania mu praktycznie nie istnieją.

W literaturze światowej znajdują się pozycje dotyczące oceny trwałości rurociągów przesyłowych sieci gazowych, które uwzględniają zjawiska korozji [2, 5]. Problemy korozji rurociągów szeroko charakteryzowane są w [3, 4, 12]. Prezentowane w artykule podejście jest oryginalne i autorzy skoncentrowali uwagę na zagadnieniach oceny wytrzymałości rurociągu, w którym dominujące jest zjawisko korozji wżerowej. Pojawianie się wżerów korozyjnych ma charakter losowy a miejsca ich wystąpienia są trudne do zlokalizowania.

Autorzy podjęli się trudnego zadania wyznaczenia czasu eksploatacji rurociągu ze względu na osiągnięcie stanów granicznych spowodowanych przekroczeniem dopuszczalnych naprężeń w materiale rury skutkiem rozwoju wżerów korozyjnych.

Rozważania dotyczą konkretnego ciepłociągu eksploatowanego w jednej z kopalń.

2. Charakterystyka procesu korozji i wyznaczanie stanów granicznych ciepłociągu

Rurociąg, który poddany jest niekorzystnym oddziaływaniom środowiska chemicznego wody i jednocześnie pojawiającym się obciążeniom zmiennym (pulsacja ciśnienia) oraz impulsowym o charakterze losowym podlega postępującej degradacji,

zachodzącej w wyniku działania chemicznych związków zawartych w wodzie, wysokiej temperatury i czasu.

Występująca korozja traktowana jest jako proces elektrochemiczny, które przebiega w sposób ciągły i prowadzi do pogłębiania się wżerów w ściance ciepłociągu [14]. Te zmiany głębokości ubytków korozyjnych mają charakter zmian ilościowych (można je zmierzyć) i w konsekwencji ich rozwoju następuje przekroczenie stanów granicznych grubości ścianek rurociągu, które skutkuje awarią (zmiana jakościowa) lub zwiększa zagrożenie jej wystąpienia.

Proces pogłębiania się korozyjnych wżerów można potraktować jako proces losowy składający się z występujących po sobie faz związanych ze zmianą wysokości ubytków korozyjnych oraz zdarzeń prowadzących do zmian jakościowych w procesie eksploatacji [6].

Przeprowadzane okresowo pomiary grubości ścianek można określić jako kontrolowane fazy rozwoju przebiegu procesu. Po pewnym czasie eksploatacji następuje przekroczenie wyznaczonych stanów krytycznych, co traktowane jest jako zdarzenia świadczące o częściowych uszkodzeniach, prowadzących w konsekwencji do pojawienia się awarii, która jest traktowana jako uszkodzenie procesu (ciepłociągu).

Można charakteryzować proces stochastyczny $N(t)$ o całkowitoliczbowych, nieujemnych wartościach i ciągłym czasie zarówno rozkładem liczby zdarzeń zachodzących w przedziałach czasowych o długości odpowiadającej rzeczywistym czasom trwania procesu jak również rozkładem długości przedziałów czasu pomiędzy występującymi zdarzeniami.

W rozpatrywanym przypadku korozji elektrochemicznej, po określonym czasie eksploatacji ciepłociągu, głębokość wżerów jest zmienną losową o określonym rozkładzie prawdopodobieństwa. Uwzględniając graniczne wartości ścianki rurociągu i wzrost głębokości wżerów można w każdym cyklu badań wyznaczyć procentową wartość wżerów stanowiących zagrożenie procesu eksploatacji ciepłociągu i oszacować rozkład charakteryzujący zwiększające się z upływem czasu prawdopodobieństwo wystąpienia uszkodzenia. Przyjmując dopuszczalny poziom zagrożenia awarią można wyznaczyć czas eksploatacji ciepłociągu.

Wyznaczenie czasu eksploatacji ciepłociągu nie jest możliwe bez określenia wytrzymałości rurociągu. Odporność na uszkodzenia będzie zależała od obciążeń zewnętrznych i od przebiegu procesu rozwoju korozji.

W rurach cienkościennych poddanych działaniu ciśnienia wewnętrznego p powstają naprężenia obwodowe σ i mają one jednakową wartość na całej grubości h (w danym przekroju) rury [7, 8].

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

$$r = \frac{D_z + D_w}{4}$$

gdzie:

r – średni promień rury,

D_z – średnica zewnętrzna rury,

D_w – średnica wewnętrzna rury.

Warunek cienkościenności w postaci $\frac{h}{r} \leq 0,2$ jest spełniony.

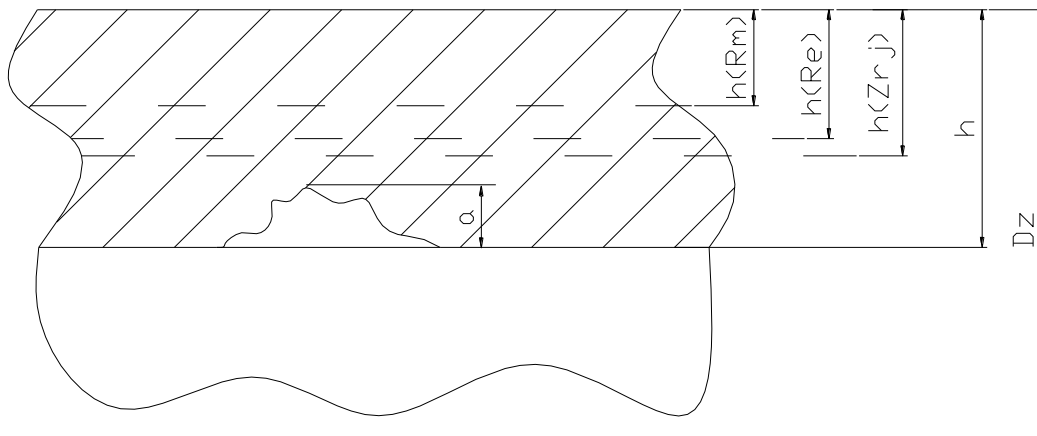
Można analizę wytrzymałościową rurociągu rozpatrywać w oparciu o konieczne grubości ścianki rurociągu, przyjmując jako naprężenie krytyczne K_r :

- granicę plastyczności $K_r = R_e$,
- wytrzymałość doraźną $K_r = R_m$,
- oraz granicę wytrzymałości zmęczeniowej $K_r = Z_{rj}$.

Korzystając ze wzoru (1) wyznaczyć można grubość ścianki:

$$h = \frac{D_z \cdot p}{2 \cdot K_r + p} \quad (2)$$

Na rysunku 1 przedstawiono poglądowo grubości ścianek h rurociągu ze względu na przyjęte wartości naprężenia krytycznego K_r .



Rys. 1. Ścianka rurociągu z przykładowym wżerem oraz wymaganymi grubościami granicznymi

$h(R_m)$ - minimalna dopuszczalna grubość rury ze względu na wytrzymałość doraźną,
 $h(R_e)$ - minimalna dopuszczalna grubość rury ze względu na granicę plastyczności,
 $h(Z_{rj})$ - minimalna dopuszczalna grubość rury ze względu na granicę wytrzymałości zmęczeniowej,
 a - głębokość wżeru,
 h - nominalna grubość ścianki rury.

3. Wyznaczenie czasu eksploatacji rurociągu

Jednym z podstawowych zadań w eksploatacji rurociągów jest zapewnienie ciągłego i bezpiecznego transportu medium. Aby to zadanie zrealizować eksploatator musi kontrolować stan rurociągu, a w szczególności spadek w czasie wytrzymałości rur,

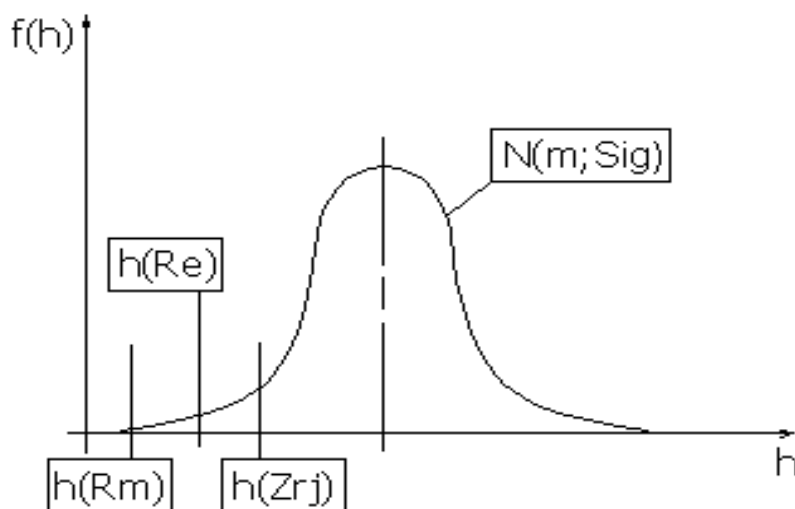
które w efekcie może doprowadzić do wystąpienia uszkodzenia. Jedną z przyczyn osłabiania rur jest korozja ścian rurociągu. Jeśli proces ten zachodzi w czasie w sposób równomierny, łatwo można wyznaczyć czas kiedy należy podjąć odpowiednie kroki w celu uniknięcia awarii.

Problem jest znacznie trudniejszy, gdy jak opisano w punkcie 2, występuje korozja wżerowa. Zmiana grubości ścianek (oraz powstawanie głębokich wżerów) rur jest spowodowana przede wszystkim korozją elektrochemiczną, której źródłem jest wysoki stopień zmineralizowanej wody (obecność znacznej ilości chlorków w wodzie).

Oprócz równomiernego zmniejszania się grubości ścianek pojawiają się wtedy punkty gdzie występują głębokie wżery, stanowiące potencjalne punkty wystąpienia uszkodzenia – rys. 1. Dodatkową trudność powoduje fakt, że są one zazwyczaj rozrzucone na całej długości rurociągu i w czasie badania mogą nie zostać wykryte. Z drugiej strony przeprowadzenie badania całego rurociągu jest często bardzo kosztowne i czasochłonne lub wręcz niemożliwe. Eksploatator staje więc często przed problemem konieczności określenia poziomu ryzyka eksploatacji rurociągu oraz wyznaczenia czasu jaki pozostaje do podjęcia działań zapobiegających awarii dysponując niepełną informacją o stanie rurociągu.

Jedną z możliwości wyznaczenia wyżej wymienionych wielkości jest wykorzystanie probabilistycznych modeli opisujących rozkłady grubości ścianek i wżerów oraz ich zmiany w czasie.

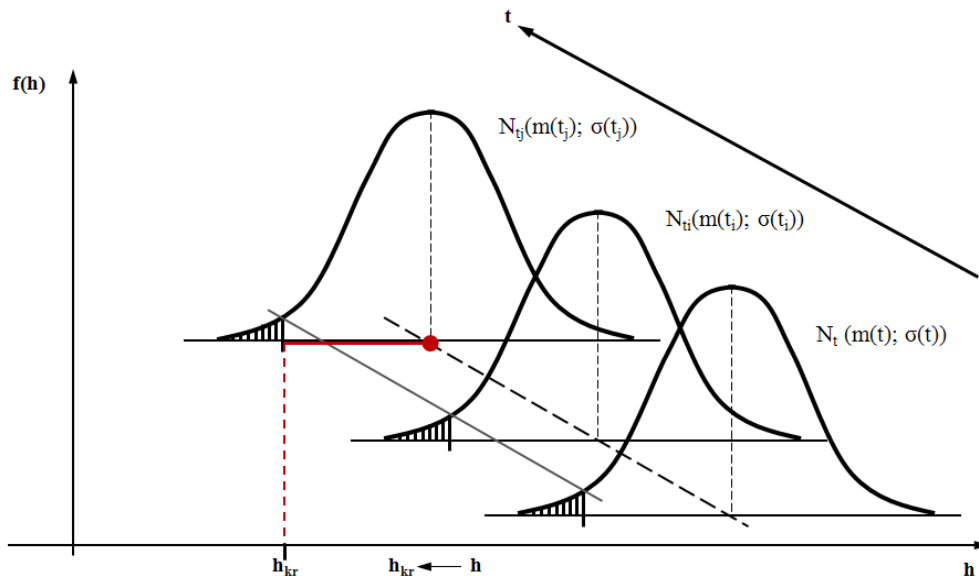
Określenia rozkładu pozostałej grubości ścianek (lub rozkładu głębokości wżerów) badanego rurociągu można dokonać w oparciu o wyniki przeprowadzonych pomiarów grubości. Wykorzystując testy zgodności można dopasować rozkład prawdopodobieństwa oraz określić jego parametry. Następnie uwzględniając warunki eksploatacji, parametry transportowanego medium oraz ich zmienność w czasie należy określić wymagane graniczne grubości ścianek, ze względu na przyjęty stan krytyczny, co zaprezentowano w punkcie 2. Dysponując rozkładem grubości ścianek oraz wymaganymi wartościami granicznymi można następnie wyznaczyć prawdopodobieństwo przekroczenia wyznaczonej wartości granicznej. Dla normalnego rozkładu grubości ścianek rurociągu sytuację taką w sposób poglądowy przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Funkcja gęstości rozkładu grubości ścianek z wymaganymi grubościami granicznymi

Określenie prawdopodobieństwa przekroczenia wymaganej wartości granicznej daje informację o stopniu zagrożenia wystąpieniem awarii w chwili, w której wykonane zostały pomiary grubości ścianek. Istotne jest jednak wyznaczenie czasu po jakim z założonym poziomem niezawodności wybrany stan krytyczny może zostać osiągnięty.

Ze względu na postępujący proces korozji, wyznaczony rozkład grubości ścianek, będzie ulegał przesunięciu. Jeśli dysponuje się pomiarami grubości wykonanymi w różnych terminach w czasie eksploatacji rurociągu należy określić ich rozkłady oraz sposób zmian parametrów w czasie. Jeżeli przeprowadzona analiza pozwala określić sposób przesuwania się rozkładu oraz charakter zmian parametrów w czasie, to można na tej podstawie wykonywać prognozy jego zmian w czasie. Następnie metodą kolejnych przybliżeń możliwe staje się określenie czasu po jakim grubość ścianek osiągnie wartość graniczną na zadanym poziomie prawdopodobieństwa – rysunek 3.



Rys. 3. Wyznaczenie czasu osiągnięcia stanu granicznego na zadanym poziomie prawdopodobieństwa

4. Przykład praktyczny

Do budowy badanego ciepłociągu o średnicy $\phi 508 \times 11$ użyto rur stalowych bez szwu, wykonanych ze stali niskowęglowej R35 (P235GH), dla których podstawowe wymagania precyzuje norma PN-80H-74219 [13]. Rury wykonano w technologii walcowania na gorąco, ze ściankami ukosowanymi i końcówkami kalibrowanymi.

Wymagana minimalna wartość granicy plastyczności materiału rur w temperaturze 473 [K] (200 [°C]), powinna spełniać nierówność $R_e \geq 185$ [MPa] zaś $R_m = 345$ [MPa].

Podstawowym obciążeniem dla analizowanego rurociągu jest ciśnienie transportowanego medium. Wartości ciśnień roboczych przesyłanego medium,

określone na podstawie całodobowego monitoringu wahają się w granicach $1,4 \div 2,7$ [MPa].

Eksploatacja rurociągu jest również zagrożona za sprawą zmiennych naprężeń pochodzących od nierównomiernego ciśnienia transportowanego medium. Dane zebrane na podstawie całodobowego monitoringu świadczą o jego falowym przebiegu i stochastycznych wartościach generujących dodatkowe impulsy obciążeniowe.

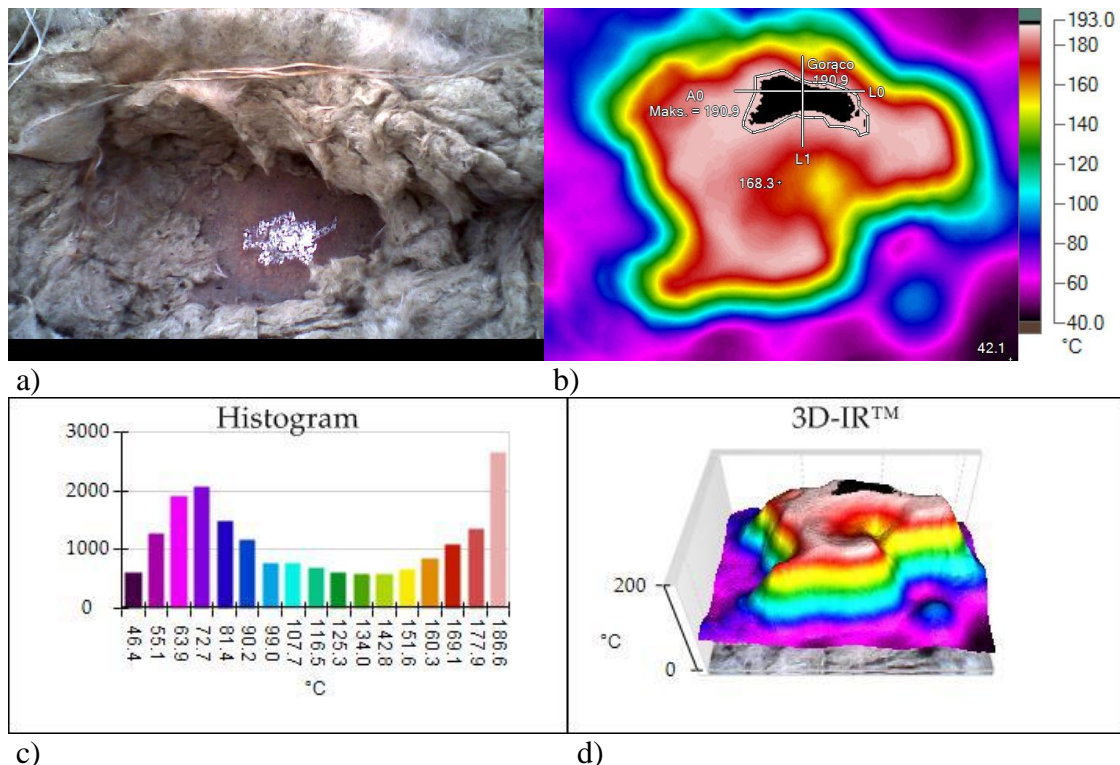
Przyjmując eksperymentalną zależność dla stali między granicą zmęczenia Z_{rj} a wytrzymałością doraźną R_m ($Z_{rj} \approx 0,5 R_m$) otrzymano konieczne grubości ścianek:

$$h(R_e) = 3,7 \text{ [mm]}, h(R_m) = 2,0 \text{ [mm]}, h(Z_{rj}) = 3,9 \text{ [mm]}.$$

Uwzględniając dodatkowo dynamiczne działanie ciśnienia ze współczynnikiem 2 [1] w porównaniu do ciśnienia statycznego ($p_{dyn} = 2p_{stat}$) według powyższej zależności otrzymamy następujące grubości ścianek:

$$h(R_e) = 7,3 \text{ [mm]}, h(R_m) = 3,9 \text{ [mm]}, h(Z_{rj}) = 7,8 \text{ [mm]}.$$

Dla rurociągu do przesyłu wody gorącej pomiary grubości ścianek zostały wykonane trzykrotnie w okresie jego eksploatacji. Pomiary grubości ścianek wykonano grubościomierzem ultradźwiękowym (typ DM-4DL, głowica DA 317). Dodatkowo w tych samych punktach przeprowadzono pomiary termowizyjne (kamera typu Ti25), z których przykładowy wynik po obróbce komputerowej przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Przykładowy wynik pomiaru termowizyjnego [11], a) obraz w zakresie widzialnym, b) obraz w podczerwieni, c) histogram częstości występowania danej wartości temperatury, d) trójwymiarowy rozkład temperatury na badanej powierzchni

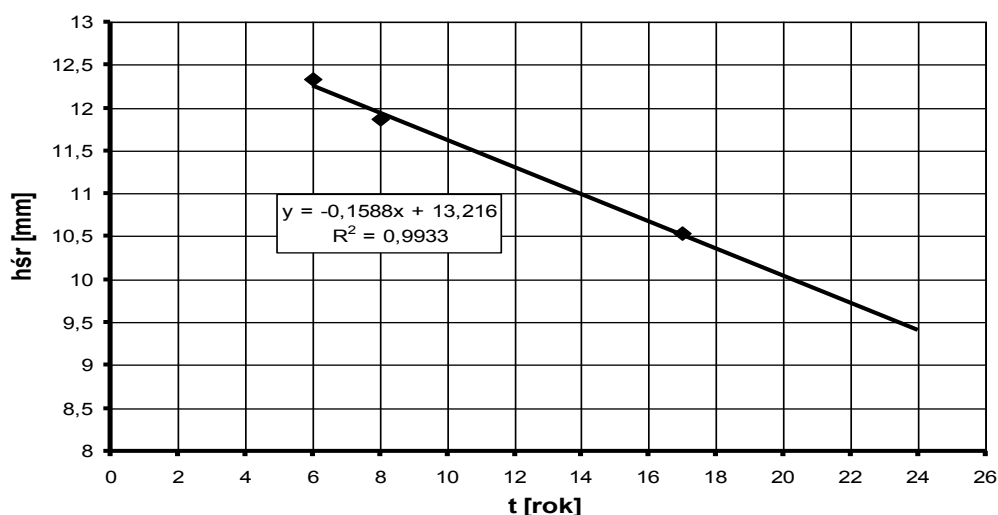
Dysponując wynikami pomiarów oraz wyznaczonymi wymaganymi wartościami granicznymi grubości należy wyznaczyć aktualny poziom niezawodności czyli prawdopodobieństwo nieosiągnięcia stanu granicznego wynikającego z możliwego wystąpienia zmęczenia materiału oraz czas po jakim niezawodność, spadnie do przyjętej wartości granicznej równej 0,98. Przyjęta wysoka wartość wymaganej niezawodności wynika ze znacznego ryzyka eksploatacji rurociągu.

Wykonane testy zgodności (test Shapiro-Wilka) wykazały, że przeprowadzone w 6, 8 oraz 17-tym roku eksploatacji pomiary grubości ścianek charakteryzują się normalnymi rozkładami prawdopodobieństwa, które można zapisać odpowiednio: $N_6(12,33; 0,9)$, $N_8(11,86; 1,46)$, $N_{17}(10,53; 1,13)$. Przyjmując najbardziej aktualne, wykonane w 17 roku eksploatacji (2010 r.) pomiary grubości, opisane rozkładem normalnym $N_{17}(10,53; 1,13)$ wyznaczono prawdopodobieństwo osiągnięcia stanów granicznych i poziomy niezawodności ze względu na te stany. Wyniki zamieszczono w tabeli 1.

Tab. 1. Niezawodność rurociągu w 17 roku eksploatacji

	Stan graniczny ze względu na:		
	wystąpienie zmęczenia materiału Z_{Tj}	granice plastyczności R_e	granice wytrzymałości R_m
Niezawodność w 17 roku eksploatacji	0,9921	0,9979	≈ 1

Zauważyć można również, że średnia zmiana grubości ścianki w czasie ma charakter niemal idealnie liniowy, ze współczynnikiem $R^2=0,9933$, co przedstawia wykres na rysunku 5.



Rys. 5. Zmiana w czasie średniej grubości ścianki h_{sr} dla analizowanego rurociągu

Wyznaczając równanie zmian w czasie średniej grubości ścianki, które przyjęło postać:

$$h_{sr} = -0,1588 t + 13,216 ; \quad (3)$$

obliczono prognozowane średnie wartości grubości ścianki w przesuwany rozkładzie normalnym dla kolejnych lat eksploatacji. Następnie przy założeniu średniego niezmiennego odchylenia standardowego w prognozowanym rozkładzie wyznaczono poziomy niezawodności i określono czas po jakim osiągnie zakładaną wartość graniczną (rys. 3). Wyniki zamieszczono w tabeli 2.

Tab. 2. Niezawodność rurociągu w kolejnych latach eksploatacji

Rok eksploatacji	Prognozowane h_{sr}	Prawdopodobieństwo nieosiągnięcia stanu granicznego ze względu na:		
		wystąpienie zmęczenia materiału Z_{Tj}	granice plastyczności R_e	granice wytrzymałości R_m
18	10,36	0,9863	0,9958	≈1
18,5	10,28	0,9837	0,9949	
19	10,20	0,9807	0,9938	
19,5	10,12	0,9772	0,9925	
20	10,04	0,9733	0,9909	
20,5	9,96	0,9687	0,9891	
21	9,88	0,9635	0,9869	
21,5	9,80	0,9576	0,9844	
22	9,72	0,9510	0,9815	
22,5	9,64	0,9436	0,9782	

Otrzymane wyniki świadczą, że pomiędzy 19,5 a 22,5 rokiem eksploatacji zagrożenie awarią jest stosunkowo wysokie, ponieważ przekracza wartość 2% , i w tym zakresie wytrzymałość rurociągu znajduje się między granicami wynikającymi ze zmęzeniem materiału a plastycznością. Ten okres eksploatacji należy przyjąć jako bezpieczną granicę eksploatacji i dogodny czas na wymianę ciepłociągu na nowy. Uzyskane wyniki są zbliżone do wyników analizy niezawodnościowej przedstawionej w pracach [9, 10].

Dalsze badania mające na celu lepsze przybliżenie modelu do warunków rzeczywistych wskazują, że rozkład czasu pracy rurociągu do osiągnięcia stanu granicznego z prawdopodobieństwem 0,02 jest zgodny z rozkładem normalnym $N(28,9;9,6)$. Uzyskane wstępne wyniki wymagają dalszej weryfikacji i zostaną przedstawione w kolejnym opracowaniu.

5. Podsumowanie

Wyznaczenie czasu eksploatacji ciepłociągu jest dla użytkownika ważne ze względu na utrzymanie ciągłości produkcji. Każda nieprzewidziana awaria skutkuje dużymi stratami ekonomicznymi i narusza stabilność produkcji. Z upływem czasu zwiększa się liczba awarii i zbliża się termin wymiany rurociągu na nowy. Wzrastająca liczba wżerów korozyjnych stanowi potencjalne zagrożenie stanu zdatności i istotna

staje się odpowiedź na pytanie, w którym momencie należy podjąć działania zmierzające do wymiany ciepłociągu na nowy.

Autorzy przedstawili jedną z możliwych propozycji rozwiązywania tego typu problemów i opracowana koncepcja powinna być użyteczna dla eksploatorów rurociągów, w których korozja elektrochemiczna jest dominującym procesem pogarszania się stanu technicznego obiektu.

Literatura

1. Brodny J.: Wyznaczanie współczynnika dynamicznego przy impulsowym działaniu siły. Prace naukowe GIG. Górnictwo i Środowisko. Wyd. spec. nr 7. Katowice 2008.
2. Broniec Z., Szybka J., Tarnowski J.: Modelowanie systemu eksploatacji sieci gazowych użytkowanych na terenach górniczych. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn, PWN Warszawa 1998; Z. 1 (113), vol. 33: 65-78.
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. Kucheryavyi V. I., Mil'kov S. N.: Probabilistic prediction of the residual lifetime of a gas pipeline under pitting corrosion. Journal of Machinery Manufacture and Reliability 2011, vol. 40, no. 5: 489-493.
6. Lenkiewicz W., Szybka J.: Koncepcja modelowania procesów w aspekcie oceny ich niezawodności. Metody prognozowania w inżynierii niezawodności. XXXI Zimowa Szkoła Niezawodności. Szczyrk, 2003.
7. Niezgodziński M. E., Niezgodziński T.: Wzory, wykresy i tablice wytrzymałościowe. WNT, Warszawa 2006.
8. Ponomariew S. D.: Współczesne metody obliczeń wytrzymałościowych w budowie maszyn. PWN, Warszawa 1957.
9. Szybka J., Pilch R., Broniec Z., Tarnowski J.: Ocena ryzyka eksploatacji ciepłociągu. Problemy Eksploatacji – Zeszyty Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji –PIB nr 1. Radom, 2011; 175-183.
10. Szybka J., Pilch R., Broniec Z.: Forecasting the failure of a thermal pipeline on the basis of risk assessment and exploitation analysis. Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability 2011; 4(52): 5-10.
11. Szybka J. i inni: Sprawozdanie z badań rurociągu – materiały wewnętrzne niepublikowane. PNTTE, kom. K-ka, 2010.

12. Yong Song, Lin Ma, Jon Morris: A practical approach for reliability prediction of pipeline systems. *European Journal of Operational Research* 2009; 198: 210-214.
13. PN-80H-74219: Rury bez szwu walcowane na gorąco ze stali węglowej i stopowej do budowy przewodów i konstrukcji.
14. PN-EN ISO 8044: Korozja metali i stopów.