

Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki
Wydział Mechaniczny
Instytut Aparatury Przemysłowej i Energetyki

Rozprawa doktorska

**Analiza wpływu rzeczywistej geometrii przekroju
poprzedniego wysokociśnieniowych rurociągów
parowych na ich pełzanie**

Mgr inż. Kamil Kwintowski

Promotor: dr hab. inż. Stanisław Łopata, prof. PK

Kraków, 2009 r.



*Pragnę serdecznie podziękować mojemu promotorowi,
dr hab. inż. Stanisławowi Łopacie prof. PK,
za wszelką udzieloną pomoc, życzliwość,
a w szczególności za cierpliwość i wnikliwe uwagi,
przekazywane mi w trakcie pisania niniejszej pracy.*

Kamil Kwintowski



Spis treści

Ważniejsze oznaczenia.....	4
1. Wstęp.....	5
2. Analiza tematu	7
2.1. Zjawisko pełzania rurociągów parowych.....	7
2.2. Diagnostyka wysokociśnieniowych rurociągów parowych	10
2.3. Metodyka badań odkształceń pełzania	12
3. Analiza wyników wieloletnich badań pełzania wysokociśnieniowych rurociągów parowych	17
4. Identyfikacja rzeczywistej geometrii przekroju poprzecznego i warunków eksploatacji rurociągów pary przegrzanej	35
5. Cel pracy	53
6. Teza pracy.....	53
7. Zakres pracy.....	54
8. Modelowanie pełzania rurociągów parowych	55
8.1. Model matematyczny	55
8.2. Równanie konstytutywne pełzania – dobór współczynników	58
8.3. Obliczenia numeryczne	62
9. Analiza numeryczna wpływu geometrii przekroju poprzecznego rurociągu na osiągane odkształcenie pełzania.....	66
9.1. Wpływ owalności początkowej profilu poprzecznego.....	67
9.2. Wpływ nierównomiernej grubości ścianki na obwodzie.....	77
9.3. Jednoczesny wpływ owalności początkowej i nierównomierności grubości ścianki ..	82
9.4. Wpływ zmiennej owalności początkowej profilu na długości rury	97
9.5. Modelowanie numeryczne rzeczywistego przekroju poprzecznego rurociągu parowego	100
10. Kontrola pełzania wysokociśnieniowych rurociągów parowych – zasady usytuowania czopów pomiarowych	104
11. Wnioski.....	110
Literatura	113
Załącznik nr 1	

Ważniejsze oznaczenia

- a_{pw}, a_{pz} – owalność przekroju poprzecznego rury (wartość początkowa) dla profilu, odpowiednio: wewnętrznego i zewnętrznego [%],
- b – poprawka mikrometra w temperaturze odniesienia $t_0 = 20$ °C [mm],
- C_1, C_2, C_3 – współczynniki równania konstytutywnego pełzania,
- D_z – zewnętrzna średnica rury wyznaczona jako wartość średnia ze zmierzonych w danym przekroju [mm],
- D_1, D_2 – zewnętrzne średnice w danym punkcie pomiarowym pełzania wzajemnie prostopadłe do siebie (zgodne z kierunkiem zainstalowania czopów pomiarowych) [mm],
- g – zmierzona (lokalna) rzeczywista grubość ścianki rury [mm],
- g_{sr} – grubość ścianki rury wyznaczona jako średnia z wartości zmierzonych (dla potrzeb niniejszej pracy) w 8 miejscach rozłożonych równomiernie na obwodzie [mm],
- t_r, t_m – temperatura, odpowiednio: ścianki rury, kabłąka mikrometru [°C],
- $v(\tau)$ – prędkość pełzania [%/h],
- α_g – odchyłka grubości ścianki rurociągu parowego [%],
- β_r, β_m – współczynnik cieplnej rozszerzalności liniowej materiału, odpowiednio: rurociągu, kabłąka mikrometru [mm/(mm·K)],
- ΔD – przyrost zewnętrznej średnicy rury spowodowany pełzaniem po upływie pewnego czasu pracy [mm],
- $\varepsilon(\tau)$ – trwałe odkształcenie pełzania rurociągu [%],
- ε_1 i $\varepsilon_2, \varepsilon_3$ i ε_4 – trwałe odkształcenie pełzania rurociągu wyznaczone na podstawie danych pomiarowych odpowiadających prostopadłym do siebie i do osi rurociągu kierunkom, odpowiednio: pierwszemu i drugiemu (układ pomiarowy podstawowy), trzeciemu i czwartemu (układ pomiarowy przestawiony względem podstawowego o 45°) [%],
- $\varepsilon_{sr1-2}, \varepsilon_{sr3-4}$ – wartość uśredniona trwałego odkształcenia pełzania dla odkształceń składowych zmierzonych w dwóch wzajemnie prostopadłych do siebie kierunkach, odpowiednio: pierwszym i drugim, trzecim i czwartym [%],
- ν – współczynnik Poissona,
- σ – naprężenie [MPa],
- τ – czas [h].

1. Wstęp

Realizowanie w elektrowniach ciepłych stosunkowo nieskomplikowanego obiegu Clasiusa-Rankine'a wiąże się z rozbudowaną strukturą, gdzie obok głównych urządzeń jakimi są: kocioł, turbina i generator, występuje wiele obwodów i urządzeń pomocniczych, wśród nich rurociągi parowe. Łączą one kocioł z turbiną stanowiąc istotny element każdego zakładu energetycznego, znacząco wpływając na jego dyspozycyjność. W wielu przypadkach uszkodzenie rurociągu oznacza przymusowy postój całego bloku energetycznego mimo sprawności pozostałych jego elementów i w konsekwencji straty związane z przerwą w produkcji energii. Należy zwrócić uwagę, że niespodziewana awaria to również poważne zagrożenie dla pracowników i innych urządzeń technicznych.

Przesyłanie czynnika roboczego o wysokich parametrach ciśnienia ($12 \div 28$ MPa) i temperatury ($500 \div 700$ °C) [37], a także ich zmienności w trakcie uruchamiania i odstawiania obiektu, naraża rurociągi parowe na wystąpienie niekorzystnych zjawisk w materiale, z którego zostały wykonane. Zmiany w strukturze stali powstałe na skutek procesu pełzania i zmęczenia cieplno-mechanicznego obniżają jej własności wytrzymałościowe i prowadzą do zniszczenia. Istotne znaczenie ma tu pełzanie, którego charakterystycznym widocznym objawem jest powolny wzrost średnicy zewnętrznej rury. Okresowe pomiary przyrostu odkształceń trwałych w trakcie eksploatacji rurociągów parowych stanowią jeden z ważniejszych elementów ich diagnostyki [15, 26, 49, 65, 77]. Wyznaczone w ten sposób wartości względnego odkształcenia pełzania i prędkości pełzania dają podstawy do oceny stanu technicznego i szacowania np. rozporządzalnej trwałości resztkowej, tj. różnicy między rozporządzalną trwałością a czasem już przepracowanym przez oceniany element. Prawidłowe prognozowanie przydatności do dalszej, niezagrożonej awarią pracy odgrywa znaczącą rolę. W energetyce krajowej jak i światowej wiele bloków energetycznych posiada elementy, których czas pracy zbliża się do wartości obliczeniowej bądź już ją przekroczył [32, 59, 64, 65, 70]. Należy tutaj dodać, że dla wielu z nich przyjmowany czas obliczeniowy wynosił 10^5 godz., gdyż dopiero w latach 80. ubiegłego wieku podniesiono go do wartości $2 \cdot 10^5$ godz. Dlatego rzeczywisty czas pracy niektórych obiektów, w tym analizowanych w niniejszej pracy, sięga niekiedy ok. $3 \cdot 10^5$ godz. Trwałość powinna być wyznaczana z dużą dokładnością, tak aby zapewnić pełne wykorzystanie materiału, nie zagrażając jednak bezpieczeństwu eksploatacji. Z kolei

błędne określenie zużycia materiału i związana z nim przedwczesna wymiana elementów wiąże się ze znacznymi kosztami.

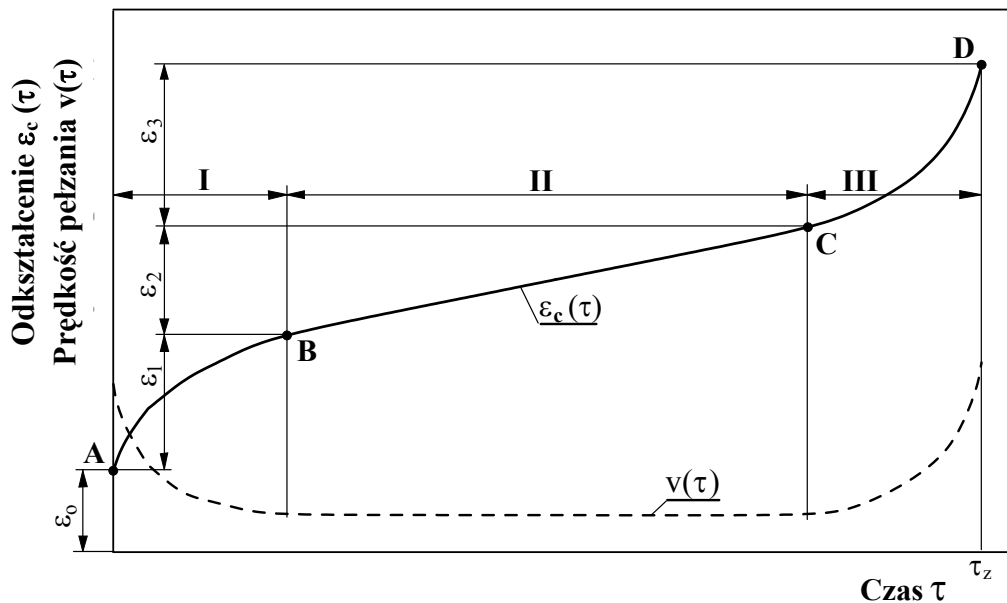
Potrzeba zapewnienia właściwej oceny przydatności rurociągów energetycznych, pracujących w warunkach pełzania, do dalszej eksploatacji, wymusza konieczność doskonalenia metod badawczych oraz sięgania po nowe rozwiązania. Rozwój metod numerycznych sprawia, że stają się one pomocnym narzędziem, stwarzającym możliwość prowadzenia różnorodnych analiz. Umożliwiają one symulowanie procesów i uzyskiwanie wyników, które w praktyce przemysłowej ze względu na np. niebezpieczne następstwa ewentualnych awarii są nieosiągalne. Modelowanie rozszerza zatem stan aktualnej wiedzy na temat pełzania rur i pozwala ulepszać metodykę ich badań i oceny diagnostycznej.

2. Analiza tematu

2.1. Zjawisko pełzania rurociągów parowych

Rurociągi parowe pracują w trudnych warunkach, często przy temperaturze przekraczającej wartość temperatury granicznej materiału, z którego zostały wykonane. Przez temperaturę graniczną rozumie się temperaturę, którą określa punkt przecięcia krzywych opisujących zmiany wyraźnej granicy plastyczności i wytrzymałości na pełzanie w funkcji temperatury. W rurach stosowanych w zakładach energetycznych występują zarówno naprężenia mechaniczne jak i termiczne. Te pierwsze powstają głównie na wskutek oddziaływania znacznego ciśnienia wewnętrznego, a także obciążenia ciągłego masą własną, czynnika oraz izolacji. Pochodzą one również od reakcji zamocowań i ograniczeń swobody dylatacji. Drugi typ naprężeń związany jest ze zmiennością temperatur elementów urządzeń w trakcie uruchamiania i odstawiania bloku oraz ich różnicy na grubości ścianki rury. Takie niekorzystne warunki sprzyjają powolnemu płynięciu materiału z upływem czasu czyli pełzaniu (przez powolne rozumie się tu prędkości rzędu $10^{-10} \div 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) [27]. Proces ten wywołuje szkodliwe zmiany w strukturze, a w przypadku wysokociśnieniowych rurociągów parowych uwidacznia się na zewnątrz poprzez trwałą wzrost ich średnicy. Typowy przebieg zjawiska pełzania przy obciążeniu próbki stałym naprężeniem przedstawia rys. 1. Cechą szczególną krzywej pełzania jest możliwość wyróżnienia na niej trzech etapów. Pierwszy z nich – pełzanie nieustalone, nazywany też pełzaniem pierwszorzędowym lub wstępnym (krzywa AB) charakteryzuje się dużymi prędkościami odkształcenia, które z czasem maleją aż do osiągnięcia stałej wartości (punkt B). Drugie stadium pełzania zwane drugorzędowym to wzrost odkształceń przy nieziennej prędkości (krzywa BC) co powoduje, że proces jest ustalony. W etapie trzeciorzędowym następuje wzrost prędkości pełzania i przyspieszona deformacja materiału (krzywa CD), prowadząca ostatecznie do jego zniszczenia (punkt D). Za zmiany prędkości pełzania odpowiedzialne są dwa przeciwstawne procesy: umocnienia mechanicznego i osłabienia termodynamicznego materiału [27]. Podczas pierwszego stadium dominuje umocnienie nad osłabieniem, w drugim procesy równoważą się, zaś w trzecim wzrasta osłabienie materiału prowadząc do jego dekohezji. Zjawisko to tłumaczono wcześniej przez wzrost naprężeń, wywołany zmniejszającą się powierzchnią przekroju próbki. Jednak obecnie za przyczynę przyjmuje się powstawanie i rozwój

mikroporów pod wpływem naprężeń i temperatury. Wzrost tych mikroporów prowadzi do osłabienia materiału, a w konsekwencji do zniszczenia próbki.



Rys. 1. Krzywa pełzania: $\varepsilon_c(\tau)$ – odkształcenie próbki przy obciążeniu stałym naprężeniem, $v(\tau)$ – prędkość pełzania

Jak przedstawiono na rys. 1, obciążeniu w chwili $\tau = 0$ towarzyszy natychmiastowe odkształcenie ε_0 , na które składa się odkształcenie sprężyste $\varepsilon^e = \sigma_1/E$ i natychmiastowe plastyczne ε^{p0} . Kolejnym stadiom pełzania odpowiadają poszczególne niezależne odkształcenia $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$. Sumując je otrzymuje się wartość odkształcenia całkowitego, które można zapisać w postaci:

$$\varepsilon_c(\tau) = \varepsilon_0 + \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = \varepsilon_0 + \varepsilon(\tau) \quad (1)$$

Przy całkowitym odciążeniu próbki występuje proces nawrotu lepko-sprężystego. W początkowej fazie odkształcenie maleje o wartość sprężystą ε^e , a następnie występuje odkształcenie rezidualne ε^r , które dąży z upływem czasu do odkształcenia trwałego. W ogólnym przypadku zjawisko pełzania opisuje równanie konstytutywne [27, 60]:

$$F(\sigma, \varepsilon, \tau, T) = 0 \quad (2)$$

gdzie: σ – naprężenie, ε – odkształcenie, τ – czas, T – temperatura.

Przy założonej historii naprężenia $\sigma(\tau)$ oraz ustalonej temperaturze z równania (2) można wyznaczyć zmianę odkształcenia w czasie $\varepsilon(\tau)$ i analogicznie, zmianę naprężenia w czasie $\sigma(\tau)$ przy założonej historii odkształcenia $\varepsilon(\tau)$.

Dokonując w równaniu (2) separacji wpływu naprężenia, czasu i temperatury na prędkość pełzania otrzymuje się:

$$\varepsilon^{cr} = f_1(\sigma)f_2(\tau)f_3(T) \quad (3)$$

W przypadku ustalonej temperatury związek (3) można zapisać w postaci:

$$\varepsilon^{cr} = f_1(\sigma)f_2(\tau) \quad (4)$$

i mówić o podobieństwie krzywych pełzania [27, 60].

Do opisu zjawiska pełzania można zastosować wiele równań empirycznych, które różnią się głównie typem funkcji charakteryzującej pełzanie pierwszorzędowe. Dla drugiego, ustalonego etapu funkcja jest zbieżna do asymptoty, natomiast pełzanie trzeciorzędowe zazwyczaj jest pomijane. W równaniach mogą występować funkcje (podano tylko przykładowe wzory określane jako prawa):

a) naprężenia

$$\dot{\varepsilon}^{cr} = K \cdot \sigma^m \quad \text{- prawo Nortona} \quad (5)$$

b) czasu

$$\varepsilon^{cr} = a + b \cdot \lg \tau \quad \text{- prawo Phillipsa} \quad (6)$$

c) temperatury

$$\varepsilon^{cr} = f[\tau \cdot \exp(-Q/RT)] \quad \text{- prawo Dorna} \quad (7)$$

d) temperatury i czasu

$$\varepsilon^{cr} = f(T - a)/(\lg \tau - b) \quad \text{- prawo Mansona} \quad (8)$$

e) naprężenia i czasu

$$\varepsilon^{cr} = k \cdot \sigma^m \cdot \tau^n \quad \text{- prawo Nuttinga} \quad (9)$$

f) naprężenia i temperatury

$$\dot{\varepsilon}^{cr} = \exp[(-Q + \gamma \cdot \sigma)/R \cdot T] \quad \text{- prawo Kauzmana} \quad (10)$$

g) naprężenia, czasu i temperatury

$$\varepsilon^{cr} = \tau^{a_1} \cdot e^{a_2 \cdot \sigma} \cdot e^{-a_3/T} \cdot e^{a_4} \quad \text{- prawo Kennedy'ego} \quad (11)$$

gdzie: $a, a_1, a_2, a_3, a_4, b, k, n, m, K, \gamma$ – stałe; Q – energia aktywacji; R – stała gazowa.

Przedstawione powyżej, wybrane równania stanowią tylko ich pewną część, więcej można odnaleźć np. w pracach [8, 16, 17, 27, 60, 75]. Można tutaj też dodać, że w przedmiotowej literaturze często brak jest wartości stałych dla równań, o których mowa powyżej. Dotyczy to także materiałów stosowanych w energetyce na różne elementy ciśnieniowe, eksploatowane w warunkach pełzania. Często stałe te odpowiadają jedynie warunkom laboratoryjnych badań rozciąganych próbek. Jednym z częściej wykorzystywanych równań jest prawo Nortona (5) i dla niego stosunkowo łatwiej można znaleźć wspomniane wartości [8, 30, 47]. Należy jednak zauważyć, że jest ono ważne tylko w drugim etapie pełzania.

2.2. Diagnostyka wysokociśnieniowych rurociągów parowych

Wzrost mocy jednostek energetycznych zainstalowanych w elektrowniach, elektrociepłowniach czy siłowniach różnych zakładów poprzez podwyższanie parametrów czynnika roboczego, przy zachowaniu stosowanych obecnie na wysokoprężne elementy materiałów (głównie są to stale niskostopowe ferrytyczno-perlityczne), prowadziłby do konieczności skrócenia czasu ich bezpiecznej eksploatacji. Dotyczy to zwłaszcza elementów pracujących w warunkach pełzania, w tym wysokociśnieniowych rurociągów parowych. Możliwe jest jednakże, przy zachowaniu dotychczasowych parametrów pracy, wydłużanie okresu eksploatacji, i to niekiedy dość znaczne, ponad założony czas

obliczeniowy. Ma to znaczenie użytkowe i stanowi ważny aspekt ekonomiczny, co wynika chociażby z faktu, że trwałość elementów może być określana tak, aby zapewnić pełne wykorzystanie materiału, tj. do chwili kiedy dalsza praca nie ma wystarczającej rezerwy bezpieczeństwa. Pogarszanie się z upływem czasu własności materiałów, a tym samym zmniejszanie się trwałości rozporządzalnej wiąże się z możliwością wystąpienia nieprzewidywalnych awarii, których skutki mogą być katastrofalne. Dlatego też wprowadzono prawny nakaz kontroli wysokociśnieniowych rurociągów parowych przez jednostki dozoru technicznego [56]. Wymaga się ich rejestracji w Urzędach Dozoru Technicznego oraz prowadzenia szczegółowych inspekcji w czasie długotrwałej eksploatacji. Prowadzone w tym celu badania mają za zadanie określenie aktualnego stanu technicznego, ocenę stopnia zużycia, a także umożliwienie wyznaczania dalszego bezpiecznego czasu pracy [10, 34, 68].

Uzyskanie wiarygodnych danych umożliwiających podjęcie decyzji o dopuszczeniu rurociągu parowego do dalszej eksploatacji możliwe jest w wyniku prowadzenia różnorodnych badań [9, 11, 18, 59, 67], co świadczy o kompleksowości prowadzonej oceny. Taki sposób postępowania wynika z niewystarczającego rozpoznania zjawisk związanych z eksploatacją obiektów, o których mowa. Ponadto brak jest jednoznacznych powiązań pomiędzy metodami oceny. Obecnie stosowane w praktyce nieniszczące metody diagnostyczne pozwalają na przybliżone prognozowanie trwałości. Uściślenie wyników można uzyskać dzięki badaniom niszczącym, jednakże wymagają one pobrania wycinków materiału, co zazwyczaj stwarza wiele problemów technicznych. Dotyczy to zwłaszcza kolan, powodując ich bezużyteczność z powodu trudności naprawy ubytku [6]. Ponadto badania te wymagają specjalistycznych laboratoriów, są długotrwałe i kosztowne. Z tego względu nie stosuje się ich w rutynowej kontroli, mogą jednak być przydatne, gdy próbka wycinana jest z elementów wycofywanych z eksploatacji. Dane z takich badań mają na celu poszerzenie wiedzy na temat zachowania się materiału podczas długotrwałej pracy w warunkach pełzania.

Z nieniszczących badań wykonywanych na wysokociśnieniowych rurociągach parowych w celu określenia ich przydatności eksploatacyjnej można wymienić: badania defektoskopowe, endoskopowe, replik metalograficznych oraz pomiary odkształceń pełzania. Powinny być one poprzedzone analizą wytrzymałościową, przeprowadzoną w oparciu o rzeczywiste dane dotyczące obiektu, jak np.: średnica i grubość rur, rozmieszczenie podpór, ciężar izolacji. W oparciu o otrzymane wyniki możliwe jest

wytypowanie miejsc największych wyżeń materiału, dla których zaleca się prowadzenie badań doświadczalnych, a zwłaszcza eksploatacyjnych, dokonywanych okresowo.

Należy również zwrócić uwagę na potrzebę gromadzenia wszelkich informacji dotyczących rurociągu, takich jak np.: rzeczywiste warunki pracy, wykonane naprawy i modernizacje, rodzaj oraz wyniki przeprowadzonych badań itp. Dla właściwej diagnostyki istotne znaczenie mają również dane wyjściowe, w tym szczególnie dotyczące geometrii i własności materiałowych, uzyskane na podstawie badań wykonywanych przed oddaniem obiektu do eksploatacji (jest to stan zerowy, którego bardzo często brakuje dla porównania ze stanem późniejszym). Niestety, tworzenie historii danego elementu często w praktyce bywa czynnością zaniechaną, chociaż przy obecnej technice komputerowej nie stwarza to większych problemów.

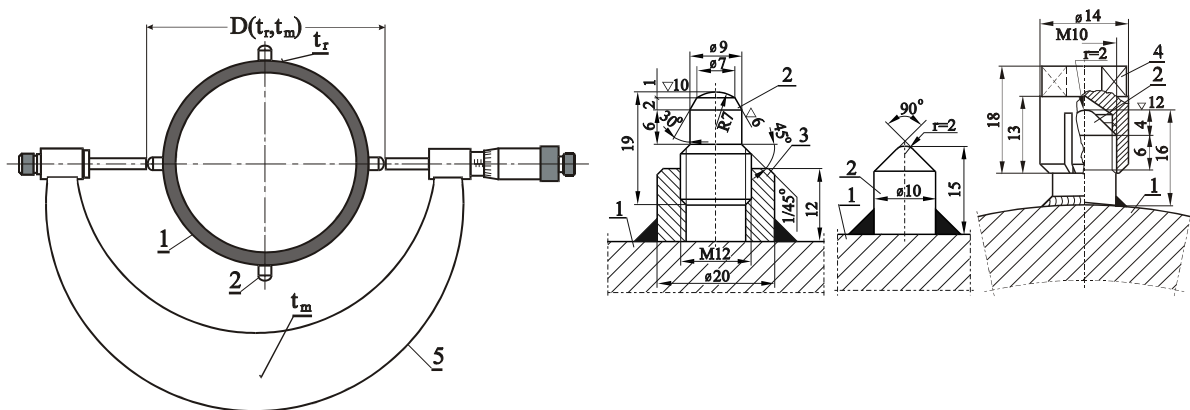
Efektom kompleksowej diagnostyki wysokociśnieniowych rurociągów parowych powinien być raport opisujący bieżący ich stan i dający podstawę do stwierdzenia czy rurociąg spełnia wymagany stopień bezpieczeństwa i może być dopuszczony do dalszej eksploatacji.

2.3. Metodyka badań odkształceń pełzania

Widocznym objawem pełzania wysokociśnieniowych rurociągów parowych jest powolny przyrost ich średnicy. Fakt ten wykorzystuje się do oceny postępu tego zjawiska z upływem czasu eksploatacji. Wśród metod pozwalających na określenie odkształceń pełzania, tych wykorzystywanych obecnie w przemyśle, testowanych kiedyś i nie przyjętych w praktyce do stosowania, jak i tych nowych, będących dopiero na etapie prób, niekiedy laboratoryjnych, można wyróżnić: pomiary średnic na czopach pomiarowych [14, 15, 49, 54, 65], pomiary obwodu lub średnicy rury za pomocą specjalnych przyrządów [31, 32, 72], pomiary odkształceń z wykorzystaniem czujników tensometrycznych [12, 13], czujników pojemnościowych [19, 44, 64], interferometru Moire'a [20], pary czopów pomiarowych do nadzorowania wybranego fragmentu obwodu [34] oraz bezkontaktową metodę wykorzystującą promieniowanie rentgenowskie [74]. Wymienione metody, ich zalety i wady, zostały szerzej zaprezentowane we współautorskiej pracy [34]. Można tutaj jeszcze dodać, że w praktyce przemysłowej, w ocenie pełzania rurociągów parowych, zasygnalizowane metody, nie wnikając w zagadnienia dotyczące

np. ich przydatności w trakcie długotrwałej pracy czy też ich dokładności, są o wiele chętniej stosowane w rutynowej kontroli niż badania niszczące [6].

Jedną z bardziej rozpowszechnionych metod kontroli pełzania rurociągów parowych w energetyce krajowej jak i zagranicznej są pomiary odkształceń trwałych dokonywane na czopach pomiarowych [15, 54]. Przeprowadzane okresowo pozwalają określić degradację materiału, z jakiego wykonany jest rurociąg, ocenić jego przydatność do dalszej pracy, a także oszacować jego trwałość rozporządzalną. Zwykle do pomiarów używane są mikrometry, rys. 2, a rzadziej kabłąki pozwalające kontrolować osiągnięcie przez rurociąg odkształcenia o określonej wartości [41]. Czopy, których przykładowe konstrukcje pokazano na rys. 2, winny być wykonane z wysokostopowych, żaroodpornych stali, np. 1H18N9T tak, aby zapewnić niezmienność ich stanu w ciągu wieloletniej pracy. Stosowane są rozwiązania proste, bez osłony i możliwości ustawienia wymiaru początkowego, jak również konstrukcje bardziej złożone, np. z gniazdem na czopy nastawne gwintowane i z osłoną zabezpieczającą. Zazwyczaj czopy instalowane są na rurociągach w dwóch, prostopadłych do siebie kierunkach, usytuowanych w płaszczyźnie prostopadłej do osi rury. Za granicą spotyka się układy z czopami rozmieszczonymi, co 45° [65].



Rys. 2. Zasada pomiaru odkształcenia pełzania rurociągu oraz przykłady konstrukcji czopów pomiarowych (nastawnego, stałego i stałego z osłoną zabezpieczającą): 1 – rurociąg, 2 – czop, 3 – gniazdo, 4 – osłona, 5 – mikrometr, t_r i t_m – temperatura ścianki rury i kabłąka mikrometru

Komplet czopów pomiarowych, tworzących układ (punkt) pomiarowy, zaleca się umieszczać w takich miejscach rurociągu, w których występują największe obciążenia lub grubość ścianki jest najmniejsza. Nie powinny być one montowane w okolicach spoin, podparć czy zawiesznień. Zazwyczaj instalowane są one na prostych odcinkach rurociągów

i na prostkach elementów giętych. Rzadko można je spotkać w miejscach przegięć rur lub na środku łuków i kolan, chociaż właśnie tam odkształcenia są większe [41]. W energetyce krajowej najczęściej spotykaną konstrukcją są czopy pomiarowe stałe bez lub z osłoną zabezpieczającą. Zaletą tych ostatnich jest mniejsza podatność na uszkodzenia, w tym także przypadkowe, dlatego one powinny być stosowane w pierwszej kolejności.

Dokładność omawianej metody zależy od poprawnego wykonania i zainstalowania czopów pomiarowych, od dokładności mikrometru i miernika temperatury oraz staranności przeprowadzanych okresowo pomiarów [41]. Płaskie zakończenie czopa utrudnia właściwe przyłożenie przyrządu pomiarowego, co może być przyczyną dużych błędów, nawet do 0,1 mm. Z kolei końcówki ostre lub o zbyt małym promieniu są bardziej podatne na uszkodzenia. Przemysłowe warunki pomiarów powodują, że przyjmowana powszechnie dokładność mikrometrów, równa $\pm 0,01$ mm, może być niekiedy gorsza [41]. Zaleca się, aby przed przystąpieniem do kontroli średnic na czopach, schłodzić rurociąg poniżej $30 \div 50$ °C [49]. Najkorzystniej jest gdy jego temperatura i mikrometru, a także otoczenia są 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, gdy wykonywane są w różniących się warunkach, należy przeliczać je na wspomniany warunek odniesienia.

Pomiary wg opisanej metodyki są prowadzone od wielu lat w ramach prac realizowanych w Instytucie Aparatury Przemysłowej i Energetyki Politechniki Krakowskiej. Są one nadal kontynuowane, w tym z udziałem autora niniejszej pracy. Ich opis zawarto w rozdziale 3 niniejszej pracy, a wyniki stanowią podstawę do porównań z wynikami przeprowadzonych obliczeń numerycznych.

Przykład arkusza pomiarowo-obliczeniowego wykorzystywanego w diagnostyce pełzania rurociągów parowych przedstawiono w załączniku 1. Zawiera on informacje dotyczące badanego obiektu tj. rzeczywiste wymiary początkowe w płaszczyźnie zainstalowania czopów, parametry pracy, datę oddania do eksploatacji, schemat rurociągu wraz z naniesionymi punktami kontroli odkształcenia. W tabeli odnotowywane są podstawowe dane, jak np.: daty kolejnych pomiarów, czas pracy, warunki w jakich przeprowadzono pomiary, tj. temperatury: ścianki rury i mikrometru oraz zmierzone na czopach pomiarowych średnice zewnętrzne.

Po przeliczeniu danych pomiarowych na warunek odniesienia wg zależności (12), niezależnie dla każdego z obu wzajemnie prostopadłych do siebie kierunków badań (rys. 2), oblicza się trwałe odkształcenia pełzania (ε_i) zgodnie ze wzorem (13) oraz następnie ich wartość średnią (ε):

$$D_i(t_o) = \frac{D_i(t_r, t_m) + b}{1 + \beta_r(t_r - 20) - \beta_m(t_m - 20)} \quad (12)$$

gdzie:

- $D_i(t_r, t_m)$ – średnica zmierzona na czopach pomiarowych w warunkach prowadzonych badań (t_r, t_m), w kierunku i -tym ($i = 1$ lub $i = 2$) [mm],
 b – poprawka mikrometra w temperaturze odniesienia $t_o = 20$ °C [mm],
 t_r i t_m – temperatura, odpowiednio: ścianki rury i kabłąka mikrometru [°C],
 β_r i β_m – współczynnik cieplnej rozszerzalności liniowej, odpowiednio: materiału rurociągu i materiału kabłąka mikrometru [mm/(mm·K)].

$$\varepsilon_i = \frac{D_{i(1)}(t_o) - D_{i(n)}(t_o)}{D_z} = \frac{\Delta D_z}{D_z} \cdot 100\% \quad (13)$$

gdzie:

- $D_{i(1)}(t_o), D_{i(n)}(t_o)$ – średnica na czopach pomiarowych (dla $i = 1$ lub $i = 2$), po przeliczeniu na warunek odniesienia ($t_o = 20$ °C), wyznaczona na podstawie danych, odpowiednio: z 1 pomiaru (wykonanego przed oddaniem obiektu do eksploatacji) i z n -tego pomiaru (po pewnym czasie eksploatacji) [mm],
 ΔD_z – przyrost zewnętrznej średnicy rury po upływie pewnego czasu pracy [mm],
 D_z – rzeczywista średnica rurociągu przed oddaniem go do eksploatacji (obliczana jako średnia ze średnic zmierzonych w kierunkach zainstalowania czopów pomiarowych) [mm].

$$\varepsilon = \varepsilon_{sr1-2} = 0,5 \cdot (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \quad (14)$$

gdzie:

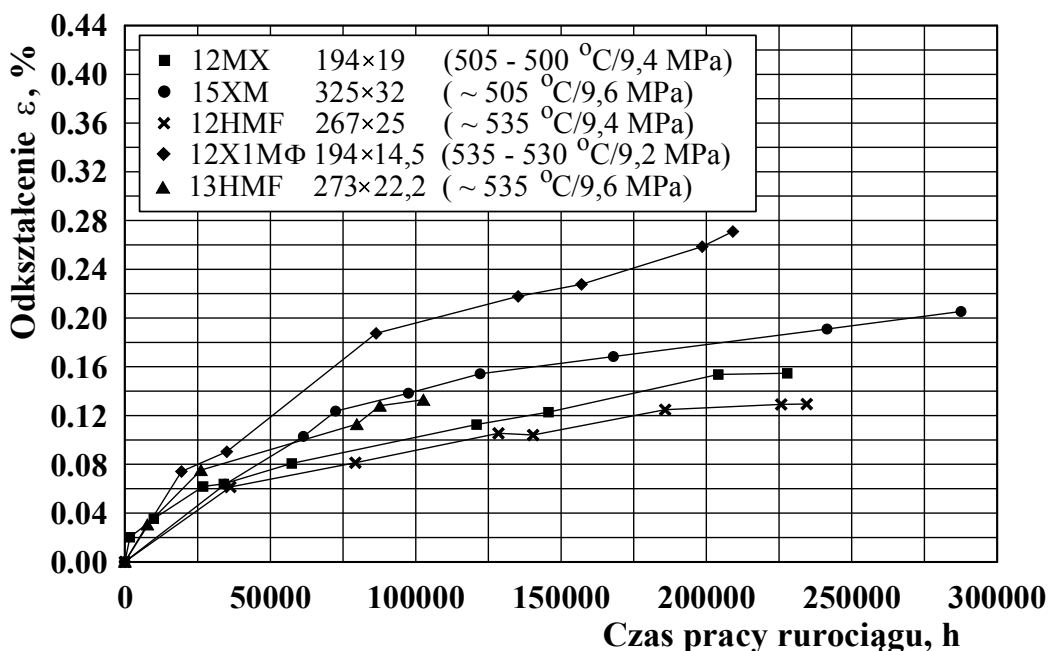
ε_1 i ε_2 – odkształcenia trwałe pełzania (wartości składowe) wyznaczone na podstawie danych pomiarowych odpowiadających prostopadłym do siebie i osi rurociągu kierunkom, odpowiednio: pierwszemu (1) i drugiemu (2) [%].

W praktyce przemysłowej kierunki te z uwagi na usytuowanie nadzorowanych elementów nazywane są, w przypadku rurociągów ułożonych poziomo jako: pionowy (kierunek pierwszy) i poziomy (kierunek drugi) lub w przypadku rurociągów ułożonych pionowo jako: prostopadły (kierunek pierwszy) i równoległy (kierunek drugi) do wzdłużnej osi hali np. kotłowni lub maszynowni.

Otrzymane rezultaty korzystnie jest przedstawić w postaci tzw. krzywych pełzania, które dla danych uzyskiwanych z badań pełzania rurociągów przemysłowych można określić jako eksploatacyjne lub ruchowe. W ten sposób łatwiej jest wychwycić nieregularność uzyskiwanych rezultatów, a także dokonywać ich różnych porównań. Na podstawie przeglądu literatury zagranicznej należy tutaj dodać, że stosunkowo mało jest prac prezentujących ruchowe krzywe pełzania [32, 58, 66, 69÷73, 76, 77]. W Polsce są to w zasadzie publikacje pracowników Instytutu Aparatury Przemysłowej i Energetyki Politechniki Krakowskiej [40, 41, 43, 49, 50, 63]. Można też spotkać publikacje zawierające krzywe pełzania uzyskane w „drodze” prób pełzania przeprowadzanych w laboratoriach [22, 61, 62].

3. Analiza wyników wieloletnich badań pełzania wysokociśnieniowych rurociągów parowych

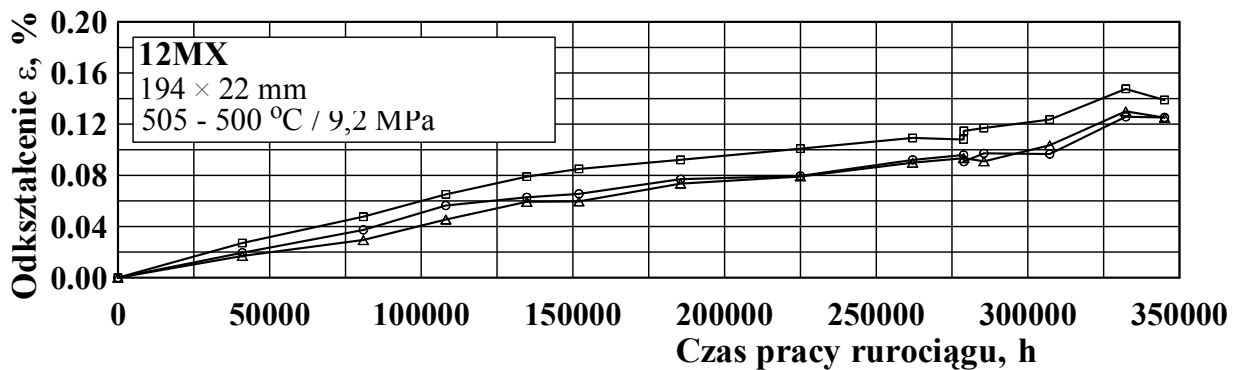
Z badań pełzania wysokociśnieniowych rurociągów parowych wynika, że przebiegi trwałych odkształceń pełzania, z uwagi na osiągane wartości, charakteryzuje duża różnorodność. Naturalnie różnice te, przy zachowaniu typowego dla zjawiska pełzania charakteru, związane są np.: z gatunkiem materiału zastosowanego na rurociągi, ich wymiarami czy też parametrami eksploatacji. Przykłady przebiegów takich krzywych przedstawiono na rys. 3 [41]. Należy zauważyć, że pokazane na nim wartości trwałego odkształcenia, osiąganego po różnym czasie pracy, są wartościami uśrednionymi, wyznaczanymi na podstawie pomiarów w dwóch, wzajemnie prostopadłych kierunkach.



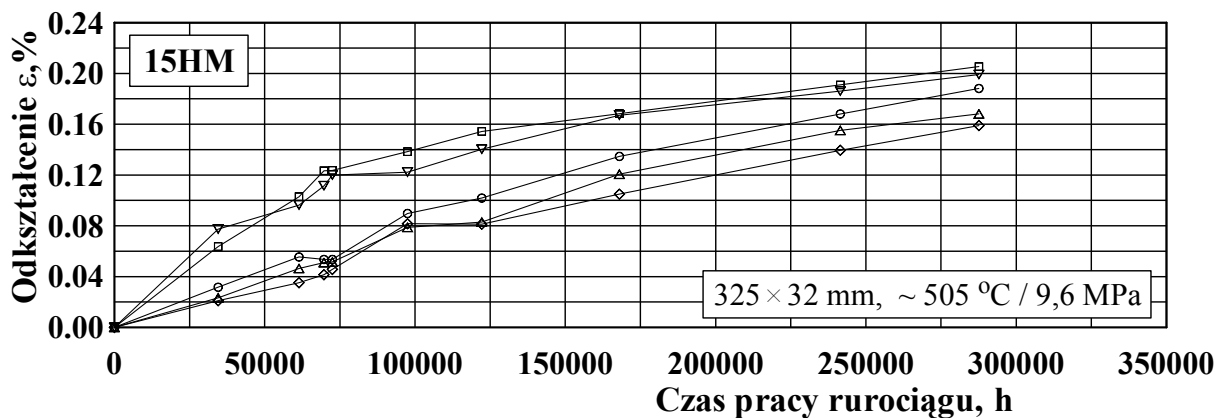
Rys. 3. Przykłady ruchowych krzywych pełzania wysokociśnieniowych rurociągów parowych (czas obliczeniowy rurociągów: $\tau_{obl} = 100\,000$ godz.)

W przypadku kontroli pełzania wysokociśnieniowych rurociągów parowych, jak już wspomniano, nadzorem diagnostycznym zwykle obejmuje się większą liczbę elementów danego obiektu. Z przeprowadzonej analizy wynika, że w takiej sytuacji, mimo tego samego materiału (i dotrzymywanego zazwyczaj warunku wykonywania elementów rurowych rurociągu z jednego wytopu), tych samych nominalnych wymiarów geometrycznych i takich samych parametrów eksploatacji, osiągane trwałe odkształcenia

zwykle różnią się. Krzywe pełzania dla materiału poszczególnych elementów rurociągu tworząc wiązkę, zajmują pewien obszar, jak to przedstawiają przykłady na rys. 4 i 5.



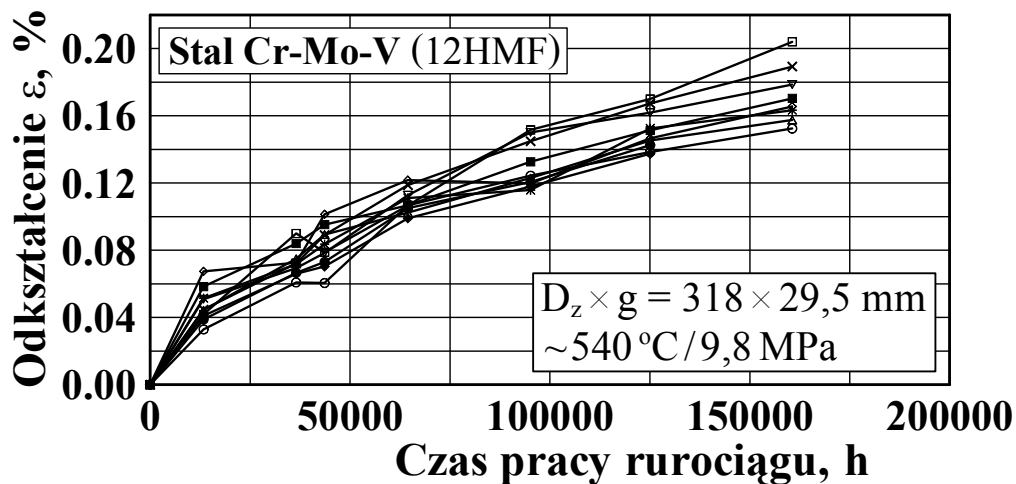
Rys. 4. Krzywe pełzania kontrolowanych elementów wysokociśnieniowego rurociągu parowego
(wartości uśrednione)



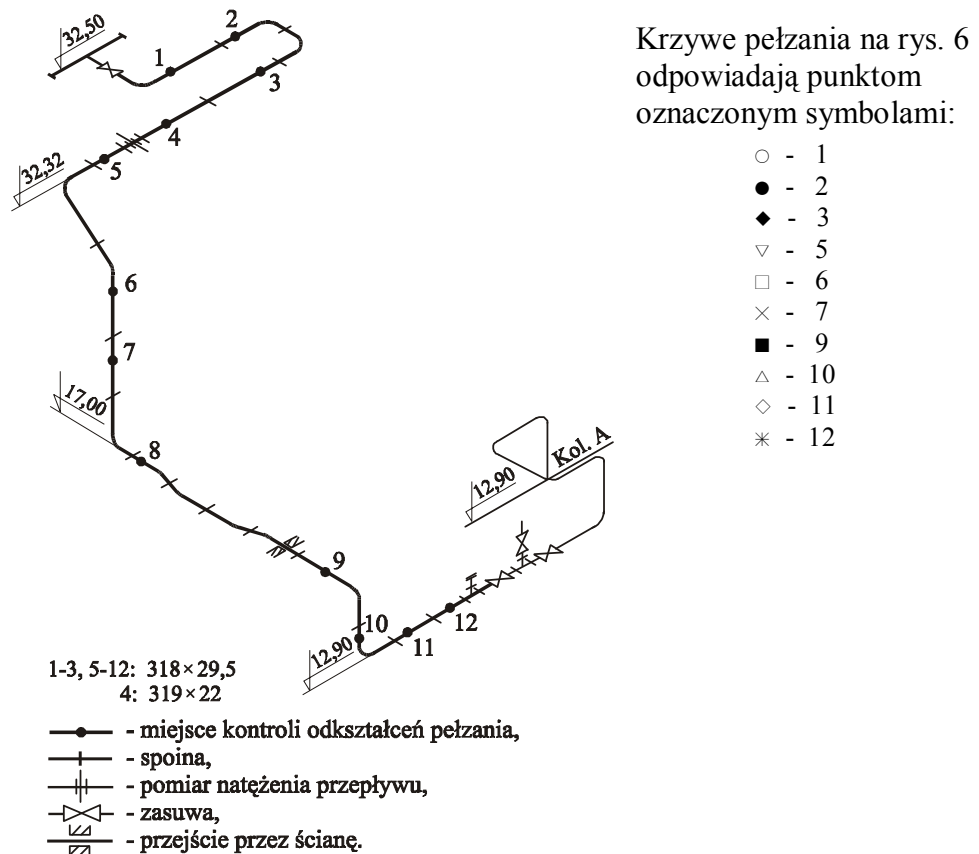
Rys. 5. Krzywe pełzania kontrolowanych elementów wysokociśnieniowego głównego kolektora parowego
(wartości uśrednione)

Jak widać z rys. 4 i 5, zakres zmian osiąganego trwałego odkształcenia pełzania dla elementów jednego obiektu (chodzi tutaj o obszar zajmowany przez wszystkie krzywe pełzania elementów poddanych nadzorowi) może być w jednych przypadkach stosunkowo nieduży, ale w innych dość znaczny. Najprościej ten obserwowany rozrzut, bez wnikania w szczegóły, można by wytłumaczyć nakładaniem się różnych czynników związanych np.: z niejednorodnością materiału, odstępstwami wymiarowymi czy dodatkowymi, trudnymi do określenia obciążeniami. Niekorzystny wpływ na wyznaczane wartości odkształceń (ich rozrzut) mogą mieć również warunki wykonywania pomiarów [41]. Trudniej podaną powyżej interpretację zaakceptować w przypadkach większych różnic w przebiegach krzywych pełzania poszczególnych elementów danego obiektu, takich chociażby jak

np. widocznych na rys. 5. Należy tutaj też dodać, że brak jest jednoznacznej zależności pomiędzy położeniem krzywych w wiązce a usytuowaniem kontrolowanych elementów na trasie rurociągu. Z logicznego punktu widzenia, biorąc pod uwagę nieznaczne, ale występujące obniżanie się temperatury i ciśnienia przesyłanej pary przegrzanej, najwyżej powinny znajdować się te krzywe, które reprezentują zachowanie się elementów gdzie wymienione parametry są najwyższe. Dlatego w przypadku rurociągów łączących np. kotły z turbinami, byłyby to elementy najbliższe tych pierwszych. Jednakże w praktyce wielokrotnie stwierdzano, że osiągnane z upływem czasu eksploatacji średnie wartości trwałego odkształcenia pełzania elementów usytuowanych w dalszej części rurociągu były wyższe od tych, które odpowiadają tym znajdującym się na jego początku lub odwrotnie. Przykład taki pokazano na rys. 6, przy czym schemat rurociągu z rozmieszczeniem punktów pomiarów pełzania widoczny jest na rys. 7. W uzupełnieniu można dodać, że w podobnych warunkach, tj. przy takiej samej trasie rurociągu, tych samych materiałach, wymiarach rur i parametrach eksploatacji, trwałe odkształcenia pełzania określonego elementu w jednym przypadku mogą osiągać górny, a w innym dolny zakres obserwowanych zmian.

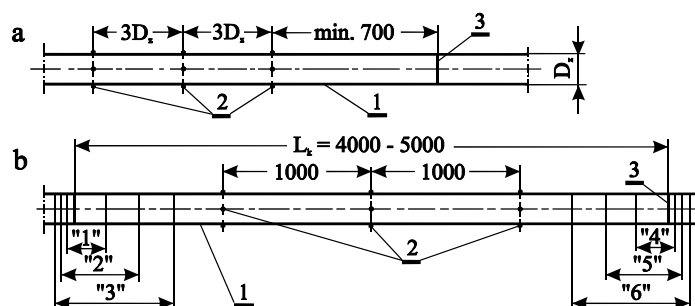


Rys. 6. Krzywe pełzania (przebiegi dla wartości uśrednionych) elementów wysokociśnieniowego rurociągu parowego (aksonometryczny schemat rurociągu z usytuowaniem punktów pomiarowych i przyjętych dla nich symboli, jakie odpowiadają poszczególnym krzywym, przedstawiono na rys. 7)



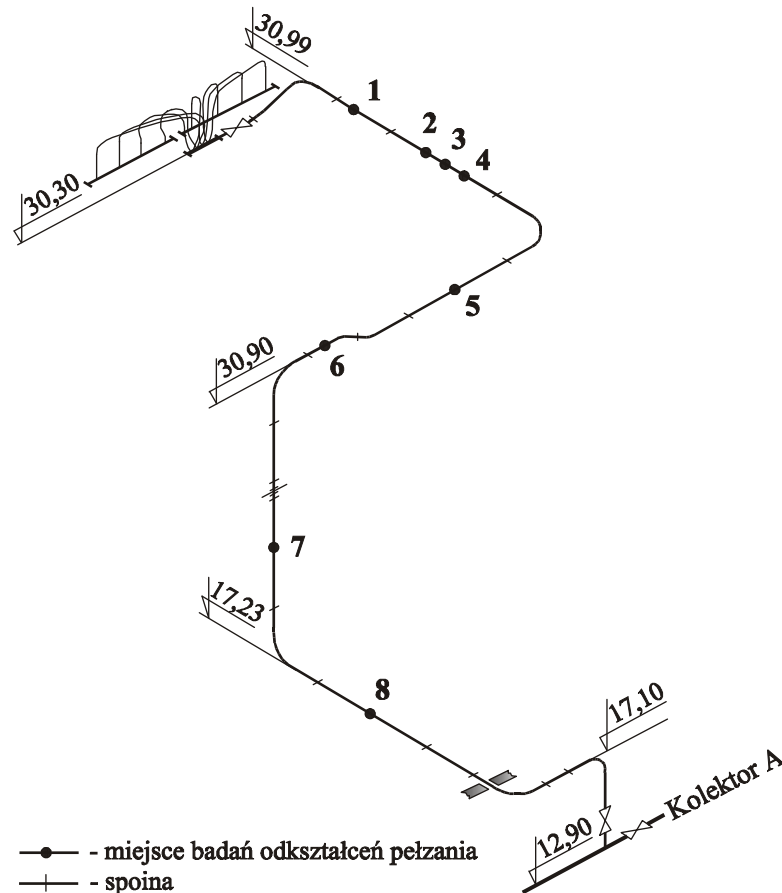
Rys. 7. Schemat rurociągu parowego z naniesionymi miejscami kontroli diagnostycznej pełzania jego wybranych elementów (punkty 1 ÷ 12)

Podobne zachowanie, do opisanego powyżej, dotyczy tzw. odcinków kontrolnych, na których przykładowe położenie czopów pomiarowych do kontroli pełzania przedstawiono na rys. 8 [14, 52, 77, 78]. Są to przypadki bardzo ciekawe z uwagi na fakt, że dotyczy to tego samego elementu, zazwyczaj usytuowanego na początku danego obiektu (rys. 9).



Rys. 8. Schematy odcinków kontrolnych przewidzianych do instalowania w rurociągu parowym:

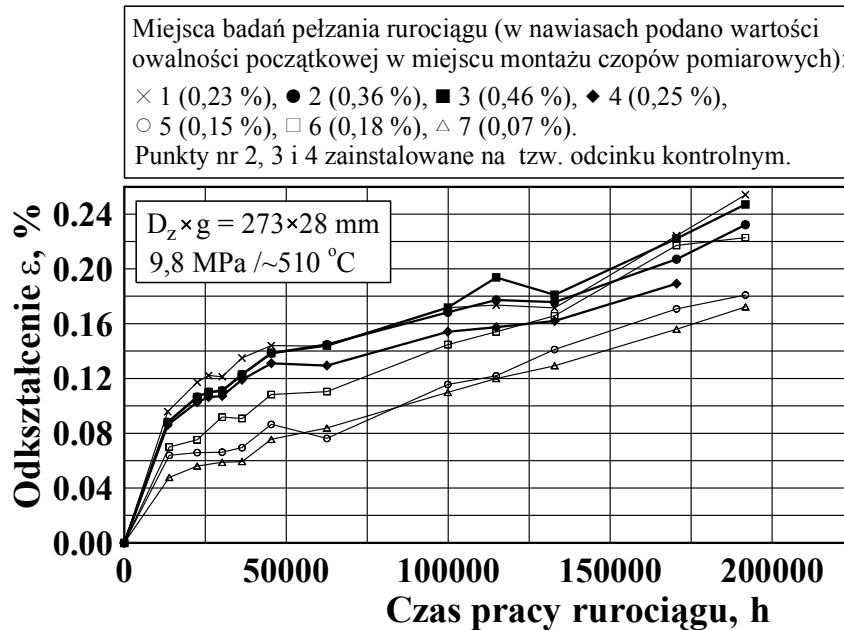
- 1 – odcinek kontrolny, 2 – miejsca instalowania czopów pomiarowych do badań pełzania,
- 3 – spoina, "1" ÷ "6" - kolejność pobierania wycinków do badań niszczących



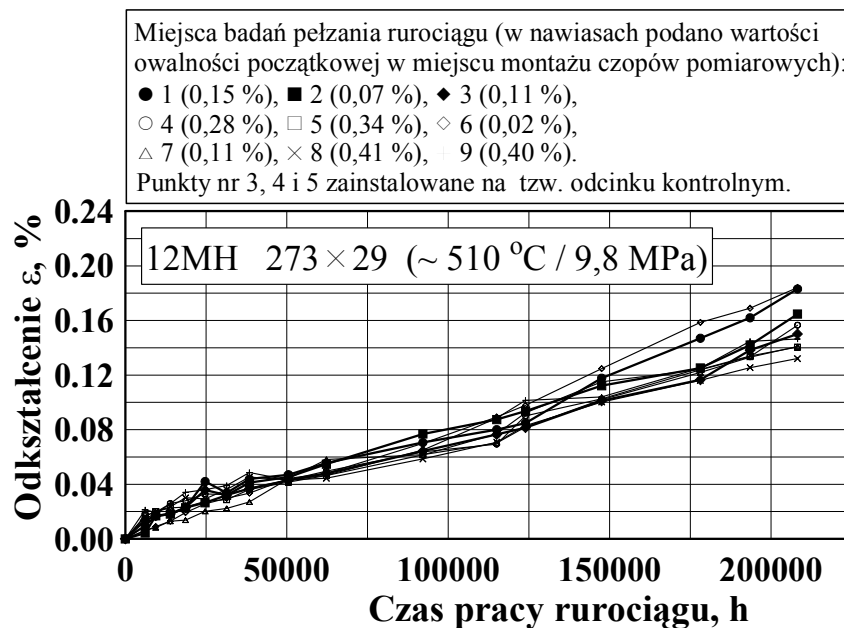
Rys. 9. Schemat wysokoprężnego rurociągu parowego z oznaczeniem miejsc, w których zainstalowano czopy pomiarowe do badań odkształceń i prędkości pełzania, w tym usytuowanych na tzw. odcinku kontrolnym (punkty nr 2 ÷ 4 znajdujące się na tym samym elemencie)

W założeniu odcinki kontrolne traktuje się często jako „reprezentanta” całego rurociągu, stąd ich stan techniczny przenoszony jest pośrednio na pozostałe elementy rurowe. Z nich też przewidywane jest pobieranie po pewnych okresach pracy wycinków do badań metalograficznych i wytrzymałościowych. Zatem w założeniu winien to być element „najsłabszy”, a osiągnięte przez niego trwałe odkształcenia pełzania powinny być największe lub przynajmniej jego krzywe pełzania, wyznaczone niezależnie w trzech, jak widać z rys. 8, niezbyt odległych od siebie przekrojach niezależnie, usytuowane w górnym zakresie obszaru zajmowanego przez krzywe wszystkich kontrolowanych elementów rurociągu. Z analizy pełzania takich odcinków w porównaniu z innymi elementami można stwierdzić, że nie zawsze ten warunek jest spełniony. Różne przykładowe zachowania odpowiadające omawianemu zagadnieniu przedstawiono na rys. 10 ÷ 12. Dodatkowo podano również na nich, jak i na kolejnych rysunkach, wartości owalności początkowej

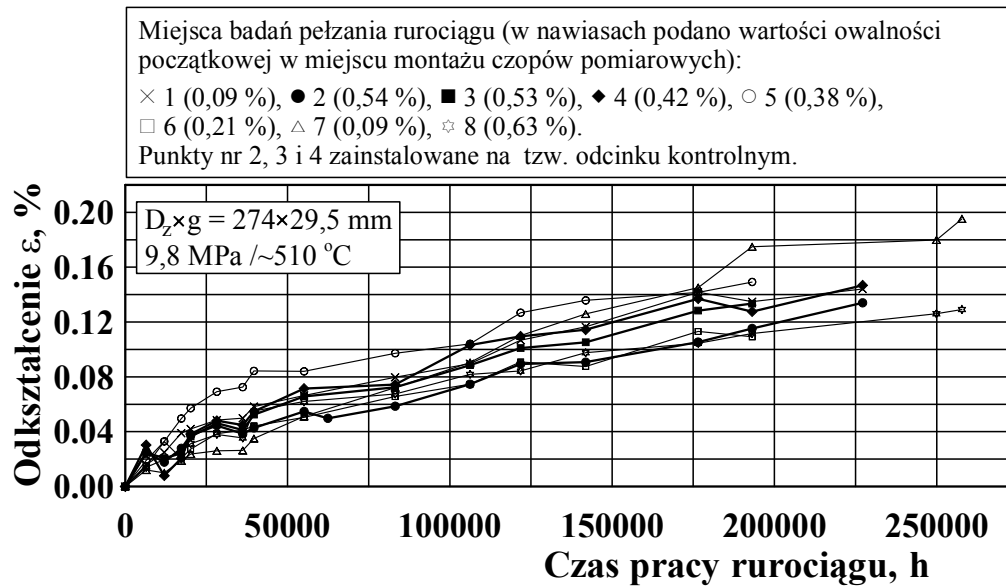
przekroju poprzecznego (a_p) w miejscach prowadzonych badań, wyznaczonych na podstawie rzeczywistych średnic w kierunkach zainstalowanych czopów pomiarowych (zagadnienie to, w tym definicja tej wielkości, zostało przedstawione w rozdziale 4 niniejszej pracy).



Rys. 10. Przebiegi krzywych pełzania odcinka kontrolnego w porównaniu z pozostałymi nadzorowanymi elementami rurociągu parowego wykonanego ze stali Cr-Mo



Rys. 11. Przebiegi krzywych pełzania odcinka kontrolnego w porównaniu z pozostałymi nadzorowanymi elementami rurociągu parowego wykonanego ze stali Cr-Mo

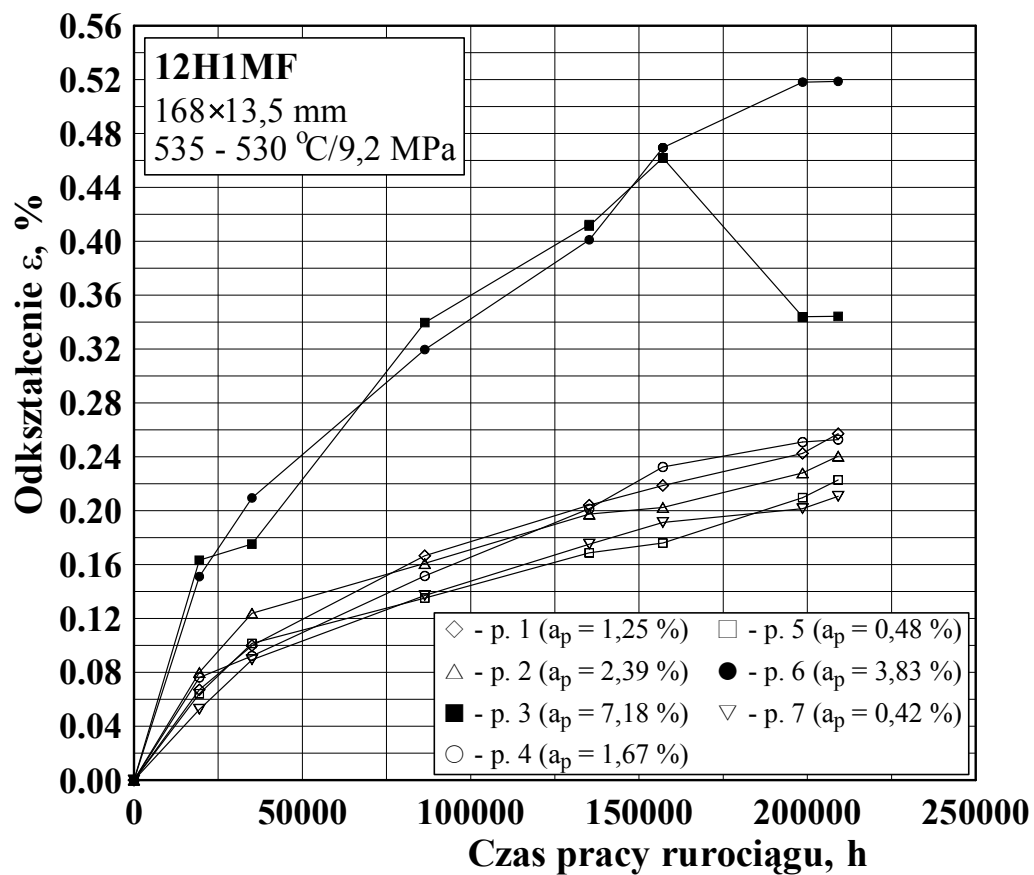


Rys. 12. Przebiegi krzywych pełzania odcinka kontrolnego w porównaniu z pozostałymi nadzorowanymi elementami rurociągu parowego wykonanego ze stali Cr-Mo

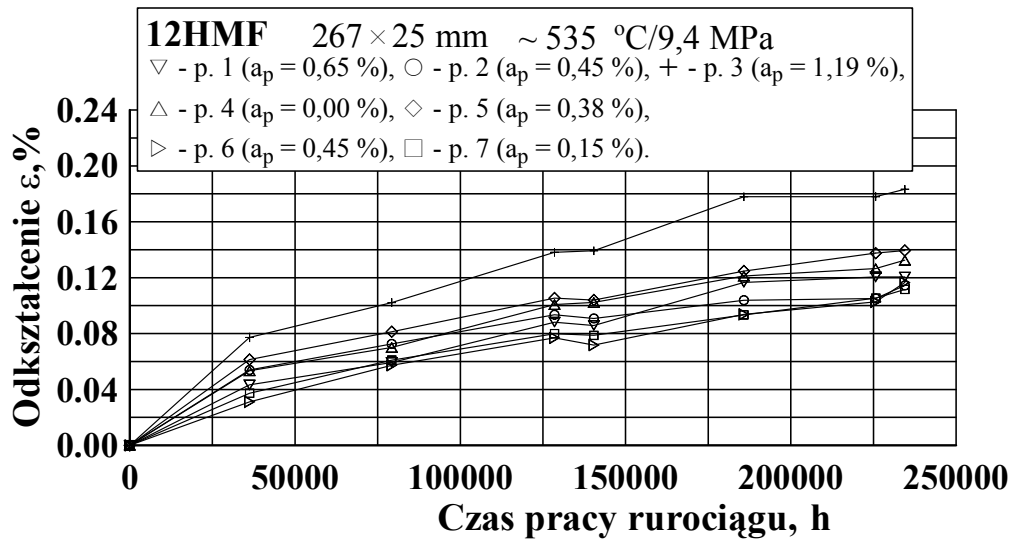
Przebiegi krzywych pokazanych na rys. 10 ÷ 12 potwierdzają wcześniejsze uwagi dotyczące obszarów zajmowanych przez nie. Ponadto, na ich podstawie można stwierdzić, że krzywe reprezentujące odcinki kontrolne w niektórych przypadkach mogą osiągać najwyższe wartości (rys. 10), a w innych obejmują cały obszar zmian wyznaczony przez pozostałe krzywe (rys. 12). Można też zauważyć, że również różnice trwałych odkształceń pełzania, mimo iż dotyczą tego samego odcinka, przy odległościach pomiędzy miejscami badań nie przekraczających jego trzech średnic zewnętrznych, mogą być różne, tj. od stosunkowo niewielkich (rys. 10 i 11) do znacznych (rys. 12).

Z analizy licznych danych pomiarowych wynika, że niekiedy pewne krzywe pełzania odbiegają, często dość znacznie od obszaru, w którym znajdują się pozostałe. Jak stwierdzono, nie jest to uzależnione od położenia kontrolowanych elementów na trasie rurociągów, których one dotyczą, ale od początkowej wartości owalności ich przekroju poprzecznego. W wyjaśnieniu przyczyn takiego zachowania pomocne było wykonanie dla potrzeb niniejszej pracy pomiarów rzeczywistej geometrii rur, w tym szczególnie w miejscach zainstalowania czopów pomiarowych (jest to przedmiotem szczegółowej analizy zaprezentowanej w rozdziale 4 pracy). Wybrane przykłady przebiegów krzywych pełzania (chodzi tutaj o wartości uśrednione) rurociągów z wbudowanymi elementami charakteryzującymi się owalnością często znacznie wyższą w porównaniu z pozostałymi, przedstawiają rys. 13 i 14.

Należy tutaj zauważyć, że w czasie kiedy instalowano w tych miejscach czopy pomiarowe, nie zwracano uwagi na ewentualny wpływ owalu rury na osiągane wartości trwałego odkształcenia pełzania. Dopiero ostatnio jest to przedmiotem, na obecną chwilę nielicznych, w tym współautorskich publikacji [2, 35, 36, 41, 42, 45, 46]. Trzeba też dodać, że do obecnej chwili wpływ tego parametru, w tym także nierównomierności grubości ścianki na obwodzie, czy też w ogólności zmian rzeczywistej geometrii przekroju wzdłuż elementów rurociągów, na pełzanie wyznaczone w określonym miejscu danego elementu, nie jest uwzględniany w wyborze takich miejsc kontroli diagnostycznej, czy też w obliczeniach np. możliwej trwałości lub w ocenie bezpieczeństwa eksploatacji, zwłaszcza po przekroczeniu założonego czasu pracy.



Rys. 13. Przebiegi krzywych pełzania (wartości uśrednione) elementów charakteryzujących się różnymi początkowymi wartościami owalności przekroju poprzecznego



Rys. 14. Przebiegi krzywych pełzania (wartości uśrednione) elementów charakteryzujących się różnymi początkowymi wartościami owalności przekroju poprzecznego

Jak już wspomniano, wartości średnie odkształcenia pełzania uzyskuje się jako sumę składowych, z których każda wyznaczana jest na podstawie pomiarów w określonym kierunku. Zwykle chodzi o dwa kierunki, wzajemnie prostopadłe do siebie i osi przewodu. Bardzo interesujące są wyniki osiąganych wartości trwałych odkształceń pełzania, obliczane niezależnie dla danych każdego z „kierunków”. Ich analiza z uwzględnieniem geometrii przekroju poprzecznego w miejscu zainstalowania czopów pomiarowych pozwala niejednokrotnie z powodzeniem wyjaśnić różnorodność wcześniej pokazanych przebiegów krzywych pełzania, tak w odniesieniu do poszczególnych elementów danego obiektu, jak i do odcinka kontrolnego.

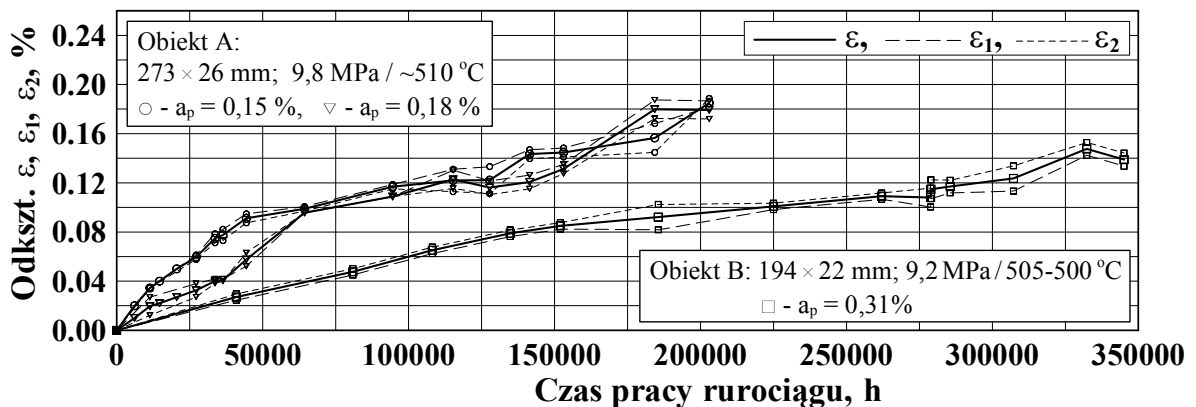
W wyniku przeprowadzonej analizy ruchowych krzywych pełzania rurociągów parowych, nadzorowanych w licznych miejscach, zauważono, że przebiegi wykreślane niezależnie na podstawie danych z obu kierunków pomiarów zależą istotnie, przy takich samych parametrach eksploatacji, od geometrii rurociągu w miejscu zainstalowania czopów pomiarowych. Należy dodać, że wynik ten potwierdza się w ponad 95 % przeanalizowanych przypadków (chodzi tutaj o ok. 250 miejsc prowadzonej kontroli pełzania wysokociśnieniowych rurociągów parowych). W pozostałych przypadkach nieścisłości najprawdopodobniej związane są z błędami pomiarów, tak tymi wykonanymi przed oddaniem obiektów do eksploatacji, jak i popełnionych w okresach późniejszych. Niestety, obecnie nie da się tego sprawdzić, co wynika z metodyki badań pełzania rurociągów (np. na wynik odkształcenia trwałego wyznaczonego po pewnym czasie

eksploatacji wpływają wartości uzyskane z pomiarów przed oddaniem obiektu do pracy). Można jednak dodać, że w pewnych przypadkach nietypowych przebiegów krzywych pełzania możliwe jest ich „naprawienie” [41], co pozwala włączyć je do grupy potwierdzającej podane wyżej spostrzeżenie.

Dla zaprezentowania zasygnalizowanego wyżej zagadnienia podzielono przeanalizowane dane na 3 grupy, które ze względu na wartość owalności początkowej miejsca zainstalowania czopów pomiarowych scharakteryzowano następująco (dla każdej grupy zaprezentowano odpowiednie przykłady przebiegów ruchowych krzywych pełzania, tak wartości średnich ε , jak i składowych, tj. ε_1 i ε_2):

- grupa 1 – niska początkowa owalność przekroju poprzecznego – w niniejszej pracy przyjęto, że chodzi o wartości w zakresie od $a_p = 0 \%$ do $a_p \cong 0,5 \%$ (rys. 15a ÷ 15c i rys. 16),
- grupa 2 – średnia początkowa owalność przekroju poprzecznego o wartości od ok. 0,5 % do ok. 2,5 % (rys. 16 oraz rys. 17a i 17b),
- grupa 3 – duża wartość początkowa owalności przekroju poprzecznego, tzn. większa niż 2,5 % (rys. 18).

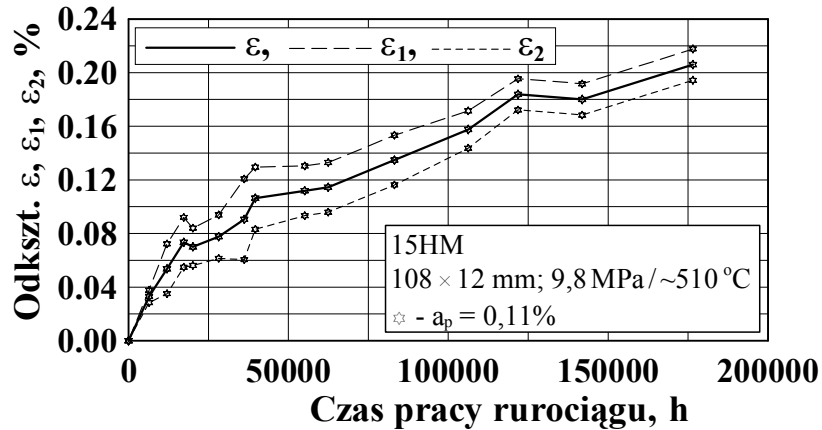
a)



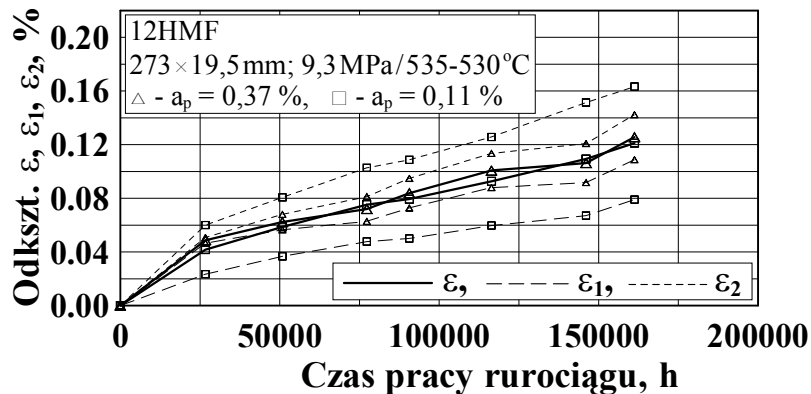
Rys. 15. Pełzanie elementów rurociągów parowych, zaliczonych do grupy 1, charakteryzujących się niską początkową wartością owalności przekroju poprzecznego (0 % ÷ 0,5 %) – przebiegi odkształcenia trwałego:

wartość średnia (ε) oraz jej składowe (ε_1 i ε_2), z których każda wyznaczona jest niezależnie na podstawie pomiarów w odpowiadającym jej kierunku

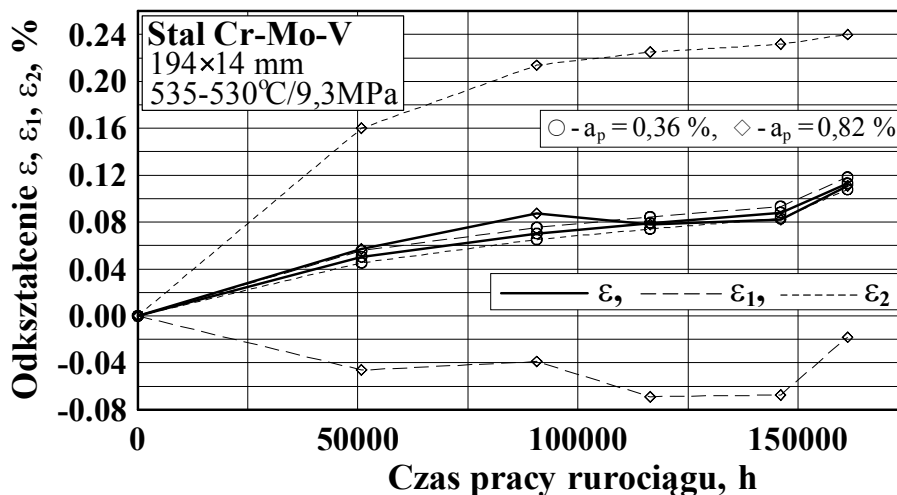
b)



c)

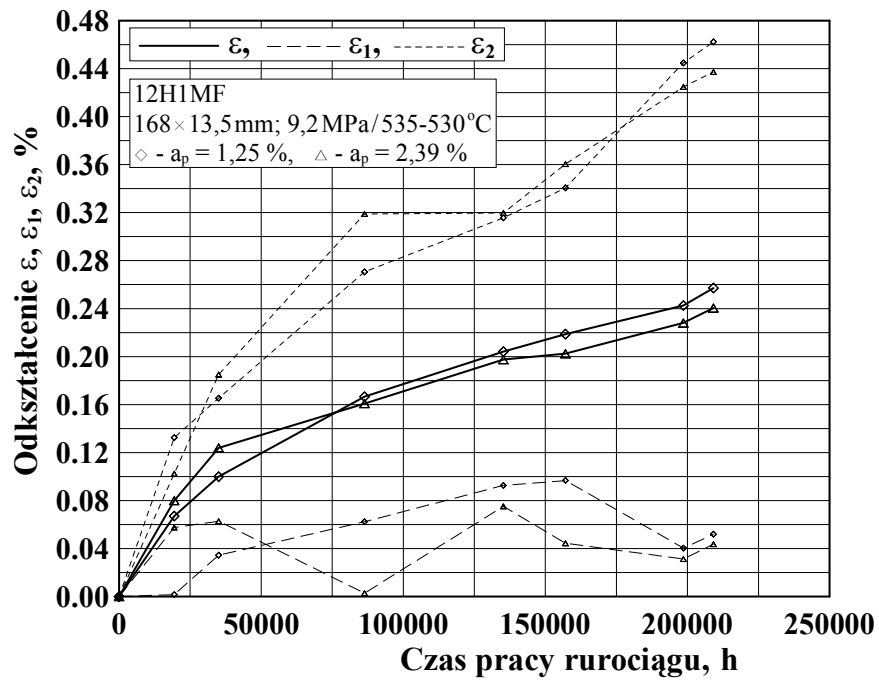


Rys. 15. Pełzanie elementów rurociągów parowych, zaliczonych do grupy 1, charakteryzujących się niską początkową wartością owalności przekroju poprzecznego (0 % ÷ 0,5 %) – przebiegi odkształcenia trwałego: wartość średnia (ε) oraz jej składowe (ε_1 i ε_2), z których każda wyznaczona jest niezależnie na podstawie pomiarów w odpowiadającym jej kierunku

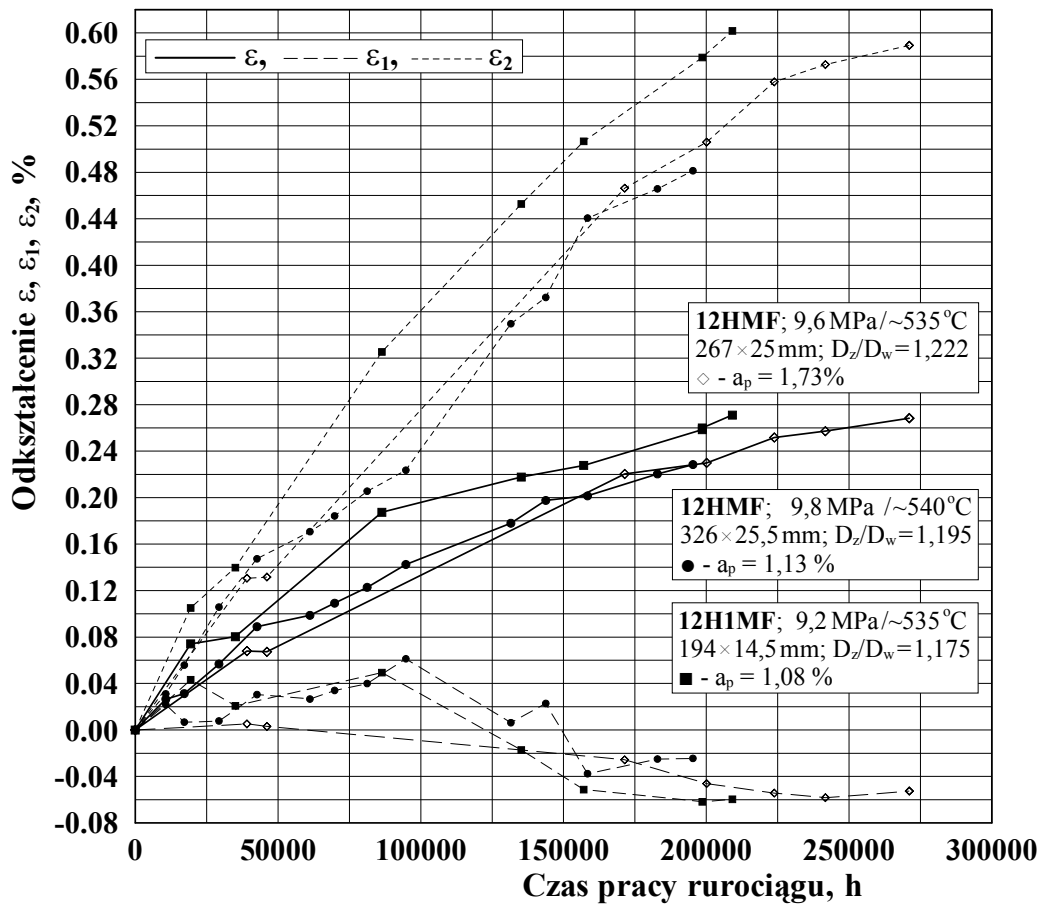


Rys. 16. Pełzanie elementów rurociągu parowego, zaliczonych do grupy 1 (niska wartość początkowej owalności przekroju poprzecznego, tj. 0 % ÷ 0,5 %) i grupy 2 (średnia wartość owalności początkowej, tj. w zakresie (0,5 % ÷ 2,5 %) – przebiegi odkształcenia trwałego: wartość średnia (ε) oraz jej składowe (ε_1 i ε_2)

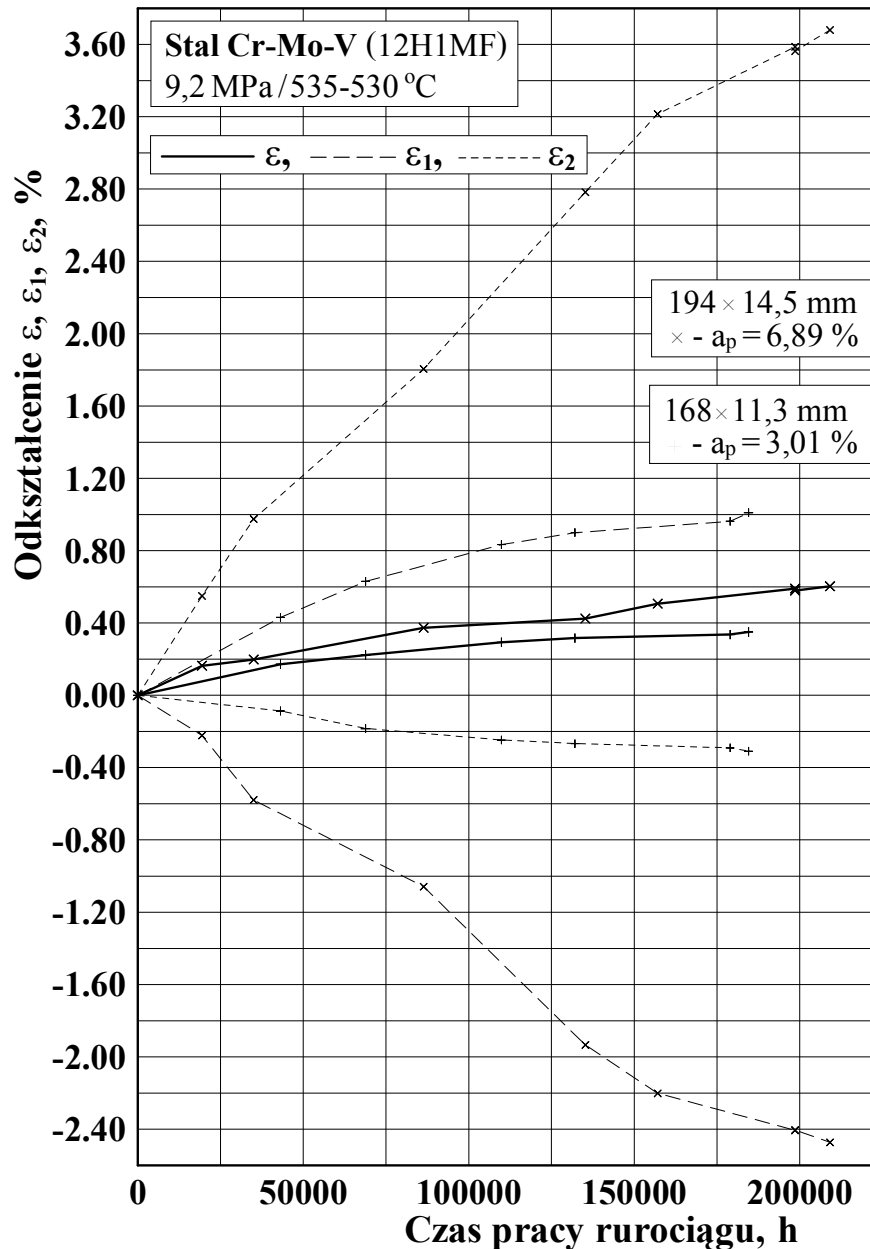
a)



b)



Rys. 17. Pełzanie elementów rurociągów parowych, zaliczonych do grupy 2, charakteryzujących się średnią wartością początkową owalności przekroju poprzecznego (ok. 0,5 % ÷ 2,5 %) – przebiegi odkształcenia trwałego: wartość średnia (ϵ) oraz jej składowe (ϵ_1 i ϵ_2)



Rys. 18. Pełzanie elementów rurociągów parowych, zaliczonych do grupy 3, charakteryzujących się dużą wartością początkową owalności przekroju poprzecznego (powyżej 2,5 %) – przebiegi odkształcenia trwałego: wartość średnia (ε) oraz jej składowe (ε_1 i ε_2)

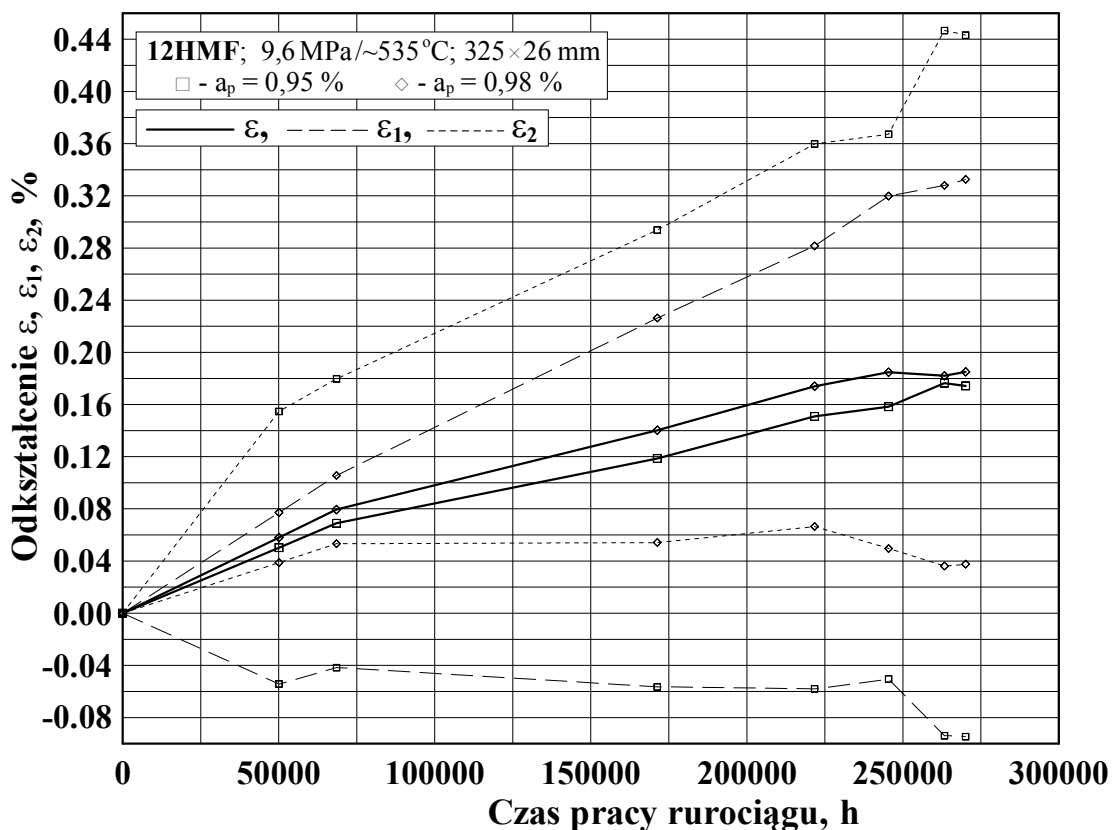
Przyjęte powyżej pojęcia niskiej, średniej i dużej wartości początkowej owalności przekroju poprzecznego rury w miejscu zainstalowania czopów pomiarowych, związane są z osiąganymi odkształceniami i charakterem przebiegu obu składowych krzywych pełzania (jak wspomniano, każda z nich wyznaczana jest na podstawie wyników pomiarów w określonym kierunku, i są one podstawą do uzyskania wartości średniej). Jak można zauważyć, na rys. 15 ÷ 18, w przypadku grupy 1 cechą charakterystyczną przebiegów

składowych krzywej pełzania jest ich podobny charakter oraz stosunkowo nieduże różnice w porównaniu z przebiegiem dla wartości średniej. Dla grupy 2 różnice te znacznie wzrastają, a jedna ze składowych może początkowo „opadać” a następnie „wzrastać”. W grupie 3 krzywe przebiegów składowych „rozchodzą się”, a różnice odkształceń są duże.

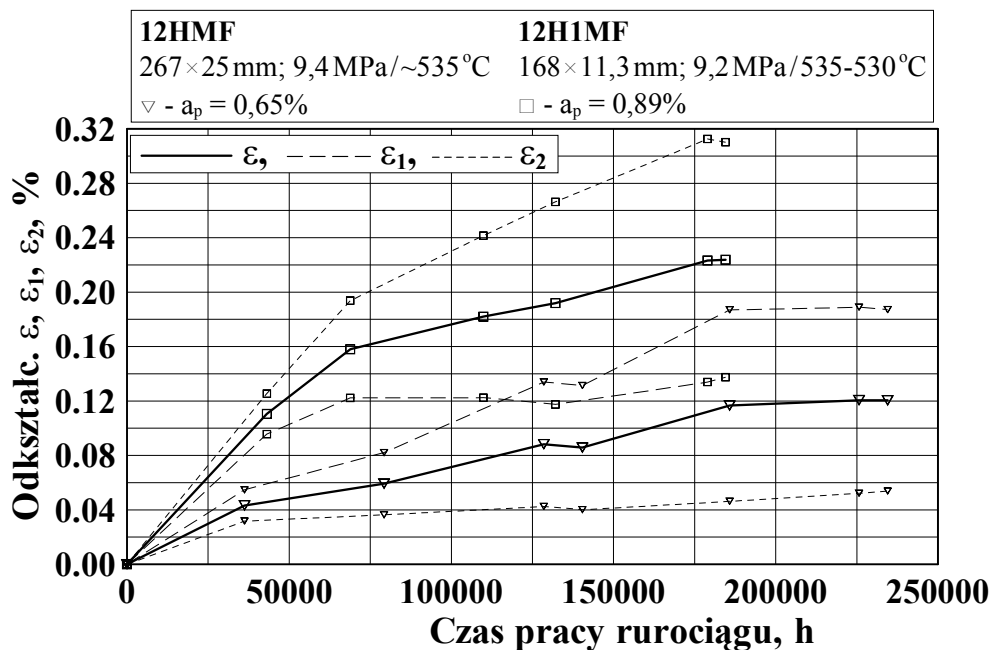
W przypadku grupy 2 zakres wartości owalności początkowej przekroju poprzecznego jest duży i można by dokonać jej podziału, jak to wcześniej zrobiono w jednej ze współautorskich publikacji [46], wydzielając grupę tzw. średnią podwyższoną, od 1,0 % do 2,5 %. Z uwagi jednak na podaną powyżej cechę tej grupy nie wydaje się to jednak konieczne i zaprezentowany podział wystarczający.

Przyjęte wartości graniczne początkowych owalności przekroju w miejscu dokonywanej kontroli pełzania dla poszczególnych grup nie są sztywne. Z uwagi na przyjęte kryterium, tj. wartość osiąganego odkształcenia trwałego oraz charakter przebiegu krzywych, mogą one różnić się od podanych 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 obciążone błędami. Stąd też, przykładowo, może zdarzyć się, że przebieg pełzania elementu, który z uwagi na średnią wartość początkowej owalności należałoby zaliczyć, wg przyjętego podziału, do grupy 2, będzie przypominał zmiany odpowiadające elementowi o owalności np. niskiej, tzn. charakterystyczne dla grupy 1. Przykład takiego zachowania pokazano na rys. 19a, dla przebiegów oznaczonych symbolem rombu, które można porównać z krzywymi pełzania pokazanymi na rys. 15. Jak można zauważyć ich charaktery są podobne. Jednocześnie na rys. 19a widoczne są również krzywe (oznaczone symbolem kwadratu) dla elementu o porównywalnej z poprzednim elementem owalności, ale ich przebiegi są właściwe dla tej grupy, tzn. grupy 2. Również na rys. 19b obserwuje się rozbieżności tego samego rodzaju, jak opisane dla przypadku rys. 19a.

a)

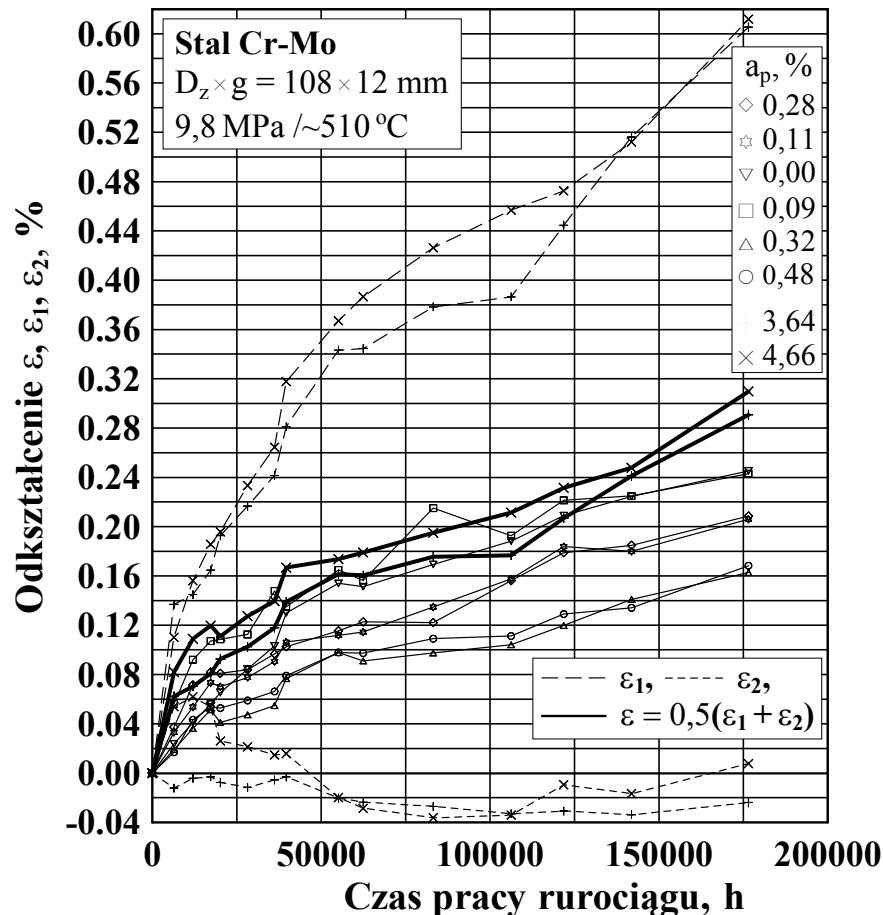


b)



Rys. 19. Przebiegi trwałego odkształcenia pełzania (wartości średnie ε oraz jej składowe ε_1 i ε_2) elementów rurociągów parowych o zbliżonych, średnich wartościach początkowej owalności przekroju poprzecznego (wg przyjętej w niniejszej pracy klasyfikacji)

O wiele rzadziej spotykany jest przypadek, kiedy z uwagi na wartość owalności początkowej element, wg przyjętego kryterium podziału, należy zaliczyć do grupy 3, a przebiegi jego krzywych pełzania są odpowiednie dla grupy 2. Przypadek taki przedstawiono na rys.20.



Rys. 20. Przebiegi pełzania elementów rurociągu parowego o różnej owalności początkowej przekroju poprzecznego: wartość średnia (ε) i jej składowe (ε_1 i ε_2 – dla elementów o najwyższych owalnościach)

Analiza przebiegów trwałych odkształceń pełzania, szczególnie w przypadku elementów o znacznej wartości owalności początkowej, tj. zaliczonych do grup 3 i 2, wskazuje, że owalność przekroju poprzecznego zmniejsza się z upływem czasu eksploatacji. Efektem tego jest „dążenie” elementów do przyjęcia kształtu koła. Zmianę tej wielkości w czasie dla kilku elementów wysokociśnieniowych rurociągów parowych pokazano na rys. 21 [42], przy czym do obliczeń wykorzystano zależność [41]:

$$a_n(\tau) = \frac{2 \cdot \{ [D_{zw} + D_{nzw}(\tau) - D_{1zw}] - [D_{zm} + D_{nzm}(\tau) - D_{1zm}] \}}{D_{zw} + D_{zm}} \cdot 100\% \quad (15)$$

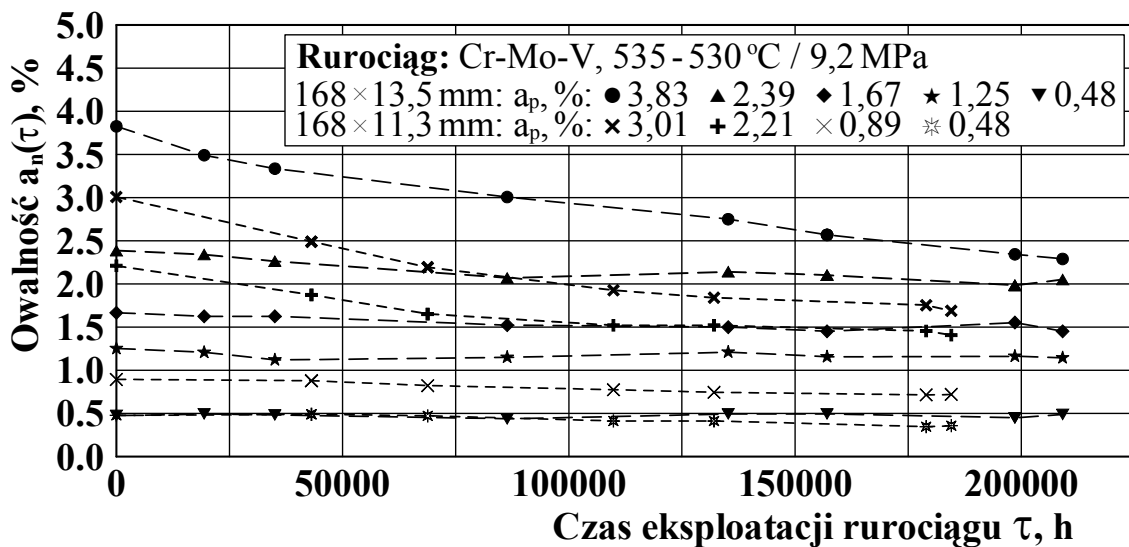
gdzie:

$a_n(\tau)$ – owalność przekroju poprzecznego rury po określonym czasie eksploatacji (dla $\tau = 0$ godz. wartość a_n jest równa wartości początkowej) [%],

D_{zw} i D_{zm} – średnica rurociągu w płaszczyźnie i na kierunku zainstalowanych czopów pomiarowych, zmierzona przed oddaniem obiektu do eksploatacji, odpowiednio: większa i mniejsza [mm],

D_{1zw} i D_{1nzw} – średnica zmierzona na czopach pomiarowych i przeliczona na warunek odniesienia wg równania (12), odpowiednio: przed oddaniem rurociągu do eksploatacji i po określonym czasie eksploatacji (obie wartości dla kierunku zgodnego z pomiarem D_{zw}) [mm],

D_{1zm} i D_{1nzm} – j w., ale dla kierunku zgodnego z pomiarem D_{zm} [mm].



Rys. 21. Przykładowe przebiegi zmian owalności przekroju poprzecznego elementów wysokociśnieniowych rurociągów parowych poddanych okresowej kontroli pełzania (dla $\tau = 0$ godz. wartość a_n jest równa wartości początkowej)

Z dokonanego przeglądu charakteru przebiegów krzywych pełzania wynika, że wyjaśnienia wymagają przyczyny większych różnic w przebiegach składowych (ε_1 i ε_2), obserwowane niekiedy w ramach każdej z grup, dla zbliżonych wartości początkowej

owalności, mimo że trwałé odkształcenia średnie są praktycznie takie same. Chodzi tutaj o zachowania takie, jakie jest widoczne np. na rys. 15c czy 19a. Przeprowadzona przy tak sformułowanym zagadnieniu analiza wieloletnich wyników badań pełzania wysokociśnieniowych rurociągów parowych wskazuje, że ma to związek z nierównomiernością grubości ścianki na obwodzie rury w miejscu zainstalowania czopów pomiarowych. Nie można tutaj jednak wykluczyć także wpływu zmian geometrii rury w strefach oddalonych od tego miejsca. Co więcej, w warunkach rzeczywistych, będzie to prawdopodobnie jednoczesne oddziaływanie tych parametrów, w różny sposób nakładających się na siebie, dając w efekcie np. wspomniane różnice, widoczne na prezentowanych rysunkach.

Na zakończenie można jeszcze dodać, że przedstawione w niniejszym rozdziale pracy wyniki i spostrzeżenia są słuszne niezależnie od tego czy czopy pomiarowe są zainstalowane na prostych odcinkach rurociągów czy też na prostkach ich elementów giętych.

Powyższe zagadnienie, jak i wcześniej prezentowane, są przedmiotem dalszej, wnikliwej analizy, w tym porównań z obliczeniami wykonanymi z wykorzystaniem opracowanego numerycznego modelu pełzania rurociągu, uwzględniającego różnorodność geometrii jego przekroju poprzecznego.

4. Identyfikacja rzeczywistej geometrii przekroju poprzecznego i warunków eksploatacji rurociągów pary przegrzanej

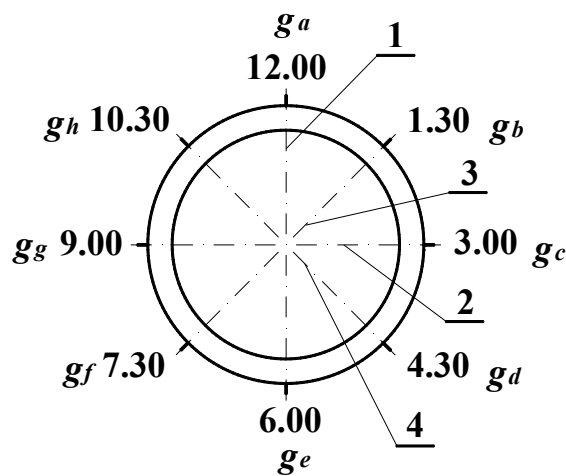
W celu wyjaśnienia przyczyn charakteru przebiegów krzywych pełzania, pokazanych w rozdziale 3, tak dla średnich wartości odkształceń, niekiedy znacznie odbiegających od pozostałych, jak i obu jej składowych, dość często różniących się między sobą, przeprowadzono identyfikację rurociągów pary przegrzanej, której celem było określenie ich rzeczywistej geometrii. Zakres badań objął pomiary średnic zewnętrznych i grubości ścianek odcinków prostych i prostek elementów giętych (dla tych ostatnich o długości większej niż 0,5 m, aby wyeliminować ewentualny wpływ stref gięcia rur). Pomiary wykonywano zarówno na nowozainstalowanych elementach, jak i na eksploatowanych od dawna, w tym także w miejscach usytuowania czopów pomiarowych (w tych przypadkach często znane są wartości średnic dla kierunków ich zainstalowania, zmierzone przed oddaniem obiektu do eksploatacji, co pozwala na oszacowanie zmiany owalności przekroju poprzecznego tego miejsca). Wybór obiektów niekiedy był losowy z uwagi na ograniczenia wynikające z warunków ruchowych i związane z tym możliwości ich udostępnienia i przygotowania do badań.

Do pomiarów zewnętrznych średnic rur, zazwyczaj w czterech kierunkach przesuniętych względem siebie co 45° , użyto suwmiarki o wydłużonych szczękach i dokładności $\pm 0,1$ mm. Miejsca przylegania szczęk do powierzchni rur były oczyszczane z zanieczyszczeń. Należy dodać, że w przypadku przekrojów z czopami pomiarowymi dla kierunków ich zainstalowania pomiary wykonywano w płaszczyznach możliwie im najbliższych (po obu stronach), a za średnicę miarodajną przyjęto wartość średnią.

Pomiar grubości ścianek rur w minimum czterech, a zwykle w ośmiu miejscach równomiernie rozmieszczonych na obwodzie, wykonywano za pomocą ultradźwiękowego grubościomierza typu 545 LC z głowicami typów 4 LDF 10 lub 4 LDL 10, obie o kołowej powierzchni styku. Zakres pomiarowy pierwszej z nich obejmuje grubości $1,2 \div 40$ mm, a drugiej $10 \div 199,9$ mm. Dokładność użytego przyrządu wynosi $\pm 0,1$ mm. Wzorce do jego zerowania i szybkiej kontroli prawidłowości pracy zostały wykonane dla celów prowadzonych pomiarów z materiałów, z jakich zrobione są badane rurociągi. W miejscach pomiarów przygotowywano powierzchnię ok. 450 mm^2 (o średnicy ok. 25 mm), czyszcząc ją do czystego metalu. Jako czynnika sprzęgającego używano smaru (towotu). W każdym miejscu dokonywano po 3 \div 5 odczytów przemieszczając nieznacznie

głowicę pomiarową w polu pomiarowym. Wynik ostateczny grubości ścianki w danym miejscu stanowi wartość średnią. Również wartość średnią stanowi grubość pod zainstalowanymi czopami pomiarowymi, wyznaczona na podstawie pomiarów w czterech równomiernie położonych obszarach tuż obok tych czopów.

Usytuowanie i przyjęte oznaczenia dla kierunków pomiarów średnic zewnętrznych oraz miejsc pomiarów grubości ścianki w danym przekroju pokazano na rys. 22 (dla jednoznaczności przyjęto tutaj odniesienie do układu tarczy zegarowej). Można dodać, że w przekrojach z czopami pomiarowymi kierunki ich zainstalowania zawsze pokrywają się z wyznaczonymi przez godziny 12.00-6.00 (kierunek 1) i 3.00-9.00 (kierunek 2).



Rys. 22. Usytuowanie kierunków pomiarów średnic zewnętrznych i miejsc pomiarów grubości ścianki w danym przekroju oraz przyjęte oznaczenia (1 ÷ 4 – kierunki pomiarów średnic zewnętrznych, $g_a \div g_h$ – miejsca pomiarów grubości ścianki)

Na podstawie uzyskanych danych określono dla badanych przekrojów owalność (dla obu par kierunków, tzn. 1, 2 i 3, 4) oraz odchyłkę grubości ścianki (dla miejsc, w których dokonano pomiarów). Otrzymane rezultaty poddano analizie.

Owalność przekroju poprzecznego obliczano za pomocą wzoru:

$$a_p = a_{pz} = \frac{D_1 - D_2}{D_z} \cdot 100\% \quad (16)$$

gdzie:

D_1, D_2 – zewnętrzne średnice rurociągu w danym przekroju, wzajemnie prostopadłe do siebie (w danym punkcie pomiarów pełzania, w kierunkach zainstalowania czopów pomiarowych) [mm],

D_z – zewnętrzna średnica rury wyznaczona jako wartość średnia ze zmierzonych w danym przekroju [mm].

Dla ujednoczenia wyników przyjęto w pracy, że średnica D_1 mierzona jest zawsze w kierunku 12.00-6.00 lub 1.30-7.30, a średnica D_2 odpowiednio 3.00-9.00 lub 4.30-10.30. W wyniku powyższego założenia otrzymano niekiedy ujemne wartości owalności. Powyższe założenie ma pewną zaletę, gdyż pozwala szybko zorientować się w usytuowaniu owalu względem przyjętych kierunków. Inaczej mówiąc, wartość ujemna świadczy o „spłaszczeniu” profilu w kierunku 1 lub 3 (tym samym o jego „wydłużeniu” w kierunku, odpowiednio: 2 lub 4).

Podaną postać wzoru (16) i zasadę co do kierunków zastosowano także do obliczenia owalności profilu wewnętrznego (a_{pw}), wykorzystując zmierzone grubości ścianki. Stąd przykładowo, wzór dla kierunków 1 i 2, stosując oznaczenia grubości jak na rys. 22, miałby postać:

$$a_{pw} = \frac{D_1 - (g_a + g_e) - D_2 - (g_c + g_g)}{D_w} \cdot 100\% \quad (17)$$

gdzie:

D_w – wewnętrzna średnica rury wyznaczona jako średnia [mm].

Do obliczenia odchyłki grubości ścianki rury w miejscach pomiarów posłużono się następującą zależnością:

$$\alpha_g = \frac{g - g_{sr}}{g_{sr}} \cdot 100\% \quad (18)$$

gdzie:

g – zmierzona (lokalna) grubość ścianki rury (np. $g = g_a, g = g_b$, itd., rys. 22) [mm],

g_{sr} – grubość ścianki wyznaczona jako średnia z 8 zmierzonych (dla potrzeb niniejszej pracy) grubości na obwodzie rury ($g_a \div g_h$, rys. 22) [mm].

Dodatnia wartość wskaźnika α_g oznacza, że ścianka w danym miejscu jest grubsza od średniej, ujemna, że jest cieńsza.

Przykładowe dane pomiarowe dla badanych w kilku przekrojach prostych odcinków rur i prostki elementu giętego zaprezentowano w tabelach 1 i 2 oraz na rys. 23 ÷ 25.

Dane w tabeli 1 odpowiadają dwóm nowym wysokociśnieniowym elementom $\phi 168,3 \times 16$ mm (przed oddaniem do eksploatacji) z wybranym losowo na każdym z nich odcinkiem pomiarowym o długości 1,2 m. Odległość pomiędzy badanymi, kolejnymi przekrojami wynosi 0,4 m (daje to cztery przekroje dla elementu).

Tabela 1

Wyniki pomiarów średnic i grubości ścianki w przekrojach poprzecznych rur stosowanych na
wysokociśnieniowe elementy energetyczne

Element i jego wymiary nominalne, materiał, nr przekroju		Średnica zewnętrzna (kierunki wg rys. 22), [mm]				Grubość ścianki (miejsca wg rys. 22), [mm]							
		1	2	3	4	g_a	g_b	g_c	g_d	g_e	g_f	g_g	g_h
Element A, odcinek prosty, $\phi 168,3 \times 16$ mm, stal 13HMF	1	168,2	167,5	168,8	167,1	16,1	16,0	15,8	15,8	16,0	16,1	16,0	15,7
	2	168,2	168,4	168,5	168,4	16,3	16,1	15,7	16,1	16,5	16,2	15,8	16,1
	3	168,7	168,6	168,9	168,6	15,6	16,1	16,4	16,1	16,1	16,0	16,2	16,2
	4	168,8	167,2	168,5	167,8	16,1	16,1	16,2	16,2	16,1	16,3	16,2	16,4
Element B, odcinek prosty, $\phi 168,3 \times 16$ mm, stal 13HMF	1	168,3	168,1	168,6	167,6	16,7	17,2	16,4	15,7	16,2	15,9	15,8	16,9
	2	167,9	168,4	168,5	167,8	16,4	16,6	16,7	16,4	15,9	15,6	16,0	16,2
	3	167,9	167,9	167,8	167,9	16,4	15,8	16,5	16,1	14,7	14,9	16,2	17,0
	4	167,7	167,8	168,0	167,9	16,5	16,7	15,4	15,3	15,2	15,5	16,3	16,0

W tabeli 2 zamieszczono dane pomiarowe również dla dwóch elementów rurociągu parowego $\phi 193,7 \times 17,5$ mm, które przepracowały ok. 34 500 godz.. Pierwszy to odcinek prosty o długości między spoinami 1,2 m z zainstalowanymi na nim czopami pomiarowymi. Odległość pomiędzy badanymi, kolejnymi przekrojami, oznaczonymi od nr 1 do nr 12 wynosi 0,1 m. Tylko między przekrojami nr 9 i dodatkowym nr 9' zmniejszono ją do 0,03 m, gdyż pośrodku znajduje się płaszczyzna ze wspomnianymi czopami. Wyniki pomiarów grubości ścianki w okolicy samych czopów (zgodnie z podaną wcześniej metodyką) oraz grubości ścianki i średnic pomiędzy nimi (chodzi tutaj o obszary przesunięte co 45°) dały wyniki odpowiadające wartościom średnim dla przekrojów nr 9

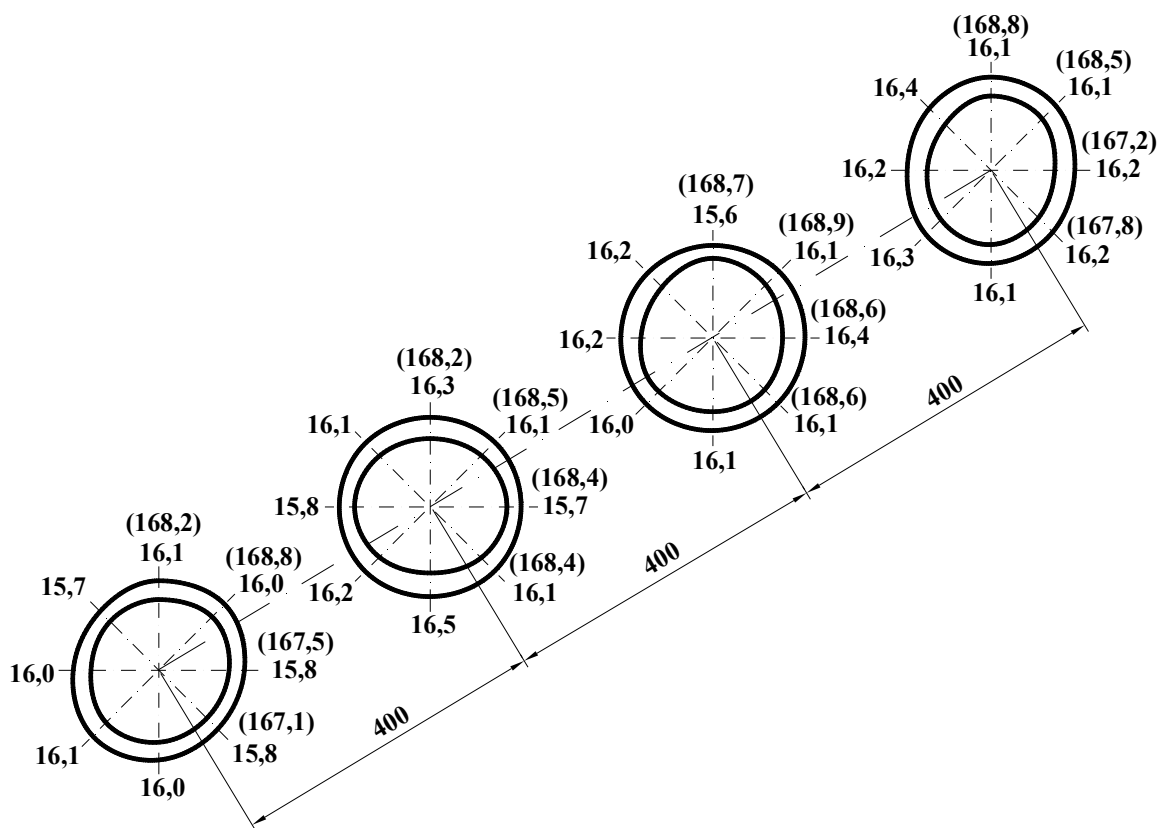
i nr 9', dlatego też nie zamieszczono ich w osobnej tabeli. Drugi ze wspomnianych wyżej elementów to prostka łuku gładkiego prostego (90°). Jej długość wynosi ok. 1,5 m, z czego 0,6 m to odcinek pomiarowy z czterema badanymi przekrojami nr 1 ÷ nr 4 (odległość między kolejnymi przekrojami wynosi 0,2 m). W przypadku obu elementów przekroje skrajne oddalone są od spoin o 0,05 m (dla elementu C są to przekroje nr 1 i nr 12, dla elementu D, nr 1).

Tabela 2

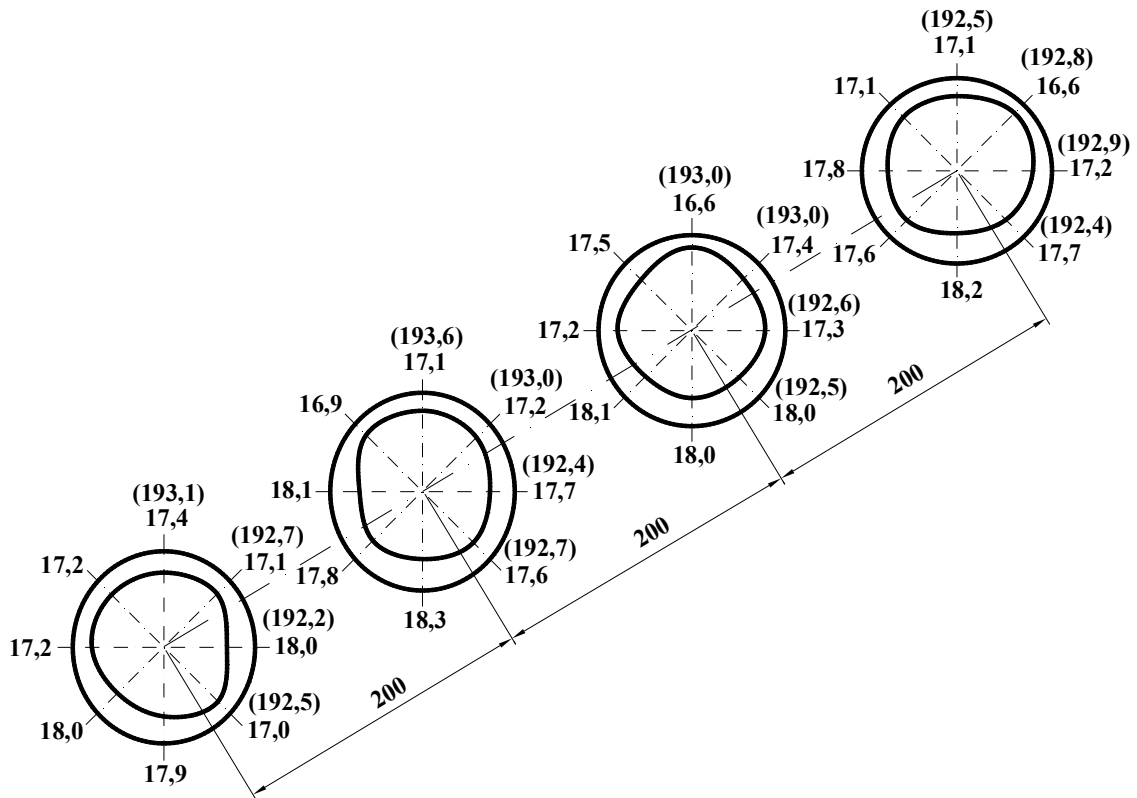
Wyniki pomiarów średnic i grubości ścianki w przekrojach poprzecznych elementów
wysokociśnieniowego rurociągu parowego

Element i jego wymiary nominalne, materiał, nr przekroju	Średnica zewnętrzna (kierunki wg rys. 22), [mm]				Grubość ścianki (miejsca wg rys. 22), [mm]								
	1	2	3	4	g_a	g_b	g_c	g_d	g_e	g_f	g_g	g_h	
Element C, odcinek prosty, $\phi 193,7 \times 17,5$ mm, stal 13HMF	1	193,1	192,2	192,7	192,5	17,4	17,1	18,0	17,0	17,9	18,0	17,2	17,2
	2	193,3	192,4	193,1	192,5	17,2	17,0	18,0	17,2	18,3	17,3	17,7	16,7
	3	193,6	192,4	193,0	192,7	17,1	17,2	17,7	17,6	18,3	17,8	18,1	16,9
	4	193,4	192,4	193,2	192,4	17,2	17,5	16,3	17,9	18,4	18,1	17,8	17,4
	5	193,0	192,6	193,0	192,5	16,6	17,4	17,3	18,0	18,0	18,1	17,2	17,5
	6	192,8	192,6	192,4	192,6	16,9	17,5	17,3	18,2	18,0	18,5	17,6	17,6
	7	192,5	192,9	192,8	192,4	17,1	16,6	17,2	17,7	18,2	17,6	17,8	17,1
	8	192,4	192,4	192,5	192,6	17,2	17,0	17,2	17,9	18,1	18,0	18,0	17,1
	9	192,6	192,6	192,6	192,5	17,1	17,1	16,9	18,0	17,9	17,9	18,0	17,1
	9'	192,6	192,5	192,6	192,3	17,0	17,0	17,2	18,0	17,4	18,0	17,8	17,2
	10	192,5	192,5	192,6	192,5	17,0	17,2	16,7	17,8	17,6	18,3	17,3	17,8
	11	192,6	192,5	192,5	192,5	17,2	17,6	17,5	17,6	17,6	18,3	17,5	17,7
12	192,6	192,5	192,7	192,6	17,5	17,0	17,6	17,5	18,2	17,0	17,6	18,0	
Element D, prostka kolana 90°, $\phi 193,7 \times 17,5$ mm, stal 13HMF	1	192,6	192,2	192,5	192,3	17,5	17,3	16,5	17,1	17,0	17,1	17,3	17,1
	2	192,5	192,1	192,7	192,2	17,3	17,7	17,1	17,3	17,1	16,3	18,2	16,7
	3	192,6	191,4	192,0	192,2	18,0	17,9	17,4	17,5	17,3	16,3	18,2	16,7
	4	192,5	191,9	192,7	192,4	18,2	17,5	17,6	17,5	16,9	16,3	18,0	17,0

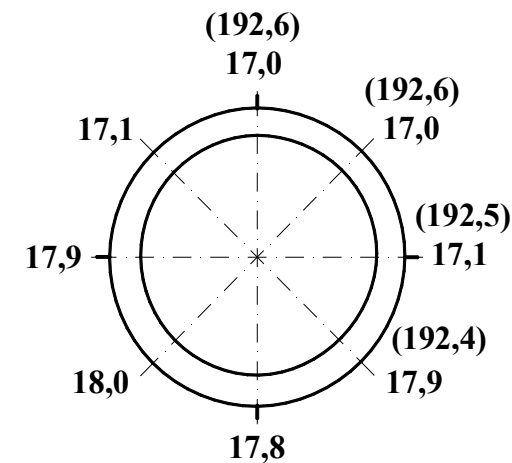
Wizualizację wybranych przekrojów w postaci profili, z naniesionymi danymi pomiarowymi, przedstawiono na rys. 23 (tabela 1, przekroje 1 ÷ 4 elementu A) i na rys. 24 (tabela 2, przekroje 1, 3, 5 i 7 elementu C). Ponadto na rys. 25 pokazano profil elementu C w płaszczyźnie zainstalowanych na nim czopów pomiarowych kontroli pełzania. Uwzględniono tutaj dane z pomiarów w przekrojach nr 9 i nr 9' oraz w pobliżu czopów (dla miejsc oznaczonych na rys. 22 „godzinami”: 12.00, 3.00, 6.00 i 9.00), a także z pomiarów między nimi (miejsca odpowiadające „godzinom”: 1.30, 4.30, 7.30 i 10.30).



Rys. 23. Profile przekrojów poprzecznych na długości rury $\phi 168,3 \times 16$ mm (element A)



Rys. 24. Profile przekrojów poprzecznych na długości rury $\phi 193,7 \times 17,5$ mm – element C (wg tabeli 2 przekroje, od lewej: nr 1, 3, 5 i 7)



$$D_z = D_{sr} = 192,5 \text{ mm}$$

$$g_{sr} = 17,5 \text{ mm}$$

Owalność przekroju poprzecznego, [%]		
Kierunek (wg rys. 22)	Profil	
	zewn. (a_{pz})	wewn. (a_{pw})
1-2	+0,05	+0,19
3-4	+0,10	+0,13

Odchyłka grubości ścianki, [%]	
Miejsce (wg rys. 22)	α_g
12.00	-2,86
1.30	-2,86
3.00	-2,28
4.30	+2,28
6.00	+1,71
7.30	+2,86
9.00	+2,28
10.30	-2,28

Rys. 25. Profil przekroju poprzecznego rury $\phi 193,7 \times 17,5$ mm w płaszczyźnie zainstalowanych czopów pomiarowych badań pelzania (inne profile dla tej rury widoczne są na rys. 24)

Wyniki obliczeń owalności przekroju poprzecznego (dla obu par kierunków profili zewnętrznego i wewnętrznego) oraz odchyłek grubości ścianek dla zaprezentowanych przykładów zestawiono w tabelach 3 i 4.

Na podstawie rys. 23 ÷ 25 i danych zawartych w tabelach 3 i 4 można stwierdzić, że rury stosowane w energetyce do budowy wysokociśnieniowych rurociągów pary przegrzanej charakteryzuje owalność przekroju poprzecznego oraz nierównomierność grubości ścianki. Należy też zauważyć, że wartości obu tych wielkości zmieniają się na długości danego elementu, tj. odcinka prostego lub prostek łuku (sama strefa gięcia nie jest przedmiotem rozważań). Ponadto zmienia się usytuowanie owalu w przestrzeni, o czym świadczy zmiana znaku przy wartości. Również grubość ścianki, np. minimalna czy maksymalna, nie jest stała wzdłuż danej tworzącej. Mogą one „przemieszczać” się na długości rury po linii śrubowej [39].

Tabela 3

Owalność przekroju poprzecznego i odchyłki grubości ścianki w wybranych miejscach na obwodzie
wysokociśnieniowego rurociągu parowego

Element i nr badanego przekroju		Owalność przekroju poprzecznego, [%]				Odchyłka grubości ścianki α_g , [%]							
		Profil zewn. (a_{pz})		Profil wewn. (a_{pw})									
		Kier. 1-2	Kier. 3-4	Kier. 1-2	Kier. 3-4	12.00	1.30	3.00	4.30	6.00	7.30	9.00	10.30
Element A, odcinek prosty $\phi 168,3 \times 16$ mm stal 13HMF	1	+0,42	+1,01	+0,29	+0,22	+1,00	+0,37	-0,88	-0,88	+0,37	+1,00	+0,37	-1,50
	2	-0,12	+0,06	+1,10	0,00	+1,24	0,00	-2,48	0,00	+2,48	+0,62	-1,86	0,00
	3	+0,06	+0,18	+0,73	+0,37	-3,05	+0,06	+1,95	+0,06	+0,06	-0,56	+0,68	+0,68
	4	+0,95	+0,42	+1,33	+0,66	-0,62	-0,62	0,00	0,00	-0,62	+0,62	0,00	+1,23
Element B, odcinek prosty $\phi 168,3 \times 16$ mm stal 13HMF	1	+0,12	+0,59	-0,37	+0,37	+2,14	+5,20	+0,30	-3,98	-0,92	-2,75	-3,36	+3,36
	2	-0,30	+0,42	-0,07	+0,81	+1,05	+2,28	+2,90	+1,05	-2,03	-3,88	-1,41	-0,18
	3	0,00	-0,06	-1,18	+1,69	+2,82	-0,94	+3,45	+0,94	-7,84	-6,58	+1,57	+6,58
	4	+0,06	+0,06	-0,07	-0,59	+4,04	+5,30	-2,90	-3,53	-4,16	-2,27	+2,77	+0,88

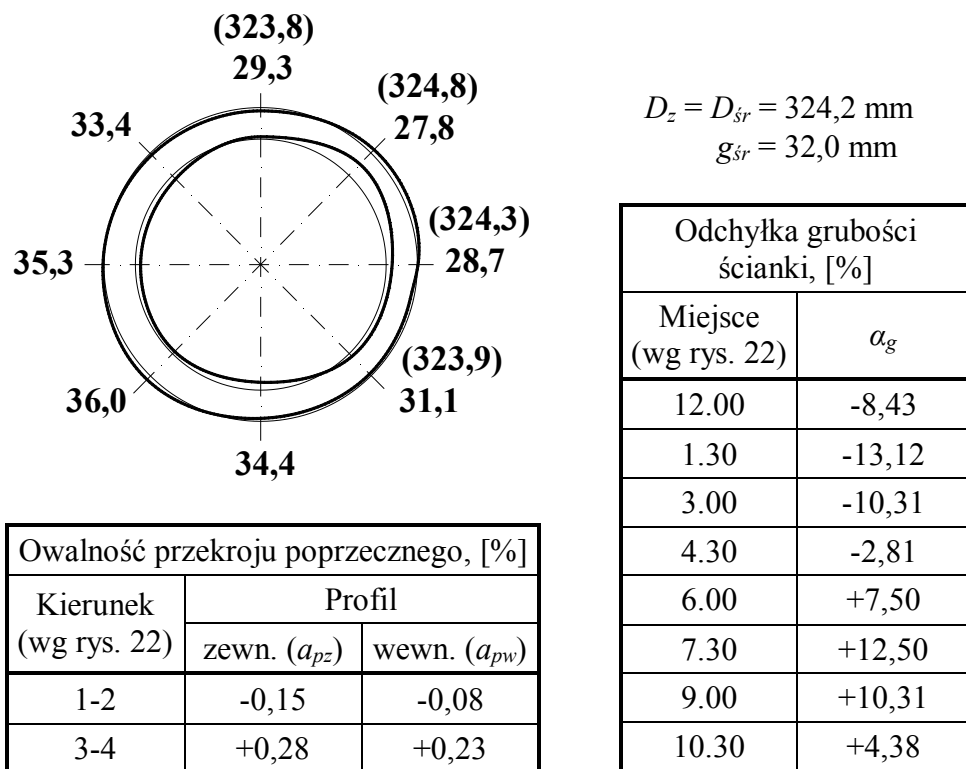
Tabela 4

Owalność przekroju poprzecznego i odchyłki grubości ścianki w wybranych miejscach na obwodzie
wysokociśnieniowego rurociągu parowego

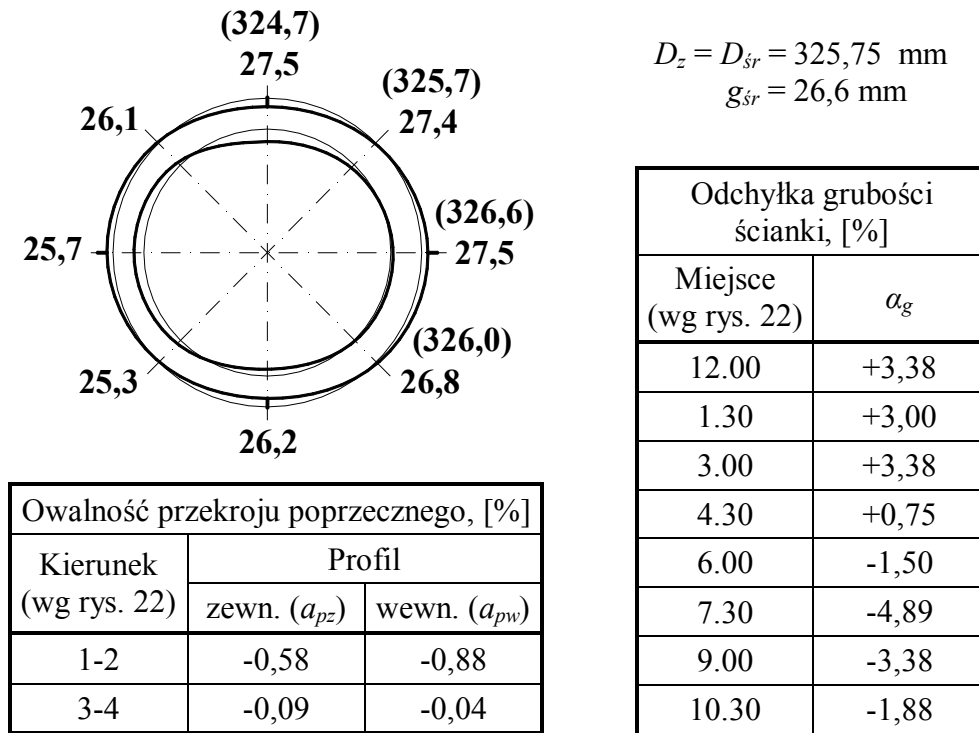
Element i nr badanego przekroju		Owalność przekroju poprzecznego, [%]				Odchyłka grubości ścianki α_g , [%]							
		Profil zewn. (a_{pz})		Profil wewn. (a_{pw})									
		Kier. 1-2	Kier. 3-4	Kier. 1-2	Kier. 3-4	12.00	1.30	3.00	4.30	6.00	7.30	9.00	10.30
Element C, odcinek prosty $\phi 193,7 \times 17,5$ mm stal 13HMF	1	+0,47	+0,10	+0,50	-0,44	-0,34	-2,06	+3,09	-2,63	+2,52	+3,09	-1,49	-1,49
	2	+0,47	+0,31	+0,70	+0,13	-1,32	-2,47	+3,27	-1,32	+4,99	-0,75	+1,55	-4,19
	3	+0,62	+0,16	+1,01	-0,13	-2,84	-2,27	+0,57	0,00	+3,98	+1,14	+2,84	-3,98
	4	+0,52	+0,41	-0,32	+0,32	-2,16	-0,46	-7,28	+1,82	+4,66	+2,96	+1,25	-1,02
	5	+0,21	+0,26	+0,19	+0,32	-5,20	-0,63	-1,20	+2,80	+2,80	+3,37	-1,77	-0,06
	6	+0,10	-0,10	+0,13	-0,25	-4,52	-1,13	-2,26	+2,82	+1,69	+4,52	-0,56	-0,56
	7	-0,21	-0,20	-0,44	+0,63	-1,78	-4,65	-1,20	+1,66	+4,53	+1,09	+2,24	-1,78
	8	0,0	-0,05	-0,06	-0,06	-2,05	-3,19	-2,05	+1,94	+3,08	+2,50	+2,50	-2,62
	9	0,0	+0,05	-0,06	+0,13	-2,29	-2,29	-3,43	+2,86	+2,29	+2,29	+2,86	-2,29
	9'	+0,05	+0,16	+0,44	+0,32	-2,58	-2,58	-1,43	+3,15	-0,29	+3,15	+2,01	-1,43
	10	0,0	+0,05	-0,38	+0,13	-2,63	-1,49	-4,35	+1,95	+0,80	+4,81	-0,92	+1,95
	11	+0,05	0,0	+0,19	-0,38	-2,44	-0,17	-0,74	-0,17	-0,17	+3,80	-0,74	+0,40
12	+0,05	+0,05	-0,25	+1,02	-0,28	-3,13	+0,28	-0,28	+3,70	-3,13	+0,28	+2,56	
Element D, prostka kolana 90° $\phi 193,7 \times 17,5$ mm stal 13HMF	1	+0,21	+0,10	-0,20	0,0	+2,28	+1,11	-3,57	-0,06	-0,64	-0,06	+1,11	-0,06
	2	+0,16	+0,26	+0,82	+0,32	+0,52	+2,85	-0,64	+0,52	-0,64	-5,29	+5,75	-2,96
	3	+0,63	-0,10	+0,95	-0,13	+3,39	+2,81	-0,06	+0,52	-0,63	-6,38	+4,54	-4,08
	4	+0,63	+0,16	+0,70	+0,63	+4,72	+0,69	+1,27	+0,69	-2,76	-6,21	+3,57	-2,19

W podanych w tabelach 1 ÷ 4 przypadkach bezwzględna wartość owalności przekroju poprzecznego w odniesieniu do profilu zewnętrznego (a_{pz}) zawiera się w granicach 0 % ÷ 1,01 %. Natomiast odchyłka grubości ścianki (α_g) w zakresie 0 % ÷ 7,8 %. Według zaproponowanego podziału (rozdział 3), ze względu na wartość owalności, pozwoliłoby to zaliczyć te przypadki do grupy 1 lub 2. Z przeprowadzonych badań i analizy zagadnienia wynika, że przekroje rur stosowanych w energetyce mogą

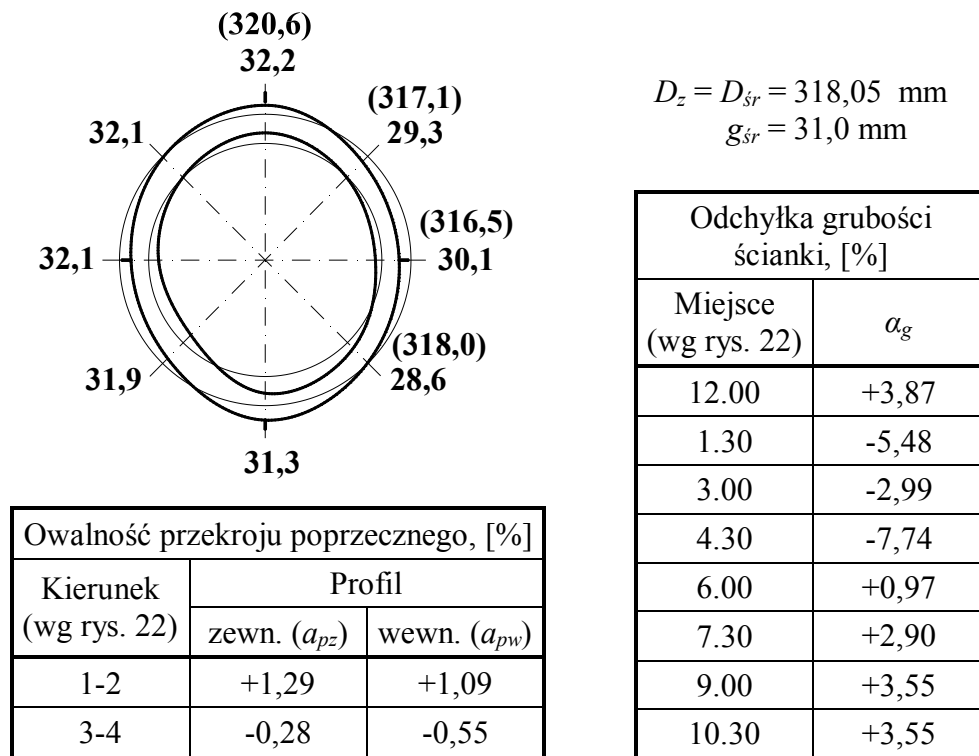
mieć także wyższe wartości wymienionych tutaj wielkości. Kilka takich przykładów pokazano na rys. 26 ÷ 29, a dane dla paru innych w tabeli 5. Zamieszczone w niej wartości dotyczą w większości obiektów poddawanych badaniom pełzania od wielu lat. Należy jednak dodać, że w ich przypadku zwykle brak jest danych związanych z grubością ścianki, odpowiadających stanowi początkowemu. W tamtym okresie (niekiedy chodzi o lata 60.) nie wykonywano zazwyczaj dla potrzeb pełzania rurociągów takich pomiarów, ograniczając się do wartości nominalnej, a wpływ profilu rury na odkształcenia był niezauważany. Dlatego tam gdzie takie wartości znalazły się, to odzwierciedlają one stan po znacznym czasie eksploatacji (np. ok. 200 000 godz.). Dane te uzyskano z zachowanych u użytkownika protokołów pomiarów grubości ścianek rurociągów lub na podstawie wykonywanych badań własnych, przeprowadzanych w miarę dostępności obiektów.



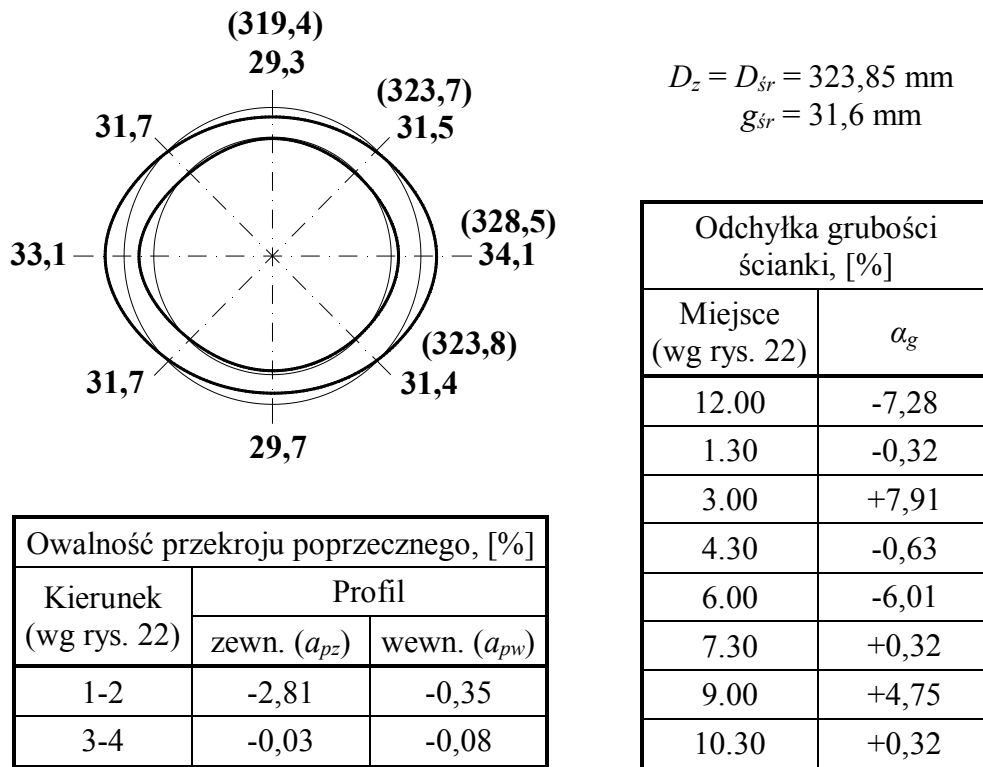
Rys. 26. Profil przekroju poprzecznego nowoinstalowanej rury $\phi 323,9 \times 32 \text{ mm}$ ze stali 13HMF (zaliczony wg zaproponowanego podziału do grupy 1)



Rys. 27. Profil przekroju poprzecznego rury $\phi 325 \times 26$ mm ze stali 12HM Φ w płaszczyźnie czopów pomiarowych pełzania (pomiar po 294 449 godz. pracy, przy czym początkowa owalność dla kierunków 1-2 wynosiła $a_{pz} = -0,98$ %, co pozwoliło zaliczyć profil do grupy 2)



Rys. 28. Profil przekroju poprzecznego rury $\phi 319 \times 29$ mm ze stali 12HMF w płaszczyźnie czopów pomiarowych pełzania (pomiar po ok. 294 000 godz. pracy, początkowa owalność dla kierunków 1-2: $a_{pz} = 1,73$ %, profil zaliczony do grupy 2)



Rys. 29. Profil przekroju poprzecznego nowoinstalowanej rury $\phi 323,9 \times 32 \text{ mm}$ ze stali 13HMF (zaliczony wg zaproponowanego podziału do grupy 3)

Na podstawie rys. 26 ÷ 29 i danych w tabeli 5 mo¿na zauwa¿yæ, ¿e owalnoœæ przekroju poprzecznego rur stosowanych w energetyce mo¿e przekraczaæ wartoœæ dopuszczaln¹ [53], która dla rur $\phi 82,5 \div \phi 508 \text{ mm}$ wynosi $\pm 1 \%$, a w przypadku wiêkszych gruboœci ich œcianek (np. dla rur $\phi 193,7 \text{ mm}$, $\phi 273,0 \text{ mm}$ i $\phi 323,9 \text{ mm}$ powy¿ej, odpowiednio: 22,2 mm, 28,0 mm i 32,0 mm) 1,5 %. Przekroczenie to jest niekiedy doœæ znaczne, najwiêksze odnotowane wartoœci osi¹gały 6,89 % i 7,18 %.

Z analizy wynika te¿, ¿e œcianka tych rur mo¿e mieæ znacz¹¹ odczyłk¹ gruboœci. Jej dopuszczalne wartoœci dla rur do $\phi 133,0 \text{ mm}$ i w zakresie $\phi 133 \div \phi 323,9 \text{ mm}$ wynos¹, odpowiednio [53]: $\pm 10 \%$ i $\pm 12,5 \%$, przy czym dla wiêkszych gruboœci œcianek (warunek jak wy¿ej) dopuszcza si¹ do $\pm 15 \%$ i $\pm 17,5 \%$ w pojedynczych miejscach na d³ugoœci do dwóch œrednic, ale najwy¿ej do 300 mm. Z zamieszczonych w pracy danych wynika, ¿e wartoœci tej wielkoœci s¹ niekiedy zbli¿one do dopuszczalnych (osi¹gaj¹ np. $\pm 8 \%$ ÷ $\pm 10 \%$), ale odnotowano te¿ jej przekroczenie (rys. 26).

Tabela 5

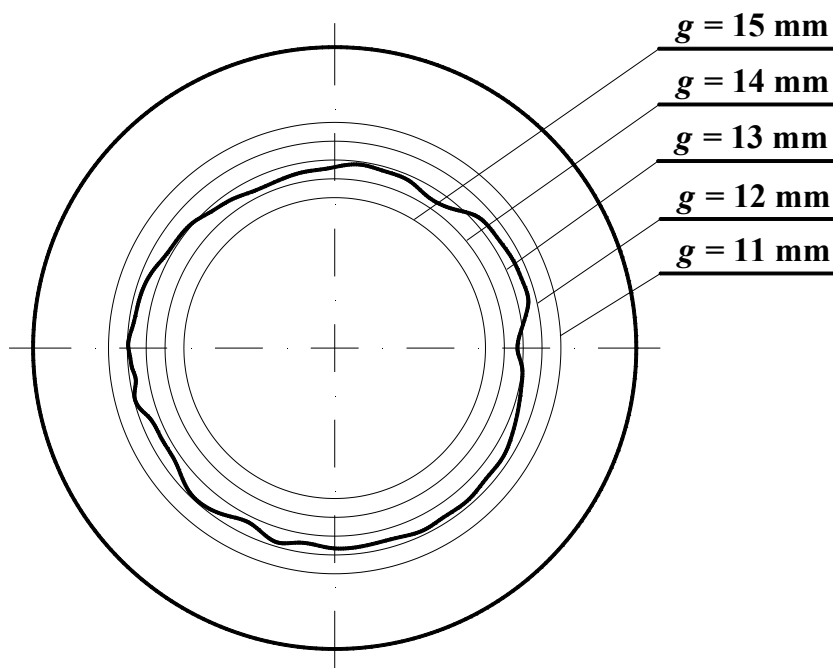
Przykłady rurociągów z przekrojami (profilami) charakteryzującymi się wyższymi od przeciętnych
wartościami owalności i/lub odchyłki grubości ścianki

Rurociąg (wymiar, materiał)	Owalność przekroju poprzecznego, [%]			Odchyłka grubości ścianki α_g , [%]							
	Kierunek	Profil		Miejsce (wg rys. 22)							
		zew. (a_{pz})	wew. (a_{pw})	12.00	1.30	3.00	4.30	6.00	7.30	9.00	10.30
$\phi 108 \times 12$, 15 HM	1-2	+3,64	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$\phi 108 \times 12$, 15 HM	1-2	-4,66	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$\phi 194 \times 14,5$, 12X1M Φ	1-2	+6,89	-	-	-	-	-	-	-	-	-
j. w. (po ok. 209 000 godz. pracy)	1-2	+0,87	+1,63	-0,69	-4,83	-4,83	-2,07	-2,76	+4,14	+8,27	+2,07
	3-4	+0,05	0,00								
$\phi 168 \times 13,5$, 12X1M Φ	1-2	+2,39	-	-	-	-	-	-	-	-	-
j. w. (po ok. 209 000 godz. pracy)	1-2	+1,67	+2,21	0,00	+0,73	-5,11	-2,19	-3,65	0,00	+3,65	+5,84
$\phi 168 \times 13,5$, 12X1M Φ	1-2	+7,18	-	-	-	-	-	-	-	-	-
j. w. (po ok. 198 500 godz. pracy)	1-2	+6,43	+7,88	+0,75	-5,22	-8,96	-6,72	-2,24	+5,97	+9,70	+6,72
	3-4	-2,16	-2,58								
$\phi 168 \times 13,5$, 12X1M Φ	1-2	+3,83	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$\phi 168 \times 11$, 12X1M Φ	1-2	-3,01	-	-	-	-	-	-	-	-	-
j. w. (po ok. 190 000 godz. pracy)	1-2	-1,19	-1,45	-0,68	-	+1,13	-	+1,13	-	-1,58	-
$\phi 168 \times 11$, 12X1M Φ	1-2	+4,22	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$\phi 168 \times 11$, 12X1M Φ	1-2	-4,64	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$\phi 274 \times 29,5$, 12 MX po ok. 249 900 godz.	1-2	-0,33	+1,11	-7,64	-2,78	-3,12	0,00	+0,69	+4,51	+7,64	+0,35
	3-4	+0,04	-0,14								
$\phi 319 \times 29$, 12 HM	1-2	+3,14	-	-	-	-	-	-	-	-	-
j. w. (po ok. 275 000 godz. pracy)	1-2	+2,48	+1,56	+9,35	-2,16	-4,32	-7,91	+2,52	-1,44	+2,52	+1,44
	3-4	+0,16	-0,11								
$\phi 244,5 \times 25$, 13 HMF	1-2	0,00	-	-3,37	-	-5,39	-	+9,13	-	-0,41	-
$\phi 323,9 \times 32$, 13 HMF	1-2	+0,12	-	+2,56	-	-11,22	-	-2,24	-	+10,58	-
$\phi 323,9 \times 32$, 13 HMF	1-2	-2,72	-	-6,18	-	+4,21	-	-5,34	-	+7,58	-

Należy też odnotować, że w większości przypadków wartości odchyłek przyjmują na obwodzie rury różne znaki. Zatem grubość ścianki w jednych miejscach jest większa, a w innych mniejsza od średniej. Niekiedy są to miejsca naprzeciw siebie, jak to jest widoczne np. na rys. 25 i 26. Fakt ten powoduje, że częściej zdarzają się przekroczenia nierównomierności grubości ścianek (dopuszczalne wartości dla tej wielkości są takie same jak w przypadku odchyłki).

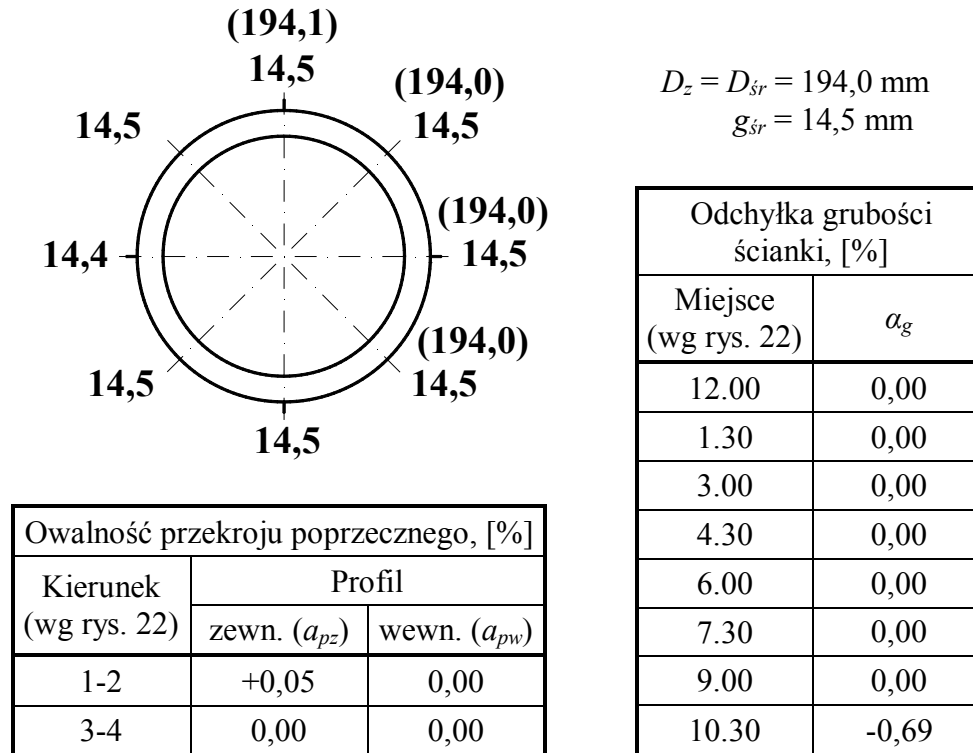
Analiza wyników badań pozwala zauważyć również, że wartości owalności danego przekroju poprzecznego, wyznaczone dla profili zewnętrznego (a_{pz}) i wewnętrznego (a_{pw}), mogą różnić się między sobą niekiedy znacznie (odniesieniem może być tutaj np. wartość dopuszczalna). Z uwagi na różną grubość ścianki w poszczególnych miejscach na obwodzie rury owalność profilu „wewnętrznego” może być większa lub mniejsza od „zewnętrznego”. Zdarza się też, że profile te są „spłaszczone odwrotnie”.

Ewentualne zagęszczenie miejsc pomiarów na obwodzie rury, dla uzyskania ciągłego rozkładu grubości ścianki, pozwoliłoby uzyskać profile jak np. pokazany na rys. 30 [55]. Należy jednak zauważyć, że procedura taka nie jest stosowana w praktyce z uwagi na znaczny nakład środków i czasu.



Rys. 30. Profil wewnętrzny rury $\phi 194 \times 14$ mm (stal 12HMF) uzyskany przez „ciągły”
pomiar grubości ścianki ($g_{sr} = 12,8$ mm)

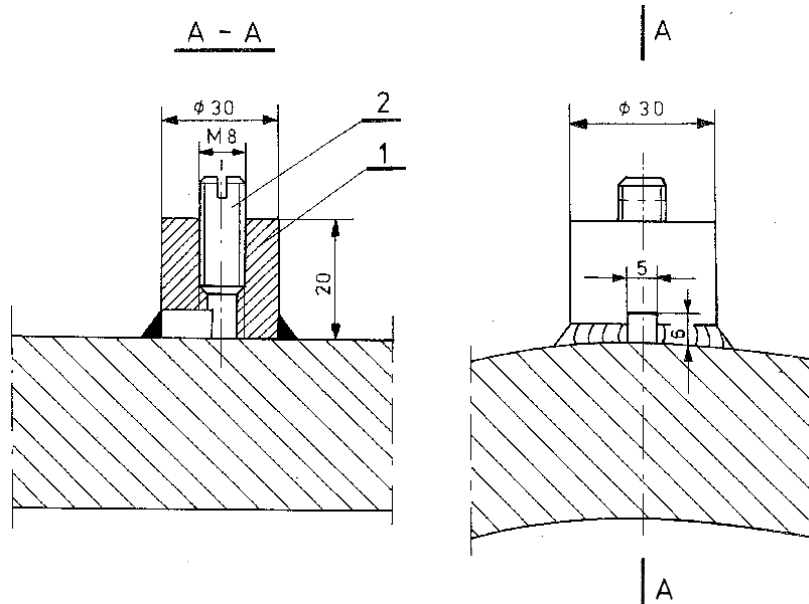
W uzupełnieniu powyższego zagadnienia można tutaj dodać, że o wiele rzadziej występują „prawie” idealne przekroje, np. takie jak przedstawiono na rys. 31. Jak można zauważyć, jego owalność i odchyłki grubości ścianki są praktycznie zerowe.



Rys. 31. Profil przekroju poprzecznego rury $\phi 194 \times 14,5$ mm ze stali 12X1MΦ

W ramach pracy wykonano także pomiary temperatury ścianki rurociągów (metal) i ciśnienia przesyłanej nimi pary przegrzanej, które charakteryzują warunki ich eksploatacji. Identyfikację tę przeprowadzono dla ustabilizowanych warunków pracy w kilku udostępnionych miejscach szeroko rozbudowanej instalacji wysokopięnych rurociągów parowych siłowni cieplnej zakładu przemysłowego. Do pomiarów temperatury wykorzystano termoelementy płaszczone o średnicy zewnętrznej $\phi 1$ mm typu K (NiCr-NiAl), klasy 1. Montowano je do rur przez wykonanie na ich powierzchni „zadzioru” i zapunktowanie. W jednym przypadku wykorzystano też istniejący króciec, którego konstrukcję pokazano na rys. 32. Zmiany temperatury rejestrowano za pomocą mierników TES 1312A i Therm typ 2280-3. Ich dokładność, uwzględniając zakres mierzonych wartości, wynosi odpowiednio: $\pm 0,3$ % odczytu ± 1 °C i $\pm 0,03$ % odczytu ± 1 °C. Należy dodać, że miejsca pomiarów temperatury wybierano obok miejsc

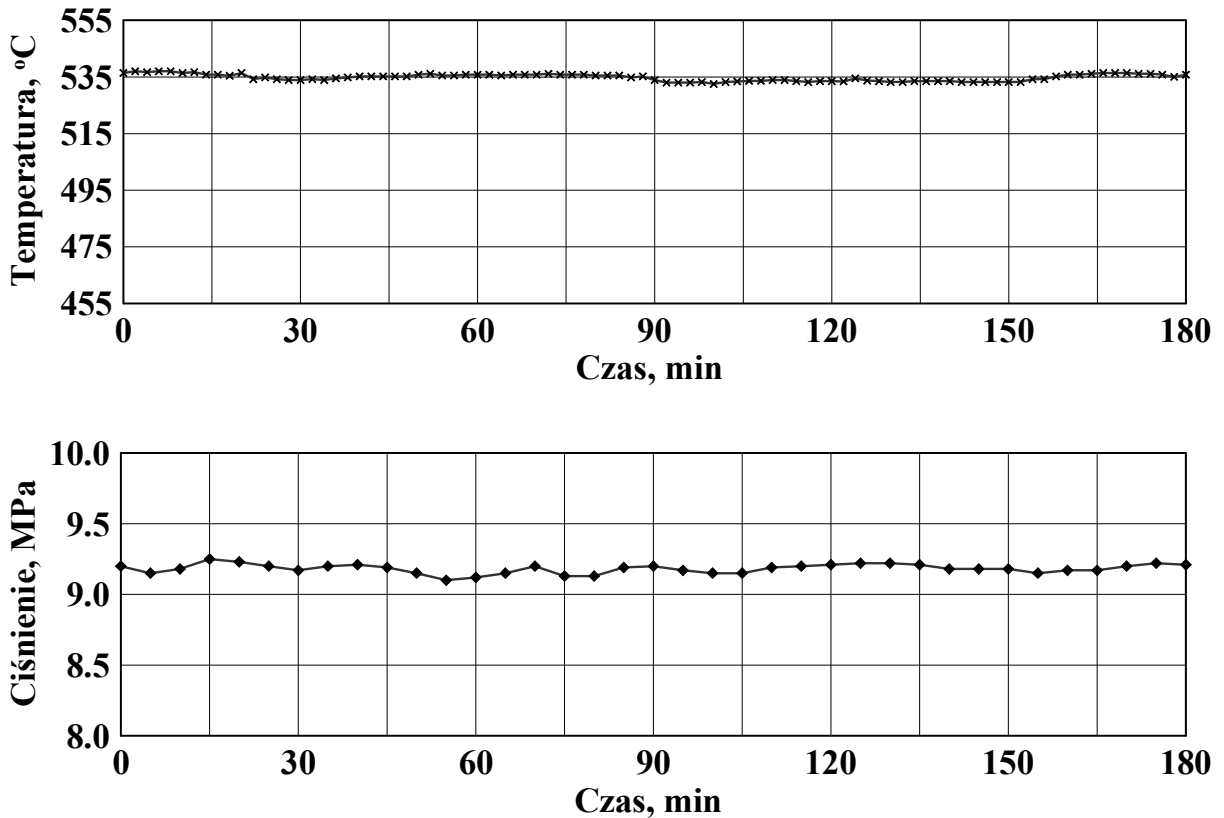
istniejących króćców impulsowych ciśnienia, które wykorzystywano do pomiarów ciśnienia. Zastosowano w tym celu uniwersalny przetwornik model UT-10 oraz przetwornik typ AR 057 z rejestratorem FPD-120 klasy 1.0.



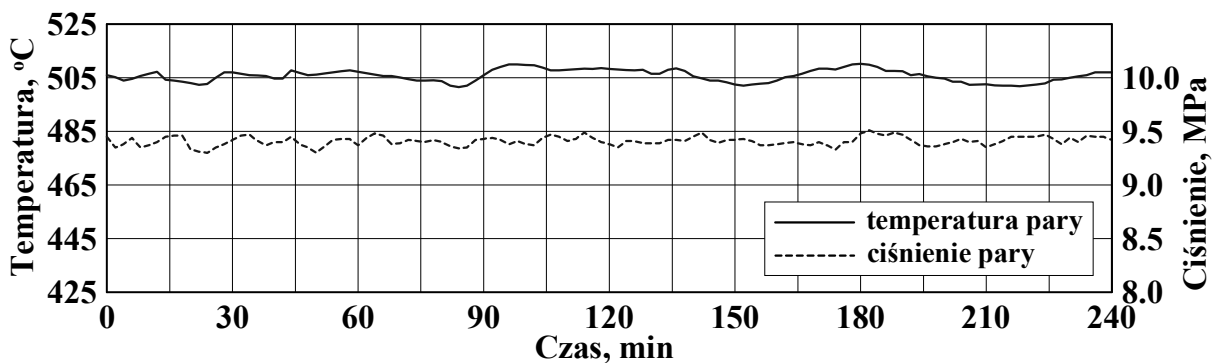
Rys. 32. Króciec do pomiaru temperatury metalu (tutaj zainstalowany na rurociągu parowym):
1 – tulejka z otworem na termoelement, 2 – wkręt do dociśnięcia termoelementu do rurociągu)

Do analizy warunków pracy rurociągów wykorzystano również wyniki ruchowej kontroli zmian temperatury i ciśnienia pary przegrzanej, prowadzonej przez użytkownika za pomocą aparatury kontrolno-pomiarowej.

Przykłady uzyskanych charakterystycznych przebiegów wymienionych powyżej wielkości pokazano na rys. 33 i 34. Można zauważyć, że w trakcie ustabilizowanej pracy urządzeń należy uznać je, z praktycznego punktu widzenia, za ustalone. Widoczne na rys. 33 zmiany temperatury ścianki kolektora głównego pary różnią się od wartości średniej nie więcej niż do ok. ± 2 °C. W przypadku ciśnienia zmiany zawierają się w przedziale ok. 0,1 MPa. Jednakże obserwowano też zmiany osiągające wyższe wartości, np. ok. ± 5 °C i ok. $\pm 0,2$ MPa, ale i tak stanowi to do ok., odpowiednio: 1 % i 2 % wartości średniej.



Rys. 33. Zmiany temperatury ścianki kolektora głównego oraz ciśnienia przesyłanej nim pary przegrzanej



Rys. 34. Zmiany temperatury i ciśnienia pary przegrzanej w rurociągu do turbiny parowej
(przed zaworem szybkozamykającym)

Z rozważań zawartych w niniejszym rozdziale wynika, że praktycznie nie istnieją rurociągi o idealnym przekroju poprzecznym (okrągłe, z równomierną grubością ścianki). Prawie każdy z nich cechuje się pewną owalnością oraz pewnymi odchyłkami grubości ścianki na obwodzie. Jednak w większości przypadków wartości obu tych wielkości są niewielkie, tzn. na poziomie nie przekraczającym połowy wartości dopuszczalnych.

Ocenia się, na podstawie analizy wyników badań własnych geometrii rurociągów parowych oraz analizy innych dostępnych danych [51], że dotyczy to ok. 80 % elementów rurowych (w odniesieniu do odcinków prostych i prostek elementów giętych). W ich przypadku można stwierdzić, uwzględniając zawartość rozdziału 3 niniejszej pracy, że osiągnięte przez nie wartości średnie trwałego odkształcenia pełzania zazwyczaj stosunkowo nie różnią się wiele między sobą. Jednakże spotyka się elementy rurociągów o rzeczywistych wymiarach dosyć znacznie odbiegających od nominalnych, a niekiedy przekraczające nawet wartości dopuszczalne normatywnie. Wpływ takich nieregularności na pełzanie rurociągów stanowi przedmiot zainteresowania autora. Uzyskane wyniki przeprowadzonej identyfikacji geometrii przekroju poprzecznego rurociągów stanowią podstawę do przyjęcia pewnych „wyidealizowanych”, odpowiadających rzeczywistości ich profili, które wykorzystano w numerycznych obliczeniach pełzania. Dla rozwiązania tego zagadnienia zastosowano modelowanie numeryczne metodą elementów skończonych (MES), którego wyniki porównano z otrzymywanymi dzięki prowadzonym badaniom na obiektach rzeczywistych. Należy zauważyć, że takie korelowanie wyników jest zalecane w wielu przypadkach [5, 33, 40, 48, 66]. Może to służyć, w tym wyniki niniejszej pracy, doskonaleniu metod oceny przydatności do pracy oraz szacowania trwałości wysokociśnieniowych urządzeń pracujących w warunkach pełzania.

5. Cel pracy

Celem pracy jest ocena wpływu początkowej owalności oraz nierównomierności grubości ścianki rurociągów parowych na ich pełzanie, tj. na osiągane odkształcenia trwałe. Analiza ta pozwoli wyjaśnić przyczyny zróżnicowania przebiegów ruchowych krzywych pełzania otrzymywanych w czasie wieloletniej eksploatacji. Przeprowadzone w pracy obliczenia numeryczne z wykorzystaniem programu ANSYS (MES) mogą stanowić podstawę do określenia optymalnych kierunków usytuowania czopów pomiarowych oraz ich liczby w danym przekroju poprzecznym rury. Umożliwi to w praktyce uzyskanie bardziej wiarygodnej oceny stanu technicznego i przydatności do dalszej bezpiecznej eksploatacji wysokociśnieniowych rurociągów parowych pracujących w warunkach pełzania.

6. Teza pracy

Przeprowadzona analiza eksploatacyjnych krzywych pełzania, a także pomiarów rzeczywistej geometrii przekroju poprzecznego rurociągów parowych upoważnia do zaproponowania następującej tezy pracy.

Nieregularny przekrój poprzeczny wysokociśnieniowych rurociągów parowych wpływa znacząco na ich pełzanie, tj. na osiągane z upływem czasu eksploatacji trwałe odkształcenie pełzania i prędkość pełzania. Tym samym, dla właściwej i wiarygodnej diagnostyki tych obiektów, istotne znaczenie ma usytuowanie czopów pomiarowych nie tylko wzdłuż tras przebiegów, ale również na obwodzie wybranych do nadzoru elementów z uwagi na geometrię ich przekroju poprzecznego.

7. Zakres pracy

Niniejsza praca obejmuje swoim zakresem wysokociśnieniowe rurociągi przesyłające czynnik roboczy, parę przegrzaną o parametrach: temperatura $500 \div 540$ °C, ciśnienie $9,2 \div 9,8$ MPa. Analizie poddano odcinki proste oraz tzw. prostki (części proste elementów giętych). W praktyce przemysłowej to głównie te miejsca poddawane są nadzorowi diagnostycznemu, prowadzonemu przez cały okres eksploatacji.

W pracy obok prezentowanych i analizowanych już zagadnień dotyczących rzeczywistego profilu rurociągów i warunków ich eksploatacji, ruchowych krzywych pełzania czy też proponowanego podziału rurociągów z uwagi na wartości owalności początkowej i przebiegi wspomnianych krzywych (w tym także z uwagi na ich składowe), zawarte są również np.:

- opracowane stałe konstytutywnego równania pełzania rurociągów parowych,
- modele odcinka rurociągu o różnej owalności początkowej oraz nierównomiernej grubości ścianki na obwodzie (odpowiadające charakterystycznej, rzeczywistej geometrii),
- numeryczna analiza wpływu nierównomiernej geometrii poprzecznej na odkształcenia trwale wywołane pełzaniem,
- numeryczne modele pełzania elementów prostych o profilach: zmiennym na długości i rzeczywistym, ale niezmiennym na długości,
- porównanie wyników eksploatacyjnych badań odkształceń pełzania z rezultatami otrzymanymi na drodze symulacji komputerowej (MES),
- wytyczne dotyczące instalowania czopów pomiarowych na rurociągach parowych.

8. Modelowanie pełzania rurociągów parowych

8.1. Model matematyczny

Metoda elementów skończonych (MES) jest obecnie jedną z najszerzej stosowanych metod rozwiązywania różnych problemów inżynierskich, w tym analizy procesów pełzania [4, 21 ÷ 25, 29, 48, 57, 61, 62], wykorzystywaną również w kilku pracach współautorskich [35, 36, 42, 46]. Główne założenie MES to podział modelu geometrycznego ciągłego o nieskończonej liczbie stopni swobody na elementy skończone, łączące się w tzw. węzłach, czego efektem jest utworzenie modelu geometrycznego dyskretnego o skończonej liczbie stopni swobody. Dzięki wprowadzonym w teorii matematycznej MES funkcjom zapewniającym ciągłość konstrukcji, krawędzie sąsiednich elementów po odkształceniu nadal przylegają do siebie. W zależności od tego czy rozpatrywany jest problem płaski czy skończony to każdy z węzłów może mieć maksymalnie sześć stopni swobody, tj. przemieszczenia w trzech prostopadłych kierunkach i obroty wokół trzech prostopadłych osi. W węzłach definiowane są warunki brzegowe i obciążenia oraz muszą być spełnione warunki równowagi. Przemieszczenia węzłów tworzą układ niewiadomych obliczanych na podstawie zadanych obciążeń. Następnie na podstawie przemieszczeń wyliczane są naprężenia i odkształcenia [28].

Metoda elementów skończonych oparta jest na ogólnym równaniu macierzowym [38]:

$$[M] \cdot \ddot{x} + [C] \cdot \dot{x} + [K] \cdot x = P(t) \quad (19)$$

gdzie:

$[M]$ - macierz bezwładności,

$[C]$ - macierz tłumienia,

$[K]$ - macierz sztywności,

\ddot{x} - wektor przyspieszeń uogólnionych,

\dot{x} - wektor prędkości uogólnionych,

x - wektor przemieszczeń uogólnionych,

$P(t)$ - wektor sił uogólnionych.

Program ANSYS do obliczeń pełzania wykorzystuje jawny ekstrapolacyjny algorytm Eulera, efektywny dla zadań charakteryzujących się małymi przyrostami odkształceń. Podstawą obliczeń jest niezmiennik tensora odkształcenia – intensywność odkształcenia [1]:

$$\varepsilon_{et} = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot (1+\nu)} \cdot \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + (\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_x)^2 + \frac{3}{2} \cdot (\gamma_{xy})^2 + \frac{3}{2} \cdot (\gamma_{yz})^2 + \frac{3}{2} \cdot (\gamma_{zx})^2} \quad (20)$$

gdzie: ν - współczynnik Poisson'a.

W zakresie sprężystym ważny jest związek:

$$\sigma_e = E \cdot \varepsilon_{et} \quad (21)$$

gdzie: E - moduł Young'a.

Przyrost odkształcenia pełzania $\Delta \varepsilon^{cr}$ jest wyliczany jako wielkość skalarna z zależności:

- model Perzyny

$$\sigma = \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}^{pl}}{\gamma} \right)^m \right] \cdot \sigma_o \quad (22)$$

- model Peirce

$$\sigma = \left[1 + \frac{\dot{\varepsilon}^{pl}}{\gamma} \right]^m \cdot \sigma_o \quad (23)$$

gdzie:

- σ - wyrażna granica plastyczności,
- $\dot{\varepsilon}^{pl}$ - prędkość odkształcenia plastycznego,
- m - parametr umocnienia odkształceniowego materiału,
- γ - lepkość materiału,
- σ_o - statyczna granica plastyczności.

W przypadku dominacji początkowych naprężeń przyrost odkształcenia pełzania $\Delta\varepsilon^{cr}$ jest zastąpiony zmodyfikowanym przyrostem odkształcenia $\Delta\varepsilon_m^{cr}$:

$$\Delta\varepsilon_m^{cr} = \varepsilon_{et} \cdot \left(1 - \frac{1}{e^A}\right) \quad (24)$$

gdzie współczynnik A określa wzór:

$$A = \frac{\Delta\varepsilon^{cr}}{\varepsilon_{et}} \quad (25)$$

Przyrost odkształcenia pełzania jest następnie przekształcany na poszczególne składowe tensora za pomocą zależności:

$$\Delta\varepsilon_x^{cr} = \frac{\Delta\varepsilon^{cr}}{\varepsilon_{et}} \cdot \frac{(2 \cdot \varepsilon_x - \varepsilon_y - \varepsilon_z)}{2 \cdot (1 + \nu)} \quad (26)$$

$$\Delta\varepsilon_y^{cr} = \frac{\Delta\varepsilon^{cr}}{\varepsilon_{et}} \cdot \frac{(2 \cdot \varepsilon_y - \varepsilon_z - \varepsilon_x)}{2 \cdot (1 + \nu)} \quad (27)$$

$$\Delta\varepsilon_z^{cr} = \frac{\Delta\varepsilon^{cr}}{\varepsilon_{et}} \cdot \frac{(2 \cdot \varepsilon_z - \varepsilon_x - \varepsilon_y)}{2 \cdot (1 + \nu)} \quad (28)$$

$$\Delta\varepsilon_{xy}^{cr} = \frac{\Delta\varepsilon^{cr}}{\varepsilon_{et}} \cdot \frac{3 \cdot \gamma_{xy}}{2 \cdot (1 + \nu)} \quad (29)$$

$$\Delta\varepsilon_{yz}^{cr} = \frac{\Delta\varepsilon^{cr}}{\varepsilon_{et}} \cdot \frac{3 \cdot \gamma_{yz}}{2 \cdot (1 + \nu)} \quad (30)$$

$$\Delta\varepsilon_{zx}^{cr} = \frac{\Delta\varepsilon^{cr}}{\varepsilon_{et}} \cdot \frac{3 \cdot \gamma_{zx}}{2 \cdot (1 + \nu)} \quad (31)$$

Następnie obliczane są odkształcenia sprężyste i całkowite pełzania z następujących równań (zaprezentowano jedynie dla składowej x):

$$\left(\varepsilon_x^{el}\right)_n = \left(\varepsilon_x\right)_n - \Delta\varepsilon_x^{cr} \quad (32)$$

$$\left(\varepsilon_x^{cr}\right)_n = \left(\varepsilon_x^{cr}\right)_{n-1} + \Delta\varepsilon_x^{cr} \quad (33)$$

8.2. Równanie konstytutywne pełzania – dobór współczynników

Program ANSYS posiada możliwość modelowania pierwszych dwóch etapów pełzania, natomiast trzeci zwykle jest rzadziej uwzględniany. Należy jednak zauważyć, że dla potrzeb analizy zagadnienia postawionego w pracy jest to w zupełności wystarczające. Do symulacji zjawiska pełzania program wykorzystuje dwie metody, tj. *implicit* (całkowanie niejawne po czasie) i *explicit* (całkowanie jawne) [1]. Pierwsza z nich jest szybka, dokładna i zalecana do ogólnego użytku, drugą zaś stosuje się w przypadkach wymagających bardzo małych kroków czasowych.

Do obliczeń przyjęto metodę niejawną z prostym jednoosiowym równaniem konstytutywnym pełzania zapisanym w postaci [1, 3]:

$$\frac{d\varepsilon}{d\tau} = C_1 \cdot \sigma^{C_2} \cdot \tau^{C_3} \quad (34)$$

gdzie: ε – odkształcenie pełzania, τ – czas i σ – naprężenie.

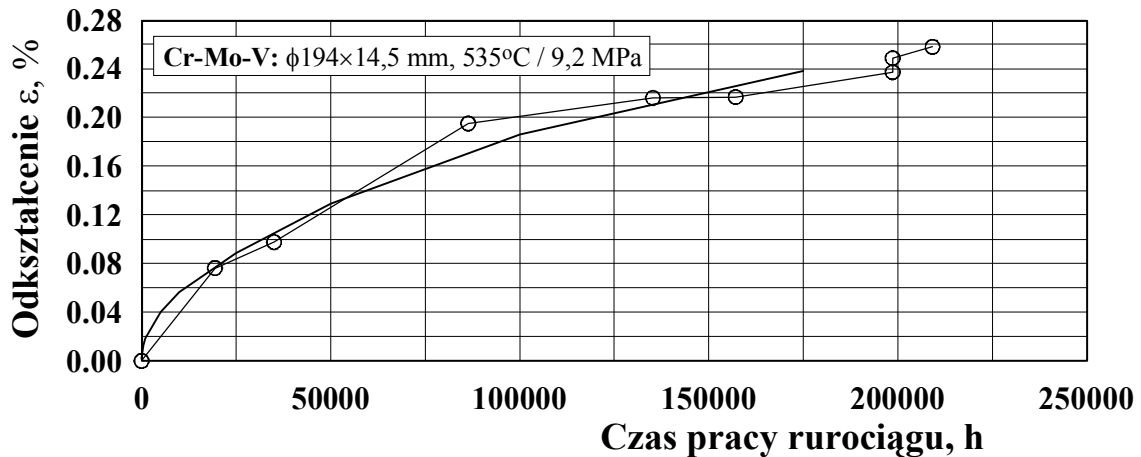
Współczynniki równania (34) wyznaczono wykorzystując wyniki badań pełzania prostego odcinka rurociągu $\phi 194 \times 14,5$ mm, wykonanego ze stali Cr-Mo-V (12X1MΦ). Cechą tego wybranego elementu jest prawie idealny kształt profilu poprzecznego w miejscu zainstalowanych czopów pomiarowych pełzania, który pokazano na rys. 31. Charakteryzuje się on praktycznie zerowymi wartościami owalności początkowej przekroju oraz odchyłki grubości ścianki na obwodzie (zatem profile zewnętrzny i wewnętrzny to okręgi, a ścianka ma stałą grubość). Wartości współczynników dobrano tak, aby krzywa pełzania modelowa, uzyskana z wykorzystaniem równania (34) w symulacji MES, w jak największym stopniu pokrywała się z krzywą doświadczalną

(tutaj ruchową). Dla wybranego elementu pokazano je na rys. 35, a uzyskane metodą prób wartości współczynników są następujące:

$$C_1 = 0,57 \cdot 10^{-14};$$

$$C_2 = 5,22;$$

$$C_3 = -0,5.$$



Rys. 35. Przebiegi krzywych pełzania elementu rurociągu $\phi 194 \times 14,5$ mm o „wzorcowym” profilu w miejscu zainstalowania czopów pomiarowych pełzania (rys. 31): ruchowej (symbole – wartości osiągnięte) i modelowej, uzyskanej za pomocą symulacji MES (linia gruba)

Przy wyznaczaniu współczynników $C_1 \div C_3$ uwzględnione zostały stałe materiałowe odpowiednie dla stali elementu i warunków jego pracy (własności te podano w następnym podrozdziale 8.3). Można też dodać, że dla $C_1 \div C_3$ za wyjściowe (startowe) przyjęto wartości określone dla próbki (kostki) obciążonej przestrzennie (w trzech kierunkach) [3, 4]. W kolejnych obliczeniach symulacyjnych ustalono ich ostateczne, podane wyżej wartości.

Postępując wg opisanej procedury wyznaczono współczynniki równania (34) także dla innych rurociągów parowych, poddawanych nadzorowi pełzania od wielu lat, od początku ich eksploatacji [41, 49]. W ich przypadku przyjmowano jako wyjściowe dla $C_1 \div C_3$ wartości ustalone dla podanego elementu, co zmniejszyło liczbę prób i związany z tym czas obliczeń. Ponadto wykorzystano w tym celu dane nie dla któregoś wybranego w rurociągu elementu, który miałby cechy podobne do wcześniej zaprezentowanego, ale korzystając z wyników dla większej ich liczby, jak to jest widoczne np. na rys. 10 ÷ 12, 14, 20. Stąd ruchowa krzywa, do której odnoszą się stanowi przebieg uśredniony. Dlatego też wyznaczone współczynniki charakteryzują pełzanie materiału danego rurociągu złożonego z wielu elementów rurowych o tych samych nominalnych średnicach i grubościach

ścianek, pracujących w podobnych warunkach. Powodem takiego rozwiązania jest brak pełnych danych dotyczących stanu początkowego geometrii przekrojów poprzecznych (przed oddaniem rurociągu do eksploatacji) w miejscach zainstalowanych czopów pomiarowych. W zasadzie jedyna znana wielkość to owalność początkowa, i to tylko w odniesieniu do kierunków prowadzonych pomiarów odkształceń. Dlatego dokonując wyboru elementów rurociągów w zdecydowanej większości ograniczono się do tych, których wartość tej wielkości pozwala zaliczyć je, zgodnie z przyjętą zasadą, do grupy 1, tzn., że $a_p < 0,5 \%$. W tym zakresie znalazło się ponad 90 % elementów, a jedynie w przypadku kilku była ona nieco wyższa, ale nie przekraczała wartości dopuszczalnej, tj. 1 %. Dla uzasadnienia tego można tutaj dodać, na podstawie dokonanej numerycznej analizy pełzania rurociągów (rozdział 9.1), że dla takich wartości osiągnięte odkształcenia nie różnią się znacząco. Zatem podany sposób uśredniający wyniki badań pełzania materiału rurociągu jako całości uznano, dla potrzeb wyznaczenia współczynników, za zasadny.

Zestawienie rurociągów, obejmujące materiał, wymiary i parametry pracy oraz wyznaczone wartości współczynników równania konstytutywnego (34) przedstawiono w tabeli 6.

Dla pełniejszego wyjaśnienia zagadnienia związanego z wyznaczanymi współczynnikami należy dodać, że w niektórych przypadkach krzywe modelowa i ruchowa nie pokrywają się w początkowej fazie pełzania idealnie. Przyczynę tego należy upatrywać np. w małej niekiedy częstotliwości przeprowadzanych w tym etapie pomiarów odkształceń. Jednak i w tej sytuacji możliwe jest wykorzystywanie uzyskanych wartości z uwagi na zgodność w drugim etapie, na który w praktyce zwraca się szczególną uwagę w diagnostyce rurociągów parowych ze względu na ich wieloletnią eksploatację. Z przebiegów krzywych ich pełzania, prezentowanych w rozdziale 3 widać, że ten etap jest dominujący.

Niestety nie zawsze dane z badań pełzania rurociągów można wykorzystać do wyznaczenia współczynników równań opisujących pełzanie od początku eksploatacji. Jak wynika z rozeznania literaturowego [14, 31], często do obliczeń odkształceń pełzania przyjmuje się za bazę wyniki z pomiarów wykonywanych po ok. 5 000 ÷ 8 000 godz. pracy. Kolejne kontrole przeprowadzane są po następnych 6 000 godz., a niekiedy nawet 25 000 godzin. Eliminuje to przydatność takich danych do celu, o którym mowa wyżej, gdyż nie jest znane odkształcenie osiągnięte do chwili pierwszego pomiaru (pomijając sytuację kiedy przyjmuje się, że jest ono pomijalnie małe).

Współczynniki równania konstytutywnego (34) opisującego proces pełzania
wysokociśnieniowych rurociągów parowych

Rurociąg			Współczynniki równania (34)		
Materiał	Wymiary nominalne $D_2 \times g$ [mm×mm]	Parametry pracy (temperatura metalu / ciśnienie czynnika) t/p , [°C/MPa]	$C_1 \cdot 10^{14}$	C_2	C_3
12HMF	321×29	540/9,8	0,91	5,22	-0,50
	318×29,5	540/9,8	0,57	5,40	-0,50
	267×25	535/9,4	0,57	5,328	-0,50
	267×25,5	535/9,4	0,57	5,38	-0,50
	193×13	535/9,2	0,57	4,98	-0,50
	273×19,5	535/9,3	0,20	5,22	-0,50
	194×14	535/9,3	0,57	4,96	-0,50
12XMΦ	325×26,5	535/9,6	0,57	5,08	-0,50
	273×21,5	535/9,4	0,35	5,22	-0,50
	168×14	535/9,4	0,73	5,22	-0,50
12X1MΦ	168×11	535/9,2	0,57	5,01	-0,50
	168×11,3	535/9,2	0,57	5,07	-0,50
	194×14,5	535/9,2	0,57	5,22	-0,50
13HMF	273,7×22,2	535/9,6	0,57	5,25	-0,50
	273,6×22,2	535/9,6	0,57	5,21	-0,50
15HM	108×12	510/9,8	0,39	5,22	-0,50
	168×20	505/9,2	0,56	5,22	-0,50
15XM	324×50	510/9,8	0,57	5,45	-0,50
	325×32	505/9,6	0,57	5,78	-0,50

Wyznaczone współczynniki równania (34) stanowią unikalny zbiór, dzięki któremu możliwy jest opis procesu pełzania rurociągów dla rzeczywistych warunków obciążenia. Obecnie coraz częściej w publikacjach można znaleźć dobrane stałe. Dotyczą one jednak innych równań pełzania, w tym głównie prawa Nortona [8, 16, 30, 47] (ważnego w drugim etapie), bądź też innych materiałów [3, 4, 21, 61].

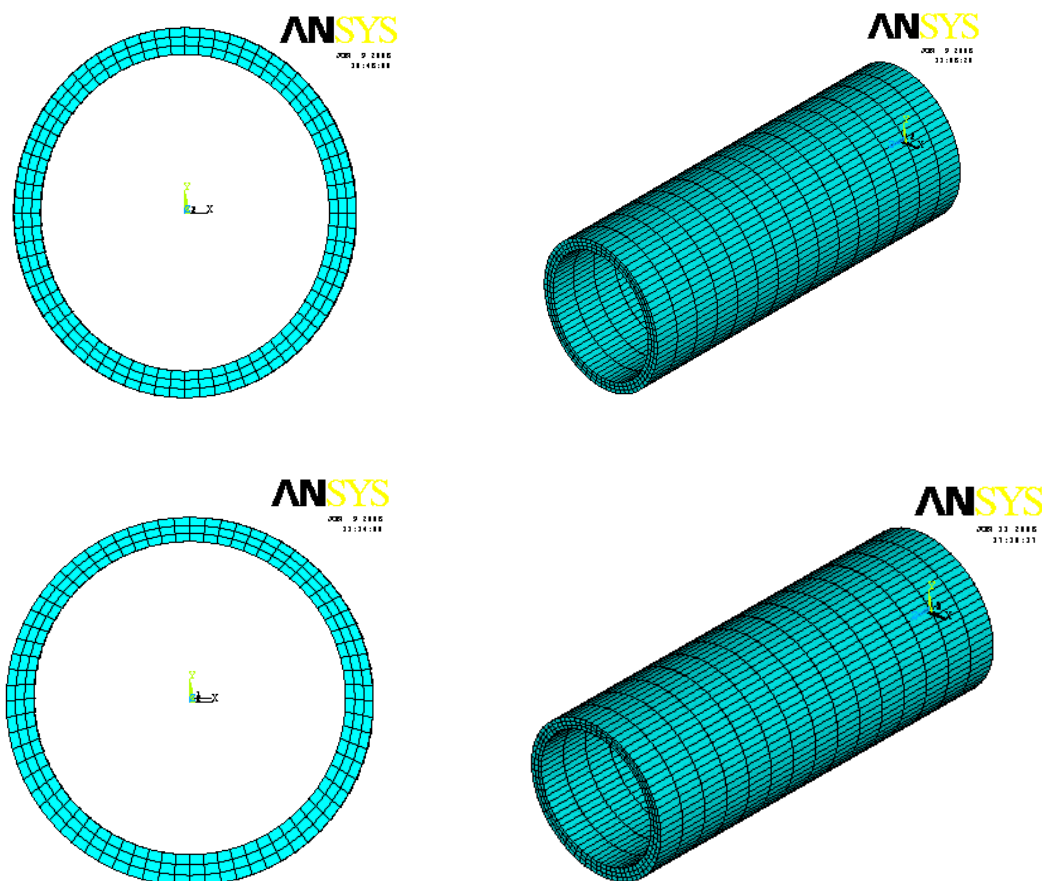
Jak już wcześniej wspomniano, w przypadku analizowanych rurociągów równanie opisuje pełzanie od początku eksploatacji. Nie należy jednak zapominać, że wyznaczone współczynniki odnoszą się do określonych obiektów i warunków pracy. Stanowi to zatem pewne ograniczenie, chociaż należy przypuszczać, że będą one przydatne także w przypadkach rurociągów podobnych do przedstawionych w wykazie. Jednakże ewentualne ich uogólnienie wymagałoby dalszej analizy dla potwierdzenia szerszej przydatności.

8.3. Obliczenia numeryczne

Do przeprowadzenia obliczeń numerycznych pełzania rurociągów metodą elementów skończonych wykorzystano program ANSYS. Jest on jednym z wiodących pakietów na świecie, umożliwiającym kompleksową symulację w każdej dziedzinie nauki i przemysłu. Składa się on z wielu narzędzi, spełniających wszystkie wymagania konieczne do przeprowadzenia planowanych obliczeń. Program posiada wygodny interfejs, bogatą bibliotekę elementów skończonych i własny język programowania APDL, który pozwala na późniejsze łatwe modyfikacje modelu jak i obliczeń. Rozwiązanie każdego problemu w programie ANSYS składa się z trzech etapów: postawienia zadania w *preprocesorze*, rozwiązania problemu w bloku *solution* oraz analizowania i opracowania wyników w *postprocesorze*. Głównym zadaniem *preprocesora* jest stworzenie modelu, określenie jego właściwości materiałowych, a także wygenerowanie siatki węzłów i elementów. Należy zwrócić uwagę, że istnieje możliwość importu geometrii modelu z innego programu, np. Catii. Warunki brzegowe oraz obciążenia mogą być definiowane zarówno w bloku *preprocesora*, jak również *solwera*. Natomiast wyniki obliczeń, rysunki przemieszczeń i naprężeń ogląda się w bloku *postprocesora*.

Wykorzystany do analizy model rury został wykonany za pomocą wewnętrznego języka komend (APDL) programu ANSYS. Opracowana w ten sposób geometria jest możliwie prosta i przejrzysta, a co najważniejsze, jej wymiary sparametryzowane za pomocą zmiennych. Pozwala to na łatwą modyfikację i przeniesienie obliczeń na rury np. o innych wymiarach średnic i grubości ścianki czy różnych wartościach owalizacji. Na tak zamodelowanym 3-wymiarowym prostym odcinku rurociągu wygenerowano regularną siatkę elementów skończonych, co pokazano na rys. 36. Utworzona siatka składa się z elementów typu SOLID 185, zdefiniowanych przez osiem węzłów, każdy mający

3 stopnie swobody [1]. Należy tutaj dodać, że wystarczające byłoby stworzenie modelu 2-wymiarowego, jednak zastosowanie układu 3-wymiarowego pozwala na realistyczne utwierdzenie odcinka, a także może stanowić punkt wyjścia do modelowania elementów o bardziej złożonej geometrii, np. kolan, trójników.



Rys. 36. Przykładowe modele prostych odcinków rurociągów z wygenerowaną siatką elementów skończonych: a) rura o owalności 8 %, b) rura o odchyłce grubości ścianki $\pm 12,5$ % (w jednym z kierunków ewentualnych pomiarów odkształceń pełzania)

Na fragment rury nałożono warunki brzegowe odpowiadające elementowi nieskończonemu w kierunku osiowym oraz założono jego nieściśliwość. Przyjęto, że model został obciążony od wewnątrz ciśnieniem przepływającego czynnika o stałej wartości. Nie uwzględniono ciężaru samego elementu. Niezbędne dane materiałowe stali z jakich wykonano analizowane rurociągi zestawiono, na podstawie kart materiałowych [7], w tabeli 7.

Tabela 7

Wybrane własności stali stosowanych na wysokociśnieniowe rurociągi parowe

Materiał, własności		Temperatura, [°C]						
		20	100	200	300	400	500	600
12HMF 12XMΦ 12X1MΦ	Gęstość, [kg/m ³]	7,80	7,78	7,75	7,72	7,68	7,64	7,60
	Rozszerzalność temperaturowa $\beta \cdot 10^6$, [1/K]	-	11,9	12,9	13,7	14,2	14,5	14,8
	Moduł Young'a $E \cdot 10^{-3}$, [MPa]	208,2	204,4	198,6	191,9	183,0	172,9	160,7
13HMF	Gęstość, [kg/m ³]	7,85	-	-	-	-	-	-
	Rozszerzalność temperaturowa $\beta \cdot 10^6$, [1/K]	-	11,8	12,7	13,3	13,8	14,1	14,4
	Moduł Young'a $E \cdot 10^{-3}$, [MPa]	213,5	210,0	202,0	193,0	186,0	176,5	165,0
15HM	Gęstość, [kg/m ³]	7,85	7,83	7,80	7,76	7,73	7,70	7,66
	Rozszerzalność temperaturowa $\beta \cdot 10^6$, [1/K]	-	11,9	12,7	13,3	13,9	14,3	14,4
	Moduł Young'a $E \cdot 10^{-3}$, [MPa]	208,6	205,0	198,0	188,3	178,1	170,5	158,8

Współczynnik Poissona dla podanych stali wynosi $\nu = 0,3$.

Dla przedstawionego w niniejszym rozdziale pracy równania konstytutywnego pełzania (34) wraz z dobranymi współczynnikami i odpowiednimi stałymi materiałowymi, przeprowadzono symulacje numeryczne pełzania rurociągów parowych o różnych, zadanych przekrojach poprzecznych, a także o przekroju zmieniającym się na długości. Wyniki obliczeń, przedstawione w postaci krzywych pełzania, ich porównanie z przebiegami uzyskanymi na podstawie badań obiektów rzeczywistych oraz analizę wyników zaprezentowano w kolejnym rozdziale.

Dobór kroków czasowych w modelowaniu związany jest z dokładnością oraz czasem trwania obliczeń numerycznych. W przypadku pełzania odkształcenia trwale zmieniają się znacząco we wczesnym jego etapie, ale następnie wzrastają już z ustaloną prędkością. Z tego powodu zaleca się używanie małych kroków czasowych w początkowej

fazie oraz wydłużanie ich wraz z „przebiegiem” symulacji [66]. Do obliczeń przeprowadzonych w ramach niniejszej pracy przyjęto następujące kroki czasowe: 1, 10, 100, 500, 1 000, 5 000, 10 000, 25 000, 50 000, 100 000 oraz 175 000 godz. Uznano, że dają one wystarczająco dokładne wyniki przy w miarę krótkim czasie ich uzyskania. Próby zagęszczenia przedziałów czasowych oraz wydłużenia zakresu symulacji do np. 250 000 godz. znacząco zwiększały czasochłonność.

9. Analiza numeryczna wpływu geometrii przekroju poprzecznego rurociągu na osiągnięte odkształcenie pełzania

Wyniki ruchowych badań pełzania wysokociśnieniowych rurociągów parowych, przedstawione w rozdziale 3 i rozumiane dalej jako doświadczalne wskazują, że istnieje wpływ owalności przekroju poprzecznego w miejscu zainstalowania czopów pomiarowych na osiągnięte średnie wartości trwałego odkształcenia pełzania, a także jego składowe, wyznaczane na podstawie danych uzyskiwanych z odpowiadających im kierunków pomiarów. Jednocześnie też stwierdzono, że przekroje poprzeczne rur stosowanych na rurociągi parowe charakteryzuje obok owalności profilu zewnętrznego, np. większa lub mniejsza od niej owalność profilu wewnętrznego, nierównomierność grubości ścianki na obwodzie, a także zmienność wszystkich wymienionych tutaj wielkości na długości. Należy spodziewać się, że wpływają one również w jakimś stopniu na odkształcenia pełzania (w porównaniu np. z obiektem idealnym). Dlatego w celu określenia jednoznacznej zależności pomiędzy poprzecznym profilem rurociągu pracującego w warunkach pełzania a przebiegiem krzywych pełzania przeprowadzone zostało odpowiednie modelowanie numeryczne (wg zasad opisanych wcześniej). Rozważone zostały następujące przypadki, powstałe jako efekt dokonanej identyfikacji geometrii przekrojów poprzecznych rurociągów:

- różna owalność początkowa profilu zewnętrznego (a_{pz}) przy stałej grubości ścianki (powoduje to, że $\alpha_g = 0\%$),
- nierównomierna grubość ścianki na obwodzie, tj. różne odchyłki grubości ścianki (α_g) przy braku owalności początkowej profili: zewnętrznego ($a_{pz} = 0\%$) i wewnętrznego ($a_{pw} = 0\%$),
- jednoczesne występowanie:
 - owalności początkowej profilu zewnętrznego (a_{pz}) i odchyłek grubości ścianki na obwodzie (α_g) przy braku owalności początkowej profilu wewnętrznego ($a_{pw} = 0\%$),
 - owalności początkowej profilu wewnętrznego (a_{pw}) i odchyłek grubości ścianki na obwodzie (α_g) przy braku owalności początkowej profilu zewnętrznego ($a_{pz} = 0\%$),
 - owalności początkowej obu profili, tzn. zewnętrznego (a_{pz}) i wewnętrznego (a_{pw}) oraz odchyłek grubości ścianki (α_g),

- zmienna owalność początkowa na długości rury (a_{pz} , a_{pw}) przy stałej grubości ścianki ($\alpha_g = 0\%$).

Zamodelowany został również profil odpowiadający rzeczywistemu (jest to jeden z wielu mierzonych w celu identyfikacji geometrii przekroju poprzecznego rur w płaszczyźnie zainstalowanych czopów pomiarowych badań pełzania materiału rurociągów parowych).

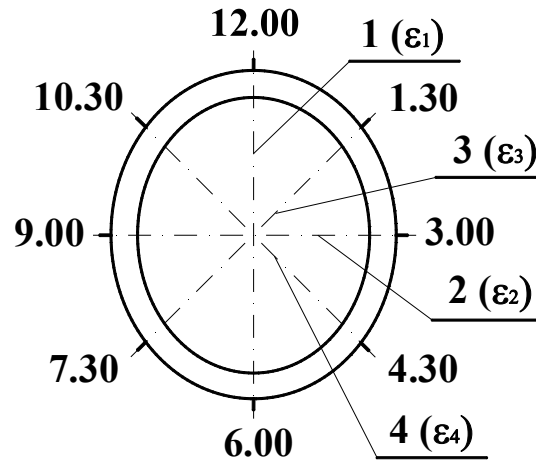
Wynikiem modelowania numerycznego są wykresy przedstawiające osiągnięte w czasie odkształcenia pełzania, wyznaczone na podstawie obliczanych danych dla poszczególnych kierunków, w których mogłyby być zainstalowane czopy pomiarowe. Można dodać, że dane, o których tutaj mowa, mogą być w takiej sytuacji traktowane jako wartości pomiarowe. Zgodnie z rys. 22, kierunek odpowiadający godzinom 12.00-6.00 nazwano pierwszym (a odpowiadające mu odkształcenie pełzania oznaczono, tak jak wcześniej, jako ε_1), godzinom 3.00-9.00 drugim (odkształcenie pełzania ε_2). Te dwa kierunki tworzą jeden układ pomiarowy. Przyjęty drugi układ, dla zwiększenia możliwych wariantów poddanych analizie, jest przedstawiony względem poprzedniego o 45° , co zmienia w odniesieniu do niego wielkości charakteryzujące profil. Wyznaczają go kierunki (rys. 22): trzeci, odpowiadający godzinom 1.30-7.30 (odkształcenie pełzania ε_3) i czwarty, godziny 4.30-10.30 (odkształcenie pełzania ε_4). Należy dodać, że układ odpowiadający kierunkom 1 i 2 traktuje się jako podstawowy i to do niego należy odnosić podawane na rysunkach przebiegów krzywych pełzania wartości owalności a_{pz} i a_{pw} .

Na podstawie wartości odkształceń w dwóch prostopadłych do siebie kierunkach obliczano wartość średnią oznaczaną jako ε , a w przypadkach konieczności doprecyzowania, o który z układów podanych wyżej chodzi, przyjmowano oznaczenia $\varepsilon_{sr\ 1-2}$ lub $\varepsilon_{sr\ 3-4}$. Zaprezentowana zasada jest utrzymywana w odniesieniu do wszystkich analizowanych przypadków, a w razie potrzeby uzupełniana dodatkowym schematem.

9.1. Wpływ owalności początkowej profilu poprzecznego

Wpływ owalności profilu poprzecznego rurociągu na jego pełzanie można zaobserwować, jak już wspomniano, na podstawie przebiegów ruchowych krzywych pełzania. W tych przypadkach chodzi o owalność w odniesieniu do profilu zewnętrznego. Dlatego w pierwszej kolejności analizie numerycznej poddano proste odcinki rur,

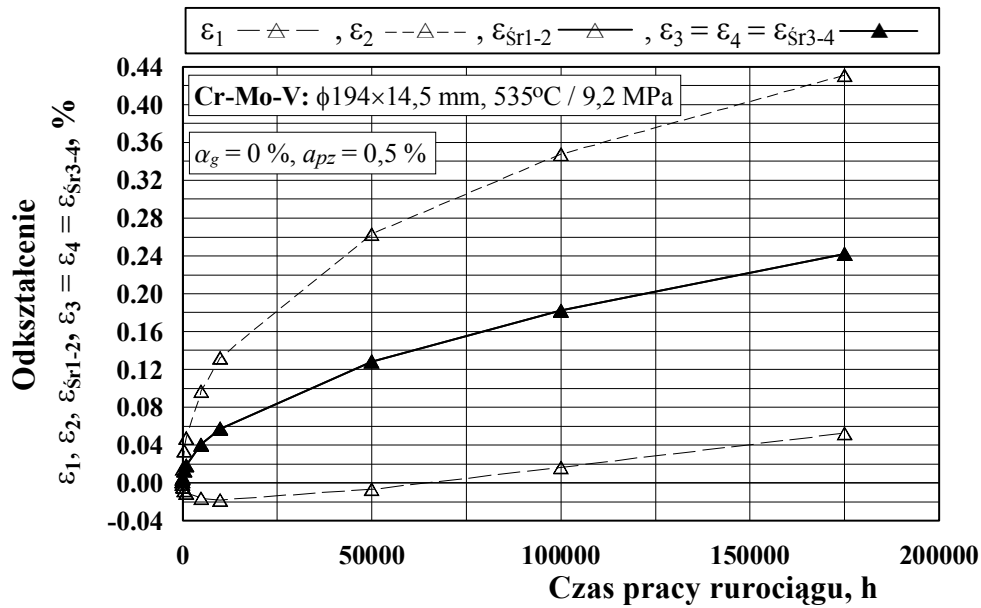
charakteryzujących się stałą grubością ścianki, tzn. że $\alpha_g = 0\%$, i różnymi wartościami owalności początkowej profilu zewnętrznego a_{pz} równymi: 0,5 %, 1 %, 2 %, 4 % i 8 %. Schematyczny widok takiego profilu pokazano na rys. 37.



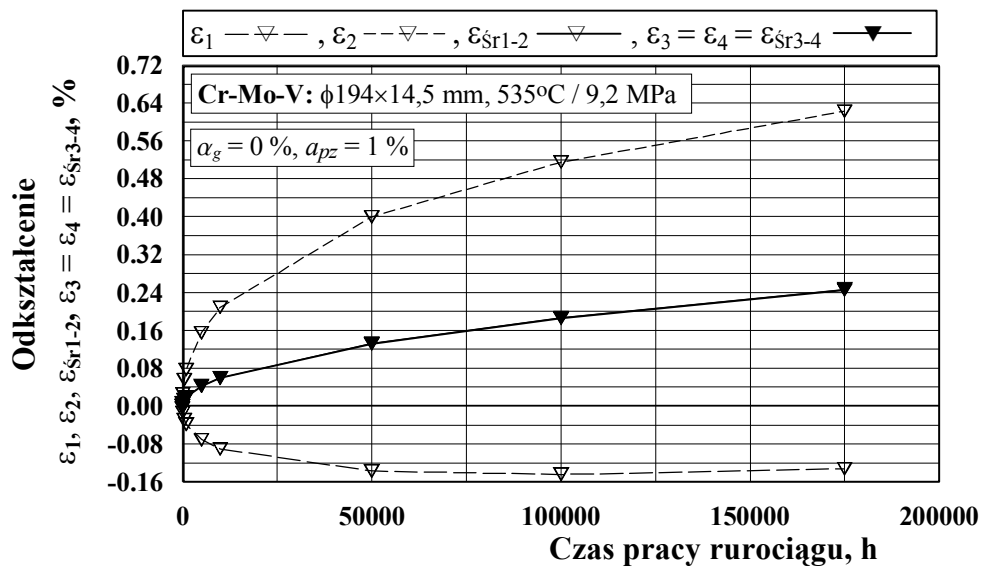
Rys. 37. Schemat profilu modelowanego numerycznie rurociągu (stała owalność i jednaka grubość ścianki na obwodzie): 1 ÷ 4 – kierunki odpowiadające odkształceniom pełzania $\varepsilon_1 \div \varepsilon_4$ (są to składowe odkształcenia średnich $\varepsilon_{sr\ 1-2}$ i $\varepsilon_{sr\ 3-4}$)

Należy tutaj zaznaczyć, że równomierna grubość ścianki na obwodzie nie oznacza takiej samej wartości owalności profilu wewnętrznego a_{pw} . Owalność wewnętrzna będzie tym większa, im większa jest grubość ścianki. Dla rurociągu przyjętego w obliczeniach o średnicy zewnętrznej $\phi = 194$ mm i grubości ścianki $g = 14,5$ mm wynosi ona, dla podanych wyżej wartości, odpowiednio: 0,6 %, 1,2 %, 2,4 %, 4,7 % i 9,4 %.

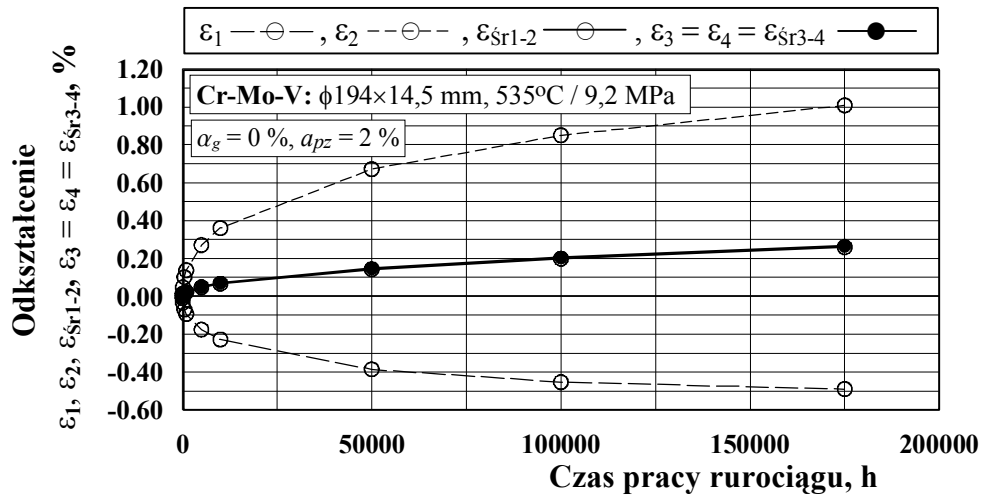
W analizowanym przypadku ze względu na symetrię modelu dane pozwalające wyznaczyć odkształcenia trwale pełzania odczytywano tylko w 3 kierunkach: pierwszym, drugim i trzecim (ten ostatni jest równoważny z czwartym). Uzyskane wartości wraz z obliczonymi wartościami średnimi przedstawiono na rys. 38 ÷ 40 w postaci krzywych pełzania.



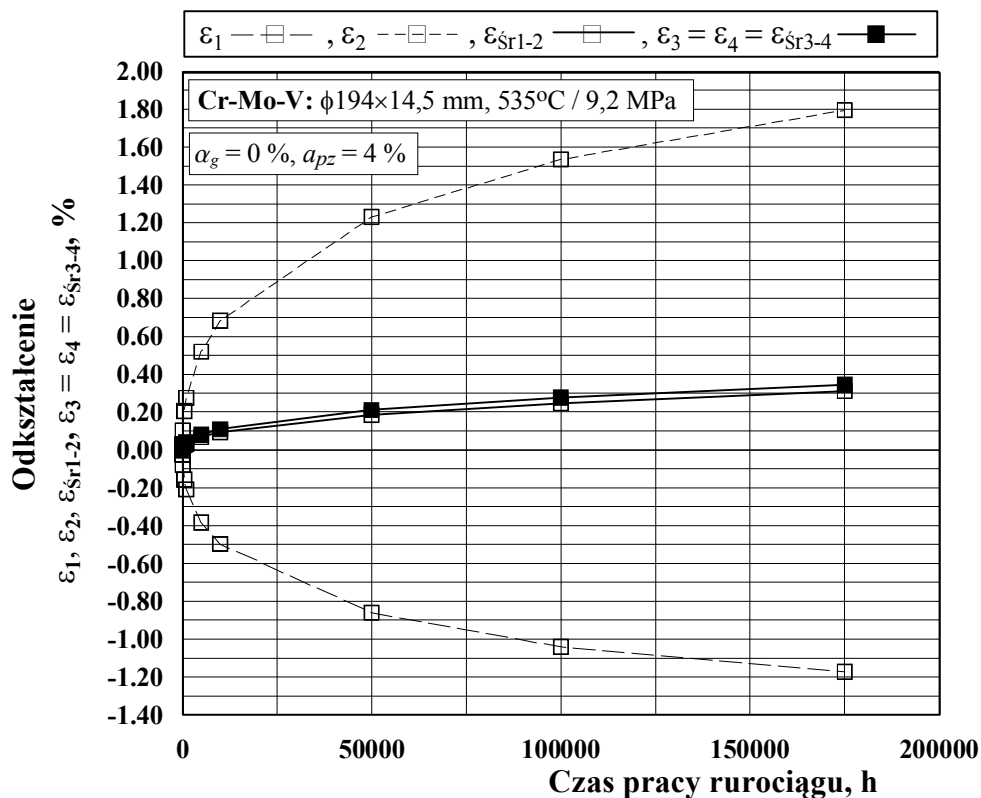
Rys. 38. Symulacja MES – krzywe pełzania wysokociśnieniowego rurociągu parowego o stałej grubości ścianki na obwodzie, tj. $\alpha_g = 0\%$ i owalności początkowej profilu zewnętrznego: dla kierunków 1 i 2 – $a_{pz} = 0,5\%$, dla kierunków 3 i 4 – $a_{pz} = 0\%$ (wg przyjętego podziału – rozdział 3 – element z pogranicza grupy 1 i 2)



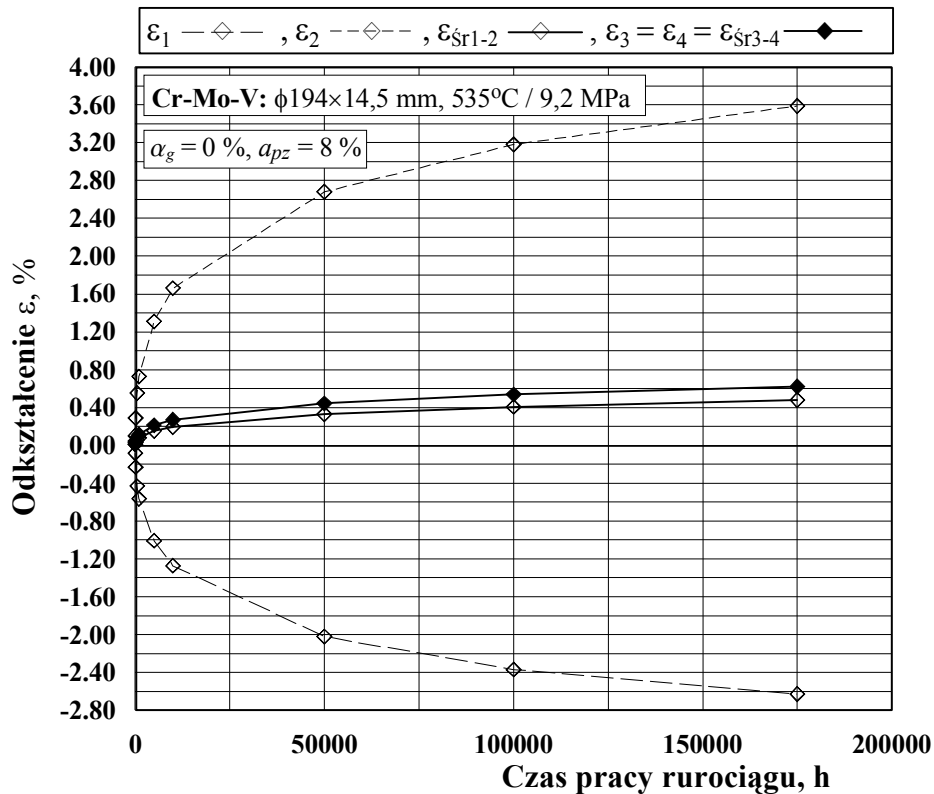
Rys. 39a. Symulacja MES – krzywe pełzania wysokociśnieniowego rurociągu parowego o stałej grubości ścianki na obwodzie tj. $\alpha_g = 0\%$ i owalności początkowej profilu zewnętrznego: dla kierunków 1 i 2 – $a_{pz} = 1\%$, dla kierunków 3 i 4 – $a_{pz} = 0\%$ (wg przyjętego podziału – rozdział 3 – element należący do grupy 2)



Rys. 39b. Symulacja MES – krzywe pełzania wysokociśnieniowego rurociągu parowego o stałej grubości ścianki na obwodzie tj. $\alpha_g = 0\%$ i owalności początkowej profilu zewnętrznego: dla kierunków 1 i 2 – $a_{pz} = 2\%$, dla kierunków 3 i 4 – $a_{pz} = 0\%$ (wg przyjętego podziału – rozdział 3 – element należący do grupy 2)

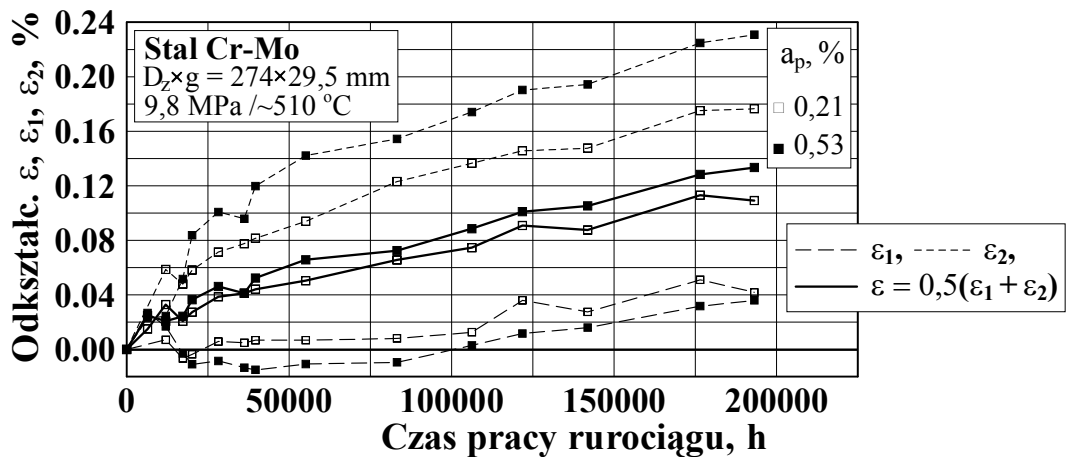


Rys. 40a. Symulacja MES – krzywe pełzania wysokociśnieniowego rurociągu parowego o stałej grubości ścianki na obwodzie tj. $\alpha_g = 0\%$ i owalności początkowej profilu zewnętrznego: dla kierunków 1 i 2 – $a_{pz} = 4\%$, dla kierunków 3 i 4 – $a_{pz} = 0\%$ (wg przyjętego podziału – rozdział 3 – element należący do grupy 3)

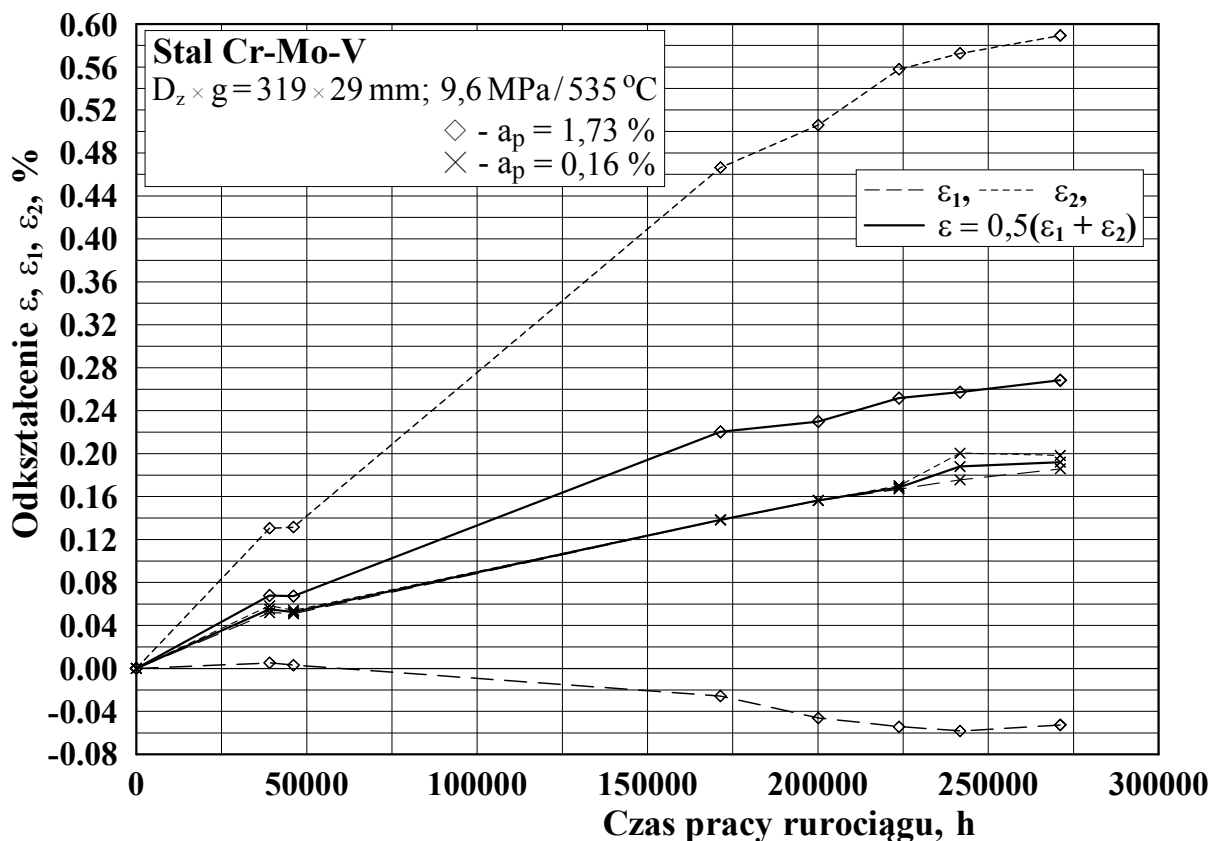


Rys. 40b. Symulacja MES – krzywe pełzania wysokociśnieniowego rurociągu parowego o stałej grubości ścianki na obwodzie tj. $\alpha_g = 0$ % i owalności początkowej profilu zewnętrznego: dla kierunków 1 i 2 – $a_{pz} = 8$ %, dla kierunków 3 i 4 – $a_{pz} = 0$ % (wg przyjętego podziału – rozdział 3 – element należący do grupy 3)

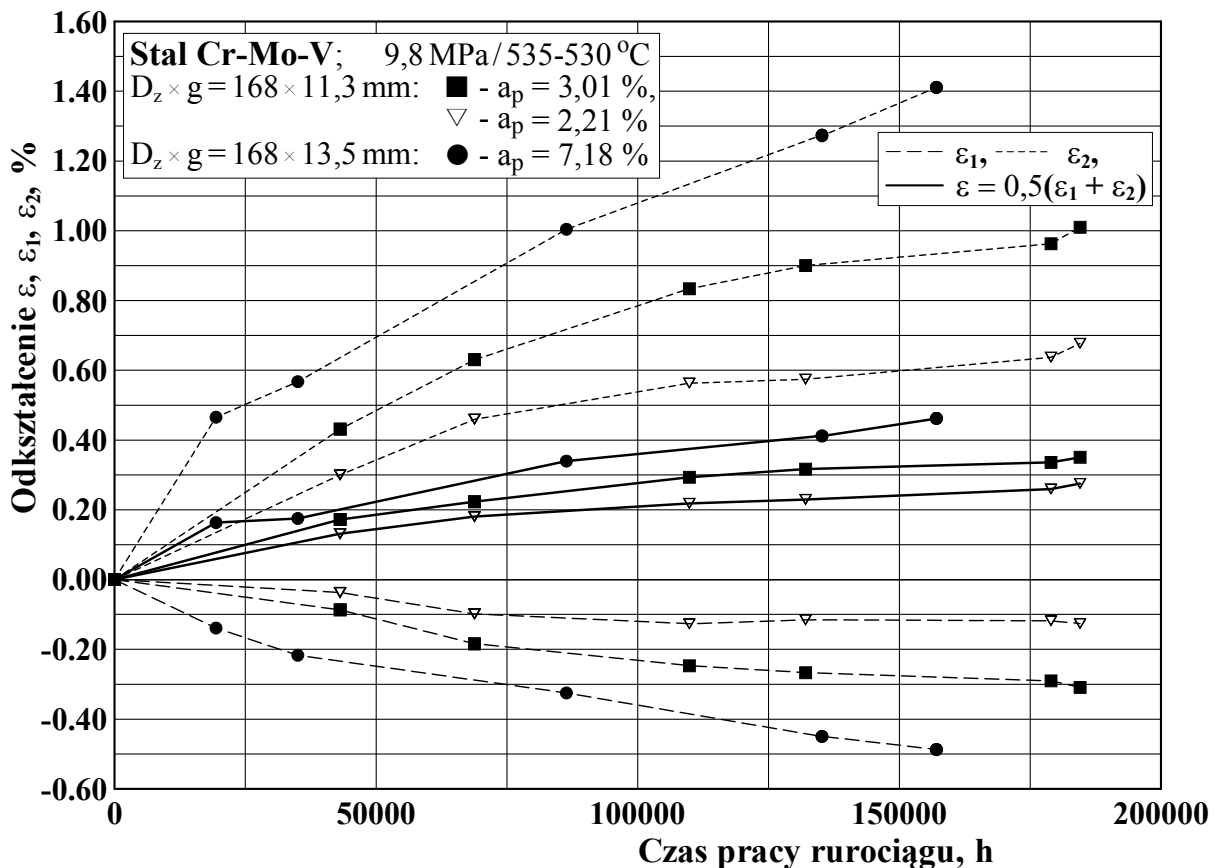
Potwierdzeniem dla uzyskanych wyników modelowania numerycznego (rys. 38 ÷ 40) są krzywe doświadczalne (tutaj ruchowe) przedstawione na rys. 41 ÷ 43, a także prezentowane już wcześniej w rozdziale 3, np. rys. 16 i 17. Ich porównanie daje zgodność przebiegów krzywych odkształceń pełzania, zarówno jeżeli chodzi o wartości średnie (ϵ , ϵ_{sr1-2}), jak i ich składowe, wyznaczone na podstawie zmian średnic w wybranych kierunkach (ϵ_1 , ϵ_2).



Rys. 41. Eksploatacyjne krzywe pełzania elementów wysokociśnieniowego rurociągu parowego o różnych wartościach owalności początkowej przekroju poprzecznego (wg przyjętego podziału z grupy 1 i z pogranicza grup 1 i 2)



Rys. 42. Eksploatacyjne krzywe pełzania elementów wysokociśnieniowego rurociągu parowego o różnych wartościach owalności początkowej przekroju poprzecznego (wg przyjętego podziału z grupy 1 i z grupy 2)



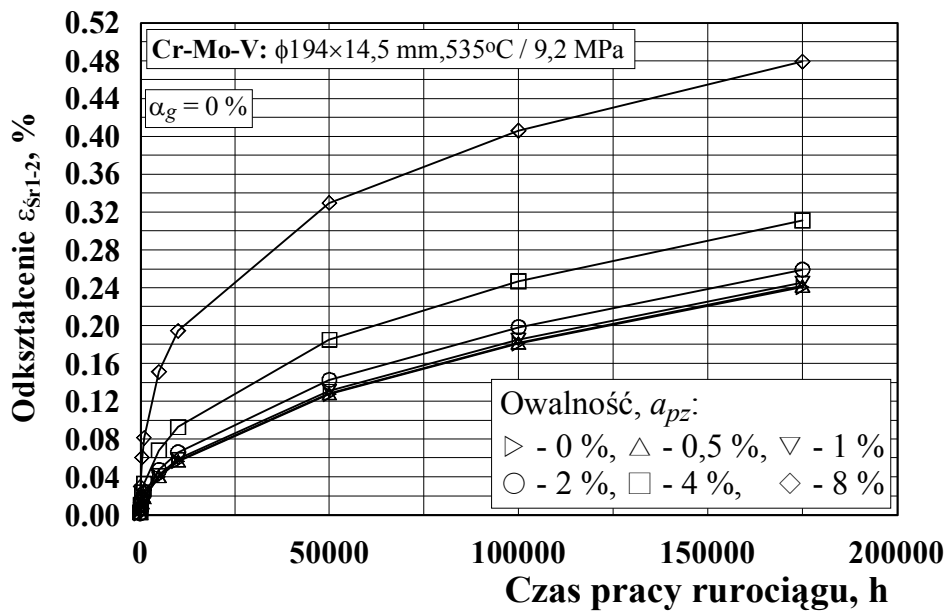
Rys. 43. Eksploatacyjne krzywe pełzania elementów rurociągów parowych o różnej owalności początkowej przekroju poprzecznego (wg przyjętego podziału z grupy 2 i 3)

Na podstawie analizy wymienionych powyżej rysunków można stwierdzić, że elementy o wyższej owalności charakteryzuje znaczna różnica wartości odkształceń pełzania, a w związku z tym przebiegi krzywych określonych na podstawie zmian średnic w kierunkach wzajemnie prostopadłych do siebie (składowe ε_1 i ε_2). O wiele większe i wzrastające z upływem czasu wartości osiągane są dla danych uzyskanych dla kierunku, w którym początkowa średnica była mniejsza. Natomiast tam gdzie początkowo średnica była większa, charakterystycznym jest zmniejszanie się jej z upływem czasu eksploatacji, dając „ujemne” wartości odkształceń. Wynika stąd, że efektem procesu pełzania zowalizowanych elementów jest zmiana w czasie ich owalności, że dążą one do przyjęcia kształtu okręgu. Tempo takich zmian jest większe w początkowej fazie eksploatacji i tym bardziej wzrasta im wyższa jest owalność początkowa przekroju poprzecznego rurociągu, co można zauważyć na rys. 21 (rozdział 3). Fakt ten potwierdzają również wyniki modelowania numerycznego zamieszczone w jednej publikacji współautorskiej [2]. Można

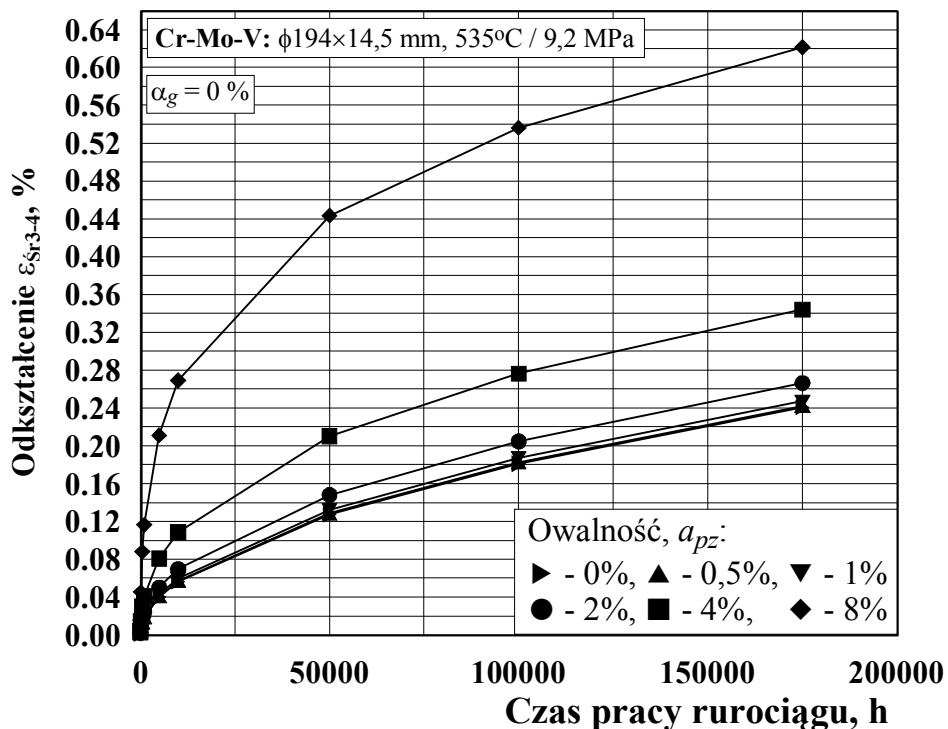
w tym miejscu również dodać, że dla elementów o niższej owalności, (np. ok. 0,5 %) odkształcenie w kierunku, w którym średnica była większa (tutaj pierwszym) początkowo wraz z upływem czasu zmniejsza się, po czym następuje jego wyraźny wzrost, jak to widać na rys. 38. Takie zachowanie potwierdzają również niektóre przebiegi doświadczalne (ruchowe). Przykładem może być krzywa pełzania rurociągu parowego o wymiarach $\phi 274 \times 29,5$ mm i owalności początkowej $a_p = a_{pz} = 0,53$ %, pokazana na rys. 41, dla której użyto symbolu (■). Posiada ona bardzo zbliżony przebieg, tj. w początkowym okresie pracy odkształcenie w jednym z kierunków przyjmuje wartości ujemne by następnie osiągnąć wartości dodatnie. W przypadku rur o podwyższonej owalności początkowej (w granicach od ok. 1 % do ok. 2 %) symulacja MES wykazuje, mniej wyraźny wzrost lub nieznaczne obniżanie się odkształceń trwałych w kierunku pierwszym. Potwierdzają to krzywe ruchowe, pokazane na rys. 42 i 43, oznaczone symbolami, odpowiednio: rombu (\diamond) – $a_p = 1,73$ % i trójkąta (∇) – $a_p = 2,21$ %. Niestety w przypadkach tych brak jest pełnej geometrii przekroju poprzecznego, w tym dotyczącej grubości ścianek na obwodzie.

Na rys. 38 i 39a, a praktycznie także na rys. 39b, dotyczących modelowania elementów o owalności początkowej do ok. 2 % wartości trwałych odkształceń pełzania uzyskane na podstawie danych w trzecim kierunku praktycznie pokrywają się z odkształceniami średnimi, wyznaczonymi dla kierunków jeden i dwa. Przy wyższych wartościach owalności, rys. 40a i 40b ($a_{pz} = 4$ % i 8 %), odkształcenie pełzania $\varepsilon_{sr3-4} = \varepsilon_3 = \varepsilon_4$ różni się od wartości ε_{sr1-2} i różnica ta rośnie ze wzrostem owalu. Jak pokazano w rozdz. 9.3 niniejszej pracy takie zachowanie ma związek z większą owalnością profilu wewnętrznego (a_{pw}) w porównaniu z owalnością profilu zewnętrznego (a_{pz}).

Analizując uzyskane modelowe przebiegi uśrednionych wartości odkształceń pełzania, osiągniętych z upływem czasu pracy, daje się zauważyć, że są one tym większe im wyższa jest owalność początkowa przekroju zewnętrznego. Dla ułatwienia zebrano te krzywe pokazując je na rys. 44 i 45, tj. osobno dla układów kierunków 1 i 2 oraz 3 i 4. W przypadku tego ostatniego w rozważanym profilu, przyjmując podaną w rozdziale 4 zasadę obliczania owalności, będzie ona zawsze wynosiła $a_{pz} = 0$ %.

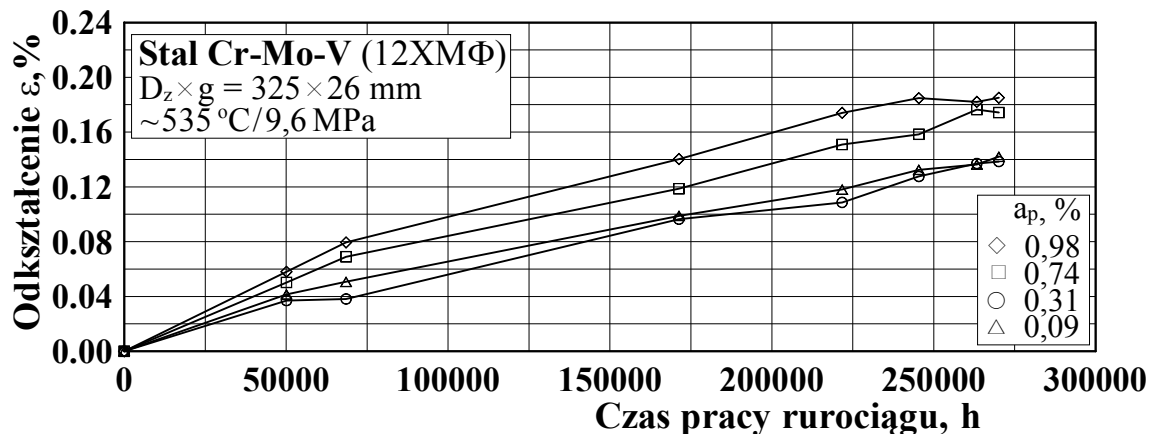


Rys. 44. Symulacja MES – przebiegi średnich wartości odkształcenia pełzania rurociągów o różnych owalnościach początkowych profilu zewnętrznego (dla układu kierunków 1 i 2 – rys. 37)



Rys. 45. Symulacja MES – przebiegi średnich wartości odkształcenia pełzania rurociągów o różnych owalnościach początkowych profilu zewnętrznego (dla układu kierunków 3 i 4 – rys. 37)

Pokazane na rys. 44 i 45 przebiegi mają swoje potwierdzenie w doświadczalnych (ruchowych) krzywych pełzania, co pokazano na rys. 46 oraz jest widoczne np. na rys. 43 czy też na rys. 13 i 14 (rozdział 3).



Rys. 46. Ruchowe krzywe pełzania elementów wysokociśnieniowego rurociągu parowego o różnej wartości owalności początkowej przekroju poprzecznego

Z powyższych rozważań wynika, że owalność początkowa profilu (tutaj z naciskiem na profil zewnętrzny) rurociągów parowych ma jednoznaczny wpływ zarówno na ich trwałe odkształcenia określane dla danych w poszczególnych kierunkach, jak i na wartości średnie. Wpływ ten jest bardziej widoczny dla elementów o większym stopniu owalizacji.

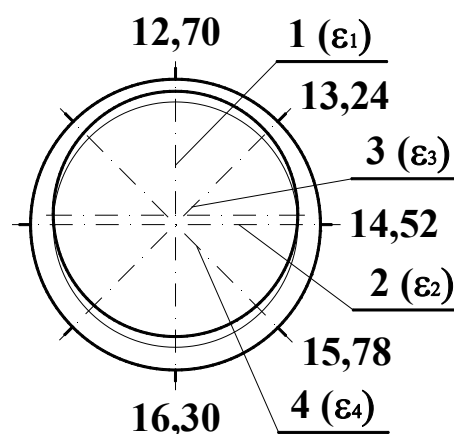
W przypadku elementów o stałej grubości ścianki lub wykazujących niewielkie jej odchyłki, oraz o owalności początkowej profilu zewnętrznego pozwalającej zaliczyć je, wg zaproponowanego w rozdziale 3 podziału, do grup 1 i 2 (ale dla tej ostatniej do wartości ok. 1,5 %), różnica odkształceń średnich jest stosunkowo niewielka, niezależnie od przyjętego układu kierunków, wg których jest określana. Dlatego też wśród krzywych ruchowych dla elementów z podanego zakresu owalności niekiedy zdarza się, że krzywa odpowiadająca wyższej owalności może znaleźć się poniżej innej o niższej owalności, jak to jest widoczne np. na rys. 11 i 12 (rozdział 3). Należy jednak dodać, że na to mogą też mieć wpływ i inne czynniki, jak większa nierównomierność grubości ścianki czy owalność profilu wewnętrznego.

Jeżeli owalność początkowa przekroju poprzecznego rur jest wyższa od 2 %, w tym szczególnie tych zaliczonych do grupy 3 (owalność powyżej 2,5 %), to osiągnięte średnie wartości odkształcenia pełzania są wyraźnie wyższe. Dla tych przypadków istotny jest

również układ kierunków, wg którego są one wyznaczone. Porównanie rys. 44 i 45 pokazuje, że wartości odpowiadające kierunkom 1 i 2 są niższe od tych dla kierunków 3 i 4. Zatem w takich przypadkach to w tych ostatnich powinny być instalowane czopy pomiarowe do kontroli pełzania. Dla niskich owalności początkowych rozważanych profili rurociągów usytuowanie układu kierunków nie ma większego praktycznego znaczenia.

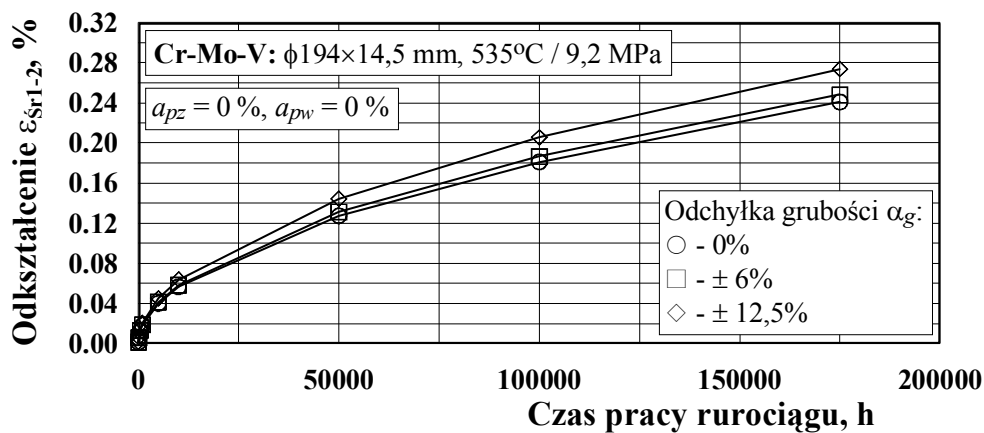
9.2. Wpływ nierównomiernej grubości ścianki na obwodzie

Przekroje poprzeczne rurociągów obok owalności zwykle charakteryzuje, jak wskazuje przeprowadzona identyfikacja geometrii (rozdział 4), pewna zmienność grubości ścianki na obwodzie. Dlatego w kolejnym etapie analizy numerycznej, symulacji poddano odcinek rury o zróżnicowanej grubości ścianki, przy czym krzywe tworzące profile zewnętrzny i wewnętrzny rury są idealnymi okręgami. Taki model uzyskano poprzez przesunięcie wzdłuż jednej z osi płaskiego układu współrzędnych, w analizowanym przypadku zgodnej z kierunkiem 1, środka wewnętrznego okręgu o żądane wartości odchyłki α_g równe: $\pm 6\%$ i $\pm 12,5\%$ (największa wartość jest maksymalną odchyłką podawaną przez normę [53]). Wyznaczone grubości ścianki w miejscach pokrywających się z przyjętymi, zgodnie z podanymi wcześniej ogólnymi zasadami, kierunkami 1 ÷ 4, dla wyższej z podanych wartości odchyłek, dla modelowanej rury $\phi 194 \times 14,5$ mm przedstawiono na rys. 47.



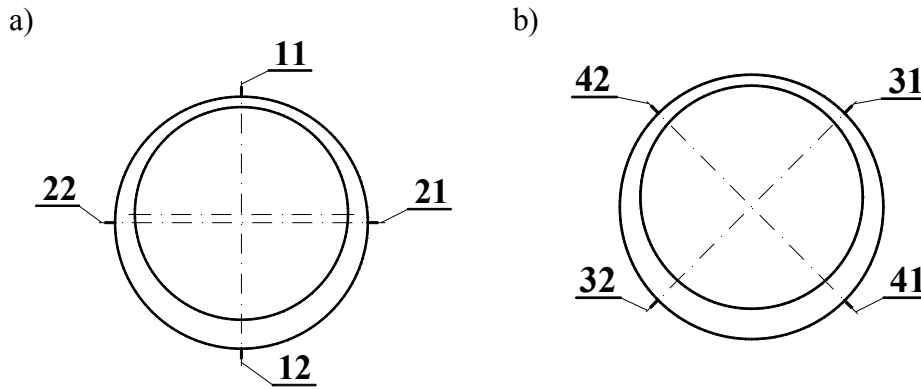
Rys. 47. Schematyczny przekrój poprzeczny rurociągu $\phi 194 \times 14,5$ mm z naniesionymi wartościami grubości ścianki dla odchyłki określonej w kierunku 1 – $\alpha_g = \pm 12,5\%$
(1 ÷ 4 – kierunki odpowiadające danym do wyznaczenia odkształceń pełzania ϵ_1 ÷ ϵ_4)

Rezultaty przeprowadzonych obliczeń przedstawiono na rys. 48 w postaci przebiegów krzywych pełzania. Jak można zauważyć, na osiągnięte względne trwałe odkształcenie pełzania ma wpływ, obok analizowanej wcześniej owalności, także nieregularność grubości ścianki, przy czym większe odkształcenia są charakterystyczne dla elementów o bardziej zróżnicowanej grubości ścianki. Wpływ ten, biorąc pod uwagę spotykane w praktyce wartości odchyłek grubości ścianek rur oraz widoczne na rys. 48 różnice osiągniętych odkształceń, w porównaniu do oddziaływania owalności początkowej profilu jest mniejszy, ale ma miejsce.



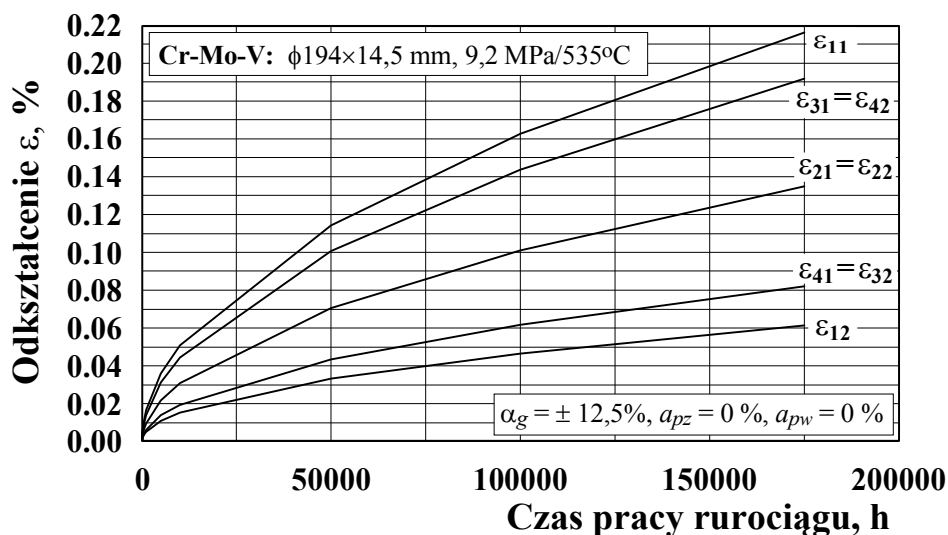
Rys. 48. Symulacja MES – krzywe pełzania wysokociśnieniowego rurociągu (wartości średnie odkształcenia pełzania) dla różnych odchyłek grubości ścianki w przekroju poprzecznym (podane na rysunku wartości odchyłek α_g dotyczą ścianki dla kierunku 1)

Dla uzyskania pełniejszego obrazu pełzania rurociągu o nierównomiernej ściance, której profil odpowiada pokazanemu na rys. 47 ($\alpha_g = \pm 12,5\%$, $a_{pz} = a_{pw} = 0\%$), odnotowano niezależnie dla kierunków 1 i 2 przyrosty odpowiadających im promieni (dla danego kierunku zwroty od środka przekroju zgodnie z promieniami). Ich przyjęte oznaczenia przedstawia rys. 49. Zgodnie z nim odkształcenie związane np. z kierunkiem 1 składa się z odkształceń cząstkowych ε_{11} i ε_{12} . Nazwę przyjęto z uwagi na fakt, że każde stanowi część odkształcenia w podanym kierunku tak, że np. $\varepsilon_1 = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{12}$. Analogicznie jest w pozostałych kierunkach $2 \div 4$.



Rys. 49. Profil rurociągu o nierównomiernej grubości ścianki na obwodzie, przyjęty w obliczeniach numerycznych (w oznaczeniu liczbowym, pierwsza oznacza kierunek ewentualnych pomiarów, druga promień, którego przyrost byłby kontrolowany). Układ z usytuowaniem czopów pomiarowych w kierunkach: a) 1 i 2, b) 3 i 4

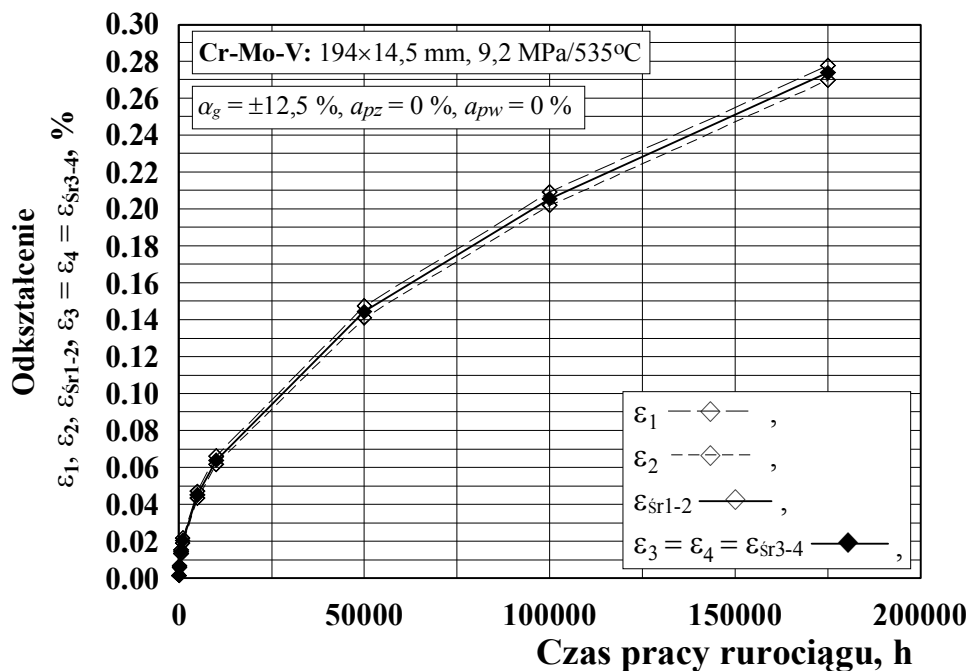
Ze względu na symetrię modelu, analizie poddano pięć „zwrotów” typu kierunek-promień, rozłożonych na połowie obwodu i przestawionych co 45° . Otrzymane wyniki, w postaci zmian odkształceń cząstkowych pełzania ε_{11} , ε_{12} , $\varepsilon_{21} = \varepsilon_{22}$, $\varepsilon_{31} = \varepsilon_{42}$ i $\varepsilon_{41} = \varepsilon_{32}$, obliczanych na podstawie danych dla poszczególnych promieni przedstawiono na rys. 50. Zgodnie z oczekiwaniami, w miejscach pocienienia ścianki trwałe odkształcenia są największe i analogicznie, tam gdzie ścianka jest pogrubiona mniejsze.



Rys. 50. Symulacja MES – przebiegi cząstkowych odkształceń pełzania $\varepsilon_{11} \div \varepsilon_{42}$ (opis w tekście) rurociągu parowego o odchyłce grubości ścianki określonej dla kierunku 1: $\alpha_g = \pm 12,5 \%$

Różnice osiąganych odkształceń cząstkowych wynikają z rozkładu grubości ścianki na obwodzie rury. Pomiedzy miejscami określonymi przez promienie 11 i 31 oraz 41 i 12 (rys. 49) różnice grubości ścianki dla analizowanego profilu wynoszą, odpowiednio 0,54 mm i 0,52 mm, co przekłada się na zbliżone różnice pomiędzy odkształceniami ε_{11} i ε_{31} oraz ε_{41} i ε_{12} . Tam gdzie różnice grubości ścianki są większe, np. 1,28 mm pomiędzy miejscami związanymi z promieniami 31 i 21 oraz 1,26 mm między 21 i 41, różnice odpowiednich odkształceń są również większe.

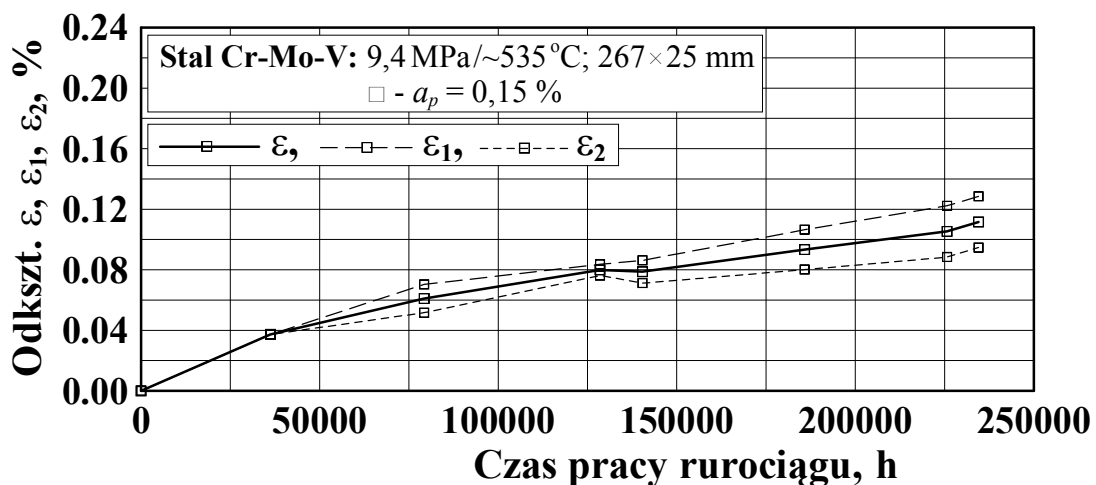
Przebiegi odkształceń pełzania wyznaczonych na podstawie zmian, w kierunkach prostopadłych do siebie, w obu przyjętych układach, tj. $\varepsilon_1 = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{12}$, $\varepsilon_2 = \varepsilon_{21} + \varepsilon_{22}$, $\varepsilon_3 = \varepsilon_4 = \varepsilon_{31} + \varepsilon_{41}$ oraz odpowiadających im odkształceń średnich tzn. $\varepsilon_{sr1-2} = 0,5(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)$, $\varepsilon_{sr3-4} = 0,5(\varepsilon_3 + \varepsilon_4)$, pokazano na rys. 51. W rozważonym przypadku na składową odkształcenia pełzania ε_1 , wyznaczoną wg danych dla kierunku 1, składają się wartości ε_{11} i ε_{12} , odpowiadające grubościom ścianki, odpowiednio: minimalnej i maksymalnej. Jak widać na rys. 51, ich suma jest jednak większa od sumy odkształceń cząstkowych ε_{21} i ε_{22} , wyznaczonych dla danych w kierunku 2, gdzie grubość ścianki jest praktycznie równa średniej co powoduje, że odchyłka jest pomijalna (0,14 %). Suma ta jest również większa od wartości $\varepsilon_3 = \varepsilon_4$ związanych z kierunkami 3 i 4, przy czym należy tutaj zauważyć, że $\varepsilon_3 = \varepsilon_4 = \varepsilon_{sr3-4} = \varepsilon_{sr1-2}$.



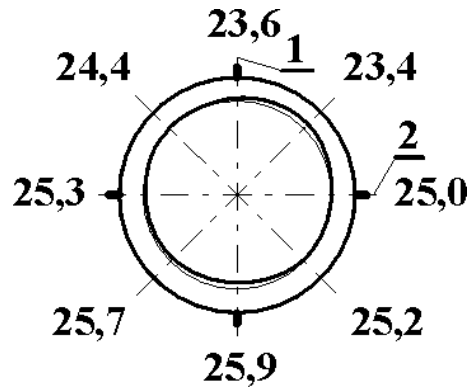
Rys. 51. Symulacja MES – krzywe pełzania wysokociśnieniowego rurociągu parowego przy odchyłce grubości ścianki $\alpha_g = \pm 12,5\%$ i owalności początkowej $a_p = 0\%$ (opis w tekście)

Uogólniając analizowany przypadek można stwierdzić, że spośród składowych trwałego odkształcenia pełzania najwyższe wartości osiągnęte są dla danych pomiarowych z kierunku, w którym odchyłki grubości ścianki rury, mierzone na jej obwodzie, są największe. Ponadto wartość średnia odkształcenia pełzania jest taka sama niezależnie od usytuowania układu pomiarowego utworzonego przez dwa wzajemnie do siebie prostopadłe kierunki.

Potwierdzeniem wyników modelowanego rurociągu są przykładowe przebiegi krzywych pełzania przedstawione na rys. 52. Wyznaczono je na podstawie danych z ruchowych badań pełzania elementu wysokociśnieniowego rurociągu parowego $\phi 267 \times 25$ mm, wykonanego ze stali niskostopowej Cr-Mo-V. Jego profil w miejscu zainstalowania czopów pomiarowych, opracowany na podstawie wykonanych po 225 700 godz. eksploatacji pomiarów grubości ścianki na obwodzie, pokazano na rys. 53. Można uzupełnić, że w przypadku tego elementu, którego czas pracy przekroczył ponad dwa razy wartość obliczeniową, początkowa owalność wynosiła $a_p = a_{pz} = 0,15$ %, a po podanym czasie obniżyła się do 0,11 %.



Rys. 52. Krzywe pełzania wysokociśnieniowego rurociągu parowego charakteryzującego się nierównomiernością grubości ścianki oraz niską owalnością początkową przekroju poprzecznego $a_p = a_{pz} = 0,15$ %



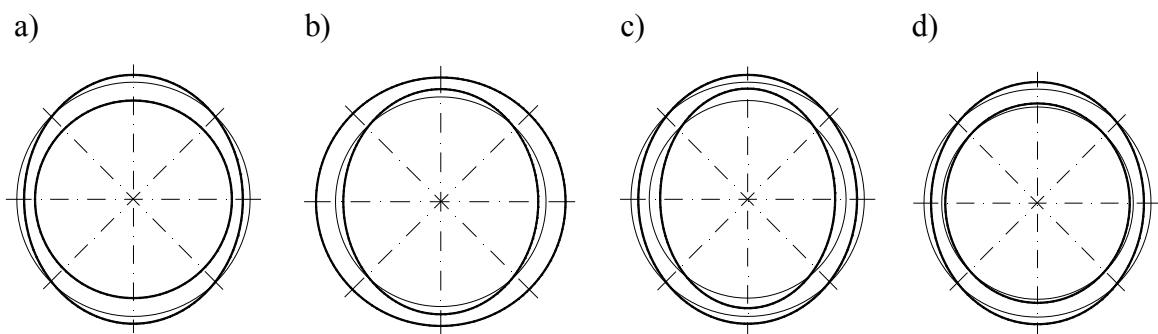
Rys. 53. Przekrój poprzeczny elementu rurociągu parowego $\phi 267 \times 25$ mm w miejscu zainstalowania czopów pomiarowych do kontroli pełzania, wg pomiarów wykonanych po 225700 godz. pracy (przebieg krzywych pełzania pokazano na rys. 52): 1 i 2 – kierunki prowadzonych pomiarów odkształceń spowodowanych pełzaniem

Dane na rys. 53 wskazują na nieregularność grubości ścianki diagnozowanego elementu a obliczone odchyłki przy średniej grubości ścianki $g_{sr} = 24,8$ mm wynoszą: w kierunku 1, w części pogrubionej, ok. +4,5 % i pocienionej, ok. -4,8 %, a w kierunku 2 ok. +0,8 % i +2,0 %. Wpływa to na osiągane wartości odkształceń, wyznaczanych niezależnie na podstawie danych dla każdego z kierunków pomiarów, i wynikające z tego położenie krzywych pełzania ε_1 i ε_2 . Ich usytuowanie jest zgodne z przedstawionym na rys. 51. Należy uzupełnić, że widoczne na rys. 52 nieco większe różnice między ε_1 i ε_2 , w porównaniu z zaprezentowanymi na rys. 51, mimo iż nierównomierność jest niższa, wynikają nie tylko np. z niesymetryczności profilu poprzecznego, ale także pewnej jego owalności.

9.3. Jednoczesny wpływ owalności początkowej i nierównomierności grubości ścianki

Przekroje poprzeczne rur wykorzystywanych na rurociągi parowe w podstawowej masie cechuje zazwyczaj jednoczesna owalność profilu, często dotycząca tak zewnętrznego (a_{pz}) jak i wewnętrznego (a_{pw}), oraz nierówna grubość ścianki, wyrażana przez odchyłkę (a_g). Stąd w kolejnym etapie pracy zamodelowano przypadki o następującej charakterystyce (podane wartości liczbowe dotyczą podstawowego układu kierunków):

- a) wewnętrzna owalność początkowa przekroju poprzecznego $a_{pw} = 0\%$ i stanowi ona punkt odniesienia dla żądanej wartości odchyłki grubości ścianki α_g (stworzono w ten sposób model, pokazany na rys. 54a, w którym wewnętrzną częścią rury jest idealny okrąg, a zewnętrzną owal ($a_{pz} = 1,8\%$ dla $\alpha_g = \pm 6\%$ i $a_{pz} = 3,7\%$ dla $\alpha_g = \pm 12,5\%$),
- b) zewnętrzna owalność początkowa przekroju poprzecznego $a_{pz} = 0\%$, a krzywa tworząca zowalizowane wnętrze rury została uzyskana przez odniesienie wymaganej wartości odchyłki α_g do zewnętrznego profilu rury, rys. 54b (otrzymano owalności wewnętrzne: $a_{pw} = 2,1\%$ dla $\alpha_g = \pm 6\%$ i $a_{pw} = 4,4\%$ dla $\alpha_g = \pm 12,5\%$),
- c) zewnętrzna owalność początkowa a_{pz} równa 1%, 2%, 4%, 8%, a owalność wewnętrzną otrzymano przez założenie minimalnej grubości ścianki w kierunku pierwszym, maksymalnej w drugim i odwrotnie, tzn. minimalnej w kierunku drugim, maksymalnej w pierwszym. Odpowiadające przedstawionej sytuacji wartości owalności (zewnętrznej i wewnętrznej) wraz z odchyłkami grubości ścianki przedstawiono w tabeli 8, a poglądowy kształt przekrojów poprzecznych na rys. 54c i 54d. W uzupełnieniu należy dodać, że widoczne w tabeli 8 ujemne wartości owalności profilu wewnętrznego wynikają z dużej odchyłki grubości przy niskiej owalności zewnętrznej (poniżej 4%) i oznaczają obrót dłuższej średnicy wewnętrznego owalu o 90° w stosunku do dłuższej średnicy owalu zewnętrznego.



Rys. 54. Poglądowe kształty przekrojów poprzecznych przyjęte w numerycznych obliczeniach rurociągów parowych (jednoczesne występowanie owalności początkowej i nierównomiernej grubości ścianki)

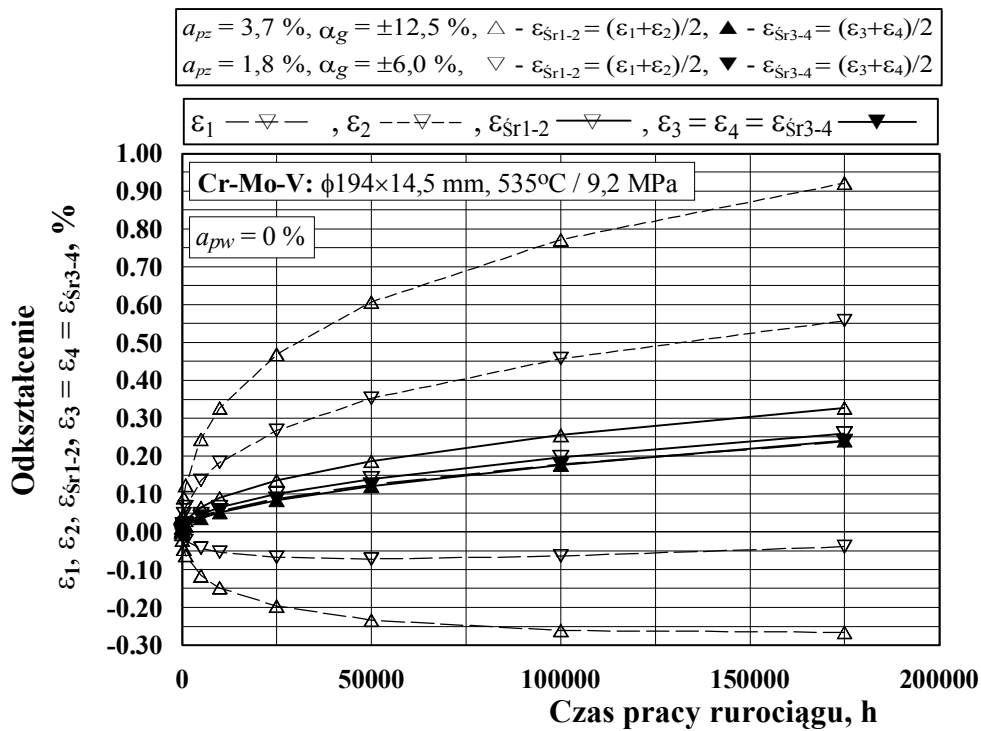
Tabela 8

Przyjęte w analizie numerycznej wartości owalności początkowej profili: zewnętrznego (a_{pz})
i wewnętrznego (a_{pw}) wraz z odchyłkami grubości ścianki w kierunkach 1 i 2 (dla przypadku c)

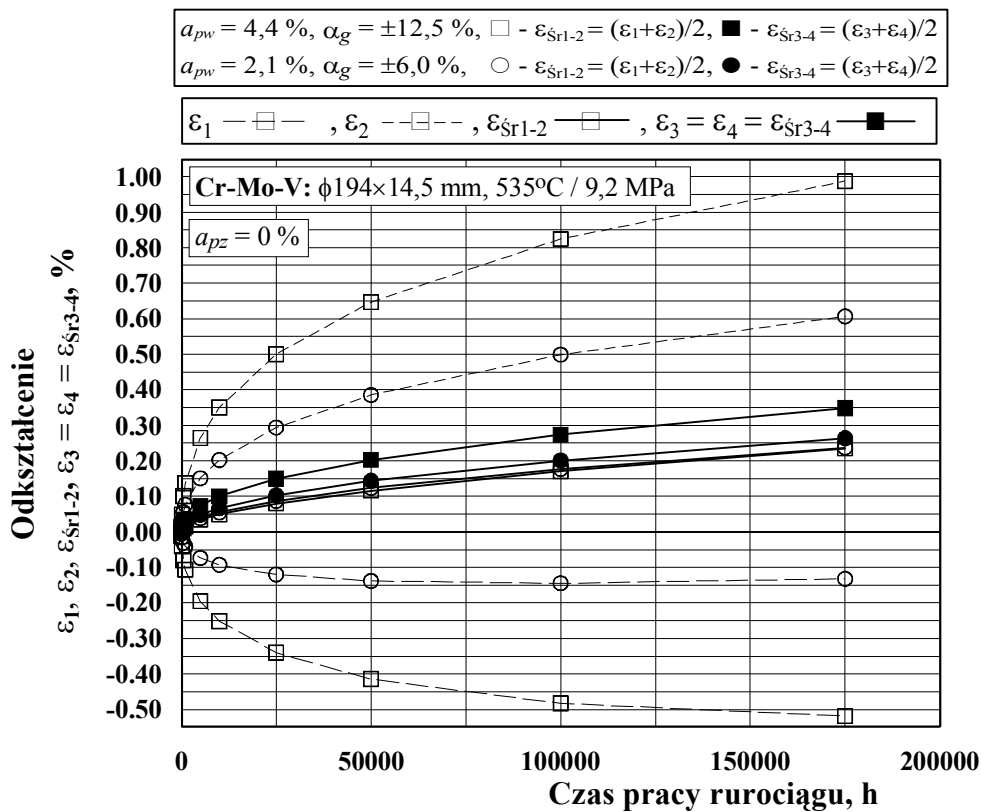
Owalność a_{pz} , [%]	Odchyłka grubości α_g w kierunku „1”, [%]	Odchyłka grubości α_g w kierunku „2”, [%]	Owalność a_{pw} , [%]
1,0	+12,5	-12,5	-3,2
1,0	+6,0	-6,0	-0,9
1,0	+3,0	-3,0	0,1
1,0	-3,0	+3,0	2,2
1,0	-6,0	+6,0	3,3
1,0	-12,5	+12,5	5,6
2,0	+12,5	-12,5	-2,1
2,0	+6,0	-6,0	0,2
2,0	+3,0	-3,0	1,3
2,0	-3,0	+3,0	3,4
2,0	-6,0	+6,0	4,5
2,0	-12,5	+12,5	6,8
4,0	+12,5	-12,5	0,3
4,0	+6,0	-6,0	2,6
4,0	+3,0	-3,0	3,6
4,0	-3,0	+3,0	5,8
4,0	-6,0	+6,0	6,8
4,0	-12,5	+12,5	9,1
8,0	+12,5	-12,5	5,0
8,0	+6,0	-6,0	7,3
8,0	-6,0	+6,0	11,5
8,0	-12,5	+12,5	13,8

Dla przypadków wymienionych jako a i b, przebiegi odkształceń składowych ε_1 , ε_2 , ε_3 i ε_4 oraz odkształceń średnich odpowiadającym tym składowym, pokazano na rys. 55. Można na nich zauważyć znaczną różnicę pomiędzy trwałymi odkształceniami pełzania określonymi na podstawie pomiarów średnic w kierunkach 1 i 2 oraz równość odkształceń składowych dla kierunków 3 i 4. Cechą charakterystyczną w obu tych przypadkach są największe wartości składowych dla danych uzyskiwanych w kierunku 2 i najmniejsze (uwzględniając znak przy wartości liczbowej) w kierunku 1.

a)



b)



Rys. 55. Symulacja MES – krzywe pełzania odcinka rurociągu z jednoczesną owalnością początkową profilu i nierównomierną grubością ścianki: a) $a_{pw} = 0 \%$ (profil a – rys. 54), b) $a_{pz} = 0 \%$ (profil b – rys.54)

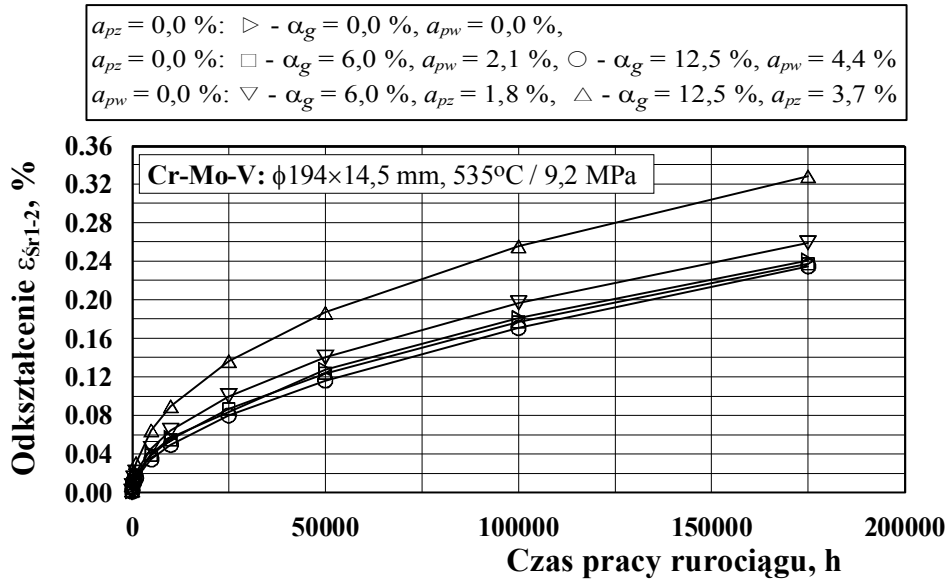
W przypadku, gdy zewnętrzny profil rurociągu jest owalem, a wewnętrzny okręgiem, to odkształcenia w kierunku 3 (ze względu na symetrię równoważne 4 oraz średniemu dla tych kierunków) są mniejsze od odkształceń średnich dla kierunków 1 i 2. Różnica pomiędzy odkształceniami ε_{sr1-2} i ε_{sr3-4} , jest tym mniejsza im mniejsza jest owalność zewnętrzna przekroju rury.

Dla modelu, w którym okrąg jest na zewnątrz a owal wewnątrz sytuacja staje się odwrotna do przedstawionej powyżej. Średnie wartości odkształceń trwałych związanych z kierunkami 3 i 4 osiągają różne wartości, w zależności od odchyłki grubości ścianki, przy czym są większe dla większej odchyłki. Porównując dla tego przypadku przebiegi krzywych pełzania wyznaczonych dla wartości średnich widać, że odkształcenie ε_{sr3-4} jest większe niż odkształcenie ε_{sr1-2} . Dla powyższego przekroju poprzecznego na uwagę zasługuje fakt dodatnich odkształceń w kierunku, w którym grubość ścianki jest większa. Mogłoby się wydawać, że tam gdzie ścianka jest najcieńsza średnica zewnętrzna będzie wzrastała przyjmując dodatnie, większe wartości odkształceń. Dzieje się jednak inaczej, w miejscu pocienienia odkształcenia osiągają „ujemne” wartości, oznaczające zmniejszanie się średnicy. Uzasadnienie można odnaleźć rozkładając wektory ciśnienia, działające prostopadle do krzywej tworzącej owal wewnętrzny w każdym jej punkcie, na wektory składowe w kierunkach 1 i 2. Daje się wówczas zauważyć, że obciążenie jest wyższe w kierunku 2 i pomimo grubszej ścianki większe jest też odkształcenie pełzania.

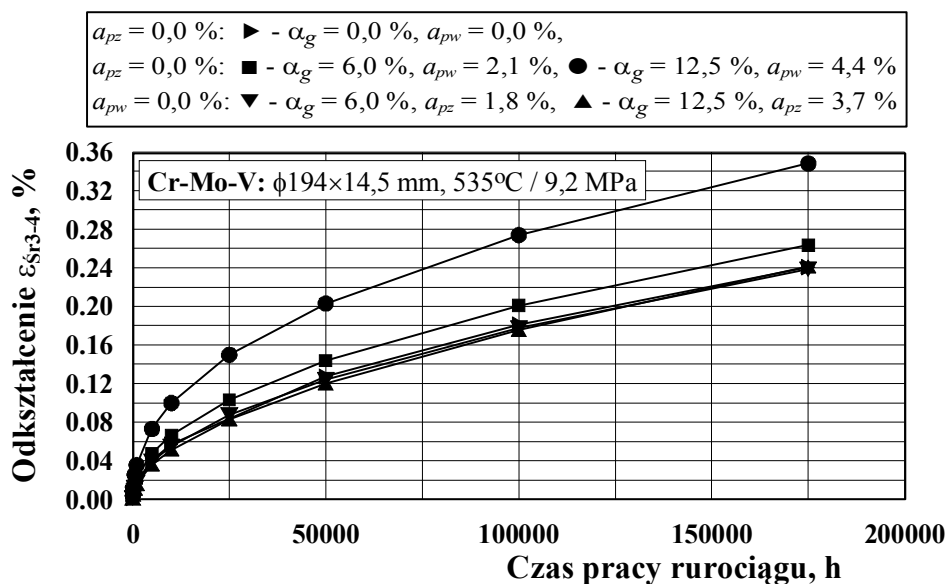
Przebiegi odkształceń średnich ε_{sr1-2} i ε_{sr3-4} dla analizowanych przypadków zestawiono na rys. 56. Dla porównania naniesiono na nim dodatkowo krzywą pełzania elementu idealnego, tzn. niezowalizowanego i o stałej grubości ścianki. Jak widać z rys. 56a, gdy zewnętrzna owalność początkowa $a_{pz} = 0 \%$, a na skutek odchyłki grubości ścianki wewnątrz rury jest owalem, to krzywe pełzania wyznaczone dla układu kierunków 1 i 2 (symbole \square , \circ) zbliżone są do krzywej odpowiadającej idealnemu przekrojowi poprzecznemu (okrągłemu). Jednak, gdy mamy do czynienia z owalnością profilu zewnętrznego (wewnątrz rury jest okręgiem) to wartości odpowiadające odkształceniu przekroju idealnego zostają znacznie przekroczone (krzywe dla danych z kierunków 1 i 2, symbole ∇ , \triangle). Sytuacja staje się odwrotna jeśli porównanie profilu idealnego odniesie się do wartości otrzymywanych na podstawie kierunków 3 i 4 (rys. 56b). Jednocześnie porównanie krzywych na rys. 56a i 56b pozwala wskazać dla tych profili układ kierunków, w których należałoby zainstalować czopy pomiarowe pełzania,

aby osiągnąć odkształcenia średnie były najwyższe. I tak, w przypadku a (rys. 54) byłyby to kierunki 1 i 2, a w przypadku b (rys. 54) kierunki 3 i 4.

a)



b)



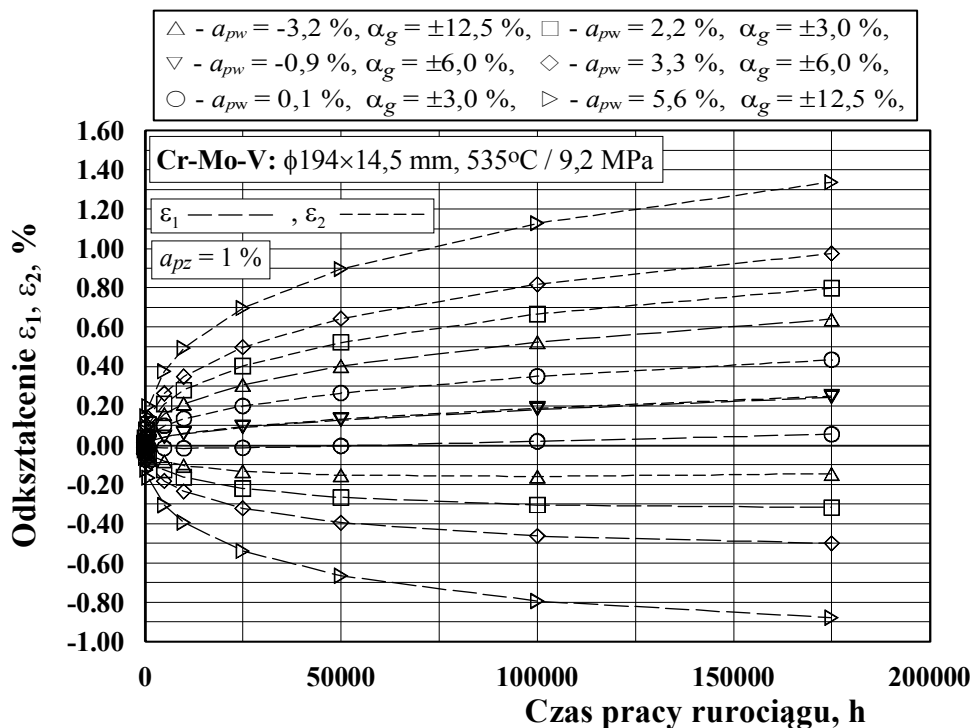
Rys. 56. Symulacja MES – przebiegi wartości średnich odkształceń pełzania rurociągu parowego o zowalizowanym profilu przekroju poprzecznego i nierównomierną grubością ścianki:

a) ε_{sr1-2} (układ kierunków 1 i 2), b) ε_{sr3-4} (układ kierunków 3 i 4)

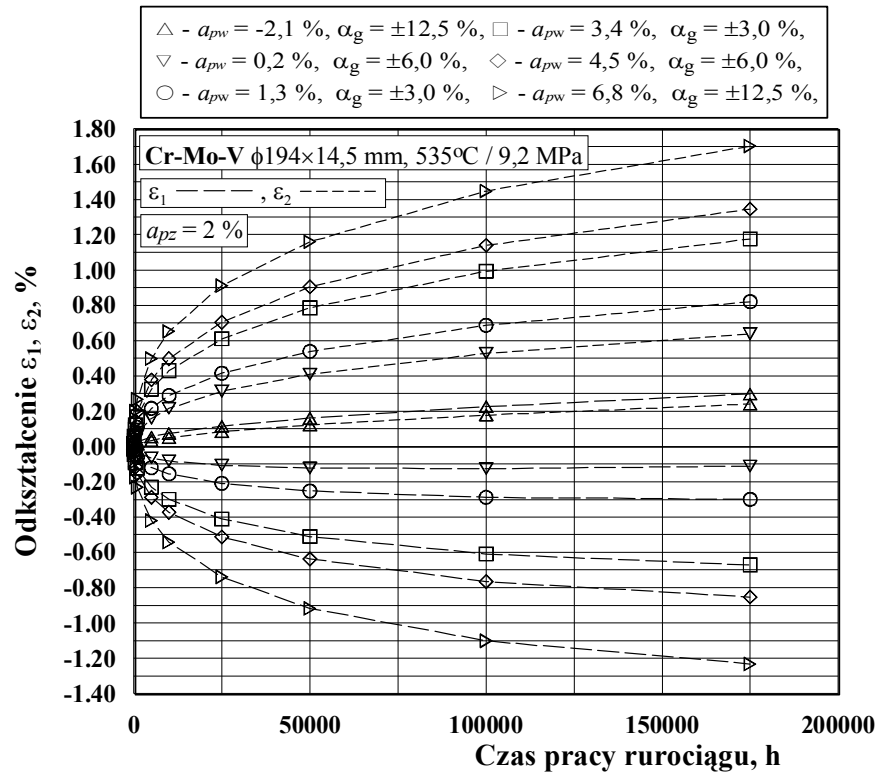
W uzupełnieniu powyższej analizy można też dodać, na podstawie rys. 44, 45 i 56, że odkształcenia rurociągów zowalizowanych z odchyłką grubości ścianki różną od zera,

osiągają większe wartości w porównaniu z tymi o stałej grubości ścianki nawet przy nieco mniejszej owalności zewnętrznej, co jest wynikiem wpływu nieregularności grubości ścianki.

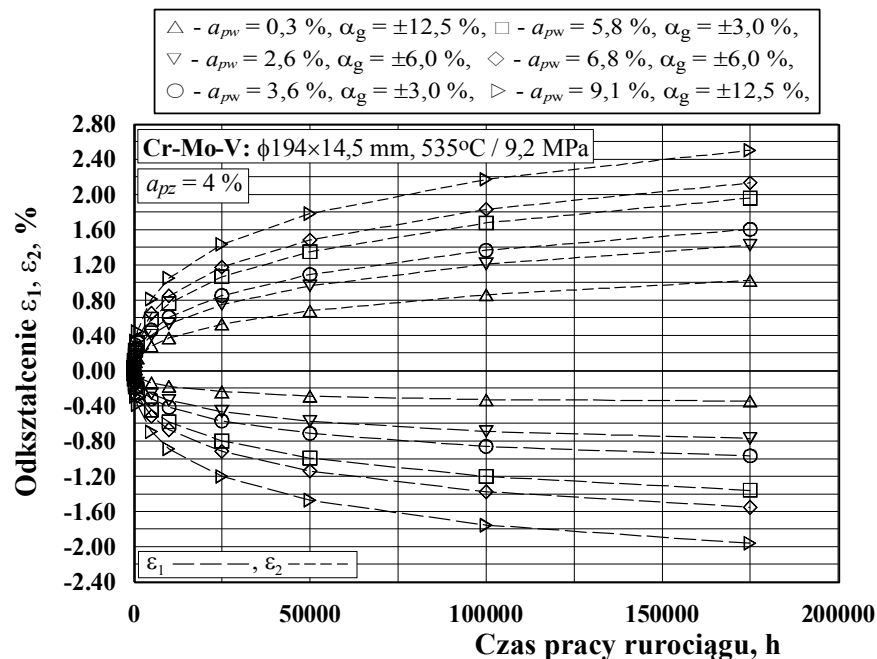
Trzeci z analizowanych przypadków (c), jak wynika z jego charakterystyki, dotyczy przekrojów poprzecznych rur, które mają różne owalności profili zewnętrznego i wewnętrznego oraz nierównomierną grubość ścianki. Wyznaczone dla nich za pomocą symulacji komputerowej zmiany odkształceń pełzania w kierunkach prostopadłych (ε_1 i ε_2) pokazano na rys. 57a i 57b ($a_{pz} = 1\%$ i $a_{pz} = 2\%$) oraz na rys. 58a i 58b ($a_{pz} = 4\%$ i $a_{pz} = 8\%$).



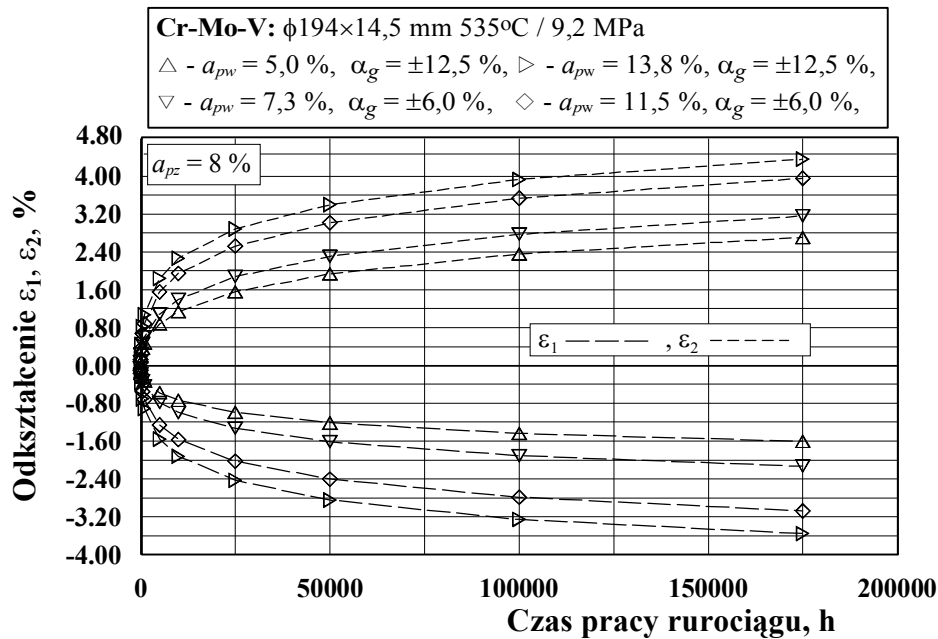
Rys. 57a. Symulacja MES – przebiegi składowych odkształceń pełzania ε_1 i ε_2 , wyznaczonych niezależnie dla każdego z kierunków pomiarów w przekroju poprzecznym wysokociśnieniowego rurociągu parowego o owalności początkowej $a_{pz} = 1\%$



Rys. 57b. Symulacja MES – przebiegi składowych odkształceń pełzania ε_1 i ε_2 , wyznaczonych niezależnie dla każdego z kierunków pomiarów w przekroju poprzecznym wysokociśnieniowego rurociągu parowego o owalności początkowej $a_{pz} = 2 \%$



Rys. 58a. Symulacja MES – przebiegi składowych odkształceń pełzania ε_1 i ε_2 , wyznaczonych niezależnie dla każdego z kierunków pomiarów w przekroju poprzecznym wysokociśnieniowego rurociągu parowego o owalności początkowej $a_{pz} = 4 \%$



Rys. 58b. Symulacja MES – przebiegi składowych odkształceń pełzania ε_1 i ε_2 , wyznaczonych niezależnie dla każdego z kierunków pomiarów w przekroju poprzecznym wysokociśnieniowego rurociągu parowego o owalności początkowej $a_{pz} = 8\%$

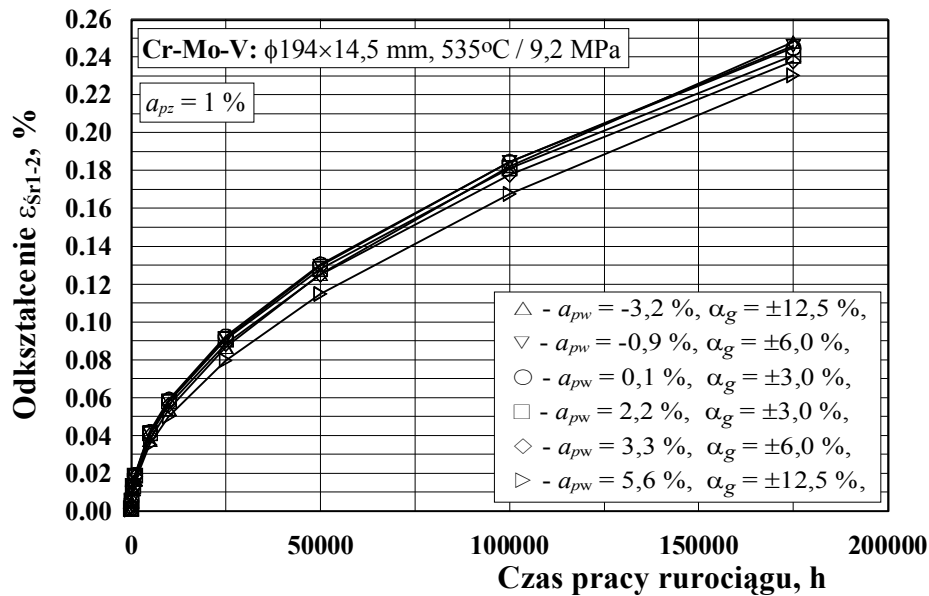
Dokonując przeglądu opracowanych krzywych widać, że im większa owalność wewnętrzna, tym bezwzględne wartości odkształceń trwałych w kierunkach 1 i 2 są wyższe. Dodatkowo dla kierunku, w którym średnica początkowa rury była mniejsza obserwuje się większe odkształcenia. Wyjątek stanowią krzywe na rys. 57a (oznaczone symbolami \triangle i ∇) oraz na rys. 57b (symbol \triangle), gdzie występuje sytuacja odwrotna. Na takie zachowanie ma wpływ owalność wewnętrzna, która w tych trzech przypadkach ma wartości „ujemne”, co zgodnie z przyjętą zasadą jej obliczania oznacza, że owal tworzący wnętrze rury jest obrócony względem zewnętrznego o 90° . Można zatem sprecyzować, że z upływem czasu eksploatacji zostaną odnotowane podwyższone odkształcenia w kierunku, w którym średnica wewnętrzna jest mniejsza.

Wyznaczone na podstawie składowych ε_1 i ε_2 odkształcenie ε_{sr1-2} , dla owalności a_{pz} równej 1 %, 2 %, 4 % i 8 % oraz odpowiadających różnym odchyłkom grubości ścianki owalności a_{pw} , zestawiono na rys. 59 i 60. W przypadku dużej owalności zewnętrznej przekroju poprzecznego rury, rys. 60, osiągnęte trwałe średnie odkształcenia pełzania są tym wyższe im jest niższa owalność wewnętrzna. Powyższe stwierdzenie jest również słuszne dla owalności 1 % i 2 %, za wyjątkiem krzywych oznaczonych na rys. 59a symbolami (\triangle , ∇) oraz na rys. 59b symbolem (\triangle), które odpowiadają ujemnej wartości

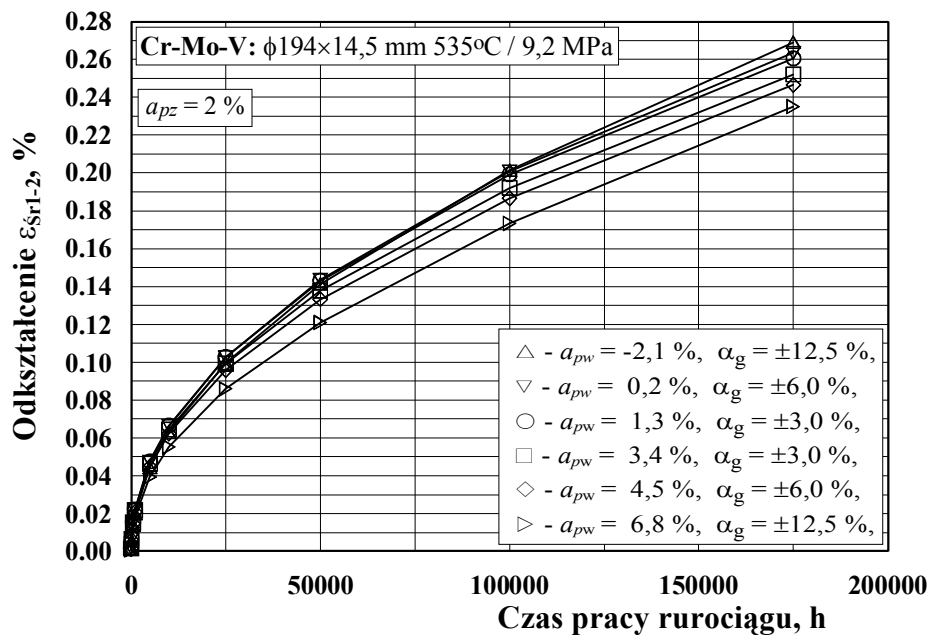
owalności. Należy tutaj dodać, że nie można ich traktować jako najmniejszych ponieważ w niniejszej pracy precyzuje to jedynie położenie owalu wewnętrznego w stosunku do zewnętrznego.

W analizowanym przypadku wpływ grubości ścianki elementu jest uwzględniony pośrednio przez owalność wewnętrzną a_{pw} , która dla danej owalności zewnętrznej a_{pz} jest uwarunkowana wartością odchyłki α_g .

a)

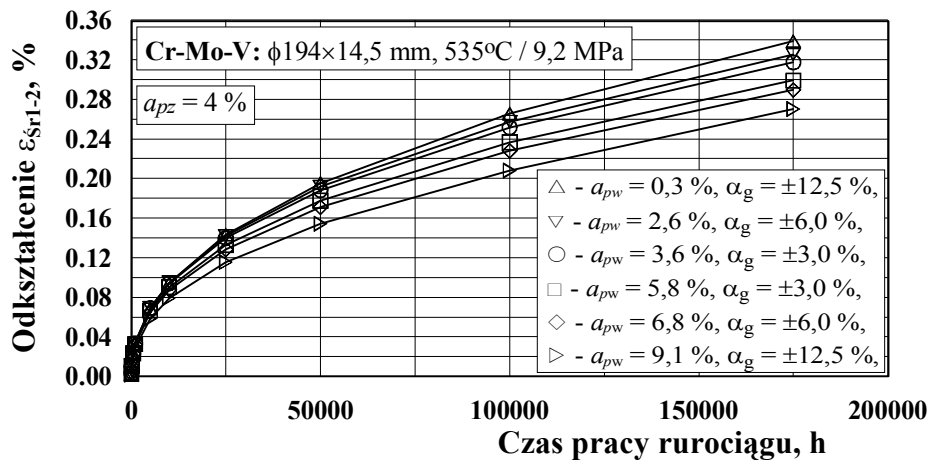


b)

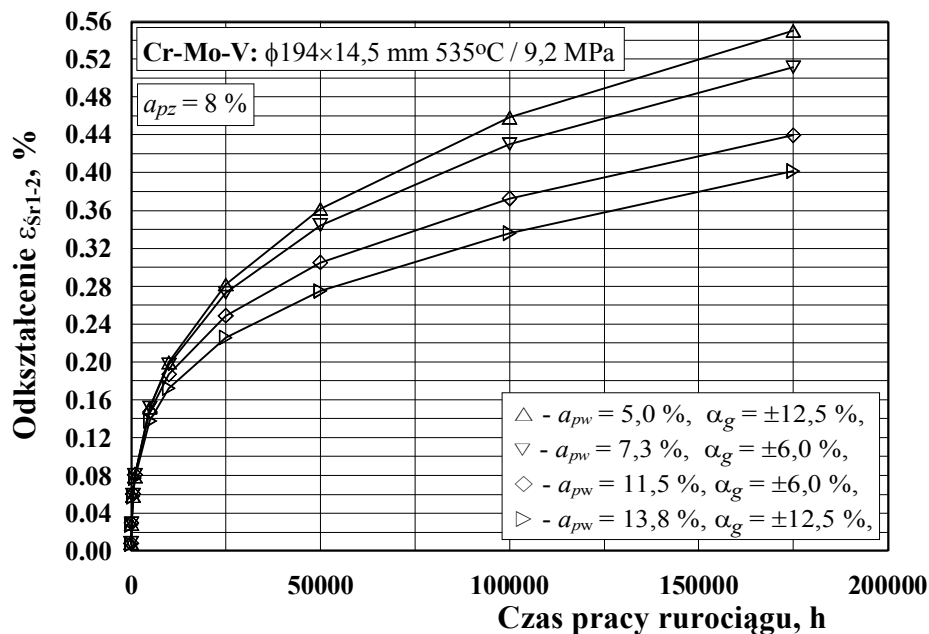


Rys. 59. Symulacja MES – przebiegi wartości średnich odkształceń pełzania dla składowych ε_1 i ε_2 ,
wysokociśnieniowego rurociągu parowego o owalności początkowej a_{pz} : a) 1 %, b) 2 %

a)



b)

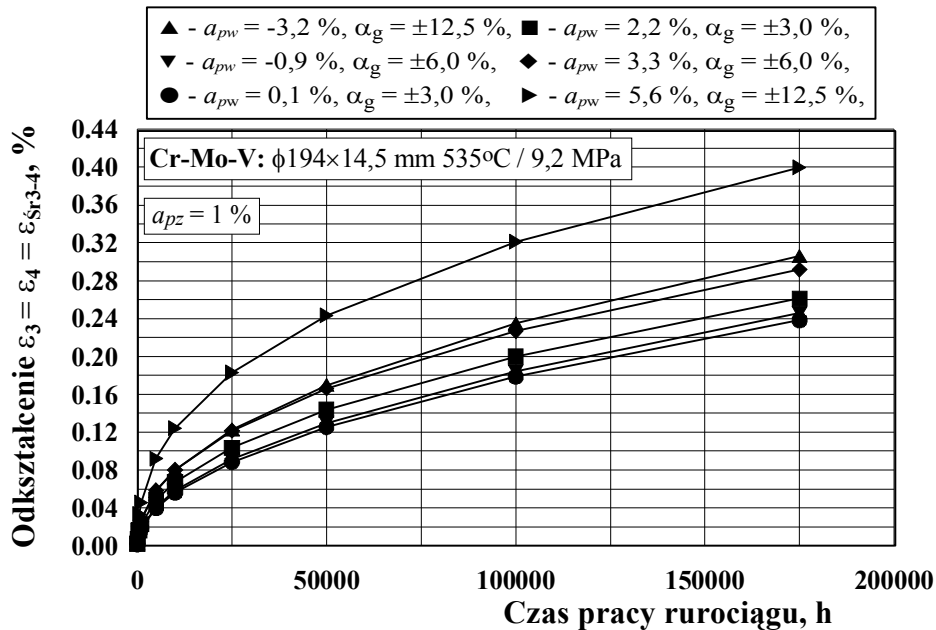


Rys. 60. Symulacja MES – przebiegi wartości średnich odkształceń pełzania dla składowych ε_1 i ε_2 , wysokociśnieniowego rurociągu parowego o owalności początkowej a_{pz} : a) 4 %, b) 8 %

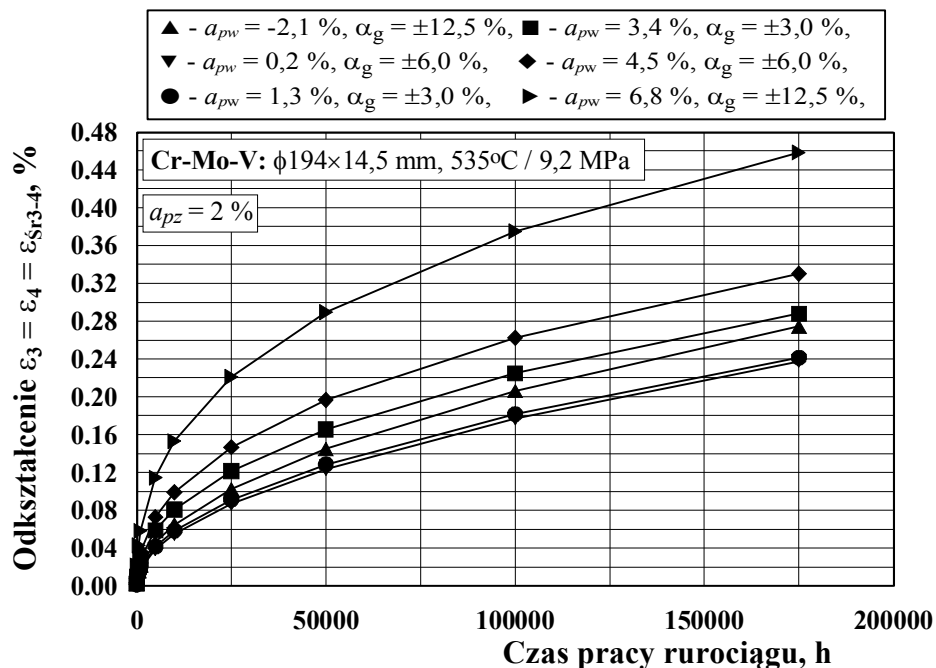
Ze względu na symetrię analizowanych przekrojów poprzecznych, zarówno w kierunku 1 jak i 2, składowe ε_3 i ε_4 , które można wyznaczyć za pomocą danych z drugiego układu pomiarowego jaki tworzą kierunki 3 i 4, uzyskują takie same wartości, równe odkształceniowi średniemu ε_{Sr3-4} . Jego przebiegi dla owalności a_{pz} , dla których prowadzono obliczenia, przedstawiono na rys. 61 i 62. Z analizy tych rysunków wynika, że dla dużych owalności początkowych (4 % i 8 %) średnie trwałe odkształcenia pełzania oraz jego składowe przyjmują wyraźnie wyższe wartości gdy profil wewnętrzny rury

posiada większą owalność. Zależność ta, w przypadku średnich wartości owalności początkowej jest również spełniona biorąc pod uwagę wartości bezwzględne owalności wewnętrznej.

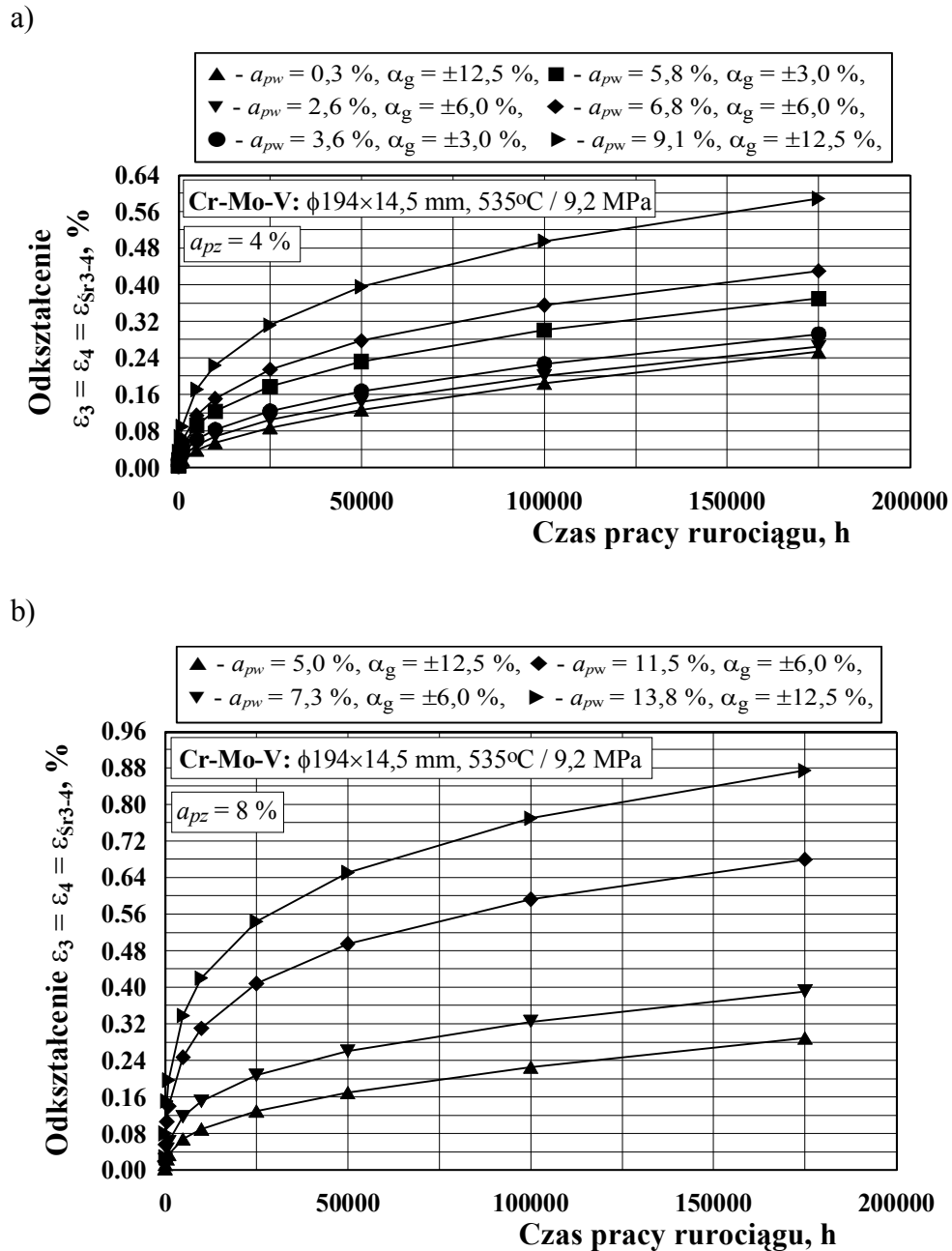
a)



b)

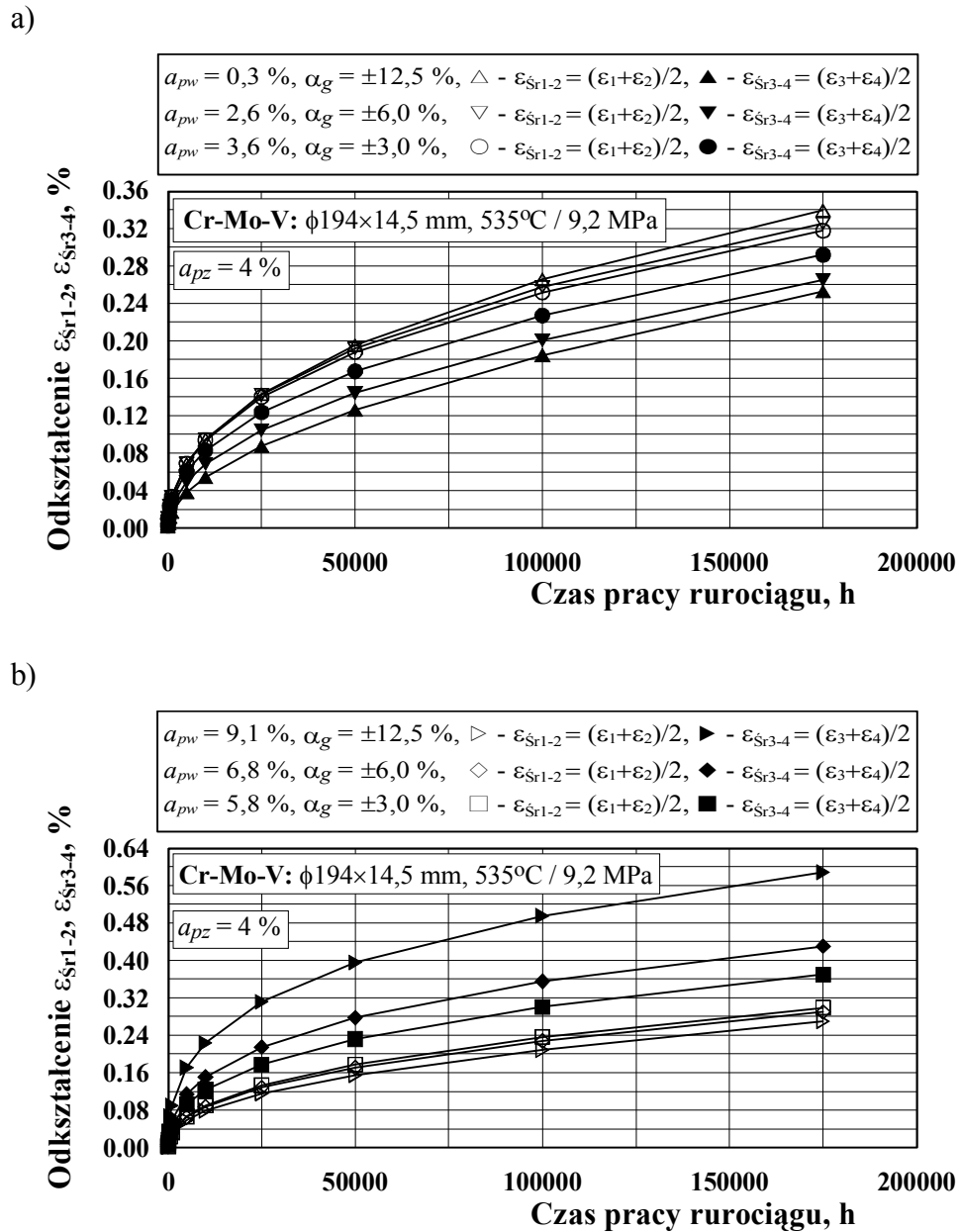


Rys. 61. Symulacja MES – przebiegi średnich wartości odkształceń pełzania oraz ich składowych ($\varepsilon_{sr3-4} = \varepsilon_3 = \varepsilon_4$) wysokociśnieniowego rurociągu parowego o owalności początkowej a_{pz} : a) 1 %, b) 2 %



Rys. 62. Symulacja MES – przebiegi średnich wartości odkształceń pełzania oraz ich składowych ($\varepsilon_{\delta r3-4} = \varepsilon_3 = \varepsilon_4$) wysokociśnieniowego rurociągu parowego o owalności początkowej a_{pz} : a) 4 %, b) 8 %

Ostatecznym efektem przeprowadzonej analizy tego rozważanego modelu (przypadek c) jest odpowiedź na pytanie o układ kierunków, w którym należy prowadzić badania, aby wyznaczone odkształcenia pełzania dla tego typu profili były największe. Dlatego na rys. 63 przedstawiono porównanie średnich wartości tej wielkości, uzyskane wg danych z układów kierunków 1 i 2 oraz 3 i 4 (dla owalności $a_{pz} = 4 \%$).



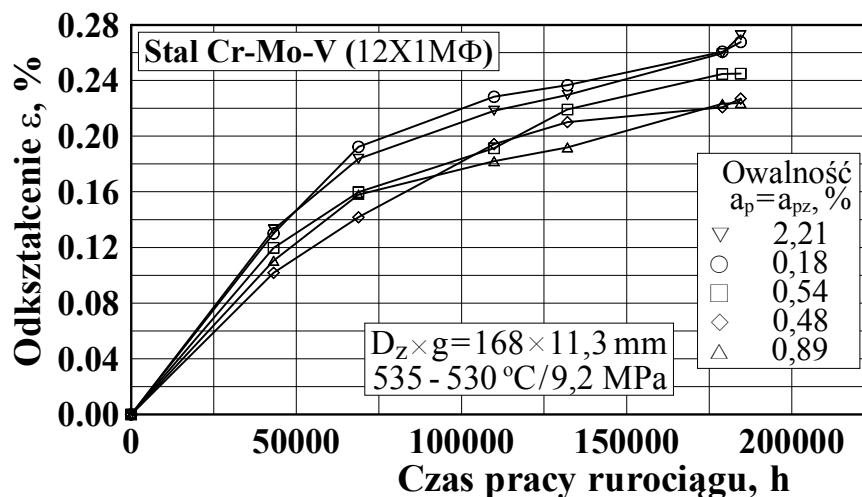
Rys. 63. Symulacja MES – przebiegi odkształceń średnich wyznaczonych dla kierunków 1 i 2 oraz 3 i 4 dla przypadku: a) $a_{pz} > a_{pw}$, b) $a_{pz} < a_{pw}$

Analiza krzywych pełzania zamieszczonych na rys. 63 pozwala zauważyć, że jeżeli początkowa owalność wewnętrzna (a_{pw}) jest mniejsza od owalności zewnętrznej (a_{pz}) to średnie odkształcenie pełzania wyznaczone dla kierunków 1 i 2 osiągnie większą wartość niż dla kierunków 3 i 4, tj. gdy $a_{pw} < a_{pz}$ to $\varepsilon_{sr1-2} > \varepsilon_{sr3-4}$. W sytuacji odwrotnej, tzn. gdy owalność $a_{pw} > a_{pz}$, wtedy $\varepsilon_{sr1-2} < \varepsilon_{sr3-4}$. Potwierdzeniem takiego zachowania są także wykresy pełzania przedstawione w rozdziale 9.1. Przy równomiernej grubości ścianki,

owalność profilu wewnętrznego jest zawsze większa niż zewnętrznego, a tym samym średnie odkształcenia trwałe ε_{sr3-4} jest większe od ε_{sr1-2} .

Należy zauważyć, że w przypadkach przekrojów, dla których $\varepsilon_{sr3-4} > \varepsilon_{sr1-2}$ i jednocześnie $\varepsilon_{sr3-4} = \varepsilon_3 = \varepsilon_4$, wystarczającym byłoby instalowanie czopów pomiarowych tylko w jednym kierunku, tj. 3 lub 4. Przy niższym nakładzie środków i czasu wyznaczone odkształcenie pełzania odpowiadałoby najwyższej wartości średniej. Przy kompletnym układzie czopów (w obu kierunkach) pozwoliłoby to na pewien rodzaj wzajemnej kontroli i eliminowanie błędów, a przy uszkodzeniach w jednym z kierunków umożliwiłoby kontynuowanie oceny diagnostycznej na podstawie wartości osiąganych w drugim.

Dokonując przeglądu ruchowych krzywych pełzania elementów rurociągów parowych można zauważyć, że w niektórych przypadkach pomimo różnych owalności zewnętrznych odkształcenia pełzania osiągają zbliżone wartości, jak to pokazano na przykładowym rys. 64. Można również wskazać sytuacje, gdy zamodelowany element o niższej owalności zewnętrznej w porównaniu z elementem, w przypadku którego ta owalność jest wyższa, ma większe odkształcenia trwałe. Widać to porównując krzywe np. na rys. 61a i 61b. Decyduje o tym owalność wewnętrzna, spowodowana nierównomierną grubością ścianki na obwodzie rury. Może to tłumaczyć przebiegi krzywych uzyskanych na podstawie danych eksploatacyjnych, w tym przedstawionych na rys. 64.

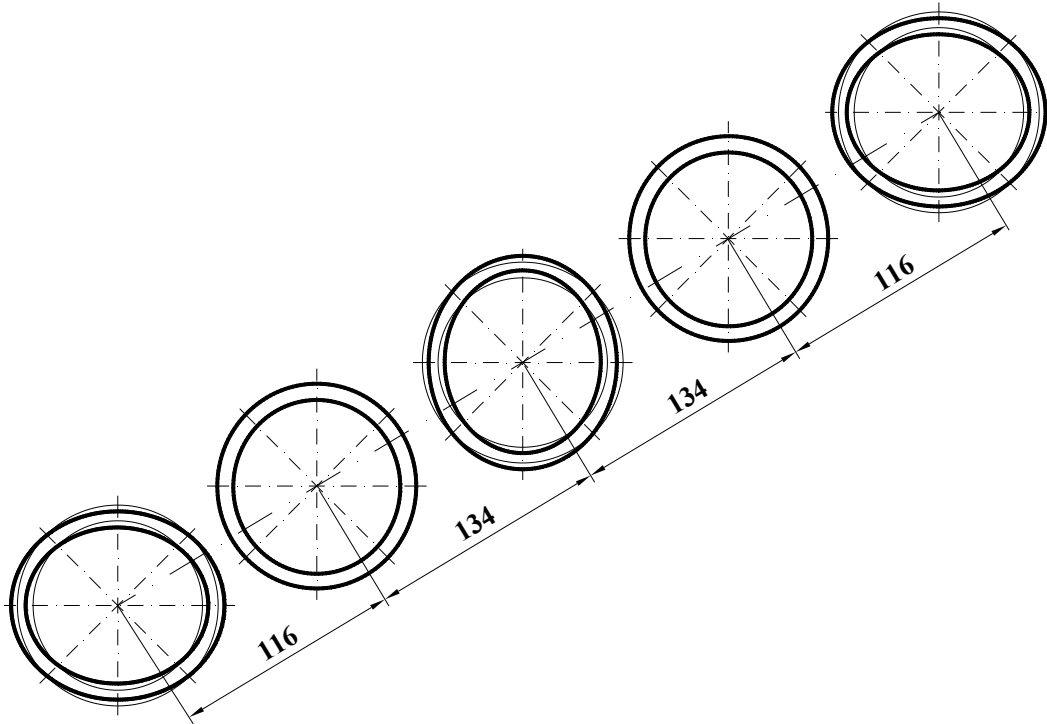


Rys. 64. Eksploatacyjne (ruchowe) krzywe pełzania (wartości średnie odkształceń) elementów rurociągu parowego

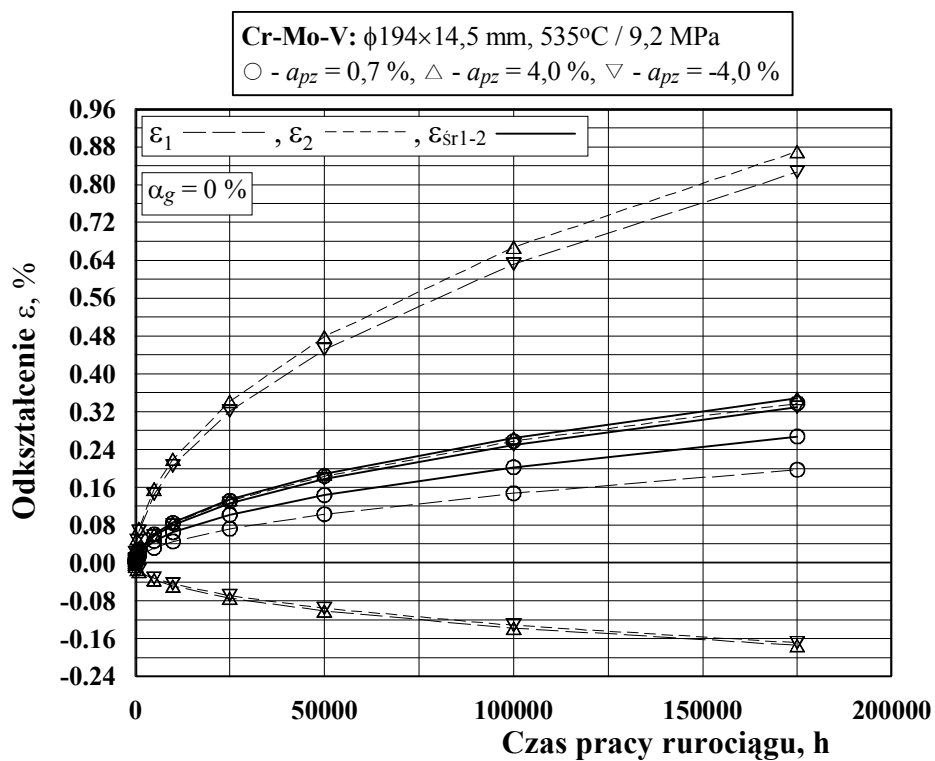
Jak wynika z rys. 64, krzywa pełzania dla elementu o wartości $a_{pz} = 0,89$ % znajduje się poniżej krzywych odpowiadających elementom, w przypadku których $a_{pz} = 0,54$ %, $a_{pz} = 0,48$ %, a nawet $a_{pz} = 0,18$ %. Zresztą ten ostatni z kolei osiąga odkształcenie średnie porównywalne z innym o wartości $a_{pz} = 2,21$ %. Na podstawie analizy numerycznej można stwierdzić z dużym prawdopodobieństwem, że takie zachowanie się spowodowane jest rozkładem grubości ścianki. Niestety brak jest pełniejszych danych dotyczących przekrojów tych elementów (zresztą jak i w przypadku wielu innych obiektów, gdyż w tamtych czasach nie dokonywano takich pomiarów), co pozwoliłoby fakt ten zweryfikować.

9.4. Wpływ zmiennej owalności początkowej profilu na długości rury

Jak przedstawiono w rozdziale 4 niniejszej pracy, prostoliniowe przewody rurowe zwykle są zowalizowane oraz mają nierównomierną grubości ścianki na obwodzie w danym przekroju poprzecznym. Ponadto parametry te zmieniają się na ich długości, i to niekiedy dość znacznie. W celu określenia wpływu zróżnicowanej geometrii przekroju poprzecznego wzdłuż rury na osiągnięte wartości odkształcenia pełzania utworzono model o stałej grubości ścianki, ale zmiennej owalności. Jej wartość dla profili końcowych wynosi: $a_{pz} = -4$ %. Znak „-” świadczy o „spłaszczeniu” w kierunku 1, tzn. że zmierzona dla niego średnica jest mniejsza od tej w kierunku 2. Przekrój zlokalizowany w połowie długości rury charakteryzuje owalność $a_{pz} = +4$ % (w kierunku 1 profil jest „wydłużony”). Zatem otrzymano element, którego owalność przekroju poprzecznego w środkowej części jest obrócona o 90° względem końców. Wskutek przyjętego sposobu modelowania elementu o tak zróżnicowanej geometrii, pomiędzy owalami otrzymano przekroje o owalności 0,7 %. Schemat zamodelowanego elementu przedstawia rys. 65, natomiast otrzymane dla niego przebiegi krzywych pełzania rys. 66.



Rys. 65. Schemat zamodelowanego elementu rurociągu parowego o zmiennym profilu na jego długości



Rys. 66. Symulacja MES – przebiegi odkształceń pełzania (wartości średnie ε_{sr1-2} oraz ich składowe ε_1 i ε_2) elementu o zróżnicowanej na długości owalności początkowej przekroju poprzecznego i stałej grubości ścianki

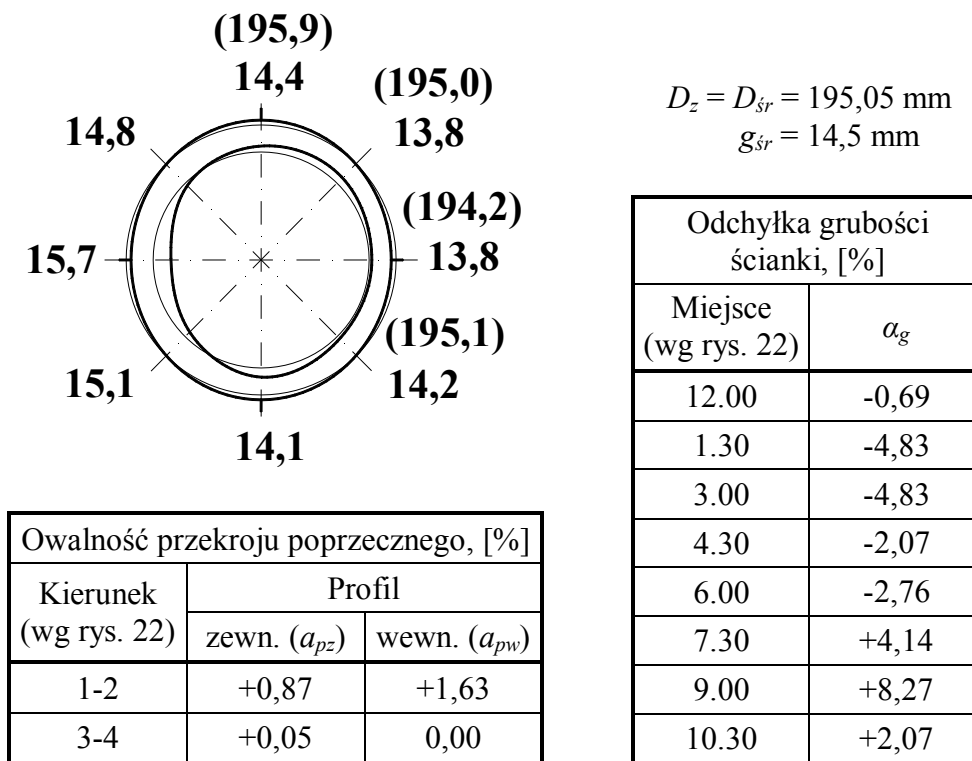
Na podstawie rys. 66 można zauważyć, że odkształcenia składowe ε_1 i ε_2 dla profili końcowych i środkowego, pomimo takiej samej bezwzględnej wartości owalności początkowej (4 %), różnią się. Różnice te stosunkowo są niewielkie zwłaszcza dla kierunków, w których średnice modelowanej rury są większe. Odkształcenia średnie ε_{sr1-2} wyznaczone na podstawie ε_1 i ε_2 również przyjmują zbliżone wartości, jednakże te dla przekroju środkowego są trochę większe. Odmienne przebiegi składowych i stosunkowo duże niższe średnie wartości odkształcenia pełzania otrzymano dla profili pośrednich. Wynika to jednak z dużo mniejszej owalności w tej części elementu.

Dla pełnej oceny wpływu nieregularnej geometrii przekroju na długości rury należy porównać otrzymane krzywe z przebiegami odkształceń trwałych elementu o jednolitym przekroju poprzecznym na całej długości, pokazanych na rys. 38 i 40a. Można zauważyć, że element o zmiennej wzdłuż niego geometrii poprzecznej charakteryzuje się nieco odmiennymi przebiegami składowych i zbliżonymi dla średnich (ale nieco wyższymi dla elementu o przekroju zmiennym). Przykładowo, dla najwyższego czasu obliczeń (175 000 godz.) wartości ε_1 , ε_2 i ε_{sr1-2} dla przekrojów stałych i zmiennych na długości wynoszą, odpowiednio +1,80 %, -1,15 % i +0,31 % oraz +0,87 %, -0,17 % i +0,35 %. Należy tutaj zauważyć, że model numeryczny charakteryzuje się dużymi zmianami przekroju na krótkim odcinku. W rzeczywistości są one o wiele łagodniejsze i stosunkowo rzadko osiągają tak ekstremalne wartości. Dlatego wydaje się, że zmienność przekroju na długości rury z praktycznego punktu widzenia, z uwagi na istotne w ocenie rurociągów osiągnięte odkształcenia średnie, można zaniedbać.

Praktycznie niemożliwym jest potwierdzenie przedstawionych przebiegów ruchowymi krzywymi pełzania. Co prawda na tzw. odcinkach kontrolnych instalowane są czopy pomiarowe w kilku płaszczyznach prostopadłych do osi, jednakże obserwowane różnice pełzania (dla danego odcinka – rys. 10 ÷ 12, rozdział 3) związane są np. z różnicami profili. Jak w danym przekroju na osiągnięte wartości wpływają sąsiednie trudno na tej podstawie stwierdzić. Potwierdzenie mogłyby dać trudne, kosztowne i długotrwałe badania laboratoryjne dla odpowiednio wykonanych rur. Biorąc jednak pod uwagę zweryfikowaną pozytywnie dla innych przykładów przydatność symulacji numerycznych, mogą być one wystarczające przy analizie zróżnicowanych przekrojów na długości elementów ciśnieniowych pracujących w warunkach pełzania.

9.5. Modelowanie numeryczne rzeczywistego przekroju poprzecznego rurociągu parowego

Dla potwierdzenia możliwości praktycznego wykorzystania symulacji komputerowej w systemie oceny procesu pełzania rurociągów parowych, zamodelowano rzeczywisty przekrój poprzeczny w celu określenia takiego usytuowania układu czopów pomiarowych, aby wyznaczane średnie wartości trwałego odkształcenia pełzania były najwyższe. Jego schematyczny wygląd wraz z naniesionymi danymi pomiarowymi i obliczonymi na ich podstawie wielkościami, które go charakteryzują, pokazano na rys. 67.

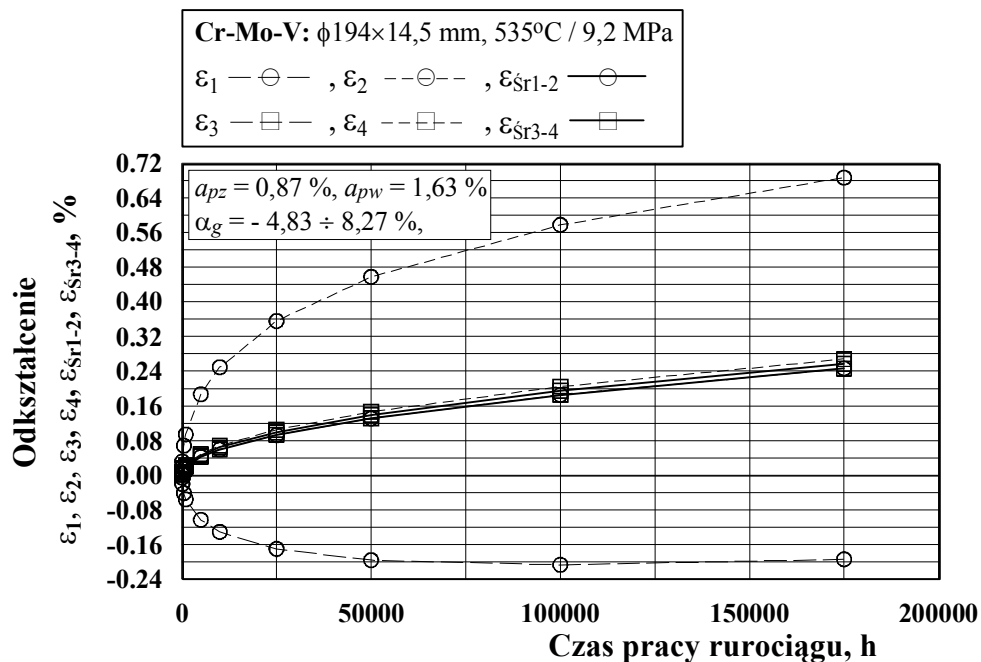


Rys. 67. Modelowany rzeczywisty przekrój rury $\phi 194 \times 14,5$ mm ze stali 12X1M Φ w płaszczyźnie zainstalowanych czopów pomiarowych pełzania, usytuowanych w kierunkach 1 i 2 (pomiar po 209 133 godz. eksploatacji)

Materiał i wymiary nominalne modelowanego elementu odpowiadają tym dla jakich analizowano wcześniejsze przypadki. Wybrano je celowo, aby możliwe było wykorzystanie wyznaczonych współczynników równania konstytutywnego pełzania. Biorąc pod uwagę uzyskane już wyniki wskazujące, że wpływ zmian geometrii wzdłuż długości rury na jej pełzanie można pominąć, przyjęto stałość profilu. Założono, że układ

jaki stanowią zainstalowane czopy pomiarowe będzie identyfikowany przez kierunki 1 i 2. Za takim wyborem przemawia fakt, że jeden z tych kierunków, tutaj 2, przechodzi przez miejsca o najgrubszej i najcieńszej ścianie. Miejsce o takiej samej najmniejszej grubości znajduje się też na kierunku 3, tworzącym z prostopadłym do niego kierunkiem 4 drugi układ ewentualnego położenia czopów, przestawiony względem poprzedniego o 45° .

Krzywe pełzania dla omówionego modelu zaprezentowano na rys. 68. Są one zgodne z wynikami dla modeli rozpatrywanych w rozdziałach 9.2 i 9.3, które w tym przypadku należy połączyć ze sobą.

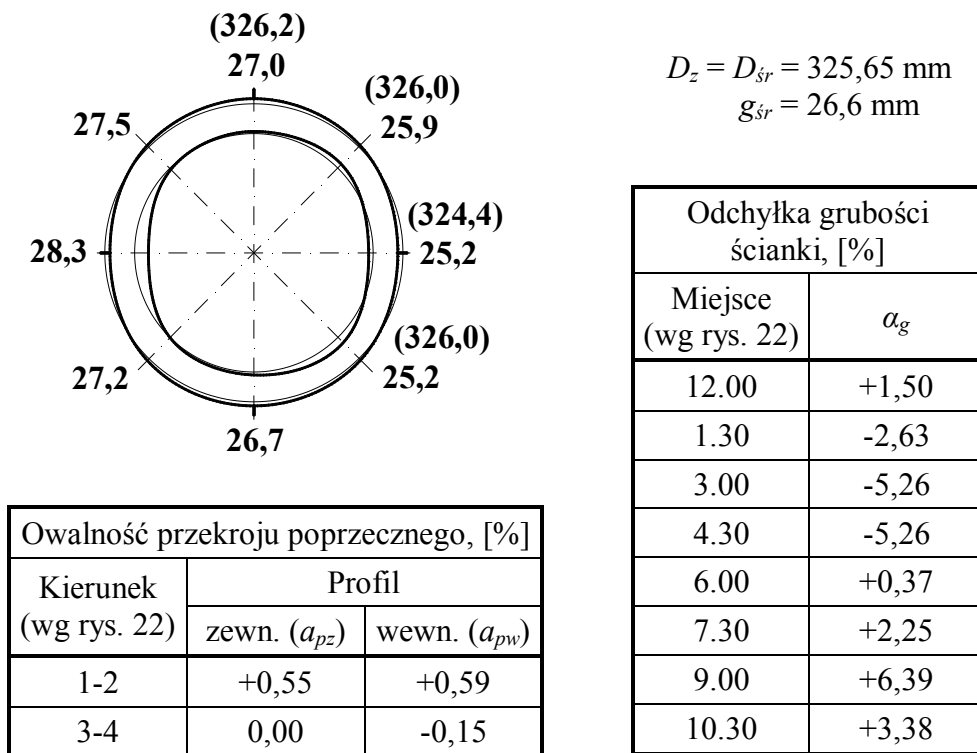


Rys. 68. Symulacja MES – krzywe pełzania rurociągu o przekroju poprzecznym pokazanym na rys. 67
(parametry pracy naniesiono na rysunek)

Na podstawie rys. 68 można zauważyć, że przebiegi odkształceń składowych obu układów usytuowania czopów pomiarowych, tzn. rzeczywistego – kierunki 1 i 2 (ε_1 i ε_2) oraz możliwego – kierunki 3 i 4 (ε_3 i ε_4), różnią się istotnie między sobą. Natomiast w przypadku średnich wartości odkształceń pełzania widoczna różnica jest z praktycznego punktu widzenia pomijalna. Niemniej fakt, że jednak $\varepsilon_{\text{sr}3-4} > \varepsilon_{\text{sr}1-2}$ związany jest z nierównomiernością $a_{pz} < a_{pw}$ (rozdział 9.3). Dla modelowanego profilu wartość owalności $a_{pz} = 0,87\%$ i jest prawie dwukrotnie mniejsza niż $a_{pw} = 1,63\%$. Można dodać, że na wartość tego ostatniego wpływa częściowo rozkład grubości ścianki na obwodzie. Na podstawie analizy wcześniejszych przypadków można zauważyć, że przy wyższej

owalności a_{pz} , tj. $a_{pz} > 1,5\%$ i przy zachowaniu podanych grubości, wspomniana różnica byłaby o wiele większa. Dlatego w przypadkach podobnych do rozpatrywanego, a tym bardziej spełniających warunki: $a_{pz} > 1,5\%$ i $a_{pz} < a_{pw}$, korzystniejsze jest zainstalowanie czopów w układzie kierunków 3 i 4. Za tym rozwiązaniem przemawia również jeszcze inna ewentualna korzyść, jaką byłaby możliwość kontynuowania oceny diagnostycznej w razie uszkodzenia któregoś z czopów w jednym z kierunków pomiarowych (o takiej możliwości wspomniano w rozdziale 9.3). Na przykładzie rys. 68 widać, że dla tego rodzaju przekrojów i przy tym układzie kierunków (3 i 4) różnice między składowymi odkształceniami pełzania (ε_3 i ε_4) oraz wartością średnią (ε_{sr3-4}) są nieduże.

Potwierdzeniem dla powyższej analizy są przebiegi ruchowych krzywych pełzania elementu wysokociśnieniowego rurociągu parowego $\phi 325 \times 26$ mm, wykonanego ze stali 12XMΦ, przedstawione na rys. 19a, oznaczone symbolem □ (rozdział 3). Ich charakter jest zgodny z widocznym na rys. 68 dla kierunków 1 i 2. Z przeprowadzonej inwentaryzacji wynika, że w takim też kierunku usytuowane są czopy pomiarowe na wymienionym obiekcie, w odniesieniu do przekroju rury, w płaszczyźnie ich zainstalowania. Widok tego przekroju i wyniki przeprowadzonych pomiarów pokazano na rys. 69.



Rys. 69. Widok przekroju poprzecznego rurociągu $\phi 325 \times 26$ mm ze stali 12XMΦ w płaszczyźnie zainstalowanych czopów pomiarowych do kontroli pełzania (pomiar po 294 449 godz. eksploatacji)

Pokazany na rys. 69 przekrój odpowiada stanowi po 294 449 godz. pracy. Z danych dotyczących pełzania tego elementu wynika, że owalność początkowa, tzn. ta przed oddaniem obiektu do eksploatacji wynosiła $a_p = a_{pz} = 0,95 \%$. Brak jest innych danych dotyczących profilu, gdyż w tamtym okresie ich nie mierzono. Jednak założenie jego podobieństwa do obecnego tłumaczy przebiegi krzywych pełzania odpowiadających kierunkom 1 i 2. Z uwagi na wyrównane wartości owalności (dla tego układu pomiarowego jednocześnie są one najwyższe w porównaniu z innymi położeniami), osiągnięte odkształcenia średnie byłyby zbliżone do siebie praktycznie niezależnie od usytuowania układu prostopadłych do siebie kierunków zainstalowania czopów pomiarowych. Różnie wyglądałyby jedynie przebiegi ich składowych. Świadczą o tym krzywe pełzania widoczne na tym samym, wymienionym już wcześniej rys. 19a, tym razem w odniesieniu do elementu, dla którego użyto symbolu \diamond . W jego przypadku wartość owalności przed oddaniem do eksploatacji wynosiła $a_p = a_{pz} = 0,98 \%$ (zatem była zbliżona do wcześniej prezentowanego), a profil poprzeczny przedstawia rys. 27 (rozdział 3). Jak można zauważyć usytuowanie kierunków zainstalowania czopów pomiarowych względem profilu jest w porównaniu z poprzednim odmienne. To tłumaczy różnorodność przebiegów krzywych dla składowych odkształcenia pełzania w przypadku obu elementów, przy praktycznie podobnych przebiegach dla wartości średnich.

10. Kontrola pełzania wysokociśnieniowych rurociągów parowych – zasady usytuowania czopów pomiarowych

W diagnostyce wysokociśnieniowych rurociągów parowych zalecana jest okresowa kontrola procesu ich pełzania. Zazwyczaj jest ona prowadzona na jego wytypowanych odcinkach prostych lub prostkach elementów giętych. W wytycznych dotyczących miejsc pomiarów pełzania określa się, że powinny je charakteryzować największe obciążenia lub najmniejsza grubość ścianki. Należy też unikać okolic spoin, podparć czy zawiesznień. Na obecną chwilę brak jest zaleceń co do kierunków usytuowania czopów pomiarowych w płaszczyźnie ich instalowania na danym elemencie rurociągu. Dlatego położenie takiego układu pomiarowego względem przekroju poprzecznego jest zupełnie przypadkowe, tym samym wpływ profilu na osiągnięte odkształcenie pełzania nie jest dostrzegany.

Na podstawie wyników badań eksploatacyjnych i uogólniających je, uzyskanych z modelowania numerycznego można lepiej usytuować czopy pomiarowe dla konkretnych elementów rurociągów parowych. Stanowi to efekt użyteczny przeprowadzonych analiz, pozwalający sformułować odpowiednie w tym zakresie zasady, w których uwzględnia się przekrój poprzeczny miejsc dokonywanej kontroli pełzania. Zwiększy to dokładność metodyki badawczej, tym samym poprawiając efektywność procedury diagnostycznej. W praktyce umożliwi to uzyskanie bardziej wiarygodnych ocen stanu technicznego i przydatności do dalszej, bezpiecznej eksploatacji wysokociśnieniowych rurociągów parowych pracujących w warunkach pełzania.

Wykazana w niniejszej pracy jednoznaczna zależność pomiędzy geometrią przekroju poprzecznego rurociągu a przebiegiem krzywych pełzania (osiąganymi z upływem czasu trwałymi odkształceniami pełzania) powoduje, że przed wytypowaniem na danym odcinku rury miejsca zainstalowania czopów należy tę geometrię zidentyfikować. W tym celu, w kilku wybranych na długości elementu miejscach (mogą być one przypadkowe, ale zgodnie z ogólnymi wytycznymi odległe o ok. 0,5 m od np. spoin czy zamocowań) należy wykonać:

- pomiary średnic zewnętrznych dla określenia (odszukania) kierunków, w których ich wartości są maksymalne i minimalne,
- pomiary średnic zewnętrznych w kierunkach prostopadłych do wcześniej ustalonych,

- pomiary średnic zewnętrznych w kierunkach przestawionych względem poprzednich o 45° ,
- pomiary grubości ścianki w punktach odpowiadających kierunkom pomiarów średnic.

W praktyce pomiary w danym przekroju po „znalezieniu” kierunku, w którym wartość średnicy jest maksymalna, sprowadzą się do ich określenia w kolejnych trzech, przestawionych co 45° , oraz do odpowiadających tym kierunkom ośmiu miejsc pomiarów grubości ścianki.

Uzyskane dane pomiarowe pozwolą wyznaczyć:

- wartości owalności profili zewnętrznego i wewnętrznego, za pomocą równań (16) i (17) – rozdział 4,
- wartości odchyłek grubości ścianki na obwodzie – równanie (18).

Ponadto, dla ułatwienia analizy korzystne jest wykonanie schematycznego szkicu przekroju poprzecznego.

Spośród przebadanych przekrojów na długości rury w pierwszej kolejności do kontroli pełzania należy wybrać te o największej owalności profilu zewnętrznego. Należy też wziąć pod uwagę przekroje, w przypadku których owalność profilu zewnętrznego jest mniejsza, a jednocześnie wewnętrznego znacznie ją przekracza (ponad 2-krotnie). Dla tak wyselekcjonowanych przekroi poprzecznych rury, kolejnym krokiem jest wyznaczenie właściwych kierunków pomiarów odkształceń trwałych. Pomocne tutaj będzie rozważenie trzech charakterystycznych przypadków jakie mogą zachodzić pomiędzy owalnościami dla profili zewnętrznego i wewnętrznego:

- brak owalności zewnętrznej (a_{pz}) i wewnętrznej (a_{pw}) lub małe ich wartości (nie większe niż 0,5 %), przy nierównomiernej grubości ścianki na obwodzie,
- owalność zewnętrzna (a_{pz}) większa od owalności wewnętrznej (a_{pw}) (dotyczy wartości bezwzględnych),
- owalność zewnętrzna (a_{pz}) mniejsza od owalności wewnętrznej (a_{pw}) (dotyczy wartości bezwzględnych).

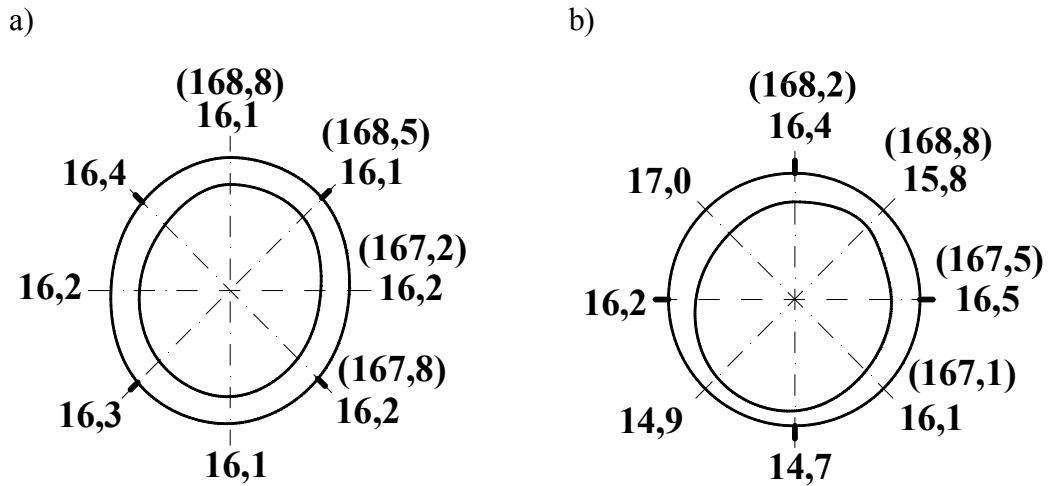
W pierwszym przypadku, tj. gdy rura cechuje się tylko nierównomierną grubością ścianki, czopy pomiarowe pełzania najkorzystniej jest zainstalować w tym z przekrojów, w którym odchyłki grubości ścianki, mierzone na obwodzie, są największe (biorąc pod uwagę wartości bezwzględne), ponieważ tam można się spodziewać największych odkształceń trwałych pełzania. Jednak z przeprowadzonej w pracy analizy wynika, że różnice pomiędzy średnimi odkształceniami dla różnych odchyłek grubości ścianki nie są

duże. Zatem z praktycznego punktu widzenia można przyjąć, że dla odchyłek mniejszych niż $\pm 6\%$ wybór kierunków pomiarowych nie ma znaczenia.

W sytuacji gdy początkowa owalność zewnętrzna (a_{pz}) jest większa od owalności wewnętrznej (a_{pw}), to trwałe średnie odkształcenia pełzania będzie miało największą wartość jeżeli zostanie wyznaczone dla kierunków, w których jeden z nich pokrywa się z największą średnicą rury. Tak więc w tych kierunkach (tworzących układ nazwany podstawowym) należy instalować czopy pomiarowe.

Jeśli owalność zewnętrzna (a_{pz}) jest mniejsza od owalności wewnętrznej (a_{pw}), przypadek trzeci z wymienionych wyżej, to czopy pomiarowe pełzania winno się montować w układzie przestawionym względem podstawowego o 45° . Mimo, że odkształcenia składowe nie osiągną największych wartości (te zawsze odpowiadają minimalnej i maksymalnej średnicom rury), to średnie odkształcenie pełzania wyznaczone na ich podstawie będzie większe. Z uwagi na ocenę przydatności danego elementu do dalszej bezpiecznej eksploatacji jest to sytuacja korzystniejsza.

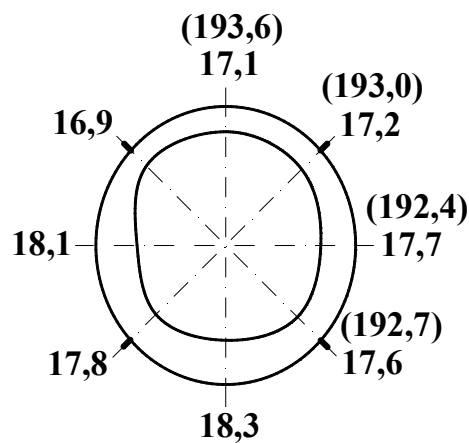
Powyższe wytyczne, dotyczące wyboru przekroju poprzecznego elementu rurowego oraz optymalnego układu czopów pomiarowych, zastosowano przykładowo dla rury $\phi 168,3 \times 16$ mm, scharakteryzowanej w tabelach 1 oraz 3, i której wybrane przekroje pokazano na rys. 23 (rozdział 4). Bazując na danych zawartych w tabeli 3 wytypowano w przypadku elementu A przekrój nr 4. W porównaniu z pozostałymi przekrojami charakteryzuje się on największymi owalnościami: zewnętrzną ($a_{pz} = +0,95\%$) i wewnętrzną ($a_{pw} = +1,33\%$) w kierunkach 1-2. W przypadku elementu B prawie wszystkie przekroje cechują się porównywalnymi, małymi owalnościami zewnętrznymi zarówno w kierunkach 1-2 jak i 3-4. Jednak przekrój nr 3 wyróżnia się największą owalnością wewnętrzną dla układu kierunków 3-4 ($a_{pz} = -0,06\%$ i $a_{pw} = +1,69\%$). Dla tak wybranych przekroi określono kierunki pomiarów pełzania takie, aby uzyskać największe średnie wartości trwałych odkształceń. W tym celu porównano dane dotyczące owalności profili zewnętrznego i wewnętrznego stwierdzając, że oba elementy cechuje zależność $a_{pz} < a_{pw}$. Zatem czopy pomiarowe powinny być zainstalowane w układzie przestawionym o 45° w stosunku do układu, dla którego obliczono największą wartość owalności. Oba wybrane przekroje z danymi pomiarowymi i sugerowanym dla każdego położeniem układu pomiarowego pokazano na rys. 70.



Rys. 70. Usytuowanie czopów pomiarowych pełzania zgodnie z proponowanymi zasadami dla profili przekrojów poprzecznych rury $\phi 168,3 \times 16$ mm (rozdział 4 – tabele 1 oraz 3):

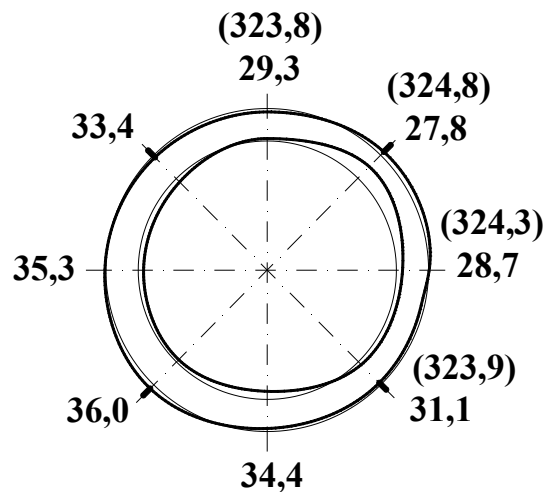
a) element A – przekrój nr 4, b) element B – przekrój nr 3

Podobną do powyższej procedurę zastosowano również dla elementu C (rura $\phi 193,7 \times 17,5$ mm), na którym został już zainstalowany układ czopów pomiędzy przekrojami nr 9 i nr 9'. Odpowiednie dane zamieszczone są w tabelach 2 i 4 oraz na poglądowych rys. 24 i 25 (rozdział 4). Biorąc pod uwagę przekroje poprzeczne tego elementu (zgodnie z tabelą 4) czopy pomiarowe powinny zostać zamontowane w przekroju nr 3, gdyż jego cechą jest największa owalność zewnętrzna oraz wewnętrzna (dla kierunków 1-2). Dodatkowo owalność profilu zewnętrznego jest mniejsza od wewnętrznej ($a_{pz} = +0,62\%$ i $a_{pw} = +1,01\%$). Stąd sugerowany dla tego przekroju układ czopów pomiarowych pełzania powinien wyglądać jak pokazano na rys. 71.



Rys. 71. Profil przekroju poprzecznego elementu C rury $\phi 193,7 \times 17,5$ mm z czopami pomiarowymi usytuowanymi zgodnie z proponowanymi zasadami

Dodatkowo na rys. 72 przedstawiono proponowane (zgodnie z opracowanymi zasadami) rozmieszczenie układu czopów pomiarowych dla profilu poprzecznego rury $\phi 323,9 \times 32$ mm, charakteryzującego się małymi owalnościami profili zarówno wewnętrznego jak i zewnętrznego (rys. 26, dla kierunków 1-2 i 3-4, odpowiednio: $a_{pz} = -0,15\%$ i $a_{pz} = 0,28\%$ oraz $a_{pw} = -0,08\%$ i $a_{pw} = 0,23\%$). W takiej sytuacji zgodnie z zaleceniami należy zwrócić uwagę na odchyłkę grubości ścianki, która dla tego elementu jest znaczna i zawiera się w przedziale $\alpha_g = -13,12\% \div +12,50\%$. Skrajne wartości odchyłki przypadają na miejsca, zgodnie z kierunkiem 3. Dodatkowo to właśnie układ pomiarowy z tym kierunkiem wykazuje wyższą wartość a_{pz} i to powoduje, że w nim należy zainstalować czopy pomiarowe do kontroli pełzania.



Rys. 72. Profil przekroju poprzecznego nowoinstalowanej rury $\phi 323,9 \times 32$ mm z proponowanym, zgodnie z podanymi zasadami, usytuowaniem czopów pomiarowych

W uzupełnieniu zagadnienia dotyczącego zasad usytuowania czopów pomiarowych na rurociągach, z uwzględnieniem geometrii ich przekrojów poprzecznych, należy zauważyć, że pewne przypadki były również przedstawione wcześniej jako wynik dokonywanych analiz numerycznego modelowania pełzania rur (rozdział 9) i nie będą tutaj one powtarzane. Jednak na jej podstawie można dodać następujące ogólne spostrzeżenia:

- jeżeli owalności profili zewnętrznego i wewnętrznego są mniejsze niż 1,5 % a jednocześnie nie różnią się znacząco między sobą, to osiągnięte odkształcenia średnie stosunkowo niewiele różnią się niezależnie od przyjętego układu kierunków, wg których są określane (zatem dla takich elementów wybór

właściwego układu usytuowania czopów pomiarowych pełzania nie ma większego praktycznego znaczenia),

- w przypadkach przekrojów charakteryzujących się symetrycznością względem układu kierunków utworzonego przez średnice maksymalną i minimalną, czopy pomiarowe należy usytuować – wyłączając przekroje gdy $a_{pz} > a_{pw}$ – w układzie przestawionym o 45° , w porównaniu z podanym wyżej (układ ten daje także średnie wartości trwałego odkształcenia pełzania porównywalne z wartościami dla innych ułożeń lub wyższe).

Uwzględnienie zasady, o której mowa powyżej, w drugim wyszczególnieniu (a także w innych przypadkach analizowanych w rozdziale 9 niniejszej pracy) ma pewne zalety jak:

- pokrywanie się przebiegów krzywych pełzania (obu wartości składowych, jak i wartości średniej odkształcenia pełzania),
- możliwość zainstalowania czopów pomiarowych (a tym samym prowadzenia pomiarów) tylko w jednym wybranym kierunku,
- przy zainstalowaniu czopów pomiarowych w obu kierunkach, możliwość wzajemnej kontroli uzyskiwanych wyników (przez porównywanie) oraz możliwość kontynuowania oceny elementu w sytuacji gdyby miało miejsce uszkodzenie czopa w jednym z kierunków, na podstawie danych z drugiego.

Ostatecznym potwierdzeniem poprawności wybranego układu kierunków usytuowania czopów pomiarowych, spełniającego warunek kontroli największych osiąganych wartości średnich trwałego odkształcenia pełzania, może być zawsze wykonanie symulacji numerycznej dla danego przekroju poprzecznego rurociągu. W przypadkach nie ujętych w tabeli 6 (rozdział 8.2) do obliczeń można przyjąć wartości współczynników konstytutywnego równania pełzania (34), np. $C_1 = 0,57 \cdot 10^{-14}$, $C_2 = 5,22$ i $C_3 = -0,50$, niezależnie od materiału, wymiarów rur i parametrów ich eksploatacji. Ponieważ dla wybrania optymalnego usytuowania układu pomiarowego nie ma potrzeby wyznaczenia dokładnych wartości odkształcenia pełzania po jakimś czasie pracy a jedynie należy stwierdzić, dla którego z nich jest ono najwyższe (ewentualnie określić charakter przebiegów krzywych pełzania), to jest to wystarczające.

11. Wnioski

Okresowe badania pełzania wysokociśnieniowych rurociągów parowych stanowią ważny składnik ich diagnostyki technicznej, pozwalają ocenić odporność materiału na pełzanie, bezpieczeństwo i przydatność eksploatacyjną.

Powszechnie stosowaną metodą kontroli pełzania rurociągów parowych są pomiary trwałych odkształceń jego wybranych elementów (najczęściej odcinki proste i prostki kolan i łuków), prowadzone z wykorzystaniem tzw. czopów pomiarowych instalowanych na ich powierzchniach zewnętrznych. Na obecną chwilę układ pomiarowy, który one tworzą stanowią dwa kierunki wzajemnie prostopadłe do siebie i do osi rury, sytuowane w danym jej przekroju zupełnie przypadkowo, tzn. bez uwzględniania geometrii przekroju poprzecznego.

Przeprowadzona identyfikacja geometrii przekrojów poprzecznych prostych odcinków i prostek elementów giętych wysokociśnieniowych rurociągów parowych oraz analiza uzyskanych danych wykazała, że charakterystycznymi ich cechami są zowalizowanie i nierównomierna grubość ścianki na obwodzie. Ponadto zmieniają się one na długości elementów i to niekiedy dość znacznie, występują przestawienia owalu i miejsc np. o najcieńszej ściance. W większości przypadków wartości pozwalające opisać przekrój, tj. owalność i odchyłka grubości ścianki są niewielkie, ale jednak spotyka się też elementy, w przypadku których przekraczane są wartości dopuszczalne dla tych wielkości. Dotyczy to zwłaszcza owalności (przekroczenia są nawet kilkukrotne).

Nowoczesne oprogramowanie komputerowe stwarza możliwość dokonywania różnorodnych analiz, których wynikiem mogą być dane często nieosiągalne w praktyce przemysłowej lub laboratoriach z powodu ewentualnych uszkodzeń instalacji czy nawet groźnych w skutkach awarii, mogących wystąpić w warunkach pracy dla jakich te dane byłyby poszukiwane (z uwagi np. na eksperymenty prowadzone przy wysokich temperaturach i ciśnieniach lub przy ich wydłużaniu ponad czas obliczeniowy). Tę zaletę metod numerycznych wykorzystano w niniejszej pracy.

Modelowanie numeryczne procesu pełzania wysokociśnieniowych rurociągów parowych za pomocą programu ANSYS Mulitphysics cechują zadowalające rezultaty, co pozwala wykorzystać je np. do udoskonalenia metody oceny ich przydatności do dalszej bezpiecznej eksploatacji. Podjęcie analizy numerycznej dało możliwość uogólnienia wyników długoletnich badań doświadczalnych, za jakie uznano w niniejszej pracy

ruchowe pomiary odkształceń pełzania, prowadzone na obiektach przemysłowych jakimi są energetyczne rurociągi parowe.

Wyznaczone współczynniki konstytutywnego równania pełzania (34) pozwalają opisać proces pełzania wysokociśnieniowych rurociągów parowych (w ograniczeniu do materiałów i parametrów eksploatacji podanych w pracy). Mogą być one wykorzystywane do komputerowych symulacji zachowania się tych obiektów pozwalając np.: szacować czas eksploatacji do chwili osiągnięcia zadanego odkształcenia, kontynuować ocenę elementów rurociągów w przypadkach uszkodzeń czopów pomiarowych, ustalać najkorzystniejsze położenie układu pomiarowego dla konkretnego przekroju, oceniać możliwość przedłużania eksploatacji, zwłaszcza po przekroczeniu założonego czasu obliczeniowego itp.

Analiza przebiegów krzywych pełzania, uzyskanych na podstawie badań wysokociśnieniowych rurociągów parowych oraz modelowania numerycznego za pomocą programu ANSYS Multiphysics prostych elementów rurociągów o różnych przekrojach poprzecznych wskazują jednoznacznie, że charakteryzujące go takie wielkości jak owalność profili zewnętrznego i wewnętrznego oraz odchyłka grubości ścianki mają istotny wpływ na wartości osiąganego z upływem czasu eksploatacji względnego trwałego odkształcenia pełzania. Uwaga ta dotyczy tak przebiegów wartości średnich, jak i ich wartości składowych wyznaczanych na podstawie danych z każdego z kierunków pomiarów niezależnie.

Wpływ, o którym mowa powyżej powoduje, że np. (poniżej podano uwagi natury ogólnej, wynikające z dokonanej analizy, a bardziej szczegółowe zawarte są w rozdziałach 9 i 10 niniejszej pracy):

- z wielkości charakteryzujących geometrię przekroju poprzecznego rurociągu, tj. owalność i odchyłka grubości ścianki, silniejsze oddziaływanie na wartości osiągniętych odkształceń pełzania ma pierwsza z wymienionych,
- elementy zowalizowane osiągają tym wyższe wartości średniego trwałego odkształcenia pełzania oraz znacznie różniące się przebiegi wartości składowych im większa jest owalność początkowa przekroju poprzecznego,
- wartości średniego trwałego odkształcenia pełzania elementów niezowalizowanych (w praktyce o małej i porównywalnej dla obu profili owalności) są wyższe przy większym zróżnicowaniu grubości ścianki,

- przebieg każdej ze składowych odkształcenia pełzania, wyznaczany niezależnie na podstawie danych dla odpowiadającego jej kierunku pomiarów, zależy od jego usytuowania względem przekroju poprzecznego,
- w przypadku profili charakteryzujących się symetrycznością względem przyjętego układu pomiarowego (utworzonego przez dwa wzajemnie prostopadłe do siebie kierunki) istnieje takie jego usytuowanie, dla którego wartości odkształceń składowych i ich średnia są takie same, a zatem krzywe pokrywają się,
- zmiana geometrii przekroju poprzecznego na długości rurociągu na osiągnięte trwałe odkształcenia pełzania powoduje nieznaczny ich wzrost, w porównaniu z jej niewystępowaniem, i z praktycznego punktu widzenia można ją zaniedbać,

Za pomocą modelowania numerycznego możliwe jest określenie wartości odkształcenia pełzania, określonych w pracy (rozdział 9.2) jako cząstkowe, związanych z danymi odpowiadającymi zwrotom danego kierunku, wyznaczonym od osi przekroju zgodnie z promieniem (tego typu dane byłyby bardzo trudne do uzyskania na drodze doświadczeń realizowanych w warunkach przemysłowych).

Wyniki badań eksploatacyjnych i modelowania numerycznego pełzania rurociągów parowych pozwoliły na opracowanie zasad (wytycznych) dotyczących usytuowania układu pomiarowego, jaki stanowią kierunki z zainstalowanymi czopami pomiarowymi, z uwzględnieniem geometrii przekroju poprzecznego. Kryterium wyboru stanowi największa wartość średnia osiąganego trwałego odkształcenia pełzania. Stanowi to efekt utylitarny przeprowadzonej analizy, a praktyczne ich wdrożenie przyczyni się do poprawy dokładności oceny diagnostycznej rurociągów, umożliwiając np. pełne wykorzystanie materiałów z jakich są wykonane.

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

Literatura

1. Ansys Release 8.0 Documentation.
2. Augustyniak M., Kwintowski K., Łopata S.: Modelowanie zmian odkształcenia pełzania, geometrii przekroju poprzecznego i naprężeń w zowalizowanych rurach pracujących w warunkach pełzania, *Archiwum Energetyki*, tom XXXIV, nr 2, Gdańsk 2005.
3. Becker, A., A.: Fundamental Tests of Creep Behaviour, NAFEMS, Ref: R0027, Glasgow 1993.
4. Becker A. A., Hyde T. H., Sun W., Andersson P.: Benchmarks for finiti element analysis of creep continuum damage mechanics, *Computational Material Science Vol. 25*, 2002.
5. Boyle J. T., Spence J.: Developments in methods of ineleastic piping analysis, *Proceedings of Institution of Mechanical Engineers*, Vol. 201, no A2, London 1987.
6. Brunne W., Rajca S.: Przydatność badań niszczących do prognozowania żywotności wysokoprężnych rurociągów parowych, *Energetyka*, nr 12, 2002.
7. Charakterystyki stali. Stale do pracy w temperaturach podwyższonych i obniżonych. Stale dla energetyki. Seria D, tom I, część 1. Wyd. „Śląsk”, Katowice 1978.
8. Chmielniak T., Kosman G., Rusin A.: Pełzanie elementów turbin ciepłych, *Wydawnictwo Naukowo-Techniczne*, Warszawa 1990.
9. Dobosiewicz J.: Badania diagnostyczne urządzeń ciepłno-mechanicznych w energetyce. Część II – kotły i rurociągi, *Wyd. Biuro Gamma*, Warszawa 1999.
10. Dobosiewicz J., Zbroińska-Szczechura E.: Ocena stopnia zużycia ciśnieniowych elementów kotłów pracujących w warunkach pełzania, *Energetyka*, nr 12, 2007.
11. Dobrzański L. A., Dobrzański J., Madejski J., Załona J.: The evaluation of the extent of damage as the base for forecasting of the residual life of pressure loaded power installation elements, *Central European & World Connection Electric Power Industry – FORUM’95. Materiały Międzynarodowego Forum Materiałoznawstwa i Przemysłu Energetycznego*, Cracow, Poland, October 12-14, 1995.

12. Drażek Z. „Pomiar odkształcenia pełzania w wysokich temperaturach przy pomocy czujników tensometrycznych” Zeszyty Problemowe. Badania nieniszczące nr 7, Warszawa 2002.
13. Drażek Z. Radziszewski A.: Zastosowanie czujników tensometrycznych i metody magnetycznej pamięci metalu do pomiarów odkształcenia pełzania rurociągów parowych, Dozór techniczny, nr 5, 2003.
14. Drop M., Kruczalak H., Włoczyk E.: Instrukcja kontroli odkształceń trwałych (pomiaru pełzania). Zakłady Pomiarowo-Badawcze Energetyki Energopomiar, Gliwice, marzec 1977.
15. 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, Octobre 1999. PN-EN 45510-7-1. Wytyczne dotyczące dostaw wyposażenia elektrowni. Część 7-1: Rurociągi i zawory – układy przewodów wysokociśnieniowych.
16. Finnie I., Heller W. R.: Pełzanie materiałów konstrukcyjnych, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1962.
17. Garofalo F.: Fundamentals of creep and creep-rupture in metals, The Macmillan Company, New York, Collier-Macmillan Limited, London 1965.
18. Hernas A., Dobrzański J.: Trwałość i niszczenie elementów kotłów i turbin parowych, Wyd. Politechnik Śląskiej, Gliwice 2003.
19. Hofstotter P.: Laborerprobung und praktischer Einsatz kapazitiver Dehnungsmeßstreifen zur messung von Kriechdehnungen im Betrieb bei 530°C, VGB Kraftwerkstechnik, H.6, 1989.
20. Huimin X., Daqing Z., Fulong D., Wei Z., Dietz P., Schmidt A.: The Creep Measurement of 474°C Pipeline Using Moire Interferometry, Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 120, 2/1998.
21. Hyde T. H., Becker A. A., Sun W., Williams J. A.: Influence of geometry change on creep failure life of 90° pressurised pipe bends with no initial ovality, International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 82, 2005.
22. Hyde T. H., Becker A. A., Sun W., Williams J. A.: Finite element creep damage analyses of P91 pipes, International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 83, 2006.

23. Hyde T. H., Sun W., Williams J. A.: Prediction of creep failure life of internally pressurised thick walled CrMoV pipes, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 76, 1999.
24. Hyde T. H., Yaghi A., Becker A. A., Earl P. G.: Finite element creep continuum damage mechanics analysis of pressurised pipe bends with ovality, *CREEP7 Conference on Creep and Fatigue at Elevated Temperatures No7*, Tsukuba, JAPAN (03/06/2001), Vol. 45, no 1 (117 p.) (10 ref.), 2002.
25. Hyde T. H., Yaghi A., Proctor M.: Use of reference stress method in estimating the life of pipe bends under creep conditions, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 75, 1998.
26. Instrukcja oceny stanu oraz kwalifikowania do wymiany komór, kolektorów, rurociągów kotłowych i głównych rurociągów parowych pracujących w warunkach pełzania. Opracował zespół: Dobosiewicz J., Krzywda Z., Sanetra P., Wojczyk K., Suchanek E., Ministerstwo Górnictwa i Energetyki, Warszawa 1986, *Dozór Techniczny* nr 3, 1988.
27. Jakowluk A.: *Procesy pełzania i zmęczenia w materiałach*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1993.
28. Kędziora S., Kubiak T.: O metodzie elementów skończonych, *Dozór Techniczny* 3/1999.
29. Kowalewski Z.: *Zjawisko pełzania metali – eksperyment i modelowanie*, Monografie, Seria A, Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk, 2005.
30. Kraus H.: *Creep analysis*, New York, John Wiley and Sons, 1980.
31. Krzywda S., Dobosiewicz J.: *Instrukcja pomiaru pełzania przewodów parowych. Część I. Zakłady Energetyczne Okręgu Południowego*. Katowice, marzec 1961.
32. Kussmaul K, Beisswänger F.: Method for Determining Remaining Life. *International Journal Pressure Vessels and Piping*, Vol. 19, 1985.
33. Kussmaul K., Maile K., Eckert W., Möller D., Fromm K.-W.: Innendruckversuche an Rohrbogen im Kriechbereich. Rechnerische Simulation und experimentelle Nachprüfung, *VGB Kraftwerkstechnik* 71, Heft 9, p. 871, 1991.
34. Kwintowski K., Łopata S.: Stosowane i proponowane przemysłowe metody badań pełzania rurociągów parowych, X Jubileuszowy Kongres Eksploatacji Urządzeń Technicznych, Stare Jabłonki, 6-9 wrzesień 2005.

35. Kwintowski K., Łopata S.: Poprzeczny profil wysokociśnieniowego rurociągu parowego a trwałe odkształcenie spowodowane pełzaniem, Współczesne technologie i urządzenia energetyczne, edytor J. Taler, Kraków 2007.
36. Kwintowski K., Łopata S., Augustyniak M.: Wpływ nieregularności przekroju poprzecznego rurociągów parowych na ich pełzanie, Archiwum Energetyki, tom XXXVII, nr 1-2, Gdańsk 2007.
37. Laudyn D., Pawlik M., Strzelczyk F.: Elektrownie, WN-T, Warszawa 2000.
38. Łączek S.: Wprowadzenie do systemu elementów skończonych ANSYS, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 1999.
39. Łopata S.: Badanie prostoliniowych przewodów rurowych instalowanych w wysokociśnieniowych rurociągach parowych, Zeszyty Problemowe, Badania niszczące, Nr 2, Warszawa 1997.
40. Łopata S.: Creep of high temperature steam piping during extensive periods of operation, Proceedings, Ninth International Conference on Pressure Vessel Technology, Vol. 2, p.621, Sydney Australia, 2000.
41. Łopata S.: Trwałość wysokociśnieniowych rurociągów parowych, Zeszyty Naukowe. Mechanika nr 81, Kraków 2001.
42. Łopata S., Augustyniak M., Kwintowski K.: The influence analysis of the steam pipeline cross-section ovality on their creep, Proceedings of The Sixth International Congress on Thermal Stresses, Vienna, Austria, May 2005.
43. Łopata S., Kwintowski K.: Nieoczekiwane przebiegi odkształceń pełzania rurociągów parowych i ich przyczyny, Zeszyty Problemowe, Badania niszczące, Nr 10, Warszawa 2005.
44. Łopata S., Kwintowski K.: Czujniki pojemnościowe w kontroli pełzania wysokopiętnych rurociągów parowych, Energetyka, nr 12, 2006.
45. Łopata S., Kwintowski K.: Implementation of a numerical model of steam pipeline creep for creep strain measurements, Науковий журнал ВІСНИК, Технічні науки, Хмельницький, No 4, Т. 1 (94), 2007.
46. Łopata S., Kwintowski K.: Pełzanie rurociągów parowych o zowalizowanym przekroju poprzecznym, Czasopismo Techniczne Mechanika, Zeszyt 2 (105), 2-M/2008.
47. Malinin N. N., Rżysko I.: Mechanika materiałów, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1981.

48. Matousek J.: Mathematical model of the creep process and its use for prediction of life-time material with influenced surface zone, Materials of II Symposium on Problems of Materials Creep, Polska, Białystok, 1986.
49. Młynarski F.: Zmiany własności stali urządzeń kotłowych o wysokich parametrach pary wodnej, Politechnika Krakowska, Zeszyt Naukowy Nr 12, Mechanika Nr 11, Kraków 1963.
50. Młynarski F., Taler J.: Residual life assesment for boiler pressure components based on measurements of creep strains, Transaction of the ASME, Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 110, No 3, August 1988.
51. Opracowania dotyczące badań geometrii nowo instalowanych rurociągów parowych oraz dotyczące oceny przydatności do dalszej bezpiecznej eksploatacji rurociągów parowych po przekroczonym obliczeniowym czasie pracy, Huta im. Sendzimira, Mittal Steel Poland S.A., Kraków 1992 ÷ 1998.
52. Osipowski N. F.: Kotły wysokoprężne, Państwowe Wydawnictwo Techniczne, Warszawa 1965.
53. PN-85/H-74252. Rury stalowe bez szwu kotłowe.
54. PN-92/M-34031. Rurociągi pary i wody gorącej – Ogólne wymagania i badania.
55. Profilaktyczne badania kolana oraz odcinka prostego za zasuwą główną i przed zaworem szybkozamykającym kolektora pary 9 MPa w rejonie turbospężarki nr 3, Orzeczenie nr 10/M/U/G/R/92. Ciągły pomiar grubości ścian wybranych trzech przekrojów kolektora pary 9 MPa w rejonie TS-3, Protokół dodatkowy do orzeczenia nr 10/M/U/G/R/92, Huta im. Sendzimira, Kraków 1992.
56. Rozporządzenie Rady Ministrów z 16.07.2002 r. w sprawie rodzajów urządzeń technicznych podlegających dozorowi technicznemu. Dziennik Ustaw z 2002 r., nr 120, poz. 1021.
57. Rusin A.: Trwałość wysokotemperaturowych elementów turbin ciepłych w ustalonych warunkach eksploatacji, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej Nr 1333, Energetyka z. 127, Gliwice 1996.
58. Seshadri R.: Design and Life Prediction of Fired Heater Tubes in the Creep Range, Journal of Pressure Vessels Technology, Vol. 110, 1988.
59. Seyna F., Ginalski J., Skibiński T.: Przydatność metod diagnostycznych stosowanych w prognozowaniu trwałości rurociągów parowych, Dozór Techniczny, nr 1, 1995.

60. Skrzypek J.: *Plastyczność i pełzanie – teoria, zastosowania, zadania*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1986.
61. Spindler M. W., Spindler S. L.: Creep deformation, rupture and ductility of Esshete 1250, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 85, 2008.
62. Sun W., Hyde T. H., Becker A.A., Williams J. A.: Steady state creep reference rupture stresses for internally pressurised pipes for use in life prediction, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 79, 2002.
63. Taler J.: Ocena trwałości elementów ciśnieniowych kotła pracujących w warunkach pełzania na podstawie pomiaru odkształcenia, *Energetyka* 42, nr 12, 1988.
64. Thielsch H., Knarr N., Burdick C.: Capacitive creep strain measurements predict component life, *Power Engineering*, Vol. 95, 5/1991.
65. Thoraval G.: Creep of high temperature steam piping: EDF experience with fossil-fired power plants from 1955 to 1987, *Nuclear Engineering and Design*, 116, 1989.
66. Zbroińska-Szczechura E.: Obliczenie trwałości elementów rurociągów parowych eksploatowanych powyżej 150 000h, *Energetyka*, Nr 12, 2002.
67. Weber J., Klenk A., Rieke M.: A new method of strength calculation and lifetime prediction of pipe bends operating in the creep range, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 82, 2005.
68. Wiśniewski W.: *Diagnostyka techniczna wytwórców urządzeń energetycznych w elektrowniach*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1991.
69. Адамович В. К., Гофман Ю. М.: Об увеличении срока эксплуатации паропроводов из сталей 12МХ и 12Х1МФ со 100 до 200 тыс. ч, *Теплоэнергетика*, № 6, 1972.
70. Векслер Е. Я., Гинзбург З. С.: Измерение жаропрочных свойств стали 12Х1МФ в процессе эксплуатации, *Электрические станции*, № 8, 1972.
71. Векслер Е. Я., Чайковский В. М., Осасюк В. В.: Эксплуатационная надежность паропроводов высокого давления из перлитных сталей после 150 – 200 тыс. ч работы, *Металловедение и термическая обработка металлов*, № 12, 1980.
72. Елизаров Д. П., Никель А. А., Семенова Т. Ф.: Опыт наблюдения за ползучестью паропроводов теплоэлектростанций, *Электрические станции*, № 2, 1974.

73. Злепко В. Ф., Крутасова Е. И., Бологов Г. А., Новицкая Г. М.: Повреждение металла паропроводных труб из стали 12Х1МФ в условиях ползучести, Электрические станции, № 1, 1974.
74. Канцедалов В. Г., Самойленко В. П., Топорков А. Т.: Бесконтактный метод диагностики остаточной деформации ползучести паропроводов, Электрические станции, № 4, 1988.
75. Куманин В. И., Ковалева Л. А., Алексеев С. В.: Долговечность металла в условиях ползучести, Металлургия, Москва 1988.
76. Левицкий Ю. В., Новиченок Л. М., Трифонов Г. Я.: О повышении безопасности эксплуатации гибов паропроводов, Теплоэнергетика, № 12, 1988.
77. Никитина И. К.: Справочник по трубопроводам тепловых электростанций, „Энергоатомиздат”, Москва 1983.
78. Сичиков М. Ф.: Ульнова Н. В.: Свойства металла и организация контроля его на установках высокого давления В кн. Пар высокого давления в энергетике. Под ред. Горшкова А. С., Ойвина Н. Л., Ромадина В. П. И Тюрина П. Я. „Госэнергоиздат”, Москва-Ленинград 1950.

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

Załącznik nr 1

Diagnostyka pełzania elementów wysokociśnieniowego rurociągu parowego
Arkusz pomiarowo-obliczeniowy

Nazwa obiektu: Rurociąg do stacji redukcyjno-schładzającej

Materiał obiektu: Stal Cr-Mo (12HM)

Parametry pracy (wg pomiarów):

- ciśnienie: 9,2 MPa,
- temperatura: 500÷505 °C

Data oddania do eksploatacji: styczeń 1959 r.

Czas obliczeniowy rurociągu: $\tau_{obl} = 100000$ godz.

Współczynnik linowy rozszerzalności cieplnej:

- materiał rurociągu: $\beta_r = 11,2 \cdot 10^{-6} \frac{1}{K}$,
- mikrometr: kabłąk stalowy (St): $\beta_m = 11,5 \cdot 10^{-6} \frac{1}{K}$,

Nr punktu (wg schematu): 1

Wymiary rurociągu (w płaszczyźnie zainstalowania czopów pomiarowych) – wartości rzeczywiste:

- średnice (wartości początkowe):

$$D_{z1} = D_{pion} = 195,4 \text{ mm},$$

$$D_{z2} = D_{poziom} = 194,8 \text{ mm},$$

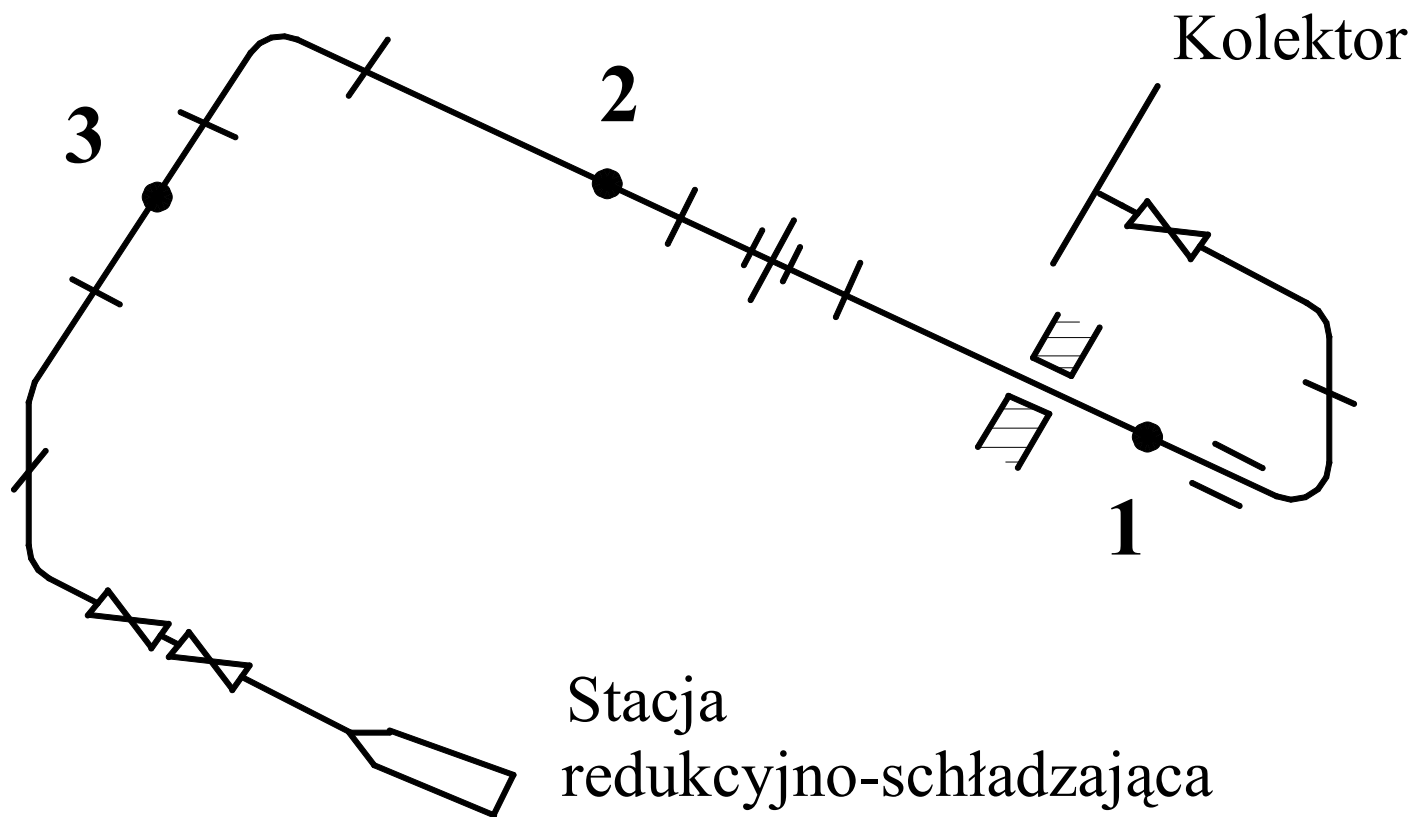
$$D_z = 0,5(D_{z1} + D_{z2}) = 195,1 \text{ mm},$$

- grubość ścianki (wartość średnia):

$$g_r = 22,1 \text{ mm}^1)$$

L.p.	Data pomiarów	Czas pracy (od początku eksploatacji) τ , h	Mikrometr			Średnica na czopach pomiarowych, mm		Warunki badań, temperatura, °C		Średnica na czopach pomiarowych dla warunku odniesienia, mm		Trwałe odkształcenie pełzania, %		
			Mat. kabł.	Poprawki, mm		$D_1(t_r, t_m) = D_{pion}$	$D_2(t_r, t_m) = D_{poziom}$	Rurociąg t_r	Mikrom. (kabłąk) t_m	$D_1(t_0 = 20^\circ\text{C})$	$D_2(t_0 = 20^\circ\text{C})$	ε_1 (dla pom. w kierunku D_1)	ε_2 (dla pom. w kierunku D_2)	$\varepsilon = 0,5(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)$
				pocz.	końc.									
1	18.11.1958	0	St	0,00	0,00	235,92	235,45	10,0	14,0	235,940145	235,470125	0	0	0
2	25.02.1964	41000	St	0,00	0,00	235,97	235,51	6,0	13,0	235,988006	235,527971	0,0245338	0,0296522	0,0270930
3	10.10.1968	80900	St	0,02	0,02	236,01	235,55	31,0	30,0	236,028065	235,568068	0,0450683	0,0502066	0,0476373
4	20.11.1971	108100	St	0,00	0,00	236,21	235,75	77,0	21,0	236,062013	235,602301	0,0624704	0,0677546	0,0651125
5	16.12.1974	134800	St	0,01	0,01	236,24	235,78	86,0	25,0	236,089058	235,629371	0,0763342	0,0816312	0,0789827
6	07.12.1976	152000	St	0,01	0,01	236,22	235,76	75,0	26,0	236,100853	235,641104	0,0823803	0,0876456	0,0850129
7	06.12.1980	185500	St	0,00	0,00	236,25	235,82	82,0	25,0	236,099628	235,669902	0,0817525	0,1024075	0,0920800
8	29.04.1986	225000	St	0,00	0,00	236,25	235,79	77,0	32,0	236,131840	235,672070	0,0982644	0,1035188	0,1008916
9	16.11.1990	262000	St	0,03	0,03	236,16	235,70	42,0	26,0	236,148107	235,688189	0,1066034	0,1117817	0,1091925
10	26.11.1992	278800	St	-0,01	-0,01	236,13	235,69	22,4	28,2	236,135920	235,695891	0,1003562	0,1157297	0,1080429
11	16.02.1994	278900	St	-0,01	-0,01	236,15	235,71	5,8	9,5	236,149042	235,709025	0,1070826	0,1224626	0,1147726
12	05.09.1997	285500	St	-0,01	-0,01	236,16	235,71	21,9	24,9	236,158282	235,708266	0,1118191	0,1220735	0,1169463
13	13.06.2000	307200	St	-0,01	-0,01	236,17	235,74	30,0	30,2	236,161252	235,731249	0,1133413	0,1338549	0,1235981
14	12.06.2003	332282	St	-0,01	-0,01	236,34	235,89	76,0	33,3	236,217974	235,768187	0,1424176	0,1527895	0,1476035
15	17.02.2005	345079	St	-0,01	-0,01	236,28	235,825	46,2	22,1	236,200689	235,751514	0,1335574	0,1442430	0,1389002

¹⁾ Wg pomiarów wykonanych 16.11.1990 r. (po 262000 godz. pracy).



Schemat wysokociśnieniowego rurociągu pary przegrzanej do stacji redukcyjno-schładzającej wraz z naniesionymi punktami, w których zainstalowano czopy pomiarowe do kontroli diagnostycznej pełzania