

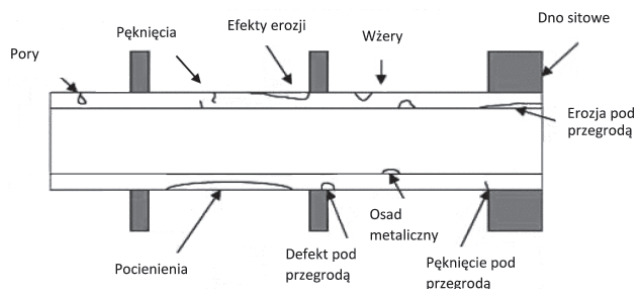
Dominik Kukła, Andrzej Zagórski, Łukasz Sarniak

Ilościowa ocena sygnału prądów wirowych od wad w austenitycznych rurkach wymienników ciepła

Wstęp

Warunki eksploatacji wymienników ciepła, w warunkach przemysłowych, pociągają za sobą szereg zjawisk, wśród których wymienić należy takie, jak tworzenie się osadu oraz powstawanie wad. Jedną z przyczyn degradacji materiałów (głównie ferrytycznych) jest korozja, której w przypadku pracy wymienników sprzyjają takie czynniki, jak: wysoka temperatura, agresywne środowisko (np. kwasy), naprężenia (np. termiczne), skraplanie i gromadzenie się wody na dnie wymiennika (brak zaworów odprowadzających), czy obecność szczelin, osadów, zgorzelin lub wad materiałowych. Kolejną przyczyną powstawania wad wynika z erozji, w wyniku której dochodzi do pocienienia grubości ścian rurek, a w konsekwencji do ich perforacji. Obszarami szczególnie narażonymi na erozję są różnego rodzaju zżewienia oraz zgięcia (np. łuki). Rury wymienników narażone są ponadto na oddziaływanie składowych naprężeń zarówno cieplnych, jak i zmęczeniowych wynikających z warunków eksploatacji. Naprężenia te powinny być kompensowane, jednak w przypadku lokalnego spiętrzenia naprężenia może dojść do inicjacji pęknięcia. Typowe wady powstające w rurach wymienników ciepła pokazano na rysunku 1 [1].

Do produkcji rur wymienników cieplnych, w zależności od warunków pracy, stosuje się stale austenityczne, ferrytyczne, ferrytyczno-austenityczne (duplex), oraz stopy niklu, miedzi i tytanu. Dla zapewnienia bezpieczeństwa oraz bezawaryjnej pracy wymienników wskazana jest okresowa diagnostyka stanu rur. W tym celu stosowane są nieniszczące techniki badawcze, które pozwalają na identyfikację i lokalizację wad mających charakter nieciągłości, a także wad w postaci ubytków, pęknięć czy perforacji. Ze względu na



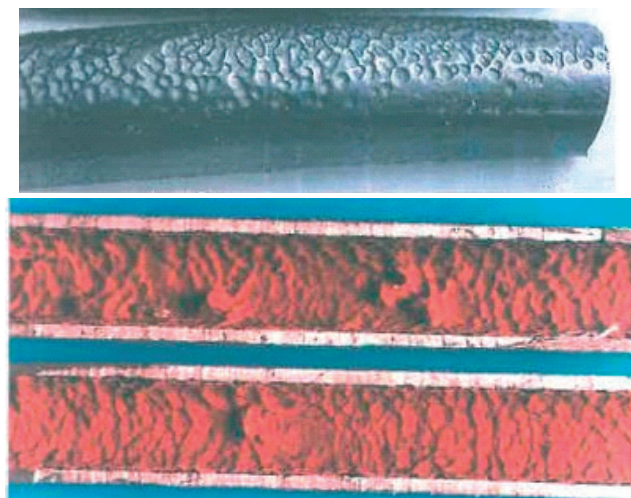
Rys. 1. Typowe wady rur wymienników ciepła

ograniczony dostęp do powierzchni rur w wymienniku ciepła, ocena ich stanu możliwa jest, z reguły, tylko od strony dna sitowego. Dlatego też, spośród nieniszczących metod badawczych największe zastosowanie w diagnostyce mają prądy wirowe oraz ultradźwięki. Metody te umożliwiają ocenę niemal 100% objętości materiału rury poprzez wprowadzenie do niej głowicy lub sondy badawczej. Takie rozwiązanie jest najczęściej wykorzystywane w technikach badawczych opartych na metodzie prądów wirowych.

Wady powstające we wkładach rurowych wymienników prowadzą do pocienienia ścianki zarówno po wewnętrznej, jak i zewnętrznej stronie. Pocienienia te, pokazane na rysunku 2 prowadzą do powstawania perforacji ścianki rury, stąd konieczność wykonywania okresowych badań diagnostycznych i wczesnej ich identyfikacji.

W większości technik badania rurek wykorzystuje się metody elektromagnetyczne. Wpływ na dobór techniki badawczej ma rodzaj materiału rur i jego właściwości magnetyczne, a także charakter potencjalnie wykrywanych wad. Do najpopularniejszych technik zaliczane są:

dr inż. Dominik Kukła, dr inż. Andrzej Zagórski, dr inż. Łukasz Sarniak - Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa, Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Materiałowej, Warszawa



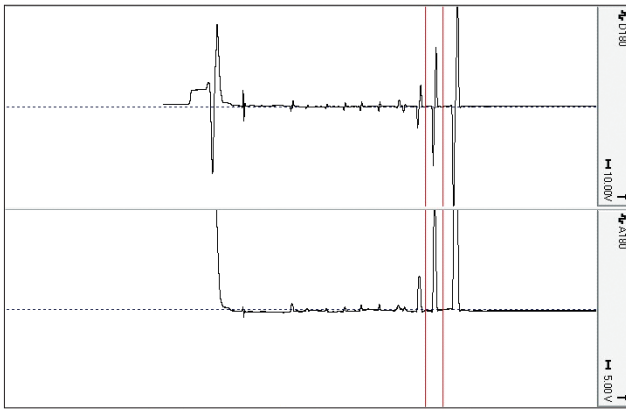
Rys. 2. Pocienienia zewnętrzne i wewnętrzne ścianki rur [3]

- Eddy Current Testing, ECT - klasyczna metoda prądów wirowych, do rurek z materiałów nieferromagnetycznych (np. austenitycznych).
- Remote Field Testing, RFT - badanie w polu dalekim, pozwalające na skontrolowanie rurek z materiałów ferromagnetycznych, w przypadku których duża wartość przenikalności magnetycznej ogranicza wnikanie prądów wirowych.
- Near Field Testing, NFT - badanie w polu bliskim, przeznaczone do identyfikacji wad wewnętrznych w rurkach z pokryciem grzebieniowym wykonanym z aluminium.
- Magnetic Flux Leakage Testing, MFLT - pomiar wycieku strumienia magnetycznego.

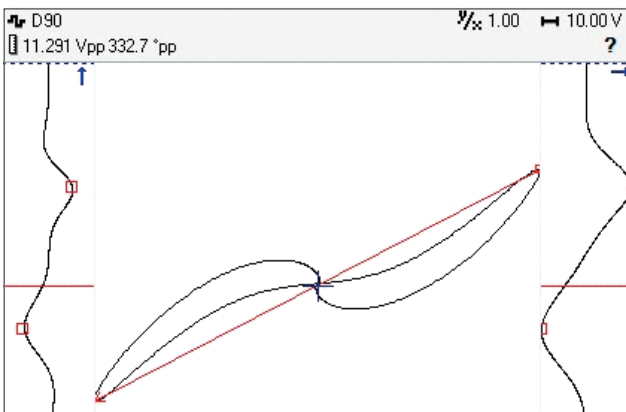
Badanie rurek tymi technikami jest zazwyczaj przeprowadzane przez skanowanie wnętrza rurki sondą pomiarową, co pozwala zidentyfikować nieciągłości zlokalizowane na wewnętrznych i zewnętrznych ściankach rur. Stosunek kwadratu średnicy sondy do kwadratu średnicy rurki nie powinien być mniejszy niż 0,7. Jak większość metod nieniszczących, badanie metodą prądów wirowych wymaga kalibracji sygnału na wzorcu lub próbce referencyjnej. Niniejsza praca skupia się na charakterystyce i analizie wskazań sygnału prądowirowego uzyskanych dla zaprojektowanego wzorca referencyjnego w postaci rurki z wytworzonymi niestandardowymi, złożonymi wadami oraz standardowego wzorca stosowanego komercyjnie w badaniach techniką ECT przeznaczoną do badania rur austenitycznych. Analiza uzyskanych wyników ma służyć ułatwieniu interpretacji wskazań w praktyce diagnostycznej.

Metodyka badań

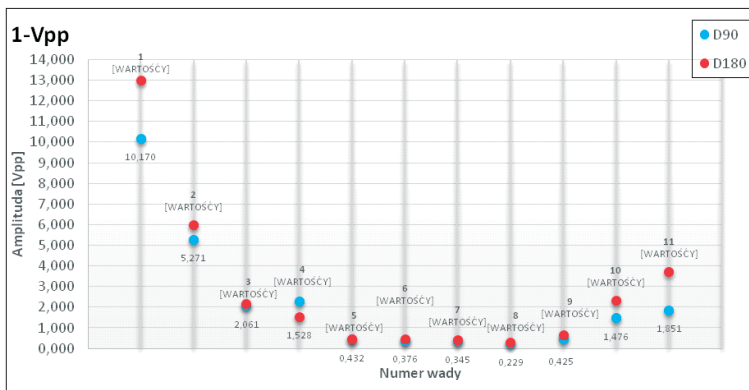
Próbki do badań wykonano z dwóch gatunków stali austenitycznych. Wzorzec ze standardowymi wadami wytworzono ze stali 304, natomiast próbkę referencyjną z zaprojektowanymi, niestandardowymi wadami, ze stali 316L. Obie rurki miały średnicę wewnętrzną 16 mm. Wybór materiału wzorców do badania prądami wirowymi oparto na popularności stalowych wkładów rurowych wymienników ciepła oraz na dostępności materiału. Geometrię wad na standardowej rurce wzorcowej przedstawiono na rysunku 3. Wzorzec zawiera wady w postaci lokalnych pocienień (podtoczeń) na głębokość 20, 40 i 60% nominalnej grubości ścianki rury, 10%-owe pocienienie wewnętrzne, a także otwory



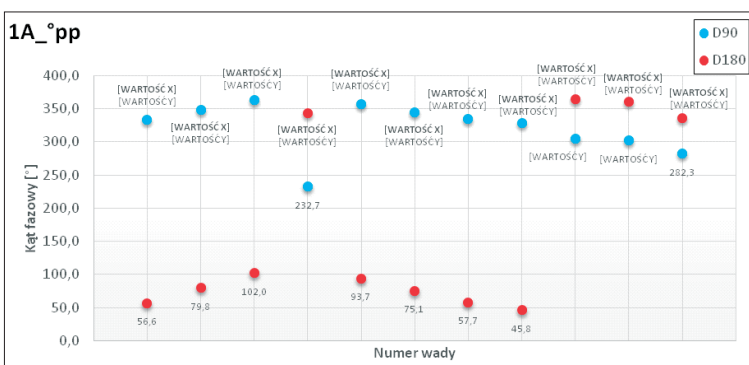
Rys. 5. Zależność zmiany impedancji w funkcji czasu. Kolejność wad liczona od prawej. Górny wykres pokazuje przebieg w trybie różnicowym, dolny - w trybie absolutnym



Rys.6. Przykładowa trajektoria zmian napięcia i kąta fazowego dla sondy różnicowej



Rys. 7. Wartości amplitudy dla ubytków w próbce 1 (wzorzec) na kanałach D90 i D180



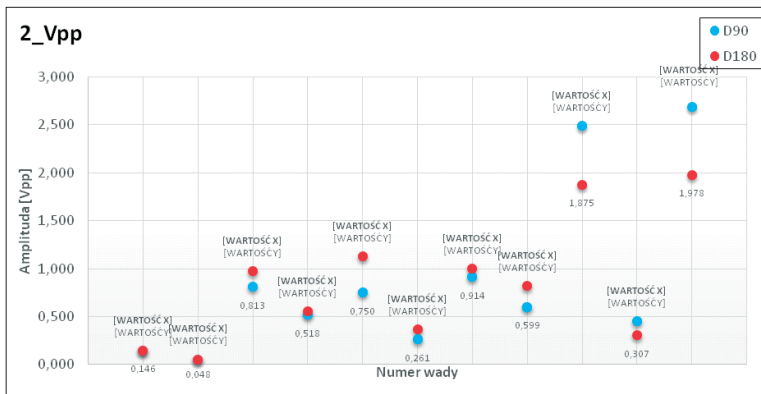
Rys. 8. Wartości kąta fazowego dla wad na kanałach D90 i D180 w próbce 1 - wzorzec

i nr 9-11 wartości kąta fazowego znacząco odbiegają od reszty wskazań. Są to odpowiednio przegroda, dwa otwory przelotowe oraz wewnętrzny rowek obwodowy. Na podstawie tych wskazań można traktować wady nr 9-11 jako nieciągłości znajdujące się na pełnej głębokości ścianki (przelotowe). Dla kanału D180 podobne wartości kąta fazowego zarejestrowano również dla wad nr 1-3 i nr 5-8, a także dla wady nr 10. Dla wad nr 4 i nr 9-11 zanotowano wartości zawarte w przedziale 335-365°. Wartości te, korzystając z okresowości pomiarów kąta fazowego, można traktować jako wartości bliskie zeru, bądź ujemne. Po zastosowaniu takiego uproszczenia punkty dla wad nr 4 i nr 9-11 na wykresie będą tworzyć, z resztą wskazań, trend wskazujący lokalizację wady względem sondy pomiarowej. Lokalizację można rozumieć przez odległość „środką” nieciągłości względem cewki sondy.

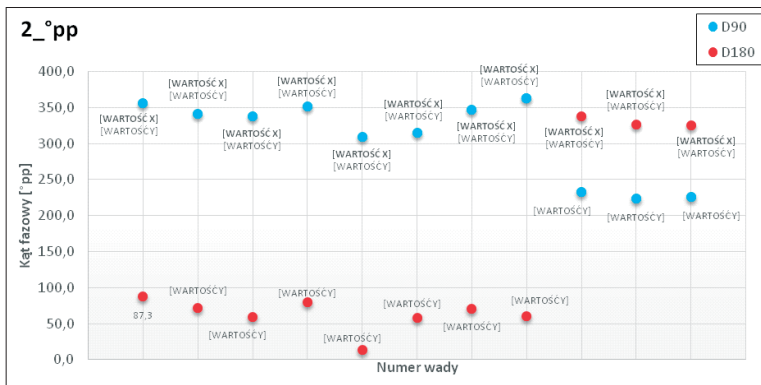
Kolejne badania dotyczyły próbki rurowej z wadami o niestandardowej geometrii (rys. 4). Zmierzone wartości amplitudy sygnałów oraz wartości kąta fazowego, w podobnej formule jak w przypadku próbki wzorcowej 1, pokazano odpowiednio na rysunkach 9 i 10.

Dla większości wad wyższe wartości amplitudy otrzymano dla kanału D180, ze względu na wyższą czułość pomiaru. Jedynie dla wad nr 8a, nr 9f i nr 9a, czyli dla ubytków pod przegrodą austenityczną oraz ferrytyczną, wyższą wartość amplitudy zanotowano dla kanału D90. Jest to skutek zwiększenia obszaru wzbudzenia prądów wirowych w materiale przegrody. Najniższe wartości zanotowano dla wady nr 2, co świadczy o jej najmniejszej objętości wśród wad w rurce 2. Niewiele wyższe wartości otrzymano dla wady nr 1. Uzyskany szereg wartości amplitudy zależy od objętości poszczególnych wad. Duża objętość otworów przelotowych pokrywa się z zakresem wnikania prądów wirowych dla kanału D180.

Dla obydwu kanałów, D90 i D180, przedstawione na rysunku 12 wartości kąta fazowego dla poszczególnych wad niestandardowych próbki 2 tworzą na wykresie podobne trendy, ale w innych zakresach wartości. Wady o podobnej geometrii, znajdujące się na podobnej głębokości osiągnęły zbliżoną wartość kąta fazowego. Dla kanału D90 dotyczy to par wad nr 1 i nr 2 oraz nr 3 i nr 7. Przy interpretacji położenia wady względem sondy pomiarowej, kluczowym aspektem jest umiejscowienie „środką” wady. Wady nr 4 i nr 5 powinny mieć zbliżone wartości kąta fazowego, przy czym wada nr 5 niższą. Ponadto, wada nr 6 powinna uzyskać wynik niższy od wady nr 5. Są podobne geometrycznie, jednakże na wadę nr 6 składa się jedynie otwór przelotowy bez dodatkowej szczeliny, dlatego „środek” nieciągłości nie zostaje oddalony od sondy. Odnotowany wynik dla tej wady potwierdza brak jego pokrycia z przewidywanymi rezultatami, ze względu na zbyt niską wartość kąta fazowego dla wady nr 5 w stosunku do wyników zanotowanych dla wszystkich nieciągłości. Wady nr 7, 8f i 8a mają jednakową geometrię, jednakże różnią się materiałem, z którego wykonana jest prze-



Rys. 9. Wartości amplitudy dla nietypowych wad na kanałach D90 i D180 w próbcie 2



Rys. 10. Wartości kąta fazowego dla nietypowych wad na kanałach D90 i D180 w próbcie 2

groda oraz jej brakiem lub obecnością. Wskazania kąta fazowego dla wady nr 8f są najwyższe spośród wszystkich wad, ponieważ defektoskop interpretuje obecność innego materiału, o innych właściwościach (stal węglowa). Interpretacja ferromagnetycznej przegrody, w tym przypadku, jako wady powoduje znaczne oddalenie środka ciężkości wady od sondy. Wartość kąta fazowego dla wady nr 8a jest znacznie niższa. Może mieć na to wpływ obecność przegrody z tego samego materiału co rurka, przez co względna głębokość (zewnętrzna średnicę pierścienia uznaje się za zewnętrzną powierzchnię ścianki rurki) wady diametralnie się przybliża do cewki sondy. Dla otworu przelotowego (wady nr 9f i 9a) zanotowano podobne zależności związane z materiałem przegrody.

Podsumowanie

Posługując się otrzymanymi wartościami amplitudy i kąta fazowego oraz przebiegiem zmian impedancji w funkcji czasu dla poszczególnych nieciągłości zarejestrowanych w dwóch trybach (absolutnym i różnicowym), można określić wymiary oraz położenie wady. Dodatkowo, w przypadkach wad o rozwiniętej powierzchni możliwa jest jakościowa ocena ich geometrii.

Bazując na przeprowadzonych pomiarach prądowiowych, możliwe było skorelowanie otrzymanych wartości z geometrią, położeniem i objętością wad standardowych względem sondy pomiarowej. Zanotowane wartości amplitudy rosy wraz ze wzrostem objętości wady. Zmierzone wartości kąta fazowego były wprost proporcjonalne do odległości nieciągłości od sondy pomiarowej.

Zaprojektowane wady niestandardowe, o zbliżonej geometrii, bądź lokalizacji względem sondy do wad standardowych, charakteryzowały się podobnymi wynikami ilościowymi oraz jakościowymi. Analiza tych sygnałów nie byłaby możliwa bez uprzednich wniosków płynących z badań wad standardowych.

Opierając się na otrzymanych wynikach, można sparametryzować niemal dowolną wadę w materiale rur austenicznych w zakresie ilościowej oceny jej amplitudy i kąta fazowego. Na tej podstawie, możliwa jest ocena zagrożenia awarią, w przypadku dalszej eksploatacji takiej rury. Należy jednak pamiętać o ryzyku w interpretacji wyników związanych z wpływem wielu czynników na uzyskane wartości sygnału. Mogą to być lokalne zmiany składu chemicznego, koncentracja naprężeń lub zmiany strukturalne wynikające, np. z lokalnego przegrzania materiału rury. Aby móc przeprowadzić

pełną diagnostykę, należy posłużyć się komplementarnymi technikami badań nieniszczących, pozwalającymi uzyskać potwierdzenie informacji o wadach w strukturze materiału badanego elementu.

Obecność przegrody jest wykrywalna podczas prowadzenia pomiarów prądowiowych, co prowadzi do zaburzenia sygnału, ale jednocześnie nie wyklucza detekcji nieciągłości, znajdującej się pod przegrodą. Materiał przegrody ma istotne znaczenie dla przebiegu charakterystyk napięciowych, podczas badania.

Praca powstała w ramach projektu PBS o numerze ID 246061

LITERATURA

1. <http://www.vikinginspection.co.uk/services/heat-exchangers>.
2. Schwartz M.: Four Types of Heat Exchanger Failures. Plant Engineering, 1982, nr 12.
3. Zbroińska-Sczechura E., Dobosiewicz J.: Uszkodzenia i diagnostyka wymienników ciepła w elektrociepłowniach. www.clektroenergetyka.pl, grudzień 2004, str. 14-16.
4. www.olympusndt.com.