
XVII Seminarium
NIENISZCZĄCE BADANIA MATERIAŁÓW
Zakopane, 8 - 11 marca 2011

ULTRADŹWIĘKOWA METODA POMIARU ZMIAN ŚREDNICY RURY
GRUBOŚCIENNEJ

Paweł Grzywna, Piotr Gutkiewicz, Sławomir Mackiewicz, Jacek Szelażek
IPPT PAN Warszawa

pgrzywna@ippt.gov.pl, pgutkie@ippt.gov.pl, smackiew@ippt.gov.pl, jszela@ippt.gov.pl

1. WSTĘP

W wysokociśnieniowych rurociągach pracujących w wysokich temperaturach obserwowane jest zjawisko pełzania. Jego rezultatami są powolny przyrost średnicy rurociągu oraz zmiany struktury materiału. Zmiany średnicy monitorowane są przez cykliczne wykonywanie mikrometrycznych pomiarów średnic. Pomiary wykonuje się w miejscach gdzie zamontowano specjalne czopy pomiarowe, zazwyczaj w dwóch wzajemnie prostopadłych kierunkach [1, 2].

Dokładność pomiarów mikrometrycznych zależy od wielu czynników takich jak stan czopów, dokładności przyrządu pomiarowego i pomiaru temperatury. Wadą tej metody śledzenia rozwoju procesu pełzania jest możliwość wykonywania pomiarów jedynie w miejscach zainstalowania czopów i jedynie w dwóch kierunkach. Dlatego podejmowane są próby wykorzystania innych metod oceny stopnia zaawansowania pełzania. Jedną z nich są pomiary ultradźwiękowe. Na przykład w pracy [3] opisano pomiar obwodu rury falami Lamba rozchodzącymi się w kierunku obwodowym, a w pracy [4] pomiar obwodu rury prowadzony falą powierzchniową rozchodzącą się po obwodzie rury.

Proponowane sposoby pomiaru obwodu obarczone są wadami utrudniającymi ich praktyczne zastosowanie lub obniżającymi dokładność pomiaru. Sposób opisany w patencie [4] umożliwia obliczenie obwodu rury lub walca ale jedynie przy założeniu, że jego powierzchnia jest gładka, czysta i swobodna. W przypadku rur pokrytych izolacją metoda ta nie może być zastosowana. Sposoby wykorzystujące fale Lamba ze względu na silną zależność prędkości tych fal od grubości ścianki rury są przydatne do wykrywania wad w materiale rury ale nie pozwalają na obliczenie obwodu rury z wystarczającą dokładnością.

Inne podejście zaprezentowano w pracy [5]. Przedmiotem badania są narażone na pełzanie rury o średnicy około 100mm w instalacji chemicznej. Opisany w pracy układ ultradźwiękowy, złożony z 4 głowic typu koło Sperry, pozwala na wykrywanie wad, ocenę tłumienia fal oraz na wyznaczenie średnicy zewnętrznej i wewnętrznej rury. Do badania rura musi być pozbawiona izolacji na całej długości ponieważ układ pomiarowy przesuwany jest wzdłuż rury.

Aby wyeliminować wady znanych rozwiązań zaproponowano wykorzystanie do oceny zmian obwodu rury fal objętościowych, rozchodzących się w kierunku obwodowym po linii łamanej, z wielokrotnymi odbiciami od zewnętrznej powierzchni rury. Fale takie można wzbudzić i odebrać specjalną kątową głowicą podwójną lub dwiema głowicami kątowymi (nadawczą i odbiorczą) ustawionymi na powierzchni rury.

Zaletą takiego sposobu oceny obwodu elementu walcowego, w porównaniu do sposobów wykorzystujących fale powierzchniowe lub płytowe, jest to, że w przypadku badania rur

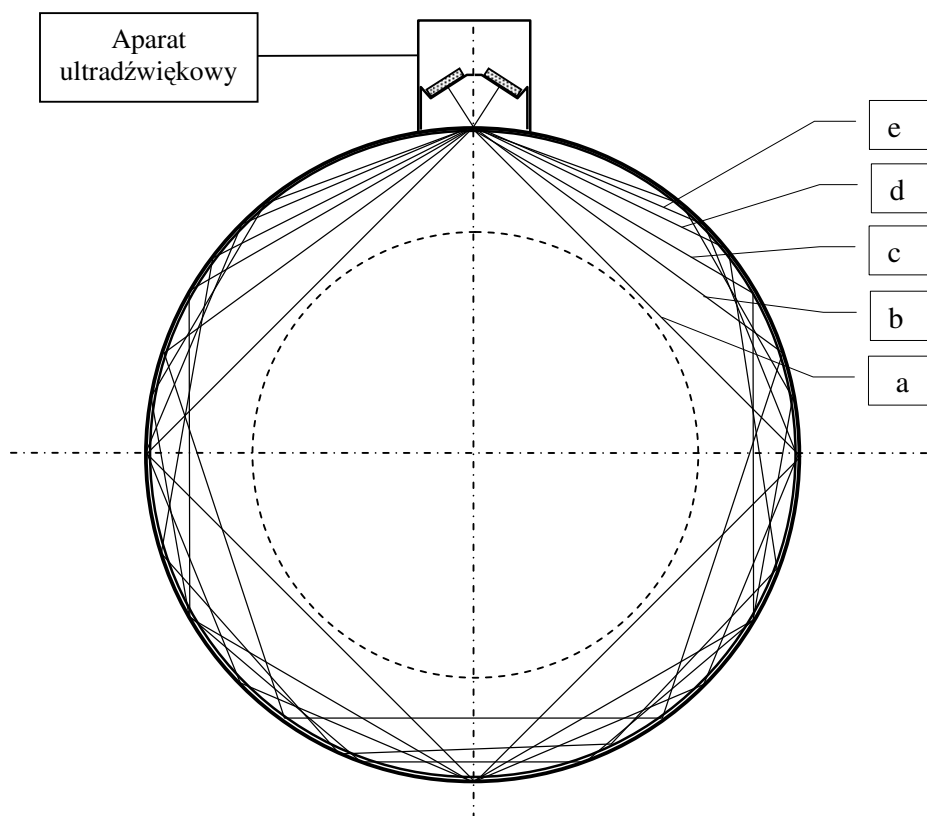
prędkość fal objętościowych nie jest zależna od grubości ścianki rury, a jedynie od własności sprężystych materiału z jakiego jest ona wykonana. Czas przejścia i amplituda fal objętościowych nie zależą od tego, czy rura pokryta jest lekką izolacją czy nie. Zaletą opisanego sposobu monitorowania obwodu rury w porównaniu do pomiarów mikrometrycznych jest to, że mogą być wykonane praktycznie w dowolnym miejscu, bez konieczności instalowania czopów pomiarowych. Do przeprowadzenia pomiaru wymagany jest jedynie lokalny dostęp do zewnętrznej powierzchni rury (miejsce na sprzęgnięcie głowicy).

Drugą zaletą takiego sposobu badania jest możliwość monitorowania zmian obwodu niezależnie od tego, czy odkształcenia są rozłożone równomiernie na całym obwodzie rury czy też są zlokalizowane jedynie na części obwodu rury – wynikiem pomiaru jest bowiem długość odcinków wielokąta wpisanego w obwód rury.

Jeśli badana rura ma średnicę zewnętrzną równą 250 mm to zmiana obwodu odpowiadająca mierzonemu po średnicy trwałemu odkształceniu równemu 0,01% odpowiada zmianie obwodu o 0,0785 mm. Taka zmiana drogi dla fali podłużnej oznacza zmianę czasu przejścia o blisko 12 ns a dla fali poprzecznej o około 24 ns. Zmiany czasu przejścia rzędu kilkunastu lub kilkudziesięciu nanosekund są współczesną aparaturą z łatwością rejestrowane.

2. POMIARY FALAMI WIELOKROTNIE ODBITYMI

Rysunek 1 pokazuje schemat pomiaru i drogi po jakich mogą rozchodzić się fale w grubościennej rurze. Głowica nadawczo-odbiorcza, wyposażona w dwa przetworniki piezoelektryczne osadzone na jednym klinie załamującym, jest sprzęgnięta akustycznie z zewnętrzną powierzchnią badanego elementu.



Rys. 1. Schemat pomiaru obwodu rury grubościennej falami objętościowymi ulegającymi wielokrotnym odbiciom. a – fala 3-krotnie odbita, b – 4-krotnie odbita, c – 5-krotnie odbita, itd. aż do fali podpowierzchniowej.

Fala ultradźwiękowa generowana przez przetwornik nadawczy, poprzez materiał klina załamującego dociera do powierzchni rury, na granicy klin-materiał badany ulega załamaniu i tworzy w ścianie rury rozbieżna wiązkę fal. Rozbieżność wiązki powoduje, że fale rozchodzą się w ścianie rury po różnych drogach i po obiegnięciu obwodu rury docierają do głowicy jako fale wielokrotnie odbite, po różnych, zależnych od ilości odbić od zewnętrznej powierzchni rury czasach. Czasy przejścia tych fal opisuje wyrażenie:

$$(1) \quad T_n = T_K + \frac{D}{c} (n+1) \sin\left(\frac{\pi}{n+1}\right)$$

gdzie T_K – czas przejścia fali w klinie załamującym
 n – ilość odbić fali na po obwodzie,
 D – średnica badanego elementu,
 c – prędkość propagacji fali.

Czas przejścia fal w klinie załamującym, wykorzystując specjalnie zaprojektowaną głowicę, można zmierzyć jak opisano w rozdziale 3.2 i pokazano na rysunku 2.

Z zależności (1) obliczyć można średnice zewnętrzne D_n rury dla każdej z odebranych fal:

$$(2) \quad D_n = \frac{c (T_n - T_K)}{(n+1) \sin\left(\frac{\pi}{n+1}\right)}$$

gdzie D_n – średnica wyznaczona z czasu przejścia fali n -krotnie odbitej,

Teoretycznie, z obliczonych czasów przejścia można wyciągnąć wnioski o geometrii rury. Równość wszystkich obliczonych średnic D_n oznacza to, że badany element ma przekrój kołowy w miejscu wykonania pomiaru. Jeśli jedna lub więcej obliczonych z zależności (2) średnic D_n różnią się od pozostałych, może to świadczyć o lokalnym odchyleniu przekroju elementu od kołowego.

W ścianie rury, w kierunku obwodowym, mogą rozchodzić się po liniach łamanych trzy typy fal: podłużna (L), poprzeczna spolaryzowana równoległe do powierzchni (SH) i spolaryzowana prostopadle do powierzchni (SV). Zgodnie z rysunkiem 1 fala rozchodząc się w ścianie rury ulega wielokrotnym odbiciom od zewnętrznej powierzchni materiału. Ważne jest więc aby w zakresie kątów padania powyżej około 50° (dla większych kątów załamania pojawia się niebezpieczeństwo odbicia fali od wewnętrznej powierzchni rury) współczynnik odbicia był możliwie wysoki i aby faza fali odbitej nie zależała od kąta padania. Ostatnie wymagania stawia ograniczenia przy badaniu falą poprzeczną SV, dla której współczynnik odbicia wynosi co prawda 100% ale przy kątach padania większych niż 33° zmienia się faza fali odbitej. Ograniczenie to nie ma jednak znaczenia w przypadku badania rur grubościennych. Fala poprzeczna SV ulega również transformacji na falę L co powoduje, że ciąg odbieranych impulsów, szczególnie w rurach o stosunkowo małej grubości ścianki, jest trudny do interpretacji. Zaletą tej fali jest natomiast łatwe sprzężenie akustyczne głowicy z badanym materiałem. Podobnie łatwo sprzęga się z materiałem głowice katowe na fale podłużne. Zaletą fali podłużnej jest też niskie tłumienie. Jej wadami w opisywanych zastosowaniach są natomiast wysoka prędkość (czyli krótki czas przejścia), silna zależność prędkości fali od temperatury w stali i silna zależność współczynnika odbicia od kąta padania na granicę stal-powietrze wywołana transformacją fali L na falę SV. Ostatnie zjawisko powoduje również, że do głowicy odbiorczej, poza impulsami rozchodzącymi się jako fala L docierają również impulsy fal ulegających wielokrotnym transformacjom. W praktyce

powoduje to, że analiza odbieranego ciągu impulsów staje się skomplikowana. Eksperymenty przeprowadzone z głowicami kątowymi na fale L o różnych kątach załamania, wykazały jej nieprzydatność do pomiaru czasu przejścia fali rozchodzącej się po linii łamanej wynikającą z tego właśnie powodu.

Trudności z transformacją i wywołanym nią spadkiem amplitudy sygnału nie sprawia fala SH. Dla tej fali współczynnik odbicia od swobodnej granicy jest równy 100% i niezależny od kąta padania. Dodatkową zaletą tej fali w rozważanych pomiarach są niska prędkość (blisko dwukrotnie niższa w porównaniu do fali L) i słaba zależność prędkości od temperatury. Natomiast wadami fali SH są wyższe w porównaniu z falą podłużną tłumienie i trudności w uzyskaniu poprawnego sprzężenia akustycznego (konieczność stosowania cieczy o wysokiej lepkości).

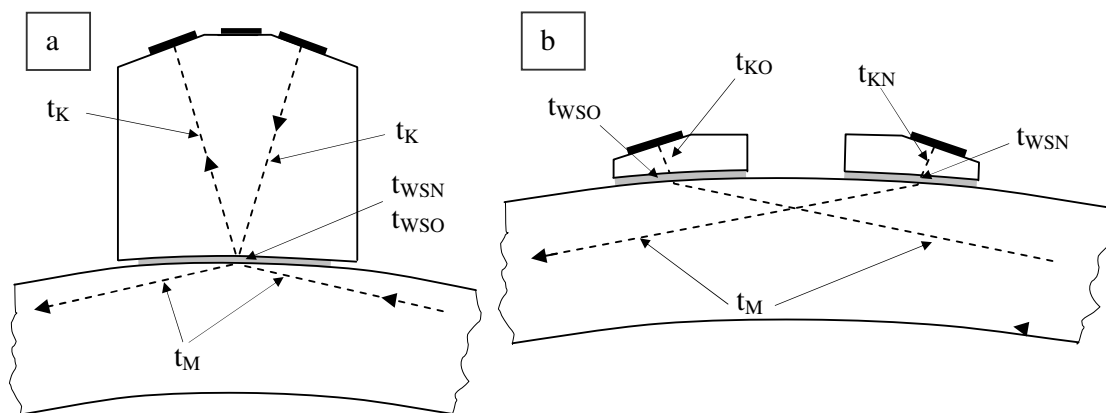
Wstępne badania wykonane głowicami na opisane wyżej trzy fale wykazały, że do dalszych badań wykorzystane będą jedynie fale poprzeczne SH i SV.

Jeszcze jednym wymaganiem jaki można postawić fali stosowanej w takich pomiarach jest możliwie niska czułość na naprężenia własne i montażowe jakie mogą występować w mierzonych elementach. Jeśli pomiary mają być wykonywane na wysokociśnieniowych rurociągach parowych w elektrociepłowniach, to najprawdopodobniej najwyższe wartości w stanie zimnym może osiągać składowa osiowa naprężen (rozciąganie, ściskanie, zginanie rurociągu). Fala SH wykazuje na tę składową naprężenia najwyższą czułość. Wpływ naprężenia na czas przejścia tej fali jest opisany w rozdziale 3.2.

3. BADANIA DOŚWIADCZALNE

3.1. Głowice stosowane w pomiarach

Ciekawą cechą pomiarów czasu przejścia fal po obwodzie walcowych elementów jest to, że możliwe jest wyeliminowanie wpływu warstwy sprzęgającej i czasów przejścia fal w klinie (znany mankament precyzyjnych pomiarów czasu przejścia impulsów fal prowadzonych ze sprzężeniem kontaktowym) i obliczenie czasu przejścia fal jedynie w badanym materiale. Pokazano to schematycznie na rysunku 2a dla głowicy zespolonej i 2b dla dwóch głowic – nadawczej i odbiorczej.



Rys. 2. Czasy przejścia fal w klinach głowic, w ośrodku sprzęgającym i w badanym materiale dla a) głowicy zespolonej, b) dwóch głowic kątowych

Czasy przejścia fal po jednym t_1 i po dwóch t_2 okrążeniach obwodu rury wynoszą:

$$(3) \quad t_1 = t_{KN} + t_{WSN} + t_M + t_{WSO} + t_{KO}$$

$$(4) \quad t_2 = t_{KN} + t_{WSN} + 2t_M + t_{WSO} + t_{KO}$$

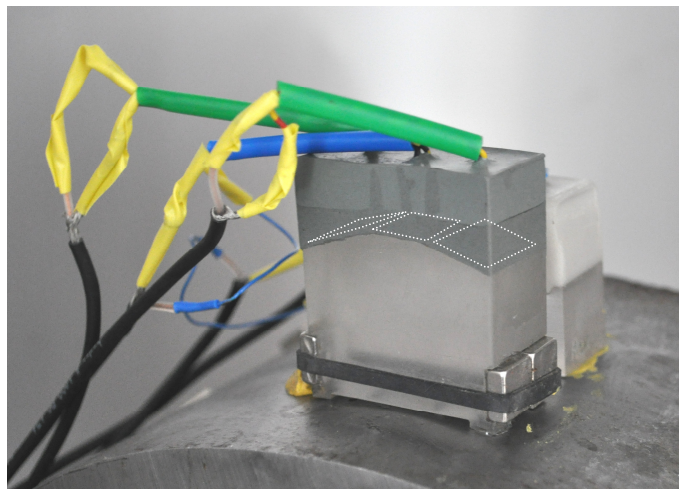
gdzie: t_{KN} , t_{KO} – czasy przejścia w klinie odpowiednio dla fali nadawanej i odbieranej,
 t_{WSN} , t_{WSO} – czasy przejścia w warstwie sprzęgającej odpowiednio dla fali nadawanej i odbieranej,
 t_M – czas przejścia fali w materiale rury.

Czas różnicowy wynosi:

$$(5) \quad t_R = t_2 - t_1 = t_M$$

Oznacza to, że wykorzystując jedynie dwa przetworniki ultradźwiękowe możliwe jest obliczenie czasu przejścia fal w badanym materiale z wyeliminowaniem wpływu grubości warstwy sprzęgającej i czasu przejścia fal w klinie głowicy (to samo w przypadku powierzchni płaskich możliwe było do uzyskania z wykorzystaniem sześciu przetworników [6]).

Na rysunku 3 pokazano wykonane specjalnie do badań rur zespolone głowice kątowe na fale poprzeczne SH i SV. Kliny załamujące głowic zostały dopasowane do krzywizny rury i uformowane tak, że osie wiązek generowanej i odbieranej przechodzą przez granicę klin-stal w tym samym punkcie (patrz rysunek 2a). Głowica na fale SH została wyposażona dodatkowo w trzeci przetwornik pozwalający na pomiar grubości ścianki rury metodą echa. Częstotliwość drgań dla obu głowic wynosiła 2MHz. Przetworniki osadzone pod kątem, poza generacją i odbiorem fal rozchodzących się po obwodzie rury, pozwalają na pomiar czasu przejścia fal w samym materiale klina (między przetwornikiem nadawczym, dolną powierzchnią klina i przetwornikiem odbiorczym).



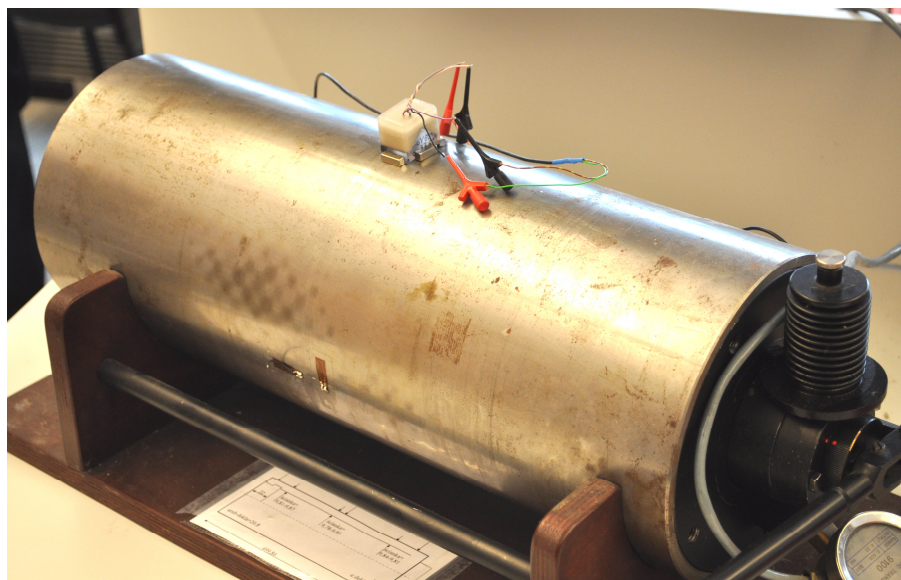
Rys. 3. Zespolone głowice kątowe na poprzeczne fale SH (po lewej, wyposażona w 3 przetworniki) i SV (z tyłu) do monitorowania zmian obwodu rury grubościenniej. Linia przerywana pokazano położenia przetworników w głowicy na fale SH.

Pomiar czasu przejścia fal w klinie głowicy może być wykorzystany dwojako:

- jako poprawka do obliczania czasu przejścia w materiale rury,
- do obliczenia poprawki temperaturowej na czas przejścia fal w materiale rury (opisanej w rozdziale 3.4).

3.2. Pomiary na rurze podanej działaniu ciśnienia wewnętrznego

Jedynym sposobem uzyskania nieznacznych, podobnych do będących wynikiem pełzania odkształceń rury (rzędu ułamek %) jest poddanie jej działaniu ciśnienia wewnętrznego. Zmieniając ciśnienie można w kontrolowany sposób zmieniać średnicą rury prowadząc jednocześnie pomiary ultradźwiękowe. Rysunek 4 pokazuje stanowisko pomiarowe składające się z rury o średnicy zewnętrznej 190mm i grubości ścianki 10mm, w której wnętrzu można zmieniać ciśnienie. Do rury sprężnięta jest głowica na fale SH o kącie załamania 60° , dopasowana do krzywizny rury.



Rys. 4. Układ ciśnieniowy do badania zmian czasu przejścia wywołanych ciśnieniem wewnętrznym w rurze. Widoczna głowica ustawione na powierzchni rury.

Na rurze tej wykonano pomiary zależności czasu przejścia fali SH rozchodzącej się w kierunku obwodowym po linii łamanej, od ciśnienia wewnętrznego. Jednocześnie mierzono mechanicznie (suwmiarka z odczytem $\pm 0,01\text{mm}$) zmiany zewnętrznej średnicy rury. Wykonano też obliczenia zmian średnicy wywołanych działaniem ciśnienia wewnętrznego. Obliczony przyrost średnicy zewnętrznej D_{Obl} wywołany działaniem ciśnienia wewnętrznego 10MPa wynosi 0,07 mm [7]. Wyniki obliczeń potwierdziły pomiary mechaniczne wykonane suwmiarką.

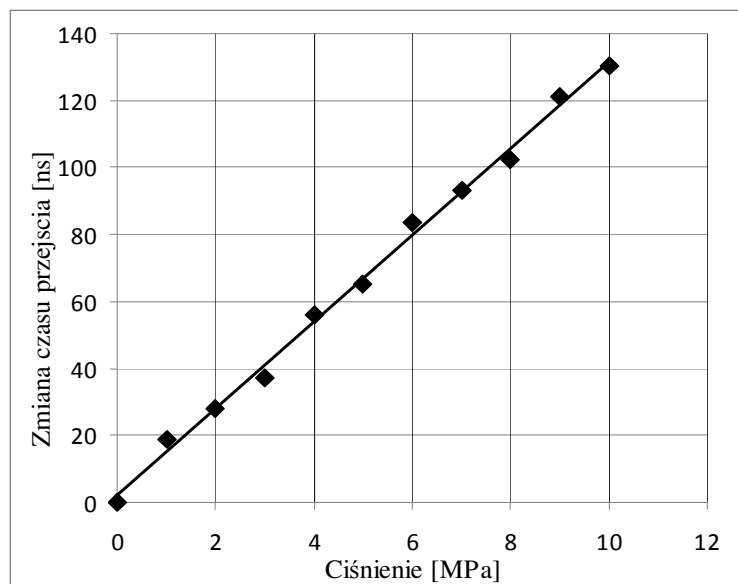
W przypadku badań ultradźwiękowych wadą wymuszania zmian średnicy rury poprzez zmiany ciśnienia wewnątrz niej jest to, że ciśnienie wywołuje w materiale rury grubościennej złożony stan naprężeń. Wskutek efektu elastoakustycznego (zależności prędkości fal ultradźwiękowych od naprężenia) zmiany czasu przejścia fal ultradźwiękowych po obwodzie rury będą wynikiem nie tylko odkształcenia rury ale i działających w jej ściance naprężeń.

Wywołany przyrostem ciśnienia wewnętrznego o 10MPa zmierzony przyrost czasu przejścia fali SH rozchodzącej się po obwodzie po linii łamanej wyniósł 130,3 ns. Gdyby prędkość fali SH była niezależna od naprężeń to przyrost średnicy rury o 0,07mm spowodowałby przyrost czasu przejścia fali jedynie o 65ns. Pozostałe 65,3 ns przyrostu czasu przejścia jest wynikiem działania efektu elastoakustycznego.

Przyjmując wartości stałych elastoakustycznych podane w [8] i uwzględniając wpływ trzech składowych naprężenia na prędkość fali SH obliczono, że składowa podłużna naprężenia równa $\sigma_l = 40\text{MPa}$ odpowiedzialna jest za przyrost czasu przejścia fali SH równy 53ns a składowa obwodowa naprężenia równa $\sigma_{tet} = -85\text{MPa}$ odpowiedzialna jest za przyrost czasu

o 10ns. Do obliczeń przyjęto wartości naprężeń uśrednionych na grubości ścianki rury ponieważ fala biegnąca po linii łamanej penetruje praktycznie całą grubość materiału rury. Promieniowa składowa naprężenia $\sigma_r = -4,75\text{MPa}$ wywołuje jedynie nieznaczny wpływ na czas przejścia fali SH.

Rysunek 5 pokazuje liniowe zmiany mierzonych czasów przejścia fal SH w funkcji ciśnienia wewnętrznego.



Rys. 5. Wyniki pomiarów czasu przejścia fali poprzecznej SH po obwodzie rury o średnicy zewnętrznej 190mm poddanej działaniu ciśnienia wewnętrznego.

Podobne obliczenia przeprowadzono dla fali poprzecznej SV, dla której ze względu na liczne transformacje fali dokładny pomiar zmian czasu przejścia w rurze poddawanej działaniu ciśnienia wewnętrznego był utrudniony a uzyskany wynik wynoszący 67ns jest obarczony błędem (wskutek interferencji impulsów uzyskano nieliniową zależność czasu przejścia od ciśnienia). Gdyby prędkość fali SV była niezależna od naprężeń to przyrost średnicy rury o 0,07mm spowodowałby przyrost czasu przejścia tej fali, podobnie jak rozchodzącej się z tą samą prędkością fali SH, o 65ns. Obliczony łączny wpływ deformacji i efektu elastoakustycznego na czas przejścia fali SV wyniósł 57ns.

Porównanie zmierzonego i obliczonego przyrostu czasu przejścia pokazuje, że dla fali SV wpływ naprężeń w ściance rury jest wielokrotnie niższy niż dla fali poprzecznej SH. W przypadku fali SH wpływ naprężeń powoduje wzrost czasu przejścia a w przypadku fali SV – nieznaczny spadek czasu przejścia. Wyniki obliczeń pokazują, że fala poprzeczna typu SV jest najmniej czuła na ewentualne naprężenia własne lub montażowe panujące w ściankach rury podczas pomiaru jej średnicy. Należy też dodać, że również w pomiarach zmian średnic prowadzonych mikrometrami zmiana naprężenia podłużnego wpływa nieznacznie na wynik pomiaru. Na przykład przyłożenie osiowego naprężania rozciągającego o wartości 40MPa do rury o średnicy 270mm spowoduje spadek średnicy rury o około 0,015mm (obliczone dla $E=210\text{Gpa}$, $\nu=0,3$).

3.3. Pomiary na wycinku rury grubościennnej

Pomiary wykonano na pokazanej na rysunku 6 próbce wyciętej z prostego odcinka wysokociśnieniowego, grubościennego rurociągu parowego wykonanego ze stali 13HMF.

Wykorzystany wycinek rury miał średnicę zewnętrzną równą 273 mm, średnicę wewnętrzną 193 mm. Wykonano na nim pomiary czasów przejścia mające na celu sprawdzenie powtarzalności uzyskiwanych wyników przy różnych sposobach obliczania średnicy zewnętrznej rury. W miejscu sprzęgania głowicy chropowata powierzchni rury została wyrównana ręcznie pilnikiem i papierem ściernym.



Rys. 6. Próbką wycięta z rurociągu. Średnica zewnętrzna 273mm, grubość ścianki 40mm.

Pomiary falami SH

Pierwszy eksperyment polegał na sprawdzeniu, czy pomiary czasów przejścia fal rozchodzących się jeden raz wokół rury ale ulegające różnej ilości odbić (na przykład czas przejścia fali **c** minus czas przejścia fali **b** z rysunku 1) pozwolą na dokładne wyznaczenie średnicy rury. Badanie wykazały, że osiągnięta powtarzalność wynosi jedynie +/- 0.22mm. Niska dokładność wynikała głównie z faktu, że w zależności od ilości odbić z jakimi fala rozchodzi się po obwodzie rury, zmienia się kąt pod jakim wnika ona do klina głowicy a tym samym zmienia się droga fali, i czas przejścia, w klinie. Znaczna różnica prędkości fal w stali i tworzywie sztucznym klina jest przyczyną trudnych do oszacowania zmian czasu przejścia. Badania doświadczalne wykazały, że ten atrakcyjny sposób oceny średnicy (fale obiegają rurę po obwodzie jedynie raz, możliwość stwierdzenia lokalnej deformacji) nie nadaje się do monitorowania nieznacznych odkształceń w wyniku pełzania a wzory (3-5) są prawdziwe jedynie dla kąta załamania wiązki fal (i wynikającej z niego ilości odbić fali od zewnętrznej powierzchni rury), dla którego została zaprojektowana głowica. Stosowana w badaniach głowica miała kąt załamania równy 60° co odpowiada drodze fali po sześciokącie foremnym. Znacznie lepsze rezultaty uzyskano stosując różnicową metodę pomiaru czasu z wykorzystaniem impulsów o jedno- i dwukrotnym obiegu fal wokół rury. Dla tego sposobu

pomiaru, przy kolejnych przyłożeniach głowicy sprzężanej na miód lub żywicę epoksydową uzyskano powtarzalność pomiaru lepszą od $\pm 0,01\text{mm}$.

Zaletą fal poprzecznych SH jest brak transformacji na fale podłużne i czytelny obraz oscyloskopowy. W zastosowaniach praktycznych wadą tych fal jest konieczność stosowania gęstego, lepkiego ośrodka sprzężającego utrudniającego szybkie uzyskanie cienkiej warstwy sprzężającej.

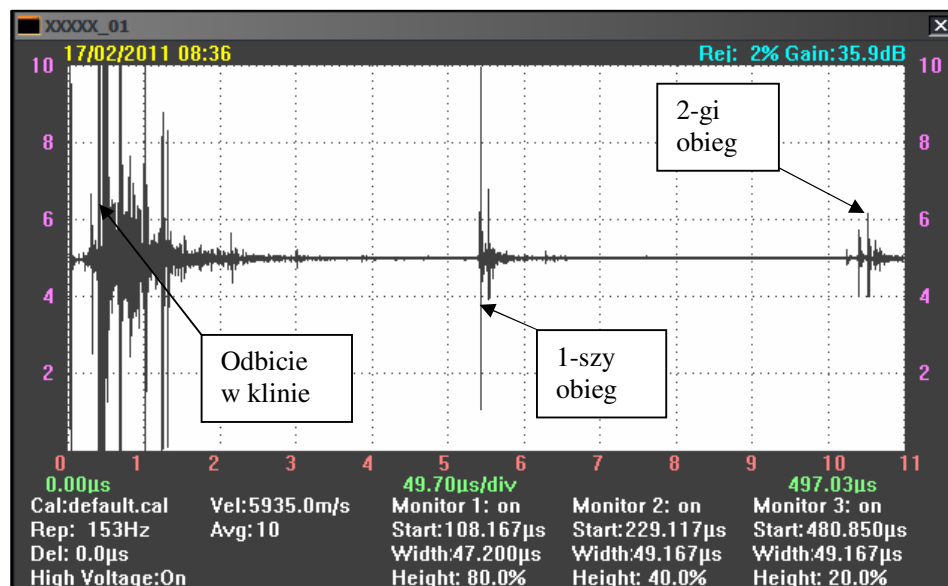
Pomiary falami SV

Pomiary głowicą na fale SV o kącie załamania równym 60° wykazały, że stosując metodę różnicową (czas podwójnego obiegu minus czas jednego obiegu), w stałej temperaturze, uzyskuje się powtarzalność wyników średnicy lepszą od $\pm 0,01\text{mm}$.

Przy pomiarze czasu przejścia jednego obiegu fal i po odjęciu czasu przejścia fal w klinie uzyskiwana powtarzalność wynosi rzędu $\pm 0,12\text{mm}$.

Rozrzuty wyników, zależne od miejsca przyłożenia głowicy do powierzchni rury wynikają głównie z nierówności powierzchni rury. W zależności od punktu przyłożenia głowicy fale obiegające rurę odbijają się pięciokrotnie w różnych miejscach.

Rysunek 7 przedstawia obraz oscyloskopowy uzyskany głowicą na fale poprzeczne SH ustawioną na rurze grubościenniej o średnicy 273 mm. Widoczny jest impuls fali podłużnej rozchodzącej się w klinie, zgodnie z rysunkiem 2a. Przed nim widoczny jest niskiej amplitudy impuls fali biegnącej bezpośrednio od przetwornika nadawczego do odbiorczego. Za impulsem fali podłużnej w klinie widoczny jest szereg impulsów odbijających się w klinie. Po czasie około $260\mu\text{s}$ pojawia się impuls po pierwszym obiegu fali poprzecznej SV wokół rury, po pięciu odbiciach od zewnętrznej powierzchni rury. Po nim pojawiają się impulsy rozchodzące się z większą ilością odbić (po siedmiokącie, ośmiokącie itd.) Po około $500\mu\text{s}$ pojawiają się impulsy po dwóch obiegach wokół obwodu. Przed impulsem, który pokonał dwukrotnie drogę po sześciokącie widoczne są impulsy pochodzące od fal rozchodzących się po krótszych drogach, ulegających mniejszej ilości odbić. W pomiarach na grubościenniej rurze są one łatwo identyfikowalne po odpowiadających im czasach przejścia.

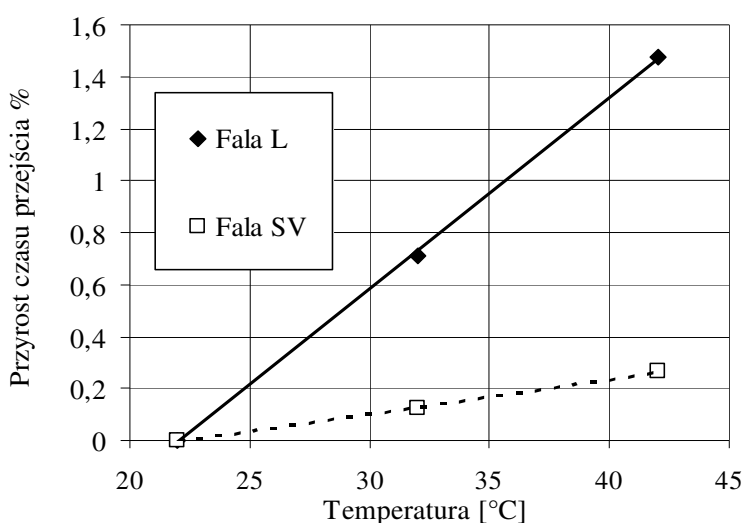


Rys. 7. Obraz oscyloskopowy impulsów obserwowanych dla fali poprzecznej SV obiegającej obwód rury dwukrotnie. Widoczny impuls fali podłużnej w klinie oraz impulsy po jednym i dwóch obiegach.

3.4. Pomiary temperaturowe

Temperatura wpływa na prędkości propagacji fal ultradźwiękowych. Jej wpływ na prędkość fal poprzecznych w stali wynosi 0,38m/s/deg. Znacznie wyższe temperaturowe zmiany prędkości obserwowane są w tworzywach sztucznych, z których wykonane są kliny załamujące głowic. Przykładowo dla PMM temperaturowa zależność prędkości fali podłużnej wynosi $2,3 \div 3$ m/s/deg.

Pomiary średnicy rury mogą być wykonywane w różnych temperaturach a ich wynik powinien być sprowadzony do wybranej temperatury odniesienia. Aby zbadać wpływ temperatury na czasy przejścia fal, wynikające z temperaturowych zależności prędkości w stali i w materiale klina oraz z termicznej rozszerzalności stali i klina, wykonano pomiary czasów przejścia fali poprzecznej w materiale rury i czasu przejścia fali podłużnej w klinie, dla kilku temperatur. Wyniki uzyskane głowicą na fale poprzeczne SV ustawionej na rurze grubościenniej pokazano na rysunku 8.



Rys. 8. Temperaturowe zmiany czasów przejścia fali podłużnej w klinie głowicy i poprzecznej SV w materiale rury o średnicy 273 mm.

Widoczne są w przybliżeniu liniowe zmiany czasów przejścia. Czas przejścia fali SV w materiale rury, dla temperatur od 22 do 42°C wzrasta o 0,3%. Ta sama zmiana temperatury powoduje względny przyrost czasu przejścia fali podłużnej w klinie aż o 1,5%. Dzięki znaczącej zmianie czasu przejścia fal w klinie głowicy czas ten może być wykorzystany do obliczenia temperatury rury (zakładając, że klin w całej swojej objętości nagrzał się do tej samej temperatury co materiału mierzonej rury). Znając wyznaczoną w ten sposób temperaturę rury możliwe jest obliczenie czasu przejścia fal w materiale rury sprowadzonego do dowolnej, stałej temperatury odniesienia i tym samym wyznaczenie średnicy rury w temperaturze odniesienia. Oszacowana dokładność wyznaczania w ten sposób średnicy rury zawiera się w zakresie $\pm 0,01$ mm. Należy dodać, że podobne obliczenia mogą być prowadzone jedynie dla konkretnego egzemplarza głowicy. Opisany sposób kompensacji wpływu temperatury na wyniki zakłada również, że temperatura w całej objętości badanej rury jest stała.

4. WNIOSKI

Eksperymenty z głowicami na fale podłużną pokazały, że ze względu na transformacje fali podłużnej na poprzeczną obraz oscyloskopowy jest trudny do interpretacji. Wadami fali podłużnej w opisanych pomiarach jest również to, że czas przejścia tej fali jest dwukrotnie krótszy niż fal poprzecznych oraz silna zależność prędkości tej fali od temperatury.

Badania prowadzone falą poprzeczną typu SH wykazały, że praktyczne wykorzystanie tej fali jest utrudnione z powodu konieczności stosowania gęstego ośrodka sprzęgającego.

Najlepszą powtarzalność pomiarów średnicy rury uzyskano stosując falę poprzeczną typu SV. W grubościennych rurach, a do pomiarów takich właśnie rur przeznaczone są głowice, pomimo obecności ech transformowanych możliwy jest pomiar czasu przejścia fali obiegającej rurę po znanej drodze. Cieczowe sprzężenie akustyczne pozwala na uzyskanie powtarzalnych sygnałów. Wpływ ewentualnych naprężeń własnych w rurze na czas przejścia fal jest znikomy.

Pomiary temperaturowych zależności czasów przejścia fali SV w rurze i fali L w klinie pokazały, że możliwe jest wykorzystanie czasu przejścia fal w klinie do obliczenia poprawki temperaturowej i wyznaczenie średnicy rury sprowadzonej do temperatury odniesienia (na przykład do 20°C).

Do prowadzenia pomiarów średnicy rury konieczne jest stosowanie specjalnej głowicy zaprojektowanej do badania rury o danej średnicy zewnętrznej (dopasowanie klina do krzywizny) i o określonym kącie załamania (od którego zależy z iloma odbiciami od powierzchni zewnętrznej rozchodzi się fala), związanym z grubością ścianki rury. Do pomiaru czasu przejścia konieczne jest korzystanie z aparatury umożliwiającej pomiar czasu przejścia impulsu z dokładnością 1 ns (na przykład karta ultradźwiękowa współpracująca z komputerem PC i z odpowiednim oprogramowaniem pozwalającym na obliczanie poprawek temperaturowych i średnicy rury w temperaturze odniesienia).

Monitorowanie zmian średnic, polegające na prowadzonych co rok lub dwa pomiarach, możliwe jest pod warunkiem stosowania w pomiarach tej samej głowicy ultradźwiękowej. Możliwa jest też budowa kilku nominalnie identycznych głowic i wyznaczenie dla każdej z nich „poprawki” mierzonej na próbce odniesienia.

Zaproponowana metoda pomiaru średnicy rury umożliwia ich wykonanie przy dostępie do niewielkiej powierzchni rury (wymiary głowicy to około 20*50 mm). Poza lokalnym wygładzeniem powierzchni rury w miejscu sprzęgania głowicy i zaznaczeniem miejsca, w którym głowica ma być przykładana, nie wymaga ona dodatkowych zabiegów.

W zależności od średnicy rury i osłabienia fal w materiale pomiar może być wykonywany jako:

- pomiar czasu przejścia jednego obiegu minus czas przejścia fali w klinie,
- pomiar różnicowy (czas dwukrotnego obiegu minus czas jednego obiegu) a czas przejścia w klinie wykorzystany do wyznaczenia temperatury.

Opisane w pracy badania wykonano częściowo w ramach Projektu badawczo-rozwojowego NCBiR N R15 0049 04 pt. OPRACOWANIE SYSTEMU MONITOROWANIA I ANALIZY STOPNIA USZKODZENIA MATERIAŁÓW W INSTALACJACH ENERGETYCZNYCH ELEKTROCIEPŁOWNI WSKUTEK OBCIĄŻEŃ EKSPLOATACYJNYCH.

Zaproponowana metoda monitorowania średnic rur grubościennych jest przedmiotem zgłoszenia patentowego [9].

5. LITERATURA

- [1]. S. Łopata, K. Kwintowski, Pełzanie rurociągów parowych z owalnym przekrojem poprzecznym, Czasopismo Techniczne, zeszyt 2-M, 2008
- [2]. S. Łopata, Nowy sposób pomiaru odkształcenia pełzania rurociągów, Mat. 22 Krajowej Konf. Badań Nieniszczących, Szczyrk 26-28 października 1993, 103-106
- [3]. K. Shivaraj, K. Balasubramaniam, C. V. Krishnamurthy, Ultrasonic Circumferential Guided Wave for Pitting-Type Corrosion Imaging at Inaccessible Pipe-Support Locations, Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 130, Nr 2, May 2008
- [4]. P.J. Latimer, H.L. Whaley, Method of detecting creep swelling, Patent USA Nr 5035143, 1991
- [5]. Don Searle, Detection and Measurement of Reformer Tube Creep, Technology Consultant, pndt pty.ltd., Australia
<http://www.ndt.net/apcndt2001/papers/1115/1115.htm>
- [6]. Brokowski A., Szelażek J., Układ głowic ultradźwiękowych do pomiaru czasu przejścia impulsów fal ultradźwiękowych, Patent Nr PL 166109 B1, 1991
- [7]. M. Bijak-Żochowski, A. Jaworski, G. Krześciński, T. Zagrajek, Wytrzymałość konstrukcji, tom 1, Oficyna Wyd. Politechniki warszawskiej, Warszawa 2004.
- [8]. J. Deputat, Własności i wykorzystanie zjawiska elastoakustycznego do pomiarów naprężeń własnych, Prace IPPT PAN Warszawa, Nr 28/1087
- [9]. J. Szelażek, S. Mackiewicz, P. Gutkiewicz, Sposób ultradźwiękowego pomiaru obwodu elementów o kołowym przekroju, zwłaszcza rur grubościennych, Zgłoszenie patentowe P.391758, 9 lipca 2010