

Dominik Kukla^{1*}, Andrzej Zagórski², Piotr Wonszewicz²

¹Institut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa

²Wydział Inżynierii Materiałowej, Politechnika Warszawska

Analiza sygnałów prądowirowych od niestandardowych defektów w stalowych rurkach austenitycznych wymienników ciepła

Analysis of eddy current signals from non-standard defects in steel austenitic tubes of heat exchangers

ABSTRACT

The impedance characteristics from non-standard defects in the austenitic tube material were analyzed. These indications were obtained during the scanning of steel pipe 316 with an internal probe using the MultiScan 5800 apparatus. The classic ECT vortex current method was used to examine both the pipe with designed defects developed on the basis of analysis of the most common failures in industrial heat exchanger tube inserts and reference tubes with defects standard. The non-standard defects created were aimed at simulating the combinations of cracks, pits or other defects occurring as a result of aggressive chemical and mechanical factors encountered in industrial diagnostics. The tests consisted in scanning the entire length of the pipe with constant velocity, using a transient probe recording electrical impedance changes in relative mode and absolute mode. On the basis of the results obtained, it was possible to describe the dimensions and location of standard defects, verifying the conformity of the actual parameters of particular defects to the virtual design. Interpretation of results for non-standard defects was based on a comparison with the results obtained for standard reference samples. The obtained values for complex non-standard defects enabled their characterization by determining their volume and position in relation to the measuring probe. In most cases, it was not possible to interpret the geometry of the defect, which can be done using other non-destructive testing techniques.

Keywords: Eddy currents, diagnostic tests, heat exchangers, austenitic pipes

STRESZCZENIE

Analizie poddano charakterystykę impedancyjną od niestandardowych defektów w materiale rury austenitycznej. Wskazania te otrzymano podczas skanowania rury ze stali 316 sondą wewnętrzną z wykorzystaniem aparatu MultiScan 5800. Zastosowano klasyczną metodę prądów wirowych ECT badając zarówno rurę z zaprojektowanymi defektami opracowanymi na podstawie analizy najczęściej spotykanych uszkodzeń we wkładach rurowych przemysłowych wymienników ciepła, jak i rury referencyjne, z defektami standardowymi. Wytworzone niestandardowe wady miały na celu symulować spotykane w diagnostyce przemysłowej kombinacje pęknięć, wżerów lub innych ubytków powstałych w wyniku działania agresywnych czynników chemicznych i mechanicznych. Badania polegały na skanowaniu całej długości rury ze stałą prędkością, przy użyciu sondy przelotowej rejestrującej zmiany impedancji elektrycznej w trybie względnym i trybie absolutnym. Na podstawie otrzymanych wyników możliwe było opisanie wymiarów i położenia wad standardowych, weryfikując zgodność rzeczywistych parametrów poszczególnych wad względem projektu wirtualnego. Interpretacja wyników dla wad niestandardowych była oparta na porównaniu ich z wynikami uzyskanymi dla standardowych próbek referencyjnych. Otrzymane wartości dla złożonych wad niestandardowych umożliwiły ich scharakteryzowanie poprzez określenie ich objętości oraz położenia względem sondy pomiarowej. W większości przypadków nie była możliwa interpretacja geometrii wady, czego można dokonać stosując inne techniki badań nieniszczących.

Słowa kluczowe: Prądy wirowe; badania diagnostyczne; wymienniki ciepła; rury austenityczne

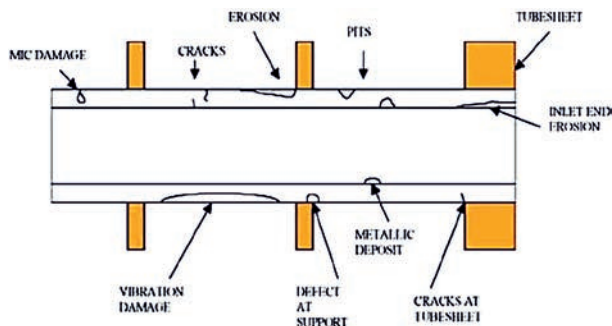
1. Wstęp

Wymienniki ciepła stanowią element wielu instalacji przemysłowych, a warunki ich eksploatacji powodują tworzenie się osadu, a także sprzyjają powstawaniu defektów. Jedną z przyczyn degradacji rur (głównie ferrytycznych) jest korozja, której w przypadku pracy wymienników sprzyjają takie czynniki jak: wysoka temperatura, agresywne substancje chemiczne (np. kwasy), naprężenia w wymienniku (np. wynikające z błędów konstrukcyjnych), skraplanie i gromadzenie się wody na dnie wymiennika (brak zaworów odprowadzających) czy obecność szczelin lub wad materiałowych. Inna przyczyna powstawania defektów wynika z erozji,

w efekcie której dochodzi do pocienienia grubości ścian rurek, a w konsekwencji do perforacji. Obszarami szczególnie narażonymi na erozję są różnego rodzaju złączenia oraz zgięcia (np. kolanka). Erozji sprzyja zły dobór materiałów, wysokie ciśnienia i wibracje. Rury wymienników narażone są ponadto na oddziaływanie składowych naprężeń, zarówno cieplnych, jak i tych zmęczeniowych wynikających z wibracji. Naprężenia te powinny być kompensowane, jednak w przypadku lokalnego spiętrzenia naprężenia może dojść do inicjacji pęknięcia. Na rys. 1. pokazano typowe defekty występujące w rurach wymienników ciepła [1].

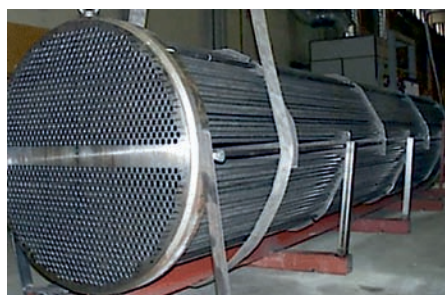
Do produkcji rur wymienników ciepła stosuje się: stale austenityczne, ferrytyczne, ferrytyczno-austenityczne (duplex) oraz stopy niklu, miedzi, tytanu.

*Autor korespondencyjny. E-mail: dkukla@ippt.pan.pl



Rys. 1. Typowe defekty rur wymienników.
Fig. 1. Typical defects of exchanger tubes.

Dla zapewnienia bezpieczeństwa pracy wymienników wskazana jest diagnostyka stanu rur. W tym celu stosowane są nieniszczące techniki badawcze, które pozwalają na identyfikację i lokalizację wad mających charakter nieciągłości, nie wpływając na jego właściwości strukturalne i powierzchniowe. Ze względu na ograniczony dostęp do powierzchni rur w wymienniku ciepła (rys. 2) ocena ich stanu możliwa jest z reguły tylko od strony dna sitowego.



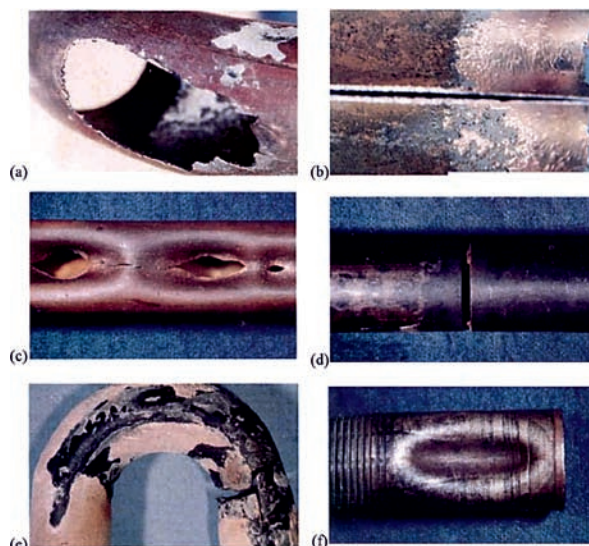
Rys. 2. Rurowy wymiennik ciepła.
Fig. 2. Tubular heat exchanger.

Dlatego też, spośród nieniszczących technik badawczych, największe zastosowanie w diagnostyce rur mają prądy wirowe oraz metody ultradźwiękowe. Metody te umożliwiają ocenę niemal całej objętości materiału rury poprzez wprowadzenie do niej głowicy lub sondy badawczej. Takie rozwiązanie jest najczęściej wykorzystywane w technikach badawczych opartych na metodzie prądów wirowych.

Przy odpowiedniej eksploatacji oraz regularnej diagnostyce wymienniki ciepła zazwyczaj charakteryzują się długoletnią pracą z małą ilością, bądź brakiem zabiegów konserwacyjnych. Jest to skutek statyczności konstrukcji, nie występują części ruchome. Jednakże, występują cztery typy uszkodzeń, na jakie narażone są wymienniki energii cieplnej i którym można zapobiec: mechaniczne, korozja elektrochemiczna, kombinacja korozji oraz mechanicznych uszkodzeń, a także wynikające z powstawania osadów [2]. Przyczyny uszkodzeń mechanicznych mogą wynikać m. in. z:

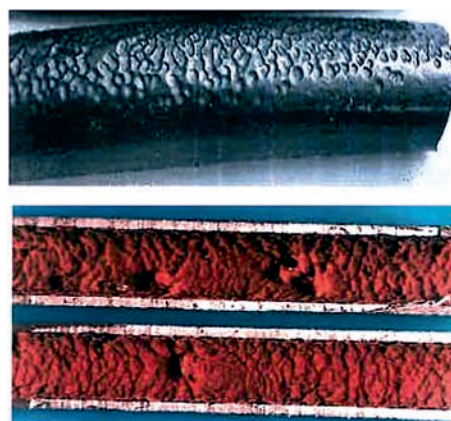
- erozji metalu;
- wodnej i/lub parowej fali uderzeniowej;
- dynamicznych obciążeń mechanicznych i cieplnych (drgania);
- przechłodzenia lub przegrzania;

Na rys. 3. Pokazano przykładowe defekty powstające we wkładach rurowych wymienników.



Rys. 3. Uszkodzenia wymienników ciepła: (a) erozja metalu w łuku rurki; (b) erozja metalu na wlocie rury; (c) uszkodzenie od strony pary; (d) pęknięcie wibracyjne; (e) zmęczenie cieplne w łuku rurki; (f) zapadnięta ściana rurki w wyniku przechłodzenia.
Fig. 3. Damage to heat exchangers: (a) metal erosion in the bend of the tube; (b) metal erosion at the end of the pipe; (c) damage from the steam side; (d) vibration crack; (e) thermal fatigue in the bend of the tube; (f) the collapsed tube wall as a result of cooling.

Powyższe warunki eksploatacyjne powodują najczęściej lokalne pocienienia grubości ścianki, zarówno po wewnętrznej, jak i zewnętrznej stronie. Pocienienia te pokazane na rys. 4 prowadzą do powstawania perforacji w materiale rury, co prowadzić może do awarii. Stąd konieczność wykonania okresowych badań diagnostycznych i wczesnej ich identyfikacji.



Rys. 4. Pocienienia zewnętrzne i wewnętrzne ścianki rur [3].
Fig. 4. External and internal defects in pipe wall thickness [3].

Większość technik dedykowanych do badania rurek wykorzystuje metody elektromagnetyczne. Wpływ na dobór techniki badawczej ma rodzaj materiału rur i jego właściwości magnetyczne, a także charakter potencjalnie wykrywanych defektów. Do najpopularniejszych technik zaliczane są:

- 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 inspekcje rurek z materiałów

ferromagnetycznych, w przypadku których duża wartość przenikalności magnetycznej ogranicza wnikanie prądów wirowych;

- Near Field Testing, NFT – badanie w polu bliskim, dedykowane do identyfikacji defektów wewnętrznych w rurkach z pokryciem grzebieniowym wykonanym z aluminium;
- Magnetic Flux Leakage Testing, MFLT – pomiar wycieku strumienia magnetycznego.

Badanie rurek powyższymi technikami jest zazwyczaj przeprowadzane przez skanowanie wnętrza rurki sondą pomiarową, pozwala to zidentyfikować nieciągłości zlokalizowane na wewnętrznych i zewnętrznych ściankach rur. Defekty te są z reguły wynikiem działania czynników korozyjnych i erozyjnych, perforacji, wżerów i pęknięć zmęczeniowych oraz korozji międzykrystalicznej i naprężeniowej, wytarc, zagniecenia oraz objawiają się w postaci lokalnego pocienienia grubości ścianki. 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 próbkę referencyjnej. Niniejsza praca skupia się na charakterystyce i analizie wskazań sygnału prądowiowego uzyskanych dla zaprojektowanego wzorca referencyjnego w postaci rurki z wytworzonymi niestandardowymi, złożonymi wadami oraz na standardowym wzorcu stosowanym komercyjnie w badaniach technika ECT. Badania prowadzono na próbkach o zbliżonej geometrii i właściwościach. Ostatnim krokiem była analiza uzyskanych wyników, która ma posłużyć w ułatwieniu interpretacji wskazań w praktyce diagnostycznej w przemyśle.

2. Metodyka badań

Wzorce zaprojektowane i wykonane dla opisanych testów wytworzono z dwóch gatunków stali austenitycznych. Dwa wzorce ze standardowymi wadami wykonane zostały ze stali 304, natomiast wzorec z niestandardowymi wadami ze stali 316L. Składy chemiczne obu gatunków stali przedstawione są w tabeli 1 i tabeli 2.

Na wybór materiału na wzorce do badania prądami wirowymi miały wpływ popularność stalowych wkładów rurowych wymienników ciepła oraz dostępność materiału.

Geometrię defektów na komercyjnej rurce wzorcowej przedstawiono na Rys. 5. Są tu defekty w postaci lokalnych podtoczeń na głębokości 20, 40 i 60% nominalnej grubości ścianki rury, 10%-owe podtoczenie wewnętrzne, a także otwory płaskodenne i otwór przelotowy. W celu eliminacji sygnału od przegród (ang. support), na rurkę wzorcową nałożono pierścien symulujący takową przegrodę.

Po wykonaniu kalibracji na ww. wzorcu przeprowadzono badania na rurce z wadami niestandardowymi, opracowanymi przez zespół autorski. Rurka ta posiadająca kombinację nieciągłości i ubytków, została opracowana na podstawie analizy najczęściej spotykanych zniszczeń we wkładach rurowych wymienników ciepła. Miało to na celu symulację wad rzeczywistych, dzięki czemu można było podjąć próbę analizy wskazań od tych defektów oraz próbę identyfikacji poszczególnych nieciągłości.

Tab. 1. Zmierzony spektrometrem RTG skład chemiczny stali 304 (X5CrNiMo18-10, 1.4301).

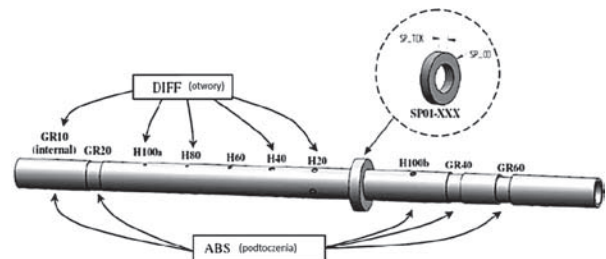
Tab. 1. Measured by X-ray spectrometer, chemical composition of 304 steel (X5CrNiMo18-10, 1.4301).

Pierwiastek	Udział % wag.
Cr	17,5-19,5
Ni	8,0-10,5
Mo	2,0-2,5
C	<0,07
Si	<1,0
Mn	<2,0
P	<0,045
S	<0,015
N	<0,11

Tab. 2. Zmierzony spektrometrem RTG skład chemiczny stali 316L (X2CrNiMo17-12-2, 1.4404)

Tab. 2. Measured by X-ray spectrometer chemical composition of 316L steel (X2CrNiMo17-12-2, 1.4404).

Pierwiastek	Udział % wag.
Cr	16,5-18,5
Ni	10,0-13,0
Mo	2-2,5
C	<0,03
Si	<1,0
Mn	<2,0
P	<0,045
S	<0,015
N	<0,11



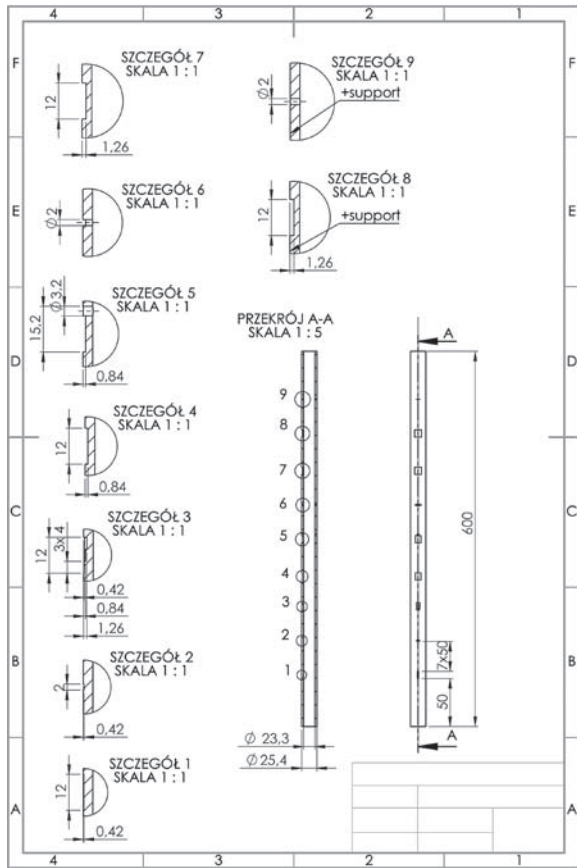
Rys. 5. Standardowy wzorec w metodzie ECT [4].

Fig. 5. Standard pipe pattern in the ECT method.

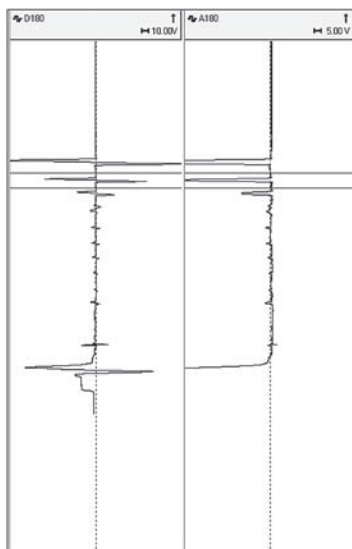
Wady niestandardowe na opracowanym projekcie obejmowały m.in.

- rowek o długości 12 mm i głębokości 20% grubości ścianki;
- rowek o długości 12 mm (3 x 4 mm) i głębokościach 20%, 40% i 60% grubości ścianki;
- rowek o długości 12 mm i głębokości 40% grubości ścianki;
- rowek o długości 12 mm i głębokości 40% grubości ścianki zakończony otworem przelotowym o średnicy 3,2 mm;
- otwór przelotowy o średnicy 2 mm;
- rowek o długości 12 mm i głębokości 60% grubości ścianki;
- rowek o długości 12 mm i głębokości 60% grubości ścianki i zewnętrznym pierścieniem.

Geometrię zaprojektowanych wad niestandardowych pokazano na rys. 6.



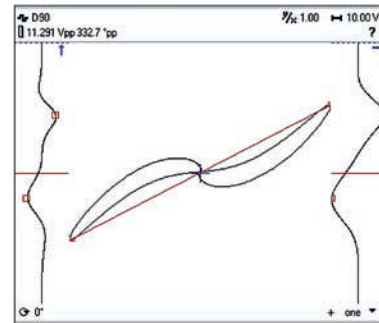
Rys. 6. Rysunek wykonawczy rurki z defektami niestandardowymi.
Fig. 6. Technical drawing of a tube with non-standard defects.



Rys. 7. Zależność zmiany impedancji w funkcji czasu. Kolejność defektów liczona od góry. Z lewej strony tryb różnicowy, z prawej absolutny.
Fig. 7. The dependence of the impedance change in time function. Order of defects, from above. On the left, differential mode, absolute on the right.

Badania przeprowadzono za pomocą aparatu prądów wirowych Multi Scan MS5800 firmy Olympus wraz z zestawem przelotowych sond badawczych, o średnicach właściwych do badania opisanych wcześniej próbek referencyjnych, tzn: - sondy wewnętrzne (przelotowe) o średnicach 14,8

mm (TEA-148-050-N15) i 19 mm (TEA-190-050-N15) firmy Olympus oraz komputera mobilnego do zastosowań przemysłowych: Getac X500G R02V010104 wyposażonego w program MultiView 6.1R0. Oprogramowanie to umożliwia graficzne przedstawienie zmian impedancji elektrycznej cewki w funkcji czasu w trybie różnicowym i trybie absolutnym, co przedstawiono na Rys. 7. Ponadto, po zaznaczeniu odcinka wykresu czasowego, obejmującego sygnał od jednego defektu, uzyskuje się charakterystyczną geometrię sygnału wraz z wartościami amplitudy (V_{pp}) oraz kąta fazowego ($^{\circ}pp$), które można zaobserwować na Rysunku 8.



Rys. 8. Przykładowa trajektoria zmian napięcia i kąta fazowego dla sondy różnicowej.
Fig. 8. An exemplary trajectory of voltage changes and phase angle for a differential probe.

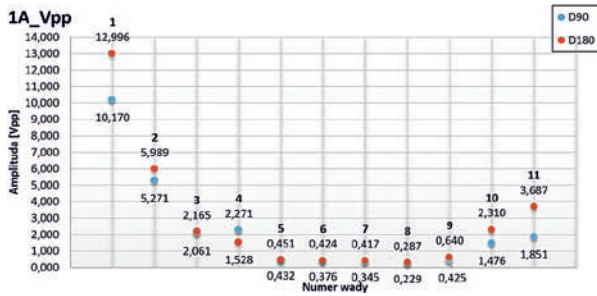
Dla każdej rurki wykonano 5 pomiarów, aby uzyskać reprezentatywne uśrednione wartości amplitudy oraz kąta fazowego. Otrzymano wyniki dla 2 kanałów pomiarowych D90 i D180, odpowiadających odpowiednio częstotliwości prądu wzbudzającego 24 i 50 kHz. Pozwoliło to na uzyskanie pełniejszych charakterystyk wad, wykorzystując zależność głębokości wnikania prądów wirowych w materiał, od częstotliwości pomiaru. Dla kanału D90 i częstotliwości ok. 24kHz, głębokość wnikania prądów wirowych w materiał stali austenitycznej wynosi ok 4 mm, zaś dla kanału D180 odpowiednio ok. 50kHz i 1,75-2mm. Biorąc pod uwagę średnicę rurek (2,1-3,4mm) kanał D90 umożliwił detekcję na całej grubości ścianki, a kanał D180 jedynie do około połowy głębokości.

3. Wyniki

Ilościowe wyniki pomiarów prądowirowych dla jednej z próbek o standardowych ubytkach kalibracyjnych (1A) przedstawiono na wykresach na rys. 9. i 10. Dla obu próbek 1A i 1B otrzymano odpowiednie wartości amplitudy i kąta fazowego dla dwóch kanałów D90 i D180 dla każdej z jedenastu wad. Rys. 9 pokazuje wartości amplitudy, natomiast rys. 10 kąt fazowy dla poszczególnych defektów.

Najniższe wartości amplitudy dla częstotliwości D90 (24 kHz) odpowiadają wadom nr 5-9, na które składają się otwory o podobnych wymiarach i geometrii. Dla reszty wad (nr 1-4, nr 10, nr 11) zanotowano zdecydowanie wyższe, nawet 10-krotnie, wartości amplitudy. Są to wady o bardziej skomplikowanej geometrii i większej objętości. Dla kanału D180 (50kHz) zanotowano wzrost wartości amplitudy, ze względu na większą czułość pomiaru do połowy grubości ścianki, z wyjątkiem wady nr 4, dla której zanotowano spadek. Wada nr 4 symuluje przegrodę i znajduje się w oddaleniu od

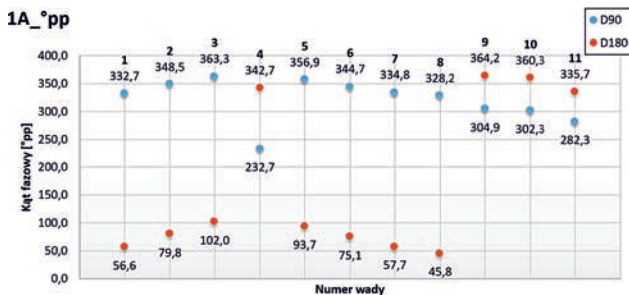
sondy o całą grubość ścianki rurki, przez co zmiana pola magnetycznego jest słabiej wykrywalna w kanale D180.



Rys. 9. Wartości amplitudy dla zaprojektowanych wad na kanałach D90 i D180 w Próbcie 1A.

Fig. 9. Amplitude values for the designed defects on channels D90 and D180 in specimen 1A.

Dla większości wad, wartości kąta fazowego, dla kanału D90, mieszczą się w przedziale 330-360°pp, co przedstawiono na Rysunku 10. Dla Wad nr 4, nr 9-11, wartości kąta fazowego znacząco odbiegają od reszty wskazań. Są to odpowiednio przegroda, dwa otwory przelotowe oraz wewnętrzny rowek otwodowy. 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 zarejestrowane zostały również dla Wad nr 1-3 i nr 5-8, a także dla Wady nr 10, przedział 45-100°pp. Dla Wad nr 4, nr 9-11 zanotowano wartości zawarte w przedziale 335-365°pp. Wartości te, korzystając z okresowości pomiarów kąta fazowego, można traktować jako wartości bliskie zeru bądź ujemne. Po zastosowaniu takiego zabiegu punkty dla Wad nr 4, nr 9-11 na wykresie będą tworzyć, z resztą wskazań, trend wskazujący lokalizację wady względem sondy pomiarowej. Lokalizację można rozumieć przez odległość „środk” nieciągłości względem cewki sondy.



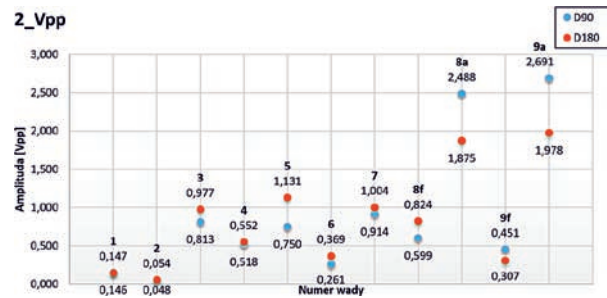
Rys. 10. Wartości kąta fazowego dla wad na kanałach D90 i D180 w Próbcie 1A.

Fig. 10. Phase angle values for defects on channels D90 and D180 in specimen 1A.

Kolejne badania dotyczyły próbki rurowej o defektach o niestandardowej geometrii (rys. 6.), na rys. 11 pokazano zmierzone wartości amplitudy sygnałów oraz na rys. 12 wartości kąta fazowego, w podobnej formie jak w przypadku próbki 1.

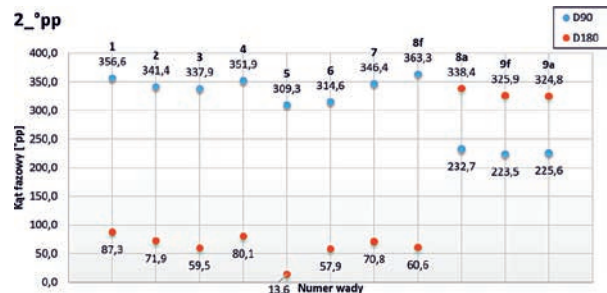
Wartości amplitudy, w zależności od cech nieciągłości Próbkę 2, dla kanału D90 zawierają się w zakresie 0,48-2,691Vpp, osiągając minimum dla Wady nr 2 oraz maksimum dla Wady 9a. Natomiast dla kanału D180 zakres amplitudy

wynosi 0,54-1,978 Vpp, osiągając minimum i maksimum dla tych samych wad. 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 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 spośród wad w Rurce 2. Niewiele wyższe wartości otrzymano dla Wady nr 1. Dla próbki nr 5 zaobserwowano nieproporcjonalną różnicę wartości między kanałami względem innych próbek, które wynikają z różnej czułości pomiaru dla obu kanałów pomiarowych. Kanał D90 lokalizuje mniej czule wszystkie wady, dlatego wartość amplitudy w tym przypadku względem wad o podobnej objętości (zlokalizowanych tylko na powierzchni zewnętrznej) jest zbliżona, zaś dla kanału D180 dominujący wpływ na otrzymany wynik amplitudy miała część wady będąca otworem przelotowym. Reszta wskazań jest proporcjonalna do szacunkowej objętości wad. Uzyskany szereg wartości amplitudy zależy od objętości poszczególnych wad. Duża objętość otworów przelotowych pokrywa się z zakresem penetracji prądów wirowych dla kanału D180.



Rys. 11. Porównanie amplitudy dla zaprojektowanych wad na kanałach D90 i D180 w Próbcie 2.

Fig. 11. Comparison of the amplitude for the designed defects on channels D90 and D180 in specimen 2.



Rys. 12. Wartości kąta fazowego dla zaprojektowanych wad na kanałach D90 i D180 w próbcie 2.

Fig. 12. Phase angle values for the designed faults on channels D90 and D180 in specimen 2.

Dla obu 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. Dla kanału D90 kąt fazowy zawiera się w przedziale 309-364°pp, z wyjątkiem Wad nr 8a, nr 9f, nr 9a które charakteryzują się wartościami kąta fazowego oscylującymi wokół 228°pp. W przypadku kanału D180,

zakres wartości kąta fazowego ukształtował się następująco: 13-90°pp dla Wad nr 1-8f. Kąt fazowy dla Wad nr 8a-9a osiągnął wartości odpowiednio około 338°pp, 326°pp i 325°pp.

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 „środk” 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. Może to być spowodowane obecnością „wióra”, na wewnętrznej powierzchni rurki, powstałego przy nawiercaniu od zewnątrz otworu przelotowego, co mogło doprowadzić do uzyskania wyniku charakterystycznego dla wady położonej najbliżej sondy pomiarowej. Wady nr 7, 8f i nr 8a mają jednakową geometrię, jednakże różnią się materiałem, z którego wykonana jest przegroda oraz jej brakiem lub obecnością. Wskazania kąta fazowego dla Wady nr 8f są najwyższe z pośród wszystkich wad, ponieważ defektoskop interpretuje obecność innego materiału o innych właściwościach (stal węglowa) jako nieciągłość. 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 obecności 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 wartości kąta fazowego, bez względu na materiał przegrody.

Dla kanału D180, ze względu na większą czułość pomiaru, zaobserwowano wyższe różnice kątów fazowych pomiędzy poszczególnymi wadami niż dla kanału D90. Wada nr 5, także dla tego kanału, osiągnęła zaniżone wartości. Pozostałe wyniki pomiarów kąta fazowego zachowały zbliżony trend na wykresie, jak dla kanału D90. Jedynie na wynik zanotowany dla Wady nr 8f, negatywny wpływ na pomiar miał zasięg penetracji prądów wirowych, ponieważ całkowita objętość wady interpretowanej przez defektoskop (szczelina + przegroda) wykroczyła swoją objętością poza ten zasięg. Kontynuując linię interpretacji wskazań dla kanału D180, zastosowaną dla Próbek 1A i 1B, wyniki dla Wad nr 8a, nr 9f i nr 9a można zredukować do wartości ujemnych (okresowość pomiarów kąta). W Tabeli 3 pokazano graficzne przebiegi amplitudy sygnałów w czasie oraz zmiany w trybie fazoczułym.

Dla Wady nr 1, zmiany impedancji w funkcji czasu przyjęły sekwencję taką, jak zaobserwowano dla wad powierzchniowych zewnętrznych Próbek 1A i 1B, jednakże powtórzoną 3-krotnie. Może to świadczyć o zdecydowanie

Tab. 3. Graficzne wyniki pomiarów prądowirowych wad standardowych dla Próbk 2.

Tab. 3. Graphical results of eddy currents with defects for the specimen 2.

Numer wady	Zmiana impedancji w funkcji czasu; Tryb różnicowy	Zmiany napięcia
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8f		
8a		
9f		
9a		

większej długości wady. Kształt pętli zmian napięcia oraz kąt przesunięcia fazowego, dla Wady nr 1, są zbliżone do kształtów uzyskanych dla Wad Próbek 1A i 1B znajdujących się na powierzchni zewnętrznej ścianki rurki. Zmiana impedancji w funkcji czasu dla Wady nr 2 jest zbliżona do zmian charakterystycznych dla wad powierzchniowych o małych

gabarytach w Próbkach 1A i 1B.

W przypadku Wady nr 3 można zaobserwować sekwencję kierunków wychyleń, taką jak dla standardowych wad powierzchniowych oraz jak dla Wady nr 4, przebiegu zmiany impedancji w funkcji czasu. Jednakże, przebieg ten ma różne wielkości wychylenia, mogące świadczyć o złożonej charakterystyce defektu i zmiennej głębokości ubytku. Także kształt pętli zmian napięcia dla Wady nr 3 ma jednocześnie cechy kształtu pętli charakterystycznej dla Wady nr 2 (szczelina o nieznacznej długości) oraz Wady nr 4 (szczelina o tej samej długości). Można interpretować taki kształt jako nieciągłość o znacznej długości, w skład której wchodzi krótkie segmenty.

Wada nr 4 charakteryzuje się identyczną geometrią pętli zmiany napięcia oraz tym samym kątem przesunięcia fazowego, co Wada nr 1. Jediną różnicą jest wielkość wychyleń przebiegu zmian impedancji w funkcji czasu. Są one większe, potwierdzając większą głębokość wady.

Dla Wady nr 5 zarejestrowano złożony przebieg zmiany impedancji w funkcji czasu. Im te zmiany są dłuższe w czasie, tym dłuższa jest wada, zaś kierunki wychylenia (pierwszy „w prawo”) są charakterystyczne dla otworu. Na podstawie analizy kształtu pętli zmiany napięcia można wywnioskować złożoną geometrię nieciągłości. Wąskie ramię pętli zmiany napięcia jest charakterystyczne dla wad powierzchniowych, natomiast wypukły fragment jest typowy dla otworów przelotowych.

Potwierdzeniem tej tezy jest geometria pętli zmiany napięcia na płaszczyźnie zespolonej dla Wady nr 6, która również zmiany impedancji ma zbliżone do wcześniej diagnozowanych otworów. Kąt przesunięcia fazowego, ok. 50° świadczy o przelotowości otworu i o względnie dużej głębokości drugiej części wady znajdującej się na powierzchni zewnętrznej rurki.

Wada nr 7 charakteryzuje się identyczną geometrią zmian napięcia oraz zbliżonym kątem przesunięcia fazowego, co Wada nr 1 i nr 4. Jediną różnicą, względem Wad nr 1 i nr 4, jest wielkość wychyleń zmian impedancji w funkcji czasu. Są one większe, potwierdzając głębokość wady równej 60% grubości ścianki (Wada nr 1 ma głębokość 20%, a Wada nr 4 głębokość 40%).

Dla Wady nr 8f zanotowano zbliżony przebieg zmiany impedancji w funkcji czasu do sekwencji wskazań dla Wady nr 7. Jest to potwierdzeniem geometrii wady znajdującej się pod przegrodą. W przypadku kształtu pętli zmiany napięcia na płaszczyźnie zespolonej można zaobserwować znaczne różnice w porównaniu z Wadą nr 7. Na pętlę składają się dwa bardzo wypukłe ramiona, co jest skutkiem obecności przegrody wykonanej z innego materiału niż rurka. Przegroda ze stali węglowej zaburza uzyskany wynik.

Wada nr 8a charakteryzuje się przebiegiem zmiany impedancji w funkcji czasu typowym dla otworów przelotowych, co jest sprzeczne z zaprojektowaną geometrią. Kształt pętli zmiany napięcia dla tej wady jest podobny do kształtu pętli dla Wady nr 3 w Próbkach 1A i 1B. Dzięki temu jest możliwość zlokalizowania pod przegrodą, z tego samego materiału co rurka, szczeliny na powierzchni zewnętrznej rurki.

Dla Wady nr 9f zanotowano skomplikowany przebieg

sekwencji wychyleń krzywej zmiany impedancji w funkcji czasu. Natomiast, porównując kształty pętli zmiany napięcia, można zaobserwować podobieństwo względem Wady nr 6 (również otwór przelotowy), jednakże zniekształcony w zbliżony sposób jak w przypadku Wady nr 8f.

Wada nr 9a charakteryzuje się zbliżonym przebiegiem krzywej zmian impedancji w funkcji czasu, co Wada nr 8a. Na tej podstawie, nie można rozróżnić obu wad, które w rzeczywistości mają odmienne geometrie i odmienne położenie względem sondy pomiarowej. Także trajektoria zmian napięcia jest zaburzona poprzez obecność przegrody i diametralnie różni się od trajektorii zarejestrowanej dla Wady nr 6.

4. 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), jest możliwy opis wymiarów oraz położenia wady. Dodatkowo, w przypadkach wad o rozwiniętej powierzchni możliwa jest ocena ich geometrii.

Bazując na przeprowadzonych pomiarach prądowirowych, możliwe było skorelowanie otrzymanych wartości z geometrią i położeniem wad standardowych względem sondy pomiarowej oraz ich objętości. Zanotowane wartości amplitudy rosły wraz ze wzrostem objętości wady. Pomiary 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, możliwe jest sparаметryzowanie niemal dowolnej wady w materiale rur austenitycznych 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 naprężenia czy 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 defektach w strukturze materiału badanego elementu.

5. Literatura/References

- [1] <http://www.vikinginspection.co.uk/services/heat-exchangers>
- [2] Schwartz. M, Four Types of Heat Exchanger Failures, Plant Engineering 12 (1982)
- [3] Zbroińska-Sczechura E. Dobosiewicz J. Uszkodzenia i diagnostyka wymienników ciepła w elektrociepłowniach, www.elektroenergetyka.pl, 12.2014.
- [4] www.olympusndt.com