

STANISŁAW ŁOPATA*, KAMIL KWINTOWSKI**

PEŁZANIE RUROCIĄGÓW PAROWYCH Z OWALNYM PRZEKROJEM POPRZECZNYM

CREEP OF STEAM PIPELINES WITH OVALITY CROSS-SECTION

Streszczenie

Wysokie wartości ciśnienia i temperatury pary przegrzanej przesyłanej rurociągami sprzyjają powolnemu płynięciu materiału – pełzaniu. W pracy przeanalizowano wpływ początkowej owalności przekroju poprzecznego rurociągów na osiągnięte z upływem czasu eksploatacji wartości trwałego odkształcenia pełzania. Do modelowania numerycznego odcinka rurociągu wykorzystano program ANSYS. Szczególną uwagę zwrócono na krzywe pełzania otrzymane na podstawie wyników uzyskanych dla każdego z prostopadłych do siebie kierunków badań niezależnie.

Słowa kluczowe: rurociąg parowy, odkształcenie pełzania, owalność początkowa

Abstract

The high pressure and temperature values of superheated steam transferred by pipelines cause slow material flow – creep process. This article contains analysis of the influence initial cross-section ovality on creep strain values achieved during the whole operating period. ANSYS software was applied to the pipeline element numerical simulation. The creep curves achieved on the basis of the results obtained for each perpendicular measurement directions independently were particularly taken into consideration.

Keywords: steam pipeline, creep strain, initial ovality

* Dr hab. inż. Stanisław Łopata, prof. PK, Politechnika Krakowska.

** Mgr inż. Kamil Kwintowski, Lurgi S.A., Kraków (doktorant).

1. Wstęp

Charakterystycznym zjawiskiem dla wysokociśnieniowych rurociągów parowych, eksploatowanych z temperaturą około 500–650°C, tj. powyżej temperatury granicznej materiału, z jakiego zostały wykonane, jest pełzanie. W czasie wieloletniej eksploatacji, wywołuje ono niekorzystne zmiany w strukturze stali, obniżające jej własności wytrzymałościowe. Mierzalnym objawem postępu pełzania rurociągów parowych jest powolny przyrost ich średnicy. W celu kontroli tego zjawiska zaleca się wykonywać systematycznie pomiary za pomocą mikrometrów, na specjalnie instalowanych czopach pomiarowych [1, 2]. Są one montowane na zewnętrznej powierzchni rur, zwykle w dwóch kierunkach wzajemnie prostopadłych do siebie, usytuowanych w płaszczyźnie prostopadłej do osi przewodu. Za granicą spotyka się układy z czopami przesuniętymi co 45° [3]. Stwierdzono jednak, że nie uwzględnia się przy tym rzeczywistej geometrii przekroju poprzecznego rurociągu, która jak wynika z dotychczasowych badań własnych ma istotne znaczenie [4, 5].

Dokładność wspomnianej wyżej metody badań pełzania rurociągów parowych zależy od poprawnego wykonania i zainstalowania czopów pomiarowych, od dokładności mikrometru i miernika temperatury, a także staranności przeprowadzanych pomiarów [4]. Zaleca się, aby temperatury rurociągu i mikrometru były równe temperaturze odniesienia, tj. 20°C. Jednak w praktyce takie warunki badań są rzadkie, zwłaszcza w układach kolektorowych. Dlatego, aby możliwe było porównywanie wyników, otrzymywanych po różnym czasie eksploatacji, należy przeliczać je na warunek odniesienia. Otrzymane rezultaty korzystnie jest przedstawiać w postaci eksploatacyjnych krzywych pełzania, tj. osiągniętych z upływem czasu eksploatacji wartości trwałych, względnych odkształceń pełzania. Pozwala to łatwiej wychwytywać nieregularności i ewentualne błędy, dokonywać odpowiednich porównań i analiz, a w konsekwencji oceniać stan techniczny i możliwość dopuszczenia wysokociśnieniowych rurociągów do dalszej, bezpiecznej pracy.

2. Pełzanie zowalizowanych rurociągów parowych – krzywe eksploatacyjne i modelowane numerycznie

Z badań pełzania wysokociśnieniowych rurociągów parowych wynika, że przebiegi uśrednionych wartości trwałych odkształceń pełzania, wyznaczonych na podstawie danych z pomiarów w dwóch prostopadłych do siebie kierunkach, charakteryzuje niekiedy duża różnorodność [4]. Naturalnie różnice te, przy zachowaniu typowego dla zjawiska pełzania charakteru, związane są np.: z gatunkiem materiału zastosowanego na rurociągi, ich wymiarami czy też parametrami eksploatacji.

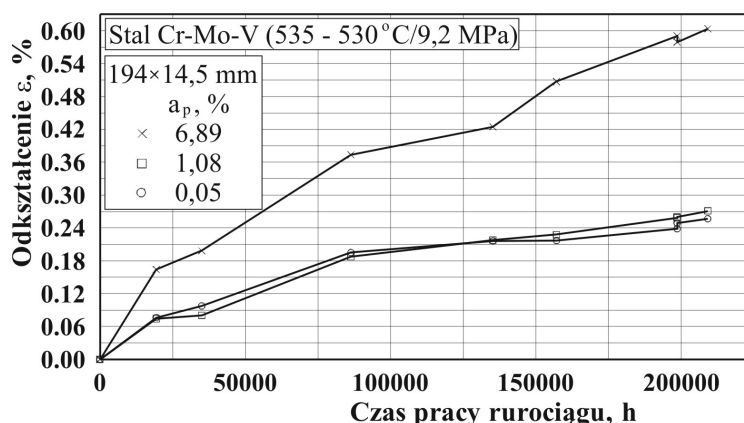
W przypadku kontroli pełzania danego rurociągu parowego, nadzorem diagnostycznym zwykle obejmuje się większą liczbę jego elementów (odcinków prostych oraz prostek kolan i łuków). Z analizy zagadnienia wynika, że w takiej sytuacji, mimo tego samego materiału, tych samych nominalnych wymiarów geometrycznych i takich samych parametrów eksploatacji, osiągane trwałe odkształcenia często się różnią. Zakres zmian tej wielkości dla elementów obiektu może być w jednych przypadkach stosunkowo nieduży, ale w innych dość znaczny. Ten obserwowany rozrzut można by wytłumaczyć najprościej, bez wnikania w szczegóły, nakładaniem się różnych czynników związanych np. z niejednorodnością

materiału czy trudnymi do określenia dodatkowymi obciążeniami. Niekorzystny wpływ na wyznaczone wartości odkształceń mogą mieć także warunki wykonywania pomiarów [4].

Analiza własnych wyników, wieloletnich badań pełzania wysokociśnieniowych rurociągów parowych pozwoliła zauważyć, że osiągnięte przez nie po określonym czasie trwałe odkształcenia praktycznie nie zależą od położenia kontrolowanych elementów na trasie danego rurociągu, ale głównie od wartości owalności początkowej przekroju poprzecznego. Odpowiednie przykłady przebiegów krzywych pełzania pokazano na rys. 1, gdzie krzywe odpowiadają wartościom uśrednionym, obliczonym na podstawie wyników pomiarów w dwu wzajemnie prostopadłych do siebie kierunkach. W wyjaśnieniu przyczyn widocznego zachowania pomocne było wykonanie pomiarów rzeczywistej geometrii rur, szczególnie w miejscach zainstalowania czopów pomiarowych [6].

Wspomnianą wyżej owalność przekroju poprzecznego rurociągu wyznaczano, stosując zależność

$$a_p = \frac{2 \cdot (D_{zw} - D_{zm})}{D_{zw} + D_{zm}} \cdot 100\% \quad (1)$$



Rys. 1. Krzywe pełzania elementów rurociągu parowego o różnych początkowych wartościach owalności przekroju poprzecznego w miejscu zainstalowania czopów pomiarowych

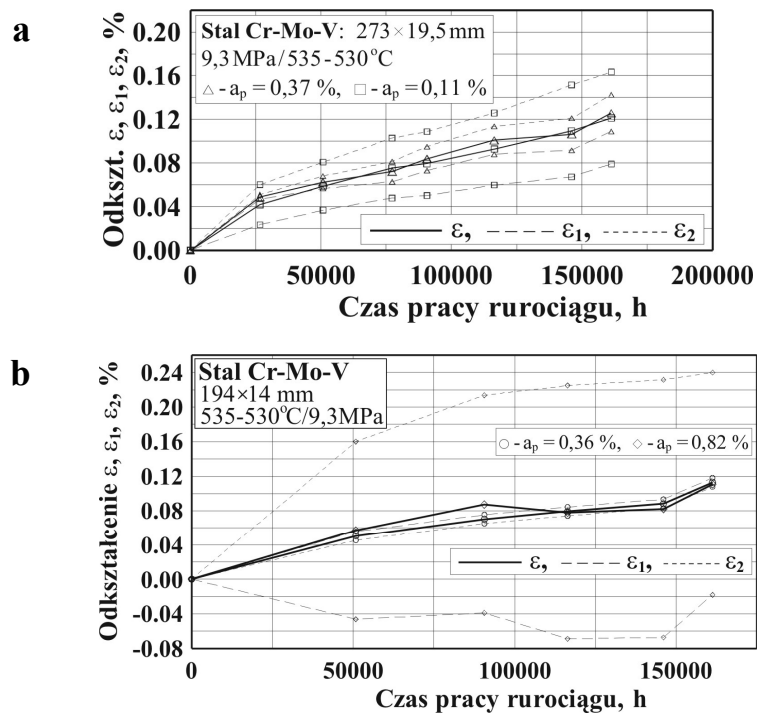
Fig. 1. Creep curves of elements of the steam pipeline with different initial cross-section ovality at the location of the measurement pins

Dla potrzeb analizy zjawiska pełzania rurociągów parowych bardzo korzystne jest prezentowanie wyników osiągniętych trwałych odkształceń pełzania nie tylko jako wartości uśrednionych, ale także, obliczając je niezależnie dla danych z każdego z wspomnianych wcześniej kierunków prowadzonych pomiarów. Jak zauważono, tak wykreślane przebiegi zależą bardzo istotnie, przy takich samych parametrach eksploatacji, od geometrii przekroju poprzecznego rurociągu w miejscu zainstalowania czopów pomiarowych, którą charakteryzuje między innymi owalność. Fakt ten pozwala z powodzeniem wyjaśnić różnorodność przebiegów krzywych pełzania, w odniesieniu do poszczególnych elementów danego obiektu. Należy tutaj dodać, że interpretacja ta potwierdza się w ponad 90%

przeanalizowanych już przypadków [4]. W pozostałych, nieścisłości najprawdopodobniej związane są z błędami pomiarów, zarówno tymi wykonanymi przed oddaniem obiektów do eksploatacji, jak i popelnionymi w okresach późniejszych. Niestety, z uwagi na specyfikę metody badań pełzania rurociągów, nie jest możliwe zweryfikowanie wcześniejszych danych. Na podstawie tego można jednakże stwierdzić, że staranność prowadzenia tego typu badań oraz świadomość ich znaczenia są bardzo ważne.

Dla zaprezentowania omawianego wyżej zagadnienia podzielono przeanalizowane dane na 4 grupy, które ze względu na owalność miejsca zainstalowania czopów pomiarowych można scharakteryzować następująco:

- grupa 1 – niska wartość początkowej owalności przekroju poprzecznego – w pracy przyjęto, że chodzi o zakres od 0% do ok. 0,4%,
- grupa 2 – średnia wartość początkowej owalności przekroju poprzecznego, zawierająca się w przedziale od ok. 0,4% do ok.1,0%,
- grupa 3 – średnia podwyższona wartość początkowej owalności przekroju poprzecznego, tj. od ok. 1,0% do ok. 2,5%,
- grupa 4 – duża wartość początkowa owalności, tzn. większa niż 2,5%.

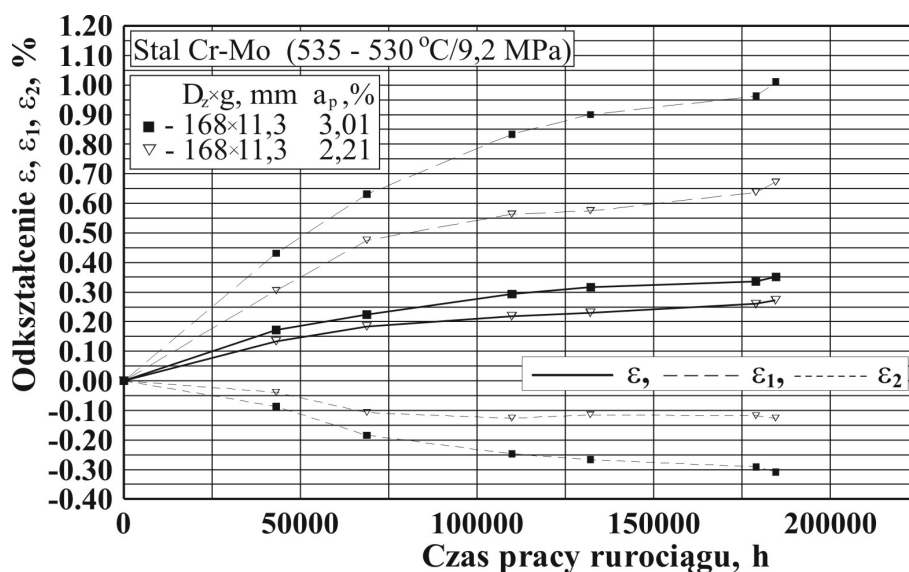


Rys. 2. Pełzanie elementów rurociągu parowego o owalności początkowej: a – niskiej, b – niskiej oraz średniej (ε – wartość średnia, ε_1 i ε_2 – składowe wartości średniej)

Fig. 2. Creep curves of elements of the steam pipeline with the initial ovality: a – low range, b – low and medium range (ε – average value, ε_1 i ε_2 – components of average value)

Przyjęte powyżej pojęcia niskiej, średniej, średniej podwyższonej i dużej wartości początkowej owalności przekroju poprzecznego rury w miejscu zainstalowania czopów pomiarowych związane są z osiąganymi odkształceniami i charakterem przebiegu obu składowych krzywych pełzania (jak wspomiano, każda z nich wyznaczana jest na podstawie wyników pomiarów w określonym kierunku, stanowiąc składową do uzyskania wartości średniej). Należy też uzupełnić, że przyjęte powyżej wartości graniczne początkowej owalności dla poszczególnych grup nie są sztywne. Z uwagi na kryterium, tj. wartość odkształcenia oraz charakter przebiegu krzywych, mogą różnić się od wyżej podanych o ok. $\pm 0,2\%$, a nawet do ok. $\pm 0,5\%$. Związane to jest z faktem, że do takiego podziału wykorzystano wyniki ruchowych badań pełzania, w tym także pomiarów średnic, z których niektóre mogły być obarczone błędami. Stąd też możliwe jest, że przebieg pełzania elementu, który ze względu na podwyższoną wartość początkowej owalności należałoby zaliczyć, wg przyjętego podziału, do grupy 2 będzie przypominał zmiany odpowiadające elementowi o owalności np. dwukrotnie wyższej, tzn. charakterystyczne dla grupy 3.

Na rys. 2 i 3 przedstawiono przypisane do wymienionych grup przebiegi krzywych pełzania, w tym głównie ze względu na kształt i wartości odpowiadające danym pomiarowym dla każdego z kierunków niezależnie, przy czym wartość średnia $\varepsilon = 0,5(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)$.



Rys. 3. Pełzanie elementów rurociągu parowego o owalności początkowej średniej podwyższonej oraz dużej (ε – wartość średnia, ε_1 i ε_2 – składowe wartości średniej)

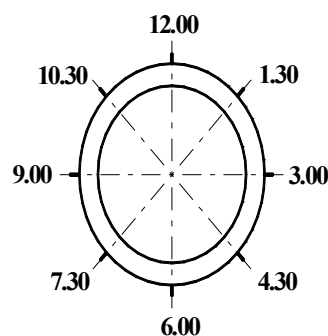
Fig. 3. Creep curves of elements of the steam pipeline with the initial ovality: higher medium range and large range (ε – average value, ε_1 i ε_2 – components of average value)

Analizując krzywe pełzania można zauważyć, że wyjaśnienia przyczyn wymagają obserwowane niekiedy, zwłaszcza w ramach danej grupy, większe różnice w przebiegach składowych ε_1 i ε_2 , przy praktycznie takich samych trwałych odkształceniach średnich ε oraz zbliżonych wartościach owalności początkowej. Przykład o jakim mowa widoczny jest np. na rys. 2a. Jak stwierdzono, ma to związek z nierównomiernością grubości ścianki na obwodzie rury w miejscu zainstalowania czopów pomiarowych [6, 7]. Jednak nie można tutaj wykluczyć także wpływu zmian geometrii rury w strefach oddalonych od tego miejsca. Więcej, w warunkach rzeczywistych będzie to prawdopodobnie jednoczesne oddziaływanie tych parametrów, w różny sposób nakładających się na siebie, w efekcie dając np. wspomniane wyżej różnice.

Wpływ wartości owalności początkowej przekroju poprzecznego rurociągu na jego pełzanie poddano analizie numerycznej, wykorzystując program ANSYS. W tym celu zamodelowano trójwymiarowy prosty odcinek rury i wygenerowano regularną siatkę elementów skończonych typu SOLID 185 [8]. Należy tutaj dodać, że wystarczające byłoby stworzenie modelu 2-wymiarowego, jednak zastosowanie układu 3-wymiarowego pozwala na realistyczne utwierdzenie odcinka, a także może stanowić dobry punkt wyjścia do modelowania elementów o bardziej złożonej geometrii, np. kolana, trójniki. Na fragment rury nałożono warunki brzegowe odpowiadające elementowi nieskończonemu w kierunku osiowym i założono jego nieściśliwość. Założono też, że model jest obciążony od wewnątrz stałym ciśnieniem przepływającego medium. Nie uwzględniano ciężaru elementu. Do obliczeń przyjęto zawarte w programie ANSYS proste, jednoosiowe równanie konstytutywne pełzania w postaci [8]

$$\frac{d\varepsilon}{d\tau} = C_1 \cdot \sigma^{C_2} \cdot \tau^{C_3} = 0,57 \cdot 10^{-14} \cdot \sigma^{5,22} \cdot \tau^{-0,5} \quad (2)$$

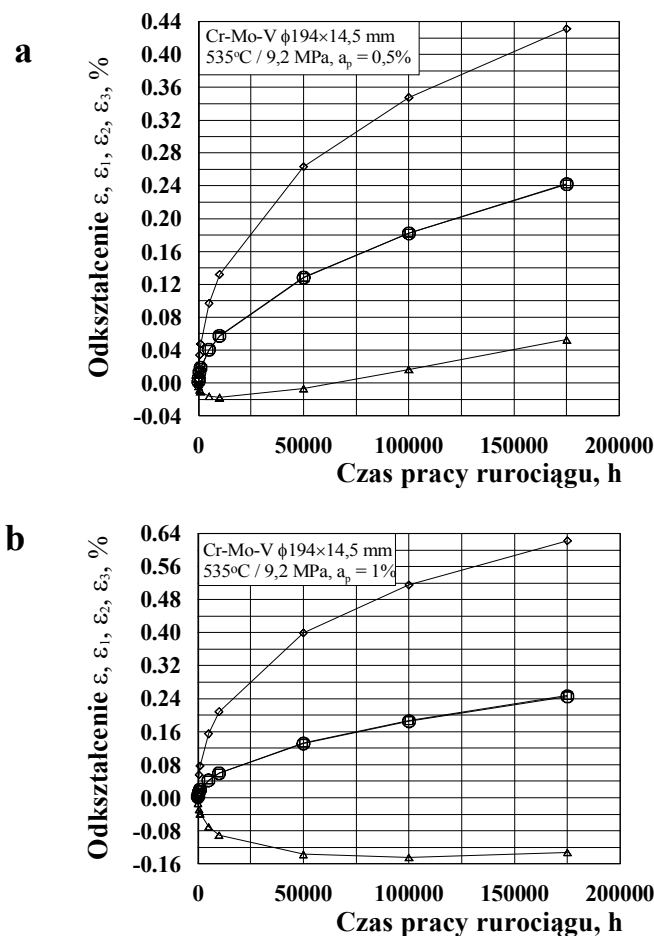
Współczynniki C_1 – C_3 w równaniu (2) wyznaczono, wykorzystując wyniki badań pełzania rurociągu $\phi 194 \times 14,5$ mm, wykonanego ze stali Cr-Mo-V. Był on eksploatowany w temperaturze 535°C i przy ciśnieniu 9,2 MPa. Wybrany element charakteryzują pomijalne wartości owalności i odchyłki grubości ścianki. Wartości współczynników dobrano tak, aby krzywa modelowa jak najlepiej pokrywała się z krzywą doświadczalną.



Rys. 4. Przyjęte oznaczenia kierunków pomiarów odkształceń rurociągu wskutek jego pełzania

Fig. 4. Accepted notations of measurement directions of the pipeline creep deformation

Modelowanie miało na celu odwzorowanie w funkcji czasu zmian względnego odkształcenia pełzania dla zowalizowanego rurociągu o stałej grubości ścianki. Odkształcenie określano na podstawie wyznaczonych dla różnych kierunków danych, które tutaj można traktować jako wartości pomiarowe. Zgodnie z rys. 4 kierunek odpowiadający godzinom 12.00–6.00 nazwano pierwszym (odkształcenie pełzania ε_1), 3.00–9.00 drugim (odkształcenie pełzania ε_2), 1.30–7.30 trzecim (odkształcenie pełzania ε_3) i 4.30–10.30 czwartym (odkształcenie pełzania ε_4).



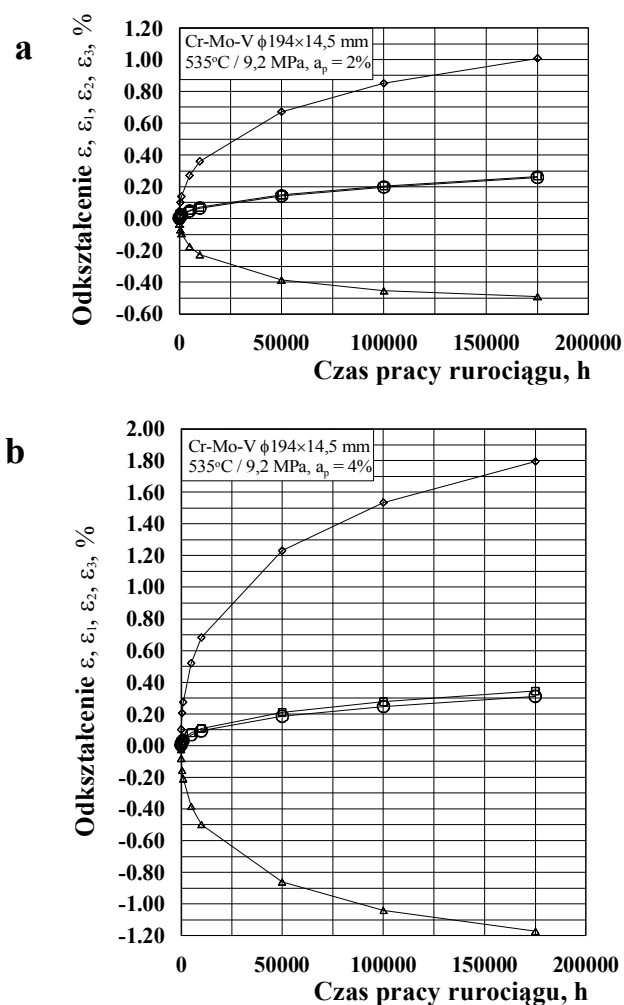
Rys. 5. Symulacja MES – krzywe pełzania rurociągu parowego o owalności początkowej przekroju poprzecznego zaliczonej do grupy średniej:

Δ – ε_1 , \diamond – ε_2 , \square – ε_3 , \circ – ε (a: $a_p = 0,5\%$, b: $a_p = 1,0\%$)

Fig. 5. MES simulation – creep curves of steam pipeline with initial cross-section ovality contained to the medium range group:

Δ – ε_1 , \diamond – ε_2 , \square – ε_3 , \circ – ε (a: $a_p = 0,5\%$, b: $a_p = 1,0\%$)

Analizie numerycznej poddano proste odcinki rury charakteryzującej się owalnością początkową a_p równą: 0,5%, 1%, 2% i 4%, a także, jak już wspomniano, jednakową grubością ścianki. Należy tutaj zaznaczyć, że ze względu na symetrię modelu przyrost trwałego odkształcenia rurociągu wyznaczano tylko w 3 kierunkach: tj. pierwszym, drugim i trzecim (ten ostatni jest równoważny z czwartym). Wyniki obliczeń pokazano na rys. 5 i 6 w postaci krzywych pełzania.



Rys. 6. Symulacja MES – krzywe pełzania rurociągu parowego o owalności początkowej przekroju poprzecznego: a – średniej podwyższonej, b – dużej ($\Delta - \varepsilon_1$, $\diamond - \varepsilon_2$, $\square - \varepsilon_3$, $\circ - \varepsilon$)

Fig. 6. MES simulation – creep curves of steam pipeline with initial cross-section ovality: a – higher medium range, b – large range ($\Delta - \varepsilon_1$, $\diamond - \varepsilon_2$, $\square - \varepsilon_3$, $\circ - \varepsilon$)

Porównanie przebiegów odkształceń pełzania otrzymanych na drodze symulacji numerycznej (rys. 5 i 6) z krzywymi eksploatacyjnymi (rys. 2 i 3) daje zadowalającą zgodność, zarówno jeśli chodzi o wartości średnie, jak i te wyznaczone na podstawie zmian średnic w wybranych kierunkach. Świadczy to o poprawności przeprowadzonej symulacji (MES) i możliwości wykorzystania modelu do analizy np. optymalnego usytuowania czopów pomiarowych ze względu na geometrię przekroju poprzecznego rurociągu.

Na podstawie rys. 5 i 6 można zauważyć, że elementy zowalizowane charakteryzuje znaczna różnica odkształceń pełzania (składowych ε_1 i ε_2), określonych na podstawie zmian średnic w kierunkach wzajemnie prostopadłych do siebie. O wiele większe wartości osiągane są dla danych uzyskanych dla kierunku, w którym początkowa średnica była mniejsza. Natomiast tam gdzie początkowo średnica rury była większa, jej zmniejszanie się z upływem czasu eksploatacji dało „ujemne” wartości odkształceń. Wynika stąd, że zowalizowane elementy dążą do przyjęcia kształtu koła. Tempo takich zmian jest tym większe im wyższa jest owalność początkowa przekroju poprzecznego rurociągu [5].

3. Wnioski

Eksploatacyjne krzywe pełzania i uzyskane na drodze symulacji numerycznej pozwalają stwierdzić, że owalność początkowa przekroju poprzecznego rurociągu ma istotny wpływ na osiągane z upływem czasu pracy trwałe odkształcenia pełzania. Dotyczy to wartości średnich ε , a przede wszystkim ich składowych ε_1 i ε_2 , wyznaczanych niezależnie na podstawie danych uzyskiwanych dla wzajemnie prostopadłych kierunków.

Przed wyborem miejsca montażu czopów pomiarowych, tworzących punkt pomiarów pełzania, należy określić geometrię przekroju poprzecznego rurociągu i następnie, za pomocą modelowania numerycznego, wyznaczyć optymalne dla niej usytuowanie układu wzajemnie prostopadłych do siebie kierunków badań pełzania. W praktyce przyczyni się to do zwiększenia dokładności oceny stanu technicznego i bezpieczeństwa dalszej eksploatacji wysokociśnieniowych rurociągów pracujących w warunkach pełzania.

Elementy charakteryzujące się dużą wartością owalności początkowej, zwłaszcza powyżej 2,5%, powinny podlegać kontroli pełzania w pierwszej kolejności, ponieważ stanowią one, w porównaniu z innymi, grupę zwiększonego zagrożenia ze względu na osiągane po tym samym czasie odkształcenia.

Oznaczenia

a_p	– owalność początkowa przekroju poprzecznego rurociągu w miejscu zainstalowania czopów pomiarowych	[%]
z_w	– większa średnica zewnętrzna rurociągu w miejscu zainstalowania czopów pomiarowych	[mm]
D_{zm}	– mniejsza średnica zewnętrzna rurociągu w miejscu zainstalowania czopów pomiarowych	[mm]
ε	– względne, trwałe odkształcenie pełzania	[%]
σ	– naprężenie	[MPa]
τ	– czas	[h]

Literatura

- [1] D r o p M., K r u c z a l a k H., W ł o c z y k E.: *Instrukcja kontroli odkształceń trwałych (pomiaru pełzania)*, ZP-BE „Energopomiar”, Gliwice 1977.
- [2] European Standard EN 45510-7-1: Guide for procurement of power station plant, equipment and systems – Part 7-1: Pipework and valves – High pressure piping systems. 1999 (Polski odpowiednik: PN-EN 45510-7-1: Wytyczne dotyczące dostaw wyposażenia elektrowni. Część 7-1: Rurociągi i zawory – układy przewodów wysokociśnieniowych. 2002).
- [3] T h o r a v a l G.: *Creep of high temperature steam piping: EDF Experience with fossil-fired power plants from 1955 to 1987*, Nuclear Engineering and Design, **116**, North Holland, Amsterdam 1989.
- [4] Ł o p a t a S.: *Trwałość wysokociśnieniowych rurociągów parowych*, Zeszyty Naukowe, Mechanika nr **81**, Politechnika Krakowska, Kraków 2001.
- [5] Ł o p a t a S., A u g u s t y n i a k M., K w i n t o w s k i K.: *The influence analysis of the steam pipeline cross-section ovality on their creep*. Proceedings of The Sixth International Congress on Thermal Stresses, Vol. 1, Vienna, Austria, May 2005, 409-412.
- [6] K w i n t o w s k i K., Ł o p a t a S., A u g u s t y n i a k M.: *Wpływ nieregularności przekroju poprzecznego rurociągów parowych na ich pełzanie*, Archiwum Energetyki, tom XXXVII, **1-2**, 2007, 77–90.
- [7] Ł o p a t a S., K w i n t o w s k i K.: *Implementation of a numerical model of steam pipeline creep for creep strain measurements*, Науковий журнал, ВІСНИК Хмельницького національного університету, Технічні науки, Т. ;'1, 94, **4**, 2007, 172-179.
- [8] Ansys Release 8.0, *Documentation*.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2007–2008 jako projekt badawczy nr N N513 3089 33.