

Michael Sirois¹, Mathieu Bouchard¹, Angélique Raude², Radosław Boba^{3*}¹Eddyfi, Québec, Canada²Eddyfi Europe, Saint-Vulbas, France³Casp System Sp. z o.o., Jaworzno, Polska

Korozja naprężeniowa – kiedy głębokość wady ma znaczenie

Stress corrosion - when the defect depth is important

ABSTRACT

The stress corrosion cracking phenomena has been characterized in terms of detection capabilities by classical NDT methods. An eddy current method using a array probe has been described in the context of detecting flaws caused by stress corrosion. A compensation system for changes of the probe lift-off distance and the dimensioning capability was presented. The characteristics of the sample head are shown and the measurement results are presented on the reference and real elements. The results shown are highly effective in detecting flaws caused by stress corrosion. Finally, the results obtained by the presented method with the ones of magnetic penetrant and ultrasonic methods were compared.

Keywords: stress corrosion, nondestruction inspection, eddy current method, eddy current array probe

STRESZCZENIE

Scharakteryzowano zjawisko korozji naprężeniowej pod kątem możliwości detekcji klasycznymi metodami NDT. Opisano metodę wiroprądową z zastosowaniem sondy macierzowej w kontekście wykrywania niezgodności spowodowanych korozją naprężeniową. Zaprezentowano system kompensacji zmiany odległości cewki od powierzchni oraz możliwości wymiarowania. Przedstawiono charakterystykę przykładowej głowicy oraz przedstawiono wyniki pomiaru na elemencie referencyjnym i rzeczywistym. Przedstawione wyniki wykazują wysoką skuteczność w wykrywaniu niezgodności powstałych w wyniku korozji naprężeniowej. Ostatecznie dokonano porównania wyników uzyskanych metodą prezentowaną oraz metodami magnetyczno-proszkową i ultradźwiękową.

Słowa kluczowe: korozja naprężeniowa, nieniszcząca ocena, metoda wiroprądowa, wiroprądowy przetwornik macierzowy

1. Wstęp

Pęknięcie związane z korozją naprężeniową (SCC) jest ściśle związane z oddziaływaniem środowiska pracy i w krótkim czasie od rozpoczęcia takiego procesu, może prowadzić do wystąpienia poważnych uszkodzeń. SCC jest wynikiem występowania naprężenia w materiałach przy jednoczesnym narażeniu ich na korozję. Korozja naprężeniowa występuje zazwyczaj na zewnętrznych powierzchniach rurociągów ze stopów podatnych na działanie czynników korozyjnych. SCC powoduje degradację materiału przy poziomie naprężeń niższych od wartości wytrzymałościowych materiału, w warunkach otoczenia, w których niekoniecznie sama korozja może doprowadzić do uszkodzenia. Ponadto, jeśli korozja naprężeniowa nie zostanie zlokalizowana, może dojść do skutku połączenia się pojedynczych wad do powstania długich i głębokich nieciągłości prowadzących do poważnych awarii [1-4].

Skupiska SCC są często określane jako kolonie, ponieważ składają się z pojedynczych małych płytek pęknięć powierzchniowych, zwykle zorientowanych wzdłuż osi przepływu czynnika, prostopadłych do naprężeń obwodowych [2-4]. Rozgałęziona morfologia nieciągłości sprawia, że wykrycie SCC jest bardzo trudne przy użyciu konwencjonalnych metod NDT. Przykładowo standardowa próba ciśnieniowa nie daje możliwości wykrycia podkrytycznych ale propagujących obszarów SCC, a konwencjonalna metoda wpływu strumienia magnetycznego (MFL) jest

nieskuteczna ze względu na małe ubytki materiału związane z korozją naprężeniową [1], [5].

Współcześnie stosowane sondy ultradźwiękowe (UT) lub elektromagnetyczne przetworniki akustyczne (EMAT) w zabudowie in-line są w stanie wykrywać wady związane z SCC, jednak ich zabudowa i właściwe rozmieszczenie są często niemożliwe [6].

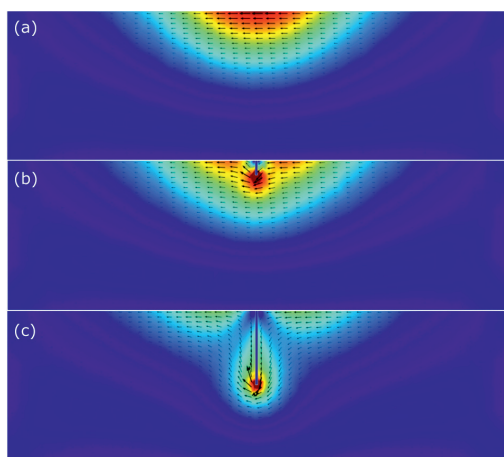
Technika UT działa dobrze tylko wtedy gdy mamy głębokie pęknięcia niewychodzące na powierzchnię. Nie daje również możliwości dokładnego określenia głębokości w przypadku dużego zagęszczenia nieciągłości lub gdy mamy do czynienia z płytkimi nieciągłościami SCC. Dlatego właśnie do dnia dzisiejszego najlepszymi metodami identyfikowania wad typu SCC są badania magnetyczno-proszkowe (MT) oraz badania penetracyjne (PT). Mimo względnie wysokiej rozdzielczości i czułości badań MT i PT, techniki te wymagają dobrego przygotowania powierzchni oraz pozostają mocno zależne od doświadczenia osoby wykonującej badania. Ponadto nie pozwalają na określenie głębokości zalegania nieciągłości oraz jej długości, a co za tym idzie nie dają możliwości właściwej oceny wykrytych wskazań pod względem krytycznych właściwości SCC (SCCDA).

2. Wiroprądowa technika wieloprzetwornikowa w układzie tangencjalnym

Najnowsze osiągnięcia w dziedzinie wykorzystania sond wielocewkowych w technice wiroprądowej ECA (Eddy Current Array) doprowadziły do rozwoju sond z cewkami w układzie tangencjalnym (TECA- Tangential Eddy Current

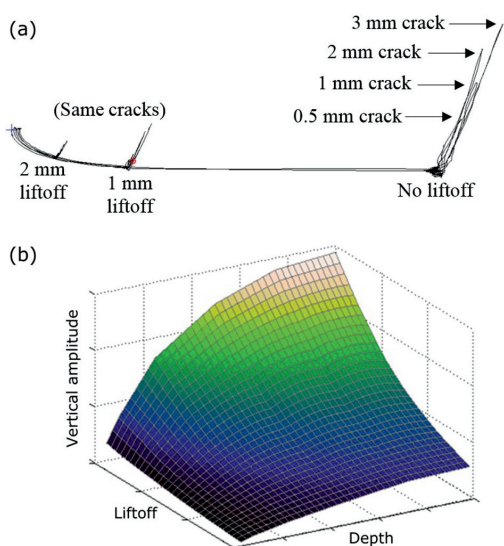
*Autor korespondencyjny. E-mail: rafal.boba@casp.pl

Array) [1]. Sondy TECA zostały zoptymalizowane do oceny wad powierzchniowych w stalach węglowych. Metoda łączy sygnały konwencjonalnych sond wiroprowadzowych z możliwościami techniki wieloprzetwornikowej, co oznacza szerszy zakres badania, szybsze badanie, obrazowanie 2D i 3D oraz pełną archiwizację danych cyfrowych.



Rys. 1. Zmiany gęstości prądu zmiennego w a) obszar bez wad; b) pęknięcie o głębokości 1mm c) pęknięcie o głębokości 5 mm
Fig. 1. Changes of AC current density in the vicinity of crack, a) flawless area, b) crack of 1mm depth, c) crack of 5 mm depth

Układ cewek TECA pozwala na indukowanie prądów wirowych stycznych do badanej powierzchni, prostopadle do nieciągłości SCC, co umożliwia ich wykrycie. Sygnały z układu cewek TECA są unikalne - pozwalają na wyróżnienie pęknięć, a także określenie ich głębokości, stale obrazują odległość między cewkami a badanym materiałem (tzw. liftoff), a także zmiany własności magnetycznych stali węglowej.



Rys. 2. Wpływ zmiany odległości przetwornika od badanego elementu: a) Przesunięcie fazowe czterech wskazań dla różnych odległości liftoff - 0,5 do 2 mm; b) funkcja 3D obrazująca zależności pomiędzy głębokością pęknięcia, amplitudą sygnału oraz odległością liftoff.

Fig. 2. Influence of liftoff: a) phase shift of four indications for different liftoff - from 0,5 to 2 mm; b) 3D relation between depth, signal amplitude and liftoff.

Dzięki pomiarowi zmian liftoff i przenikalności magnetycznej materiału, sygnał pochodzący od wady może być odpowiednio kompensowany, umożliwiając dokładne jej wymiarowanie. Rysunek 1 ilustruje, w jaki sposób strumień TECA przepływa prostopadle do powierzchni i opływa nieciągłości o różnych głębokościach zalegania. Zmiany kolorystyczne ilustrują zmiany gęstości prądów wirowych w badanym materiale.

W odniesieniu do klasycznych badań wiroprowadzowych (ECT) widać, że sygnał TECA na nieciągłości charakteryzuje się dobrą separacją fazową w stosunku do sygnału liftoff, co jest szczególnie użyteczne przy wyodrębnianiu i wymiarowaniu wszystkich sygnałów niezależnie. Krzywa liftoff jest bardzo wypłaszczona dzięki czemu pomiar przesunięcia poziomego pomiędzy sygnałem, a punktem zerowym umożliwia pomiar liftoff. Sygnały nieciągłości również dają płaskie wskazania, wszystkie w tej samej fazie i dużą składową w pionie, co ułatwia korelację głębokości pęknięcia na podstawie amplitudy w pionie. Pozwala to wykrywać pęknięcia SCC oraz wymiarować je w czasie rzeczywistym, co znacznie skraca czas oraz koszty diagnostyki rurociągów ze stali węglowych.

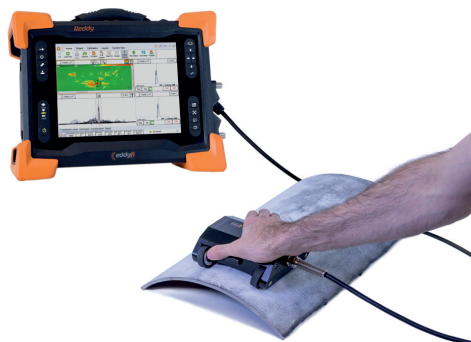
3. TECA Liftoff

3.1 Kompensacja zmiany odległości cewki od powierzchni

Jak pokazano na rysunku 2. liftoff związany z występowaniem powłok lub farb znacznie zmniejsza pionową składową sygnału pochodzącego od wady. Układ cewek TECA umożliwia monitorowanie w czasie rzeczywistym liftoff, co pozwala dynamicznie kompensować amplitudę sygnału pochodzącą od wady.

3.2 Możliwości wymiarowania

Funkcje wymiarowania w technice TECA opierają się na płaszczyźnie 3D, która umożliwia korelację pomiędzy głębokością wad, amplitudą i odległością liftoff (rysunek 2b). Plan obrazowania składa się z kilku krzywych wyznaczonych dla różnych głębokości uzyskanych przy określonych wartościach liftoff. Wybór najlepszej krzywej zależy od zmierzonej wartości liftoff. Wartość ta jest automatycznie wyliczana przez system podczas skanowania, co ułatwia wizualizację i analizę danych.



Rys. 3. Sonda wysokiej rozdzielczości Sharck do wykrywania drobnych wad w obszarach SCC

Fig. 3. High resolution Sharck probe for detection of SCC area

Ponadto, jeśli podczas badania występują zmiany w przenikalności, wówczas kompensacja jest stosowana do sygnałów prądów wirowych tak aby przylegały one do płaszczyzny 3D głębokości. Bez kompensacji takie zmiany właściwości magnetycznych materiału mogłyby negatywnie wpływać na pomiar głębokości podczas analizy danych.

4. Głowica wysokiej rozdzielczości Sharck

Widoczna na rysunku 3 wielocewkowa sonda o dużej rozdzielczości (Sharck HR) opracowana została dla wykrywania oraz wymiarowania wad w obszarach SCC. Konstrukcja posiadająca cztery koła zapewnia wysoką stabilność podczas badania. Dwa koła są ze sobą połączone i sprzężone z enkoderem, umożliwiając lokalizowanie wad oraz pomiar ich długości. Sonda Sharck HR może pracować z prędkością do 600 mm/s.

Obszar aktywny cewek będący w kontakcie z badaną powierzchnią jest wykonany z wytrzymałego polimeru i umożliwia badanie rur o średnicach od 254 do 1220 mm (10-48").

Mechanizm sprężynowy umożliwia dopasowanie powierzchni sondy do kształtu badanej powierzchni zapewniając stały i bliski kontakt z badaną powierzchnią. Głowica posiada łącznie 64 elementy aktywne TECA o wysokiej rozdzielczości, co pozwala na skanowanie pasa o szerokości do 71 mm przy pojedynczym przejeździe. Elementy aktywne cewek są umieszczone w kilku rzędach dla uzyskania lepszej rozdzielczości oraz jednolitej czułości.

Sonda została zoptymalizowana pod kątem wykrywania i oceny płytkich pęknięć o głębokości od 0,25 do 3 mm. Zakres ten został dobrany z uwzględnieniem ograniczeń konwencjonalnych metod NDT (np. UT) oraz z uwzględnieniem obszarów występowania SCC w zakresie 10% grubości ścianek. Umożliwia to właścicielom instalacji opracować wewnętrzne procedury SCCDA z uwzględnieniem maksymalnych dopuszczalnych pęknięć.

Sondy TECA dają możliwość wykrywania wad o min. długości ok. 2 mm oraz pozwalają na pomiar całego obszaru

występowania SCC. Uwzględniając najczęściej występujące na powierzchniach rurociągów powłoki i farby, sonda Sharck HR może kompensować liftoff do 2 mm.

Dla osiągnięcia wysokiej dokładności pomiaru przy użyciu głowicy Sharck HR wykonano serię badań testowych na odcinku rurociągu stalowego X52. Wykonano próbkę, w której wydrążono techniką elektroerozji EDM 23 wady referencyjne o różnym kształcie, długości i głębokości. Wykonane nieciągłości zostały przebadane i wykorzystane do stworzenia płaszczyzny odniesienia głębokości 3D – rysunek 3b.

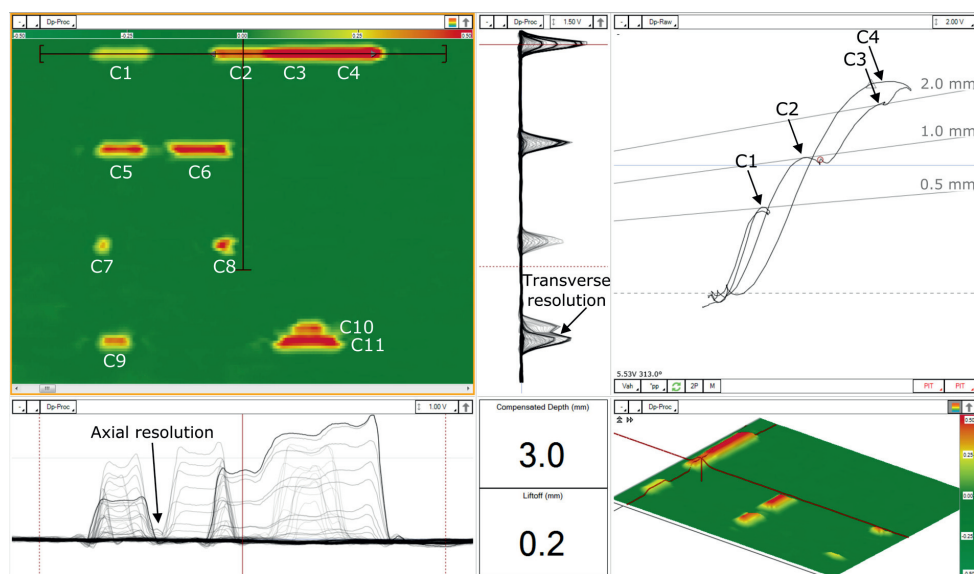
Wykorzystano również narzędzie do kompensacji w celu uwzględnienia różnic w przewodnictwie elektrycznym i przepuszczalności magnetycznej pomiędzy różnymi gatunkami stali węglowej, w których mogą wystąpić skupiska korozji naprężeniowej SCC (stale X42, X56, X60 itp.). Zapewnia to dokładny pomiar głębokości zalegania wad w obszarach SCC dla większości rurociągów wykonanych ze stali węglowej.

5. Pomiar głębokości oraz rozdzielczość sondy Sharck

W celu sprawdzenia skuteczności wykrywania i określania głębokości nieciągłości przy użyciu Sharck HR, druga część rury ze stali X52 została przygotowana pod kątem symulacji skupisk obszarów korozji naprężeniowej SCC.

Obszary SCC charakteryzują się bardzo krótkimi i płytkimi pęknięciami, wady występują zazwyczaj pojedynczo, i mają różną głębokość i są zamknięte. Rysunek 4., ilustruje wyniki uzyskane z pojedynczego skanowania próbki wykonanego w czasie 2 sekund.

Sygnały z wad zlokalizowanych w górnej części obrazu C-scan (oznaczone C1-C4) pokazano w prawym górnym okienku na rysunku 4. Pęknięcie C1 ma głębokość 0,5 mm, jednak jego wykrycie i zwymiarowanie jest już możliwe. Wskazania C2, C3 i C4 mają odpowiednio głębokość 1 mm, 2 mm i 3 mm. Wskazania



Rys. 4. Wyniki skanowania sondą Sharck HR
Fig. 4. Results of inspection using the Sharck HR probe

na próbce były wyfrezowane w sposób ciągły w kształcie schodów. Trzy poziomy głębokości wady są dokładnie widoczne w widoku poziomym C-skanu w dolnej części rysunku 4. Widok boczny jest szczególnie przydatny ponieważ pozwala na szybkie wykrycie najgłębszych pęknięć podczas badań obszarów SCC.

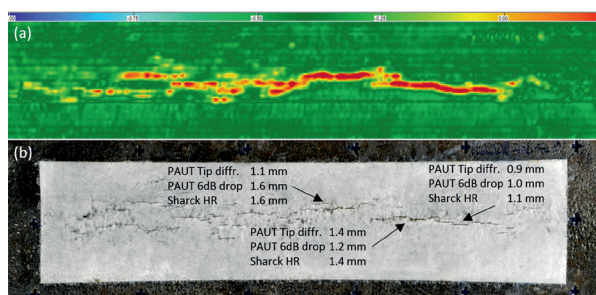
Rozdzielczość osiowa sondy jest jednym z ważniejszych parametrów podczas oceny stref SCC, ponieważ decyduje o rozróżnieniu długich ciągłych pęknięć od krótkich pęknięć w linii. Odległość pomiędzy pęknięciami C5 i C6 została ustalona dla celów walidacji na 3 mm. Wyniki pokazują, że sonda z powodzeniem odróżnia wszystkie pęknięcia, a amplituda sygnału między nimi spada do 0. Wskazuje to na możliwość wykrywania wad odsuniętych od siebie o $1 \div 1,5$ mm.

Dla sprawdzenia rozdzielczości poprzecznej wykonano wady C10 i C11 w odległości 3 mm. Przyjęta odległość wzorcowa pozwala na sprawdzenie zdolności sondy pod kątem wykrywania i pomiaru wad sąsiadujących poprzecznie w skupiskach SCC. Pionowy widok boczny obok C-scan pokazuje, że sonda posiada wysoką rozdzielczość, co pozwala również wykrywać tak usytuowane względem siebie wady.

Pęknięcie C7 zostało wykonane dla wykazania możliwości wykrycia najkrótszego wskazania w obszarze SCC. Pomimo małych rozmiarów wady C7 (długość 3 mm, głębokość 1 mm) jest ona doskonale widoczna na C-scan.

6. Rzeczywiste wyniki badania stref SCC

Głowica Sharck HR została również przetestowana na różnych próbkach rzeczywistych rurociągów zawierających naturalne skupiska występowania korozji naprężeniowej SCC. Przykład takiego badania pokazano na Rysunku 5. Dla porównania uzyskane rozkłady odniesiono do wyników otrzymanych przy użyciu metody MT. Uzyskany C-scan jest odpowiada obrazowi strefy pęknięć uzyskanej podczas badania MT. Wskazania zostały wykryte i zobrazone z wysoką rozdzielczością.



Rys. 5. Badana strefa SCC z wykorzystaniem a) Sharck HR; b) techniki MT i UT

Fig. 5. Examined SCC area using: a) Sharck HR probe, b) using MT and UT technique.

W porównaniu do techniki MT, technologia TECA umożliwia jednocześnie oszacowanie głębokości zalegania pęknięć w czasie rzeczywistym. Zapis wyników badania daje możliwość zarządzania danymi oraz ich późniejszej oceny. Biorąc pod uwagę czas niezbędny do przygotowania badań, kontrola głowicą Sharck jest szybka, a wpływ tzw. czynnika ludzkiego jest zminimalizowany w stosunku do badania

MT - metoda TECA nie wymaga specjalnego przygotowania powierzchni oraz jej czyszczenia.

Do weryfikacji określonych przez TECA głębokości wskaźników zastosowano technikę UT. Ze względu na ograniczenia techniki UT przy określaniu głębokości w gęstych skupiskach wad, pomiaru dokonano na trzech odizolowanych wadach. Wykorzystano dwie techniki UT: spadek sześciodecybelowy (6dB) oraz dyfrakcję fali. Jak pokazano na rysunku 5., głębokości zmierzone przez głowicę Sharck są bardzo zbliżone do wyników UT.

7. Wnioski

Sonda Sharck została zaprojektowana i opracowana do szybkiej analizy z wysoką rozdzielczością pęknięć w strefach naprężeń korozyjnych w stali węglowej. Skonstruowana w oparciu o technikę wielociekowej głowicy ECA, zapewnia wykrywanie i analizę stref SCC, wraz ze zobrażowaniem C-scan wysokiej rozdzielczości oraz pomiarem i kompensacją liftoff w czasie rzeczywistym. Sonda została zaprojektowana specjalnie do wykrywania wad typowych dla SCC, dlatego zakres pomiarowy głębokości wad dotyczy płtych wad w zakresie $0,25 \div 3$ mm w rurociągach ze stali węglowych X52.

System Sharck HR pokazuje duże możliwości rozwoju dokładnych technik pozwalających na analizę degradacji rurociągów, które mogą ulec poważnej awarii w przypadku wystąpienia pęknięcia. Szerokie pokrycie pojedynczego skanu oraz duża szybkość i dokładność wymiarowania, w połączeniu z zaawansowanym i intuicyjnym oprogramowaniem, sprawiają, że proponowana technologia jest poważną alternatywą dla tradycyjnych technik stosowanych do oceny stref występowania wad związanych z pękaniem w strefach występowania korozji naprężeniowej SCC.

8. Literatura/References

- [1] M. Sirois, M. Bouchard, A. Raude, "Stress-Corrosion Cracking: When Depth Sizing Matters", World Pipelines magazine, July, 2017.
- [2] W. Chen, "An Overview of Near-Neutral pH Stress Corrosion Cracking in Pipelines and Mitigation Strategies for Its Initiation and Growth", Corrosion, vol. 72, no. 7, pp. 962-977, 2016. DOI 10.5006/1967
- [3] C. Loto, "Stress corrosion cracking: characteristics, mechanisms and experimental study", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 93, no. 9-12, pp. 3567-3582, 2017. DOI 10.1007/s00170-017-0709-z
- [4] O. Aly, M. Mattar Neto, "Stress Corrosion Cracking", Developments in Corrosion Protection, 2014. DOI 10.5772/57349
- [5] S. Takaya and K. Miya, "Application of magnetic phenomena to analysis of stress corrosion cracking in welded part of stainless steel", Journal of Materials Processing Technology, vol. 161, no. 1-2, pp. 66-74, 2005. DOI 10.1016/j.jmatprotec.2004.07.017
- [6] L. Murugan, "Phased Array UTUT application on in service Heavy wall Reactors", in 6th Middle East Nondestructive Testing Conference & Exhibition, Kingdom of Bahrain, October 7 - 12, 2012.