

Andrzej ZBROWSKI, Krzysztof MATECKI
Instytut Technologii Eksploatacji – PIB, Radom

WYKRYWANIE WAD PODPOWIERZCHNIOWYCH METODĄ PRĄDÓW WIROWYCH

Słowa kluczowe

Wady materiałowe, badania nieniszczące, prądy wirowe.

Streszczenie

W artykule przedstawiono możliwości diagnozowania wewnętrznych wad materiałowych w elementach stalowych techniką defektoskopii nieniszczącej wykorzystującą metodę prądów wirowych z pomiarem w tzw. polu dalekim RFEC (ang. *Remote Field Eddy Current*).

Wprowadzenie

Powstałe w materiałach walcowanych i kutyh wady w postaci nieciągłości powierzchniowych lub nieciągłości znajdujących się bezpośrednio pod powierzchnią stanowią obszary dodatkowej koncentracji naprężeń wywołującej uszkodzenia w postaci przyspieszenia zużycia zmęczeniowego lub źródła nagłego zniszczenia elementu wskutek pęknięcia [1, 2]. Najbardziej niebezpieczne są duże, wewnętrzne wady materiałowe w postaci różnego rodzaju nieciągłości materiału, pęknięć, wtrąceń, rzadzisz, zawalcowań itp.

Zapewnienie odpowiedniej jakości produkcji determinuje konieczność całkowitego eliminowania elementów z wadami powierzchniowymi i podpowierzchniowymi [3, 4]. Skutecznym sposobem wykrywania defektów i niedoskonałości w materiałach konstrukcyjnych lub w wyrobie gotowym oraz niedo-

puszczenia go do użytkowania może być stosowanie w systemach kontroli jakości produkcji badań nieniszczących. Stanowią one zespół metod pozwalających określić stan fizyczny – jakość badanych obiektów – bez spowodowania zmian ich własności użytkowych. Odmianą badań nieniszczących w szczególnie sposób nadającą się do kontroli w procesie wytwarzania czy w trakcie eksploatacji są badania oparte o metody indukcyjne. Kontrola jakości obiektów z wykorzystaniem metod indukcyjnych jest wdrażana na wielu etapach produkcji kęsów, prętów, rur, drutów, obiektów o różnorodnych kształtach [5]. Jedną z nich jest metoda prądów wirowych, wykorzystywana głównie do detekcji powierzchniowych wad materiałowych oraz pęknięć.

W Instytucie Technologii Eksploatacji – PIB w Radomiu prowadzone są prace nad wykonaniem urządzenia do detekcji wewnętrznych wad materiałowych z wykorzystaniem metody prądów wirowych, przeznaczonego do pracy w linii produkcyjnej bieżni łożysk tocznych, w systemie „zero braków” przy 100% kontroli potokowej [6]. Realizacja powyższego celu wymaga zastosowania kosztownej, specjalistycznej aparatury badawczej.

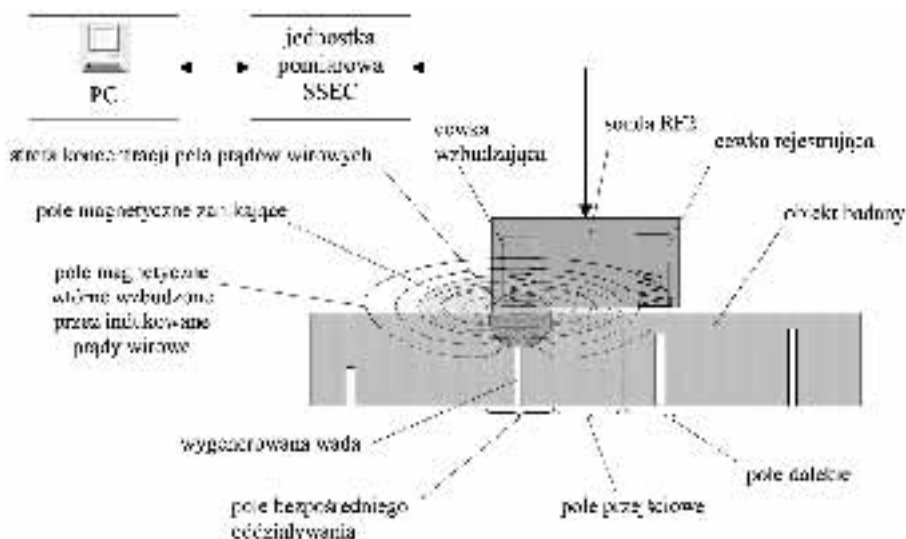
W celu zweryfikowania poprawności przyjętej metody badawczej podjęto próbę diagnozowania wad materiałowych o charakterze podpowierzchniowym w materiale ferromagnetycznym z zaimplementowanymi w nim na różnej głębokości uszkodzeniami, wykorzystując metodę prądów wirowych z pomiarem w tzw. polu dalekim (ang. *Remote Field Eddy Current*).

1. Metoda badania

Metoda prądów wirowych z pomiarem w tzw. polu dalekim RFEC pierwotnie zastosowana była m.in. do badań rurek wymienników ciepła [7].

Na rys. 1 przedstawiono układ detekcyjno-pomiarowy. Zmienne w czasie pole magnetyczne powoduje generację prądów wirowych płynących osiowo i obwodowo w badanym elemencie [8]. Dzięki zjawisku Faradaya i regule Lenza wytworzone wtórne pole magnetyczne przeciwdziała przyczynie je wywołującej. Z uwagi na zjawisko tzw. efektu naskórkowego jak również geometrię badanego elementu koncentracja pola prądów wirowych (obszar o największym natężeniu) obejmuje obszar przy cewce wzbudzającej. Jednakże dzięki rozptyłowi prądów w badanym elemencie wytworzone pole magnetyczne ma dużo większy zasięg. Powoduje to wytworzenie zjawiska dominacji pola magnetycznego od prądów wirowych – pola magnetycznego wtórnego – w pewnym obszarze z dala od cewki pomiarowej nad polem magnetycznym wytworzonym przez cewkę wzbudzającą.

Do generowania prądów stosuje się sondę pomiarową RF2, w której przepływający zmienny prąd elektryczny generuje zmienne pole magnetyczne. Sonda wyposażona jest w dwie cewki pomiarowe, tzw. wzbudzającą i rejestrującą.



Rys. 1. Układ detekcyjno-pomiarowy

W badaniu metodą RFEC cewka rejestrująca jest umieszczona w pewnej odległości od cewki wzbudzającej w obszarze, w którym dominującym polem magnetycznym jest pole od wzbudzonych prądów wirowych. Innymi słowy obszar pomiaru to rejestracja jedynie pola magnetycznego wtórnego. Rejestracja zmian w polu wtórnym poprzez zmianę napięcia generowanego w cewce rejestrującej pozwala na określanie zmian w badanym materiale. Pole magnetyczne w tym obszarze jest zdecydowanie słabsze (o mniejszym natężeniu) niż w obszarze cewki wzbudzającej – jednakże wszelkie niejednorodności w postaci nieciągłości materiału lub wtrąceń są rejestrowane.

Z uwagi na generowane pola magnetyczne obszary wokół cewki generującej można podzielić na trzy główne strefy (pola):

- pole bezpośredniego oddziaływania,
- pole przejściowe,
- pole dalekie.

Zależność pozwalająca na wyznaczenie standardowej głębokości penetracji ma postać [9]:

$$D_p = 50 * \sqrt{\frac{172.41}{\mu * f * \delta}} \quad (1)$$

gdzie:

- D_p – standardowa głębokość penetracji (wnikania) [mm],
- μ – przenikalność magnetyczna badanego materiału,

- δ – przewodność elektryczna badanego elementu [% IACS] (IACS – ang. *International Annealed Copper Standard* – Międzynarodowy Standard Miedzi Wyżarzanej),
- f – częstotliwość badania [Hz].

Obliczeniowa głębokość badania pozwala na określenie warstwy, w której prowadzimy badania, jakie defekty (powierzchniowe, podpowierzchniowe) będą wykrywane, a także na regulowanie czułości badania.

Czułość systemu detekcji wad jest ustalana w oparciu o próbki porównawcze [10] (testowe) odpowiadające pod względem materiału i geometrii badanemu elementowi. Dla większości materiałów stałe ujęte są w materiałowych bazach danych.

2. Obiekty badań

W celu oceny możliwości wykrywania wewnętrznych wad w materiale przeprowadzono badania doświadczalne na specjalnie przygotowanych próbkach. Do badań przygotowano następujące próbki:

Próbka A – próbka płaska z nacięciami o różnych głębokościach;

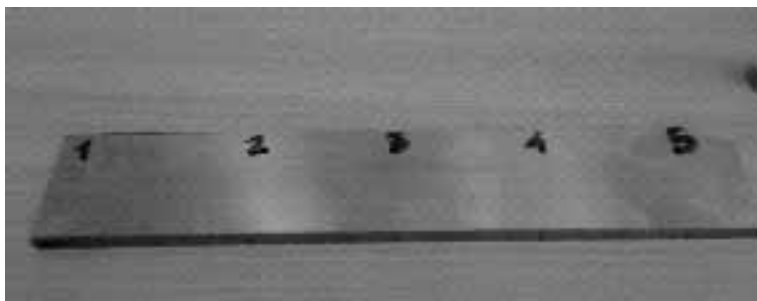
Próbka B – próbka płaska z otworami o średnicy 4 mm;

Próbka C – próbka płaska z otworami o średnicy 3 mm;

Próbka D – próbka płaska z otworami o średnicy 2 mm;

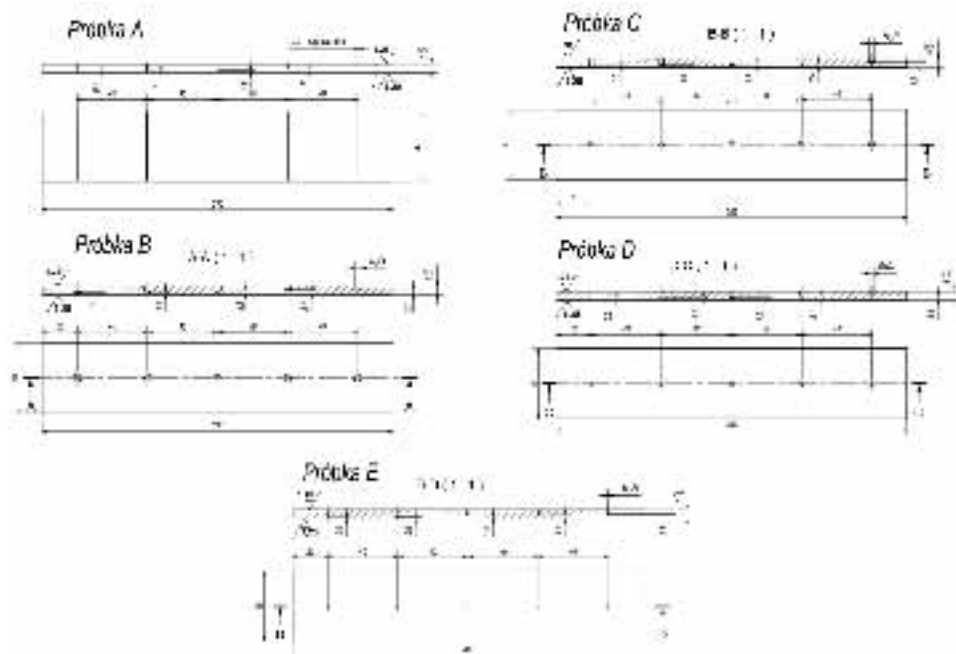
Próbka E – próbka płaska z otworami o średnicy 1 mm.

Przykładową próbkę pokazano na rysunku 2.



Rys. 2. Próbką pomiarowa z nacięciami

Przygotowane próbki miały kształt płaskowników z zamodelowanymi nieciągłościami struktury w postaci nacięć o różnej głębokości oraz zestawu otworów o różnych średnicach i ułożonych na różnych głębokościach. Kształt i wymiary próbek pokazuje rys. 3.



Rys. 3. Kształt i wymiary próbek

Próbki wykonano ze stali St5.

W tabeli 1 przedstawiono opis uszkodzeń wykonanych na próbkach odniesienia które scharakteryzowano za pomocą wykorzystanej metody badawczej.

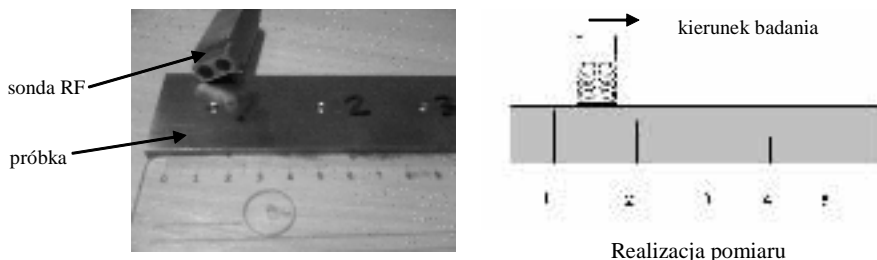
Tabela 1. Opis próbek wykorzystanych do badań (gr – grubość badanej próbki)

Uszkodzenie	Próbka A – nacięcia gr. = 4,9 mm	Próbka B – otwór $\varnothing = 4$ mm (gr. = 4,9 mm)	Próbka C – otwór $\varnothing = 3$ mm (gr. = 4,9 mm)
1	4,3 mm	4,6 mm	4,6 mm
2	3,8 mm	4,3 mm	4,4 mm
3	3,3 mm	3,7 mm	4,0 mm
4	3,0 mm	3,2 mm	3,5 mm
5	2,8 mm	3,0 mm	3,2 mm

3. Realizacja badania

Do badań zastosowano sondę płaską. Stąd też geometria płaska próbek najlepiej odpowiadała możliwościom wykrycia i scharakteryzowania uszkodzeń.

Zastosowana sonda posiadała dwie cewki pomiarowe o średnicy 6 mm. Dysponowano więc relatywnie dużymi rozmiarami przetwornika w stosunku do wybranych rozmiarów średnic uszkodzeń (1, 2, 3, 4 mm). Na rys. 4 przedstawiono sondę pomiarową z widocznymi cewkami pomiarowymi. Do badań zastosowano system SSEC składający się z jednostki pomiarowej wraz z sondą RF2 oraz komputera sterującego wraz z oprogramowaniem.



Rys. 4. Widok sondy pomiarowej, próbki odniesienia oraz schemat realizacji pomiaru

Badanie wykonywano od strony przeciwnej do lokalizacji uszkodzenia, co symulowało wykrywanie uszkodzeń na określonej głębokości. Schemat realizacji badania na przykładzie próbki A przedstawiono na rys. 4.

Sondę przesuwano z określoną prędkością przesuwu nad uszkodzeniami i rejestrowano wskazania na płaszczyźnie impedancji elektrycznej oraz przebiegi czasowej wektorów składowych (IM i Re).

Tabela 2. Głębokość uszkodzenia od powierzchni

Uszkodzenie	Próbka A głębokość od powierzchni [mm]	Próbka B głębokość od powierzchni [mm]	Próbka C głębokość od powierzchni [mm]
1	0,6	0,3	0,3
2	1,1	0,6	0,5
3	1,6	1,2	0,9
4	1,9	1,7	1,4
5	2,1	1,9	1,7

W tabeli 2 przedstawiono głębokość położenia uszkodzenia od strony badanej powierzchni. Głębokości uszkodzeń zawierają się w przedziale 0,3–2,1 mm.

4. Wyniki badań

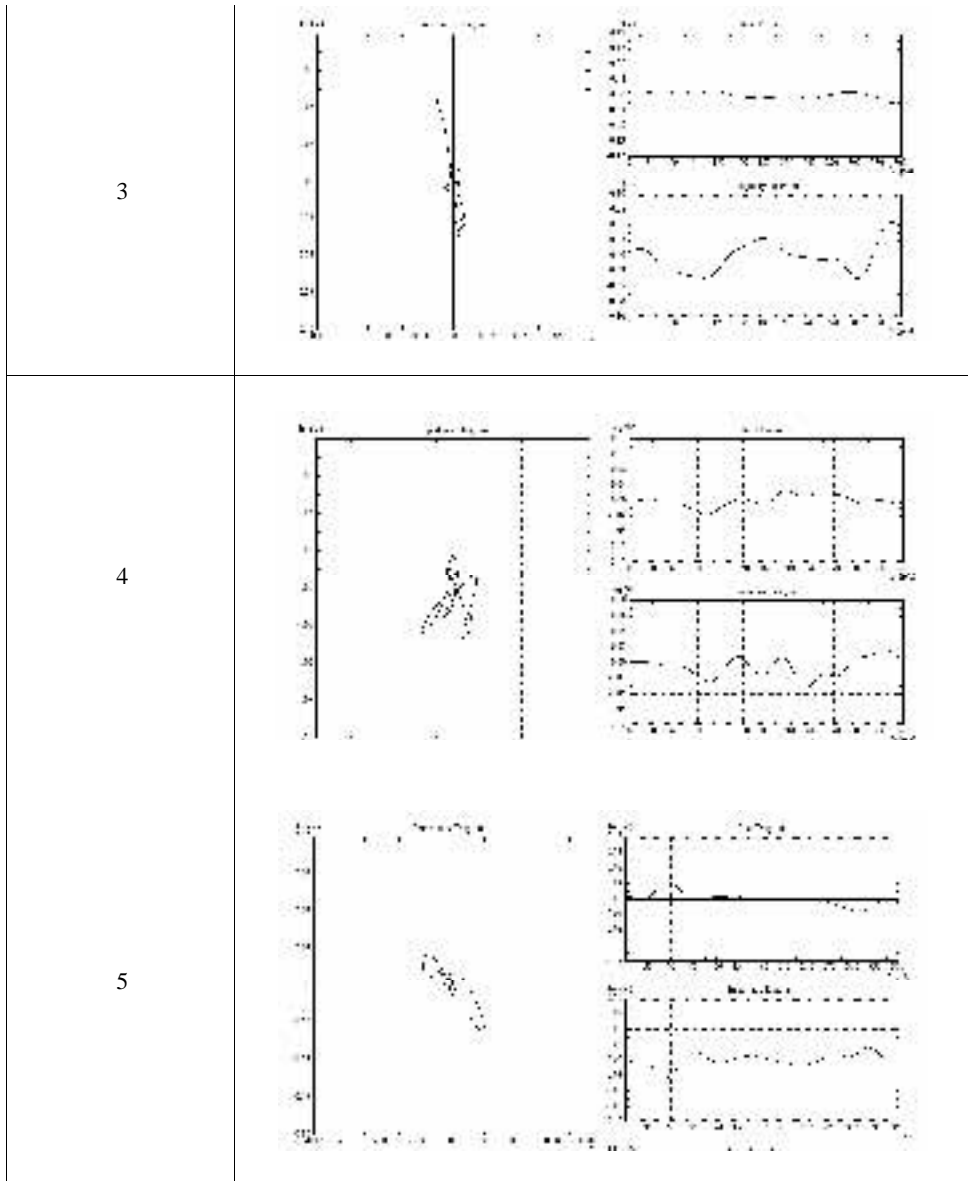
Próbka A

Próbkę poddano badaniu z wykorzystaniem częstotliwości badania $f = 200$ kHz. Dla wszystkich badań sygnał od lift-off pozycjonowano wertykalnie. W celu wycięcia szumów od drgań sondy i szybkich przemieszczeń zastosowano filtr dolnoprzepustowy. Układ pomiarowy pracował w trybie sondy typu Reflection.

Na rysunkach zestawionych w tabeli 3 przedstawiono zobrazowanie uszkodzeń o numerach 1–5. Przedstawione wyniki obrazują płaszczyznę impedancji elektrycznej (część rzeczywistą Re – składowa pozioma i urojona Im – składowa pionowa).

Tabela 3. Zobrazowanie sygnałowe uszkodzeń – próbka A

Uszkodzenie	Obraz płaszczyzny impedancji elektrycznej
1	
2	



Ponadto urządzenie umożliwia śledzenie i zapis sygnału dla poszczególnych składowych (Real Diagram dla rzeczywistej i Imaginary Diagram – dla urojonej). Składowa rzeczywista odpowiada amplitudzie sygnału – odnosi się do rozmiaru uszkodzenia, składowa urojona opisuje opóźnienie fazowe zależne od głębokości uszkodzenia. Uszkodzenia w postaci nacięć ułożone bliżej powierzchni będą charakteryzowały się zwiększoną odpowiedzią amplitudową z uwagi na większy przekrój prostopadły uszkodzenia, jakie wprowadza zabu-

rzenie w rozplywie prądów. Na załączonych rysunkach bardzo wyraźny sygnał od uszkodzenia występuje dla uszkodzeń 1–3. W przypadku automatyzacji oceny uszkodzenia (np. bramka dla wskazań Re lub Im) uszkodzenia te zostaną zarejestrowane już na poziomie bramek 50% FSH (*Full Screen Height*). Uszkodzenia położone głębiej, o głębokości powyżej 1,5 mm, charakteryzują się zdecydowanie słabszą wielkością sygnał/szum, co powoduje, iż rejestracja takich sygnałów dla przyjętych poziomów uszkodzenia jest utrudniona. Podsumowując: dla przyjętych wielkości parametrów można efektywnie wykrywać uszkodzenia o charakterze pęknięć położonych na głębokości do około 1,5 mm dla badanego materiału i zastosowanej sondy pomiarowej.

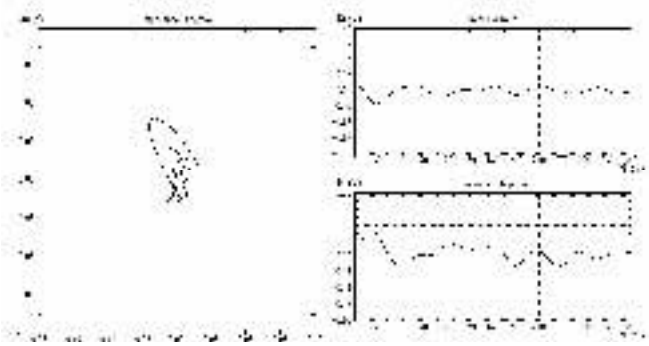
Próbka B

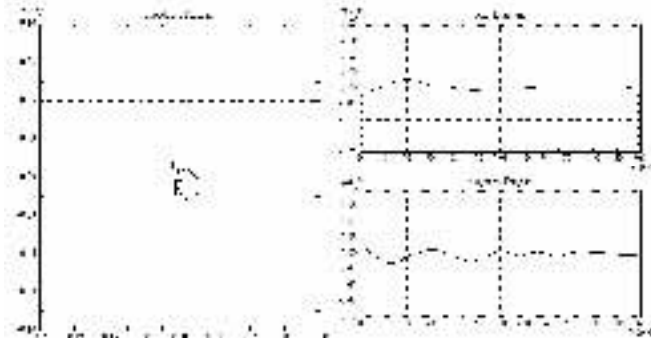
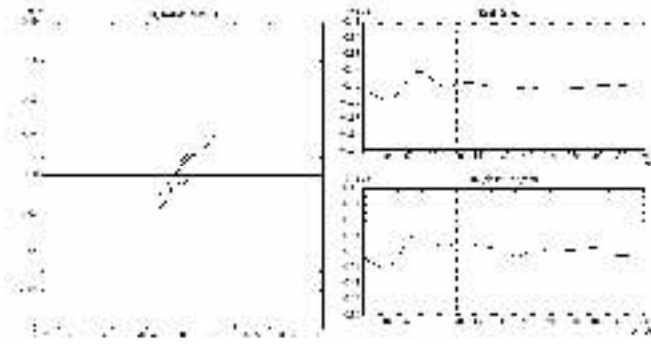
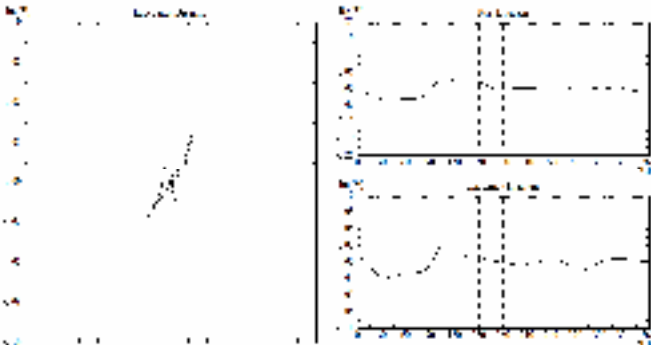

Badania wykonano dla ustawień wykorzystanych w badaniu próbki A.

Próbkę poddano badaniu z wykorzystaniem częstotliwości badania $f = 200$ kHz. Dla wszystkich badań sygnał od lift-off pozycjonowano wertykalnie. W celu wycięcia szumów od drgań sondy i szybkich przemieszczeń zastosowano filtr dolnoprzepustowy. Układ pomiarowy pracował w trybie sondy typu Reflection.

Średnica badanego elementu stanowi 65% średnicy cewki pomiarowej. W zarejestrowanych wynikach zaobserwowano wystarczającą czułość dla automatyzacji metody dla uszkodzeń 1–4. Oznacza to, że uszkodzenia te przy odpowiednim ustawieniu bramek pomiarowych mogą zostać wykryte przy automatyzacji badań. W trakcie badań zauważono wyraźny efekt lokalnego magnesowania materiału wpływający na obrót sygnału dla płaszczyzny pomiarowej. Efekt ten można wyeliminować przez lokalne namagnesowanie badanego elementu.

Tabela 4. Zobrazowanie sygnałowe uszkodzeń – próbka B

Uszkodzenie	Obraz płaszczyzny impedancji elektrycznej
1	

2	 <p>The figure for case 2 consists of three subplots. The left subplot is a scatter plot with a vertical axis ranging from -10 to 10 and a horizontal axis from 0 to 20. It shows a cluster of points around (10, 0) and a single point at approximately (15, 5). The right side contains two time-series plots. The top plot has a vertical axis from -10 to 10 and a horizontal axis from 0 to 20, showing a signal that starts at 0, rises to about 5, and then stays constant. The bottom plot has a vertical axis from -10 to 10 and a horizontal axis from 0 to 20, showing a signal that starts at 0, rises to about 5, and then stays constant.</p>
3	 <p>The figure for case 3 consists of three subplots. The left subplot is a scatter plot with a vertical axis from -10 to 10 and a horizontal axis from 0 to 20, showing a cluster of points around (10, 0) and a single point at approximately (15, 5). The right side contains two time-series plots. The top plot has a vertical axis from -10 to 10 and a horizontal axis from 0 to 20, showing a signal that starts at 0, rises to about 5, and then stays constant. The bottom plot has a vertical axis from -10 to 10 and a horizontal axis from 0 to 20, showing a signal that starts at 0, rises to about 5, and then stays constant.</p>
4	 <p>The figure for case 4 consists of three subplots. The left subplot is a scatter plot with a vertical axis from -10 to 10 and a horizontal axis from 0 to 20, showing a cluster of points around (10, 0) and a single point at approximately (15, 5). The right side contains two time-series plots. The top plot has a vertical axis from -10 to 10 and a horizontal axis from 0 to 20, showing a signal that starts at 0, rises to about 5, and then stays constant. The bottom plot has a vertical axis from -10 to 10 and a horizontal axis from 0 to 20, showing a signal that starts at 0, rises to about 5, and then stays constant.</p>
5	 <p>The figure for case 5 consists of three subplots. The left subplot is a scatter plot with a vertical axis from -10 to 10 and a horizontal axis from 0 to 20, showing a cluster of points around (10, 0) and a single point at approximately (15, 5). The right side contains two time-series plots. The top plot has a vertical axis from -10 to 10 and a horizontal axis from 0 to 20, showing a signal that starts at 0, rises to about 5, and then stays constant. The bottom plot has a vertical axis from -10 to 10 and a horizontal axis from 0 to 20, showing a signal that starts at 0, rises to about 5, and then stays constant.</p>

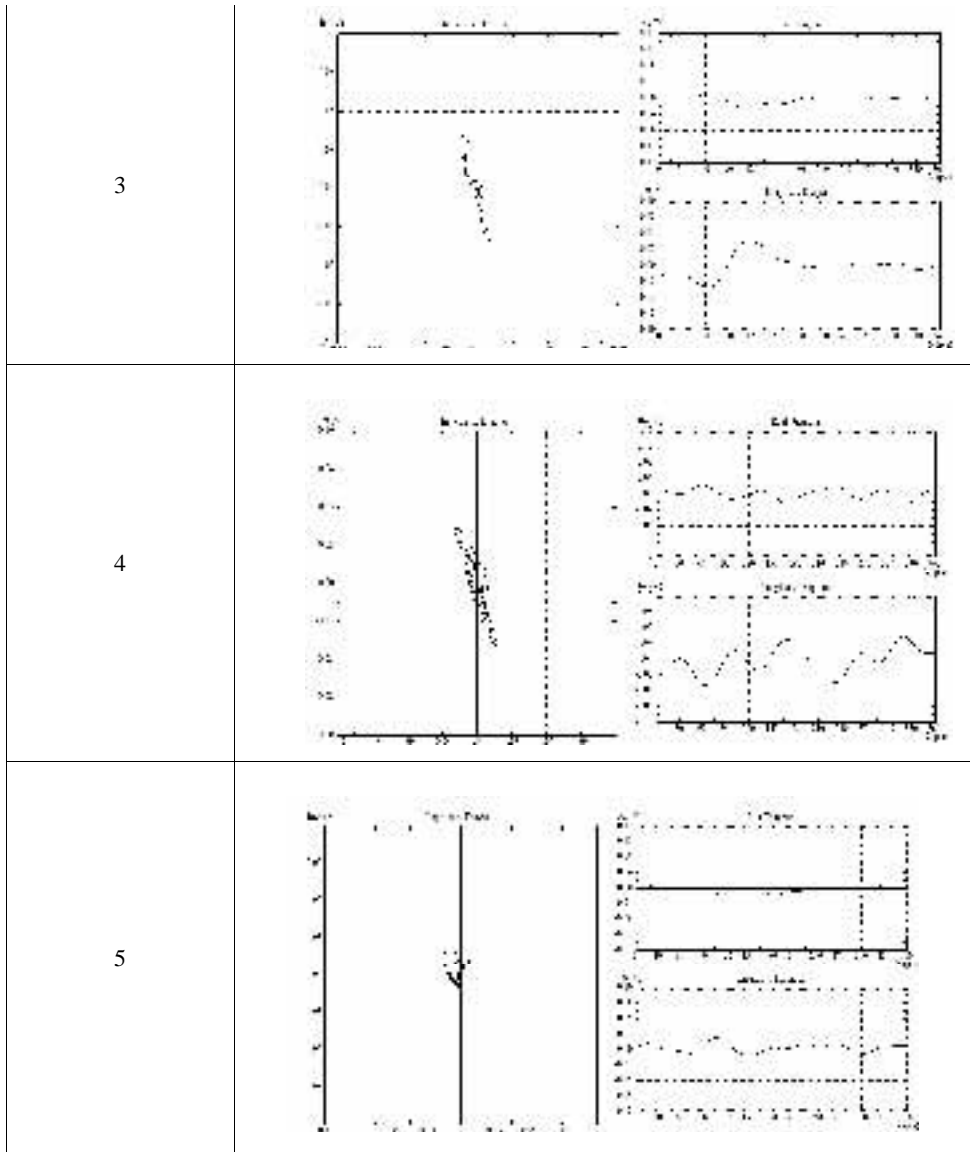
Próbka C

Badania wykonano dla ustawień wykorzystanych w badaniu próbki A i B. Próbkę poddano badaniu z wykorzystaniem częstotliwości badania $f = 200$ kHz. Dla wszystkich badań sygnał od lift-off pozycjonowano wertykalnie. W celu wycięcia szumów od drgań sondy i szybkich przemieszczeń zastosowano filtr dolnoprzepustowy. Układ pomiarowy pracował w trybie sondy typu Reflection.

Średnica badanego elementu stanowi 50% średnicy cewki pomiarowej. Jednakże poziom sygnałów (amplituda i zmiana fazy) są zbliżone dla badań próbki B. Analogicznie jak w poprzednim przypadku w zarejestrowanych wynikach zaobserwowano wystarczającą czułość dla automatyzacji metody dla uszkodzeń 1–4.

Tabela 5. Zobrazowanie sygnałowe uszkodzeń – próbka C

Uszkodzenie	Obraz płaszczyzny impedancji elektrycznej
1	
2	



Wnioski

Wykonane badania z wykorzystaniem metody RFEC pozwoliły na wykrycie zamodelowanych uszkodzeń w wykonanych próbkach (zarówno o charakterze pęknięć, jak i lokalnych zmian geometrii).

Wykorzystanie urządzenia SSEC wraz z sondą RF 2 pozwoliło na wykrycie wszystkich uszkodzeń. Jednakże odpowiedni stosunek sygnał/szum osiągnięto dla uszkodzeń znajdujących na głębokości 0,3–1,5 mm.

Uszkodzenia znajdujące się poniżej wartości 1,5 mm mogą zostać wykryte przy wyższym poziomie wskaźnika sygnał/szum po zmianie parametrów pomiaru (zmniejszenie częstotliwości, zwiększenie wzmocnienia). Jednak takie podejście wymagałoby co najmniej dwóch badań:

- 1) charakteryzowanie płycej położonych uszkodzeń;
- 2) charakteryzowanie uszkodzeń położonych głębiej przy zmodyfikowanych parametrach pomiaru.

Zarejestrowane sygnały od uszkodzeń dają możliwości oceny badanego obiektu w przypadku automatyzacji badań i zastosowania podobnej aparatury w badaniach przemysłowych.

Praca naukowa wykonana w ramach realizacji Programu Strategicznego pn. „Innowacyjne systemy wspomagania technicznego zrównoważonego rozwoju gospodarki” w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka.

Bibliografia

1. Szala J., Boroński D.: Ocena stanu zmęczenia materiału w diagnostyce maszyn i urządzeń. Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji – PIB, Bydgoszcz 2008.
2. Kocańda S., Szala J.: Podstawy obliczeń zmęczeniowych. Wydawnictwo naukowe PWN, Warszawa 1997.
3. Zbrowski A., Giesko T.: Automatyzacja kontroli jakości wyrobów w linii technologicznej wytwarzania wałeczków łożysk tocznych. Technologia i Automatyzacja Montażu 2008 nr 2, s. 36–40.
4. Giesko T., Mazurkiewicz A., Zbrowski A.: Advanced mechatronic system for in-line automated optical inspection of metal parts. 2nd International Conference on Control Instrumentation And Mechatronic Engineering CIM 2009, Melaka, Malaysia 2-3 June 2009, [139] pp. 39.
5. Strona internetowa: www.foerstergroup.com.
6. Matecki K., Zbrowski A.: Koncepcja systemu do wykrywania wewnętrznych wad materiałowych w pierścieniach łożysk tocznych. Materiały konferencyjne XVII Krajowej Konferencji Automatyki KKA-2011, 19–22.06. 2011 Cedzyna – Kielce.
7. Dragan K., Synaszko P.: Wykrywanie korozji i pęknięć z wykorzystaniem nowoczesnych metod diagnostycznych w konstrukcjach typu kompozyt-metal, 38 Krajowa Konferencja Badań Nieniszczących, 20–22.10.2009, Licheń.
8. Dragan K., Klimaszewski S.: Modern techniques for rapid crack detection in aircraft skin structure, 8 Międzynarodowa Konferencja Diagnostyka sa-

molotów i śmigłowców Airdiag 2005, Warszawa, 27–28 października 2005.

9. Strona internetowa: www.ndt-ed.org.
10. Wrzuszczak M.: Wytwarzanie wzorców wad w materiałach przewodzących dla celów diagnostyki wiroprądowej, PAR, 12.2010, <http://www.par.pl/pomiary/czujniki-i-systemy-pomiarowe>.

Recenzent:
Janusz JANECKI

Detection of sub-surface defects with the use of eddy current method

Key words

Material defects, non-destructive testing, eddy current.

Summary

The article presents the possibilities for detecting of the inner material defects in the steel elements by means of the non-destructive defectoscopy technique with the use of the method of Remote Field Eddy Current.