

Adam Kondej*, Tomasz Babul, Sylwester Jończyk

Instytut Mechaniki Precyzyjnej, Warszawa

Aparatura i możliwości badań nieniszczących metodą prądów wirowych w Instytucie Mechaniki Precyzyjnej

Devices and possibilities of non-destructive testing using the eddy current method at Institute of Precision Mechanics

ABSTRACT

This paper describes the basics of the eddy current method, the measuring devices and possibilities of non-destructive testing by this method conducted at the Institute of Precision Mechanics (IMP). The work presents the development of the method at IMP and sample research results carried out using the IMP measuring devices. The conducted research confirms the effectiveness of the eddy current method in assessing the condition of examined material in terms of assessment of surface hardness, detection of material nonconformities and defects, detection of structural changes, differentiation and sorting of materials and thickness measurements of layers and coatings.

Keywords: non-destructive testing, eddy current method, Wirotest

STRESZCZENIE

Artykuł opisuje podstawy metody prądów wirowych, aparaturę pomiarową oraz możliwości badań nieniszczących tą metodą w Instytucie Mechaniki Precyzyjnej (IMP). W pracy przedstawiono rozwój metody w IMP oraz przykładowe wyniki badań, zrealizowanych z wykorzystaniem urządzeń pomiarowych produkcji IMP. Przeprowadzone prace badawcze potwierdzają skuteczność metody prądów wirowych do oceny stanu badanego materiału pod kątem m.in.: oceny twardości powierzchniowej, wykrywania niezgodności i wad materiałowych, wykrywania zmian strukturalnych, rozróżniania i sortowania materiałów, pomiarów grubości warstw i powłok.

Słowa kluczowe: badania nieniszczące, metoda prądów wirowych, Wirotest

1. Metoda prądów wirowych

Metoda prądów wirowych (ET – Electromagnetic Testing lub Eddy Current Testing) opiera się na zjawisku indukcji elektromagnetycznej. Polega ona na indukowaniu prądu w materiale przewodzącym, w wyniku działania na niego zmiennego pola magnetycznego. Zmienne pole magnetyczne występuje wskutek zasilania cewki indukcyjnej prądem zmiennym I . W cewce, jak i wokół niej, indukowane jest zmienne pole magnetyczne H , które wnika w badany materiał indukując w nim prądy wirowe EC. Prądy wirowe EC indukują swoje własne pole magnetyczne H_{EC} , które oddziałuje – osłabia, pole magnetyczne cewki H (rys. 1). Jeżeli materiał badany jest jednorodny to osłabienie jest stałe. Zmiany w materiale badanym powodują zmianę osłabienia. Analiza wartości amplitudy sygnału wyjściowego bądź amplitudy i przesunięcia fazowego pozwala na ocenę stanu badanego materiału [1-4].

Głębokości wnikania prądów wirowych określane są przez standardową głębokość wnikania prądów wirowych (δ). Nie określa ona rzeczywistych wartości głębokości, lecz wyznacza umowną głębokość, przy której amplituda prądów zmniejsza się e -krotnie, czyli około 2,72 razy, w stosunku do amplitudy na powierzchni materiału. Standardowa głębokość wnikania prądów wirowych jest opisana zależnością (1) [2, 3].

Wpływ niezgodności materiałowych oraz zmian

strukturalnych na sygnały przetworników jest ograniczony do tzw. efektywnej głębokości wnikania prądów wirowych. Jest to głębokość trzech standardowych głębokości wnikania prądów wirowych (3δ) [2, 3].

$$\delta = \frac{503}{\sqrt{f \cdot \gamma \cdot \mu_r}} \quad (1)$$

gdzie:

δ – standardowa głębokość wnikania prądów wirowych [mm],
 f – częstotliwość pracy przetwornika [Hz], γ – przewodność elektryczna właściwa materiału [MS/m], μ_r – przenikalność magnetyczna względna elementu, bezwymiarowa.

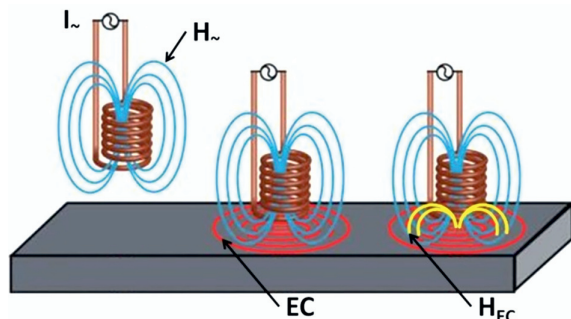
Wybór częstotliwości pracy przetwornika zapewnia możliwość regulowania głębokości wnikania prądów wirowych, a tym samym wybór obszarów, jakie mają być badane. Do badania warstw wierzchnich stosuje się przetworniki o wysokiej częstotliwości pracy, rzędu kilku MHz. Natomiast do wykrywania zmian na pewnej głębokości od powierzchni należy używać przetworników o niższej częstotliwości, rzędu od kilku do kilkuset kHz [2, 3].

Badania metodą prądów wirowych polegają na analizie zmian wskazań urządzenia pomiarowego w odniesieniu do wskazania na powierzchni elementu bez wad i o takiej samej strukturze jak materiał badany. Jest to metoda porównawcza, wymagająca korzystania z wzorców bądź próbek odniesienia.

Główne kierunki wykorzystania metody ET to wykrywanie wad materiałowych - defektoskopia, badania właściwości

*Autor korespondencyjny. E-mail: adam.kondej@imp.edu.pl

materiałów – strukturoskopia oraz określanie wymiarów (głównie pomiary grubości warstw i powłok).



Rys. 1. Podstawy metody prądów wirowych [4]
Fig. 1. Basics of the eddy current method [4]

2. Rozwój badań nieniszczących metodą ET w IMP

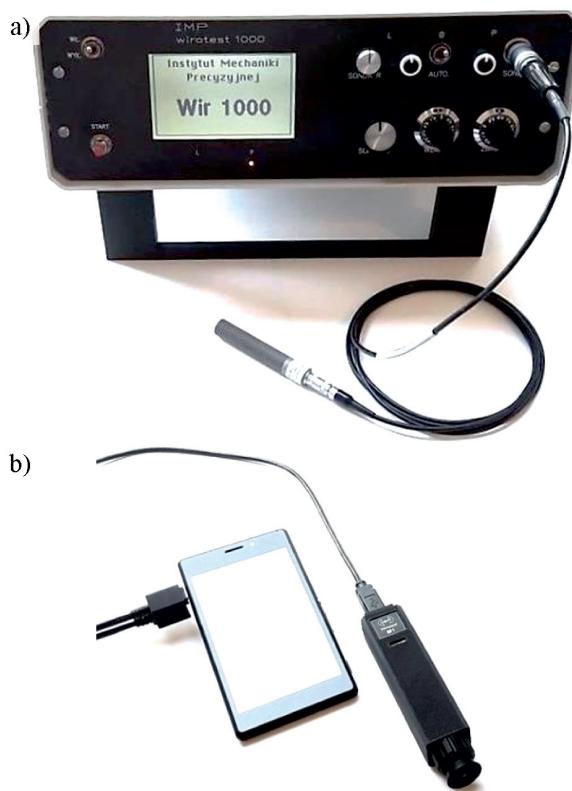
Prace nad zastosowaniem metody prądów wirowych do badań nieniszczących części maszyn i urządzeń są prowadzone w IMP od blisko 50 lat. Główne kierunki badań to wykrywanie wad materiałowych (pęknięcia) oraz strukturalnych (austenit szczałkowy, przypalenia szlifierskie), pomiar naprężeń własnych, ocena twardości powierzchniowej.

Kierunek prac badawczych i rozwojowych był uwarunkowany możliwością zastosowania praktycznej metody na potrzeby przemysłu. W tym celu konstruowano w IMP aparaturę pomiarową – urządzenia oraz sondy. Opracowywanie sond specjalnych dla konkretnych, często skomplikowanych wyrobów, było szczególnie ważne w latach, gdy zakup za dewizy był dla wielu zakładów trudny, a niekiedy niemożliwy. Na przestrzeni lat skonstruowano i wykonano szereg urządzeń do badania części, od dużych stacjonarnych typu Wirotest 01, 02, 03 i 04, poprzez mniejsze Wirotest 201, 202 i 400, do przenośnych typu Wirotest 301 i 302. Urządzenia te były przedmiotem wdrożeń w zakładach krajowych, a także zagranicznych.

W 1996 roku rozpoczęto proces akredytacji laboratoriów badawczych IMP przez PCA. W 2001 roku Laboratorium Badań i Oceny Własności Mechanicznych Materiałów, Części Maszyn i Konstrukcji (Laboratorium LB-4) otrzymało akredytację (nr AB 342) na badania nieniszczące nieciągłości i naprężeń. Laboratorium LB-4 uczestniczyło w badaniach międzylaboratoryjnych, m.in. z Politechniką Warszawską oraz z zakładem Bonatrans (Czechy) w zakresie pomiarów naprężeń metodą prądów wirowych, z Laboratorium Badań Nieniszczących CBMK Instytutu Lotnictwa w zakresie wykrywania nieciągłości.

W ostatnich latach powstał przenośny defektoskop – Wirotest 1000 (rys. 2a), zastępujący wcześniejszy model 302 (rys. 3). W dalszym ciągu są konstruowane sondy pomiarowe, zarówno uniwersalne, jak i specjalne, przeznaczone dla konkretnych zastosowań. Obecnie, istotnym kierunkiem prowadzonych prac jest automatyzacja pomiarów. Opracowano i wykonano przenośne oraz stacjonarne stanowisko do kontroli kół zębatych, a także uniwersalne stanowisko automatyczne do badania elementów o różnym kształcie – AutoWir-S1 [5]. Innym kierunkiem jest

miniaturyzacja urządzeń pomiarowych. W wyniku prac w 2017 roku powstał zminiaturyzowany układ pomiarowy do badań ET – Wirotest M1 (rys. 2b) [4, 6].



Rys. 2. Urządzenia pomiarowe IMP: a) Wirotest 1000, b) Wirotest M1

Fig. 2. IMP measuring devices: a) Wirotest 1000, b) Wirotest M1

3. Współpraca z przemysłem lotniczym

Badania nieniszczące znajdują zastosowanie do kontroli jakości części i elementów odpowiedzialnych, np. stosowanych w silnikach lotniczych. Przemysł lotniczy jest obszarem, w którym większość metod NDT znajduje zastosowanie, również metoda ET. W ostatnich latach IMP nawiązała ścisłą współpracę z zakładami produkcyjnymi z tej branży, czego efektem były wdrożenia aparatury pomiarowej oraz wspólnie realizowane projekty badawcze.

Jednym z przykładów współpracy jest zastosowanie urządzenia typu Wirotest 401 wraz z sondami aktywnymi do badania łopatek turbin. Na potrzeby zakładu wykonano kilka rodzajów sond specjalnych: sondę pazurkową do wykrywania pęknięć w zamkach łopatek wirnika turbiny, sondę palcową kątową do sprawdzania tarczy wirnika sprężarki, sondę palcową do sprawdzania kanałków w tarczy wirnika sprężarki, sondę palcową czołową do sprawdzania czół tarczy wirnika oraz sondy palcowe grzbietowe do sprawdzania krawędzi natarcia. Układ pomiarowy pracuje od wielu lat w jednym z zakładów WSK.

Zakłady przemysłu lotniczego, stowarzyszone w tzw. „Dolinie Lotniczej”, sygnalizowały potrzebę opracowania metody badań i aparatury do nieniszczącej kontroli hartowanych indukcyjnie lotniczych kół zębatych. W wyniku tego w latach 2008-2013 został zrealizowany projekt PO IG 1.1.2

pt. „Opracowanie techniki kontroli wiroprądami struktury, naprężeń i wad w lotniczych kołach zębatych zahartowanych indukcyjnie”.

Innym projektem badawczym, zrealizowanym w latach 2012-2014, wspólnie z WSK „PZL-Rzeszów” S.A. oraz z Wydziałem Inżynierii Materiałowej PW był projekt INNOTECH pt. „Zastosowanie i wdrożenie prądów wirowych do badania i wykrywania wad materiałowych na częściach lotniczych krytycznych wirujących wykonanych ze stali niskostopowych”.

Od roku 2015 jest realizowany projekt PBS pt. „Opracowanie nieniszczących metod charakteryzacji warstw nawęglanych w kołach zębatych” wspólnie z Politechniką Rzeszowską oraz Instytutem Podstawowych Problemów Techniki PAN.

4. Przykłady badań metodą ET w IMP

4.1 Ocena twardości łusek mosiężnych po obróbce cieplnej

W IMP przeprowadzono nieniszczącą kontrolę jakości metodą ET zbioru 993 sztuk łusek mosiężnych po obróbce cieplnej. Finalne elementy, uznane za poprawnie wykonane, muszą charakteryzować się twardością, zawierającą się w ściśle określonym przedziale – od 164 HV5 do 175 HV5. Do określenia kryterium oceny twardości metodą prądów wirowych wykorzystano wzorce o twardości 164 HV5 i 175 HV5. Sygnały wyjściowe od tych wzorców przyjęto jako graniczne. Elementy, dla których wskazania mieściły się w przedziale wyznaczonym przez sygnały graniczne były uznawane jako dobre. Do badań zastosowano Wirotest 302 z sondą przelotową 10 kHz (rys. 3). Badania zostały przeprowadzone w sposób ręczny [7].

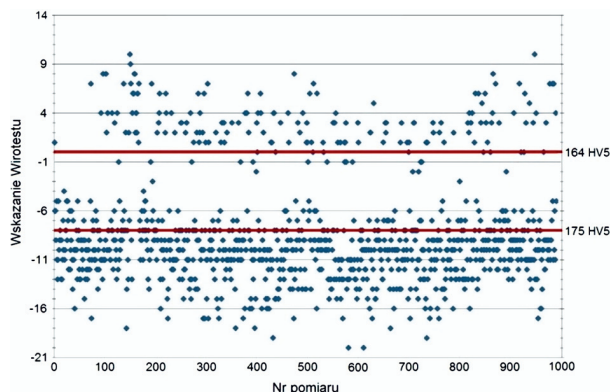


Rys. 3. Badanie łusek mosiężnych – Wirotest 302 z sondą przelotową

Fig. 3. Measurement of a brass shells – Wirotest 302 with an encircling coil

Wyniki pomiarów przedstawiono na rysunku 4. Do procenta przekazano 607 szt. (61,1%) łusek o twardości >175 HV5, 154 szt. (15,5%) łusek o twardości <164 HV5. Jedynie 232 szt. (23,4%) elementów spełniało kryterium odbioru.

Kontrola twardości została przeprowadzona w warunkach przemysłowych w zakładzie producenta. W ramach kontroli, z wykorzystaniem wzorca twardości 175 HV5, przebadano 25 000 szt. łusek pochodzących z różnych partii produkcyjnych. Prędkość kontroli wynosiła około 350÷400 szt./godz. W wyniku kontroli około 40% elementów zostało uznane za dobre lub granicznie dobre [7].

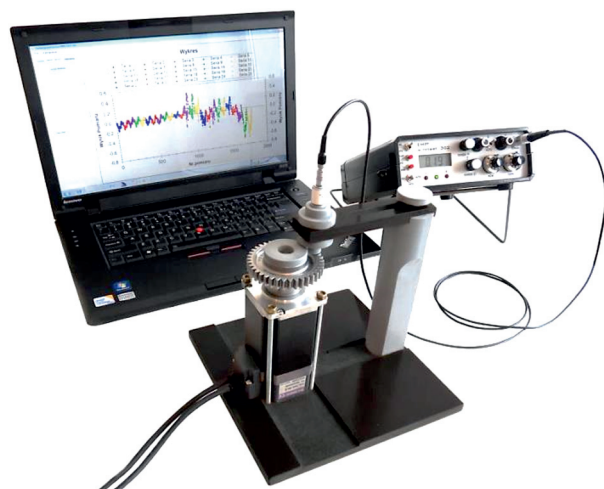


Rys. 4. Wyniki badań łusek mosiężnych [7]

Fig. 4. Results of the brass shells measurement [7]

4.2 Wykrywanie pęknięć w kołach zębatych hartowanych indukcyjnie

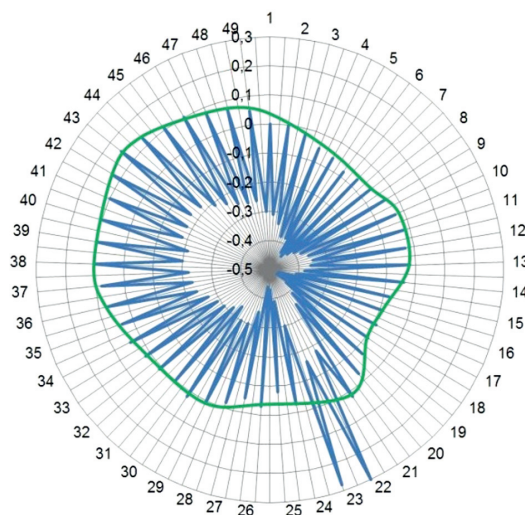
Wykrywanie pęknięć w lotniczych kołach zębatych było jednym z głównych tematów projektu badawczego realizowanego przez IMP w ostatnich latach. Obróbka cieplna, polegająca na hartowaniu indukcyjnym uzębień kół, powodowała powstawanie pęknięć hartowniczych u podstawy zębów. Do wykrywania tego typu wad opracowano metodykę badań nieniszczących metodą ET oraz stanowiska pomiarowe. Jednym z nich jest przenośne stanowisko pomiarowe, współpracujące z defektoskopami typu Wirotest 302 oraz 1000 (rys. 5). Dzięki zastosowaniu zmechanizowanego przemieszczania elementu badanego względem sondy pomiarowej wyeliminowano błędy przypadkowe, wynikające z czynnika ludzkiego, zwiększono powtarzalność oraz skrócono czas pomiarów.



Rys. 5. Badanie kół zębatych na przenośnym stanowisku automatycznym – Wirotest 302 z sondą stykową

Fig. 5. Measurement of gear wheels on a portable automatic stand – Wirotest 302 with a surface probe

Na rysunku 6 zamieszczono wykres radarowy wskazań Wirotestu 302 z badań jednego z wadliwych kół zębatych. Do pomiarów użyto sondę stykową o częstotliwości pracy 250 kHz. Pomiar odbywał się skokowo – koło zębate obracało się o 1/2 zęba co 1 sekundę, w chwili zatrzymania następowała rejestracja wskazań. Wyraźny wzrost sygnału na zębach nr 22 oraz 23 wskazuje na obecność pęknięć hartowniczych.

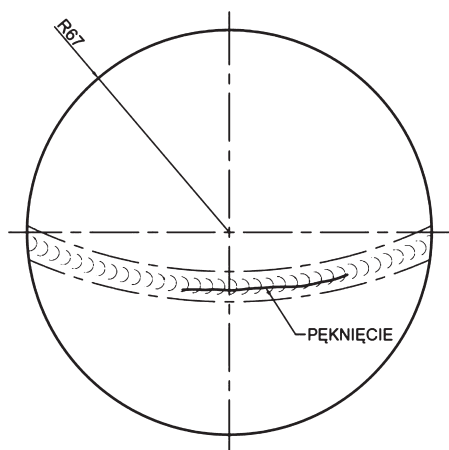


Rys. 6. Wykres radarowy wskazań Wirotestu 302
Fig. 6. The radar graph of the Wirotest 302 indications

4.3 Wykrywanie pęknięć w złączu spawanym ze stali martenzytycznej

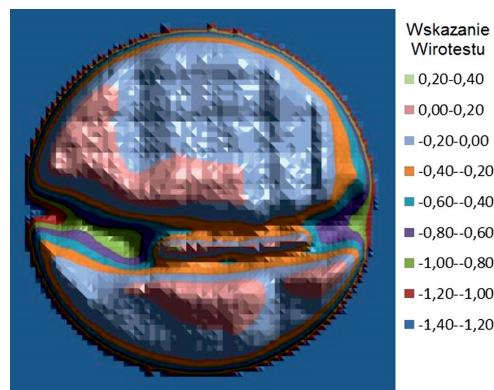
Przedmiotem badań były złącza spawane ze stali nierdzewnej X5CrNiCuNb16-4 (wg EN 1.4542) wykonane metodą TIG. Złącza wycięto z blachy o grubości 3 mm, pracującej jako taśma prasująca do produkcji płyt pilśniowych typu MDF. Była ona poddawana cyklicznym obciążeniom, w wyniku których następowały lokalne pęknięcia. Fragmenty z wykrytymi wadami były wycinane, a ubytki taśmy uzupełniane poprzez wstawianie nowej. Lico spoiny czołowej usuwano mechanicznie, zatem spoina nie powodowała zmian geometrii powierzchni [8].

Geometrię i wymiary złącza wadliwego – z obecnym pęknięciem, przestawiono na rysunku 6. Do badań zastosowano automatyczne stanowisko pomiarowe AutoWir-S1 [5] oraz Wirotest 302 z sondą stykową 1 MHz.



Rys. 7. Geometria złącza spawanego z obecnym pęknięciem
Fig. 7. Geometry of the welded joint with a crack present

Wyniki skanowania powierzchni złącza przedstawiono w formie wykresu powierzchniowego na rysunku 8. Otrzymana mapa obrazuje kształt badanego elementu, miejsce występowania spoiny i strefy wpływu ciepła, a także ujawnia pęknięcie.

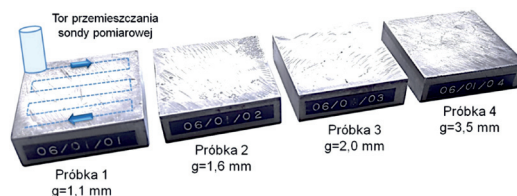


Rys. 8. Wykres powierzchniowy wskazań Wirotestu 302 [8]
Fig. 8. Surface graph of the Wirotest 302 indications [8]

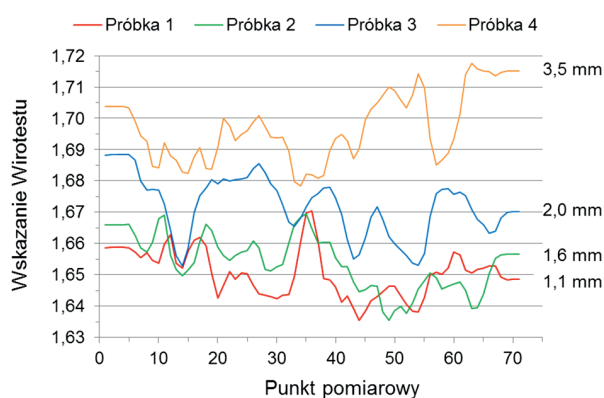
4.4 Ocena grubości warstw nawęglonych

Pomiary grubości warstw nawęglonych przeprowadzono na stalowych próbkach wyciętych z płaszcza komory pieca do spalania śmieci. Próbki pochodzą z miejsc o różnym stopniu nawęglenia. Badaniom poddano cztery próbki o różnych grubościach warstwy nawęglonej: 1,1, 1,6, 2,0 i 3,5 mm (rys. 9) [6].

W badaniach zastosowano Wirotest M1 z sondą stykową 268 kHz oraz automatyczne stanowisko AutoWir-1. Meandrowe skanowanie powierzchni próbki odbywało się z prędkością 0,06 m/s. Podczas skanowania zebrano 71 punktów pomiarowych [6].



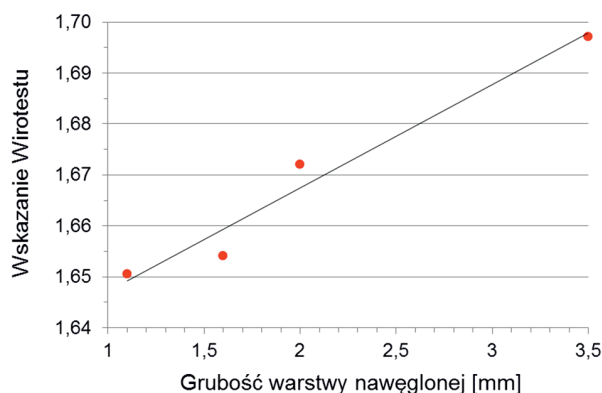
Rys. 9. Próbki z warstwami nawęglonymi o różnej grubości (g) [6]
Fig. 9. Samples with carburized layers of different thicknesses (g) [6]



Rys. 10. Wyniki pomiarów na próbkach nawęglonych [6]
Fig. 10. Measurement results of carburized samples [6]

Wyniki pomiarów przedstawiono w formie wykresu liniowego na rysunku 10. Z przebiegu sygnału wynika, że powierzchnia materiału badanego nie jest jednorodna. Pomimo tego, możliwe jest rozróżnienie próbek pod względem grubości warstwy nawęglonej. Po uśrednieniu wyników skanowania powierzchni otrzymano wartości sygnałów,

dla których wyznaczono zależność wskazań Wirotestu M1 od grubości warstwy nawęglonej (rys. 11). Wraz ze wzrostem grubości rośnie wartość wskazania urządzenia pomiarowego.



Rys. 11. Zależność sygnału Wirotestu M1 od grubości warstwy nawęglonej

Fig. 11. The dependence of the Wiritest M1 signal on the thickness of the carburized layer

Charakteryzacja warstwy nawęglonej obejmuje pomiary grubości oraz twardości. Przykład zastosowania metody prądów wirowych do oceny twardości powierzchniowej warstw nawęglonych przedstawiono w pracy [9].

5. Podsumowanie

Instytut Mechaniki Precyzyjnej posiada wieloletnie doświadczenie w prowadzeniu badań metodą prądów wirowych. Jako jeden z pierwszych w kraju zajmował się w opracowywaniem własnych urządzeń pomiarowych. Niegdyś najmniej znana metoda badań nieniszczących spośród sześciu podstawowych, obecnie jest coraz częściej stosowana w praktyce. Dzięki dynamicznemu rozwojowi elektroniki, stosowaniu specjalistycznych rozwiązań programistycznych, metoda ET znajduje nowe możliwości aplikacyjne. Duża czułość oraz wiarygodność wyników badania stawia ją na istotnej pozycji wśród metod stosowanych przez takie sektory przemysłowe jak lotniczy, jądrowy, kosmiczny, chemiczny czy maszynowy.

Przenośne stanowisko do kontroli kół zębatach oraz automatyczne stanowisko AutoWir-S1 opracowano i wykonano

w ramach projektu badawczego POIG.01.01.02-14-116/09-00 pt. „Opracowanie techniki kontroli wiropłukami struktury, naprężeń i wad w lotniczych kołach zębatych zahartowanych indukcyjnie”.

Opracowanie i wykonanie Wirotestu M1 zrealizowano w Instytucie Mechaniki Precyzyjnej w ramach pracy statutowej w 2017 r. pt. „Opracowanie zminiaturyzowanego układu pomiarowego do badań nieniszczących metodą prądów wirowych”, nr 13.1.01.416.00.

Badania warstw nawęglonych realizowano w ramach projektu badawczego PBS3/B/40/2015 „AirLot” pt. „Opracowanie nieniszczących metod charakteryzacji warstw nawęglanych w kołach zębatych”.

6. Literatura/References

- [1] C. Dybiec, S. Włodarczyk, „Badania nieniszczące metodą prądów wirowych – możliwości zastosowań”, *Ochrona przed korozją*, no. 3, pp. 67-74, 2010.
- [2] A. Lewińska-Romicka, *Badania nieniszczące. Podstawy defektoskopii*. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2001.
- [3] A. Lewińska-Romicka, *Badania materiałów metodą prądów wirowych*. Warszawa: Biuro Gamma, 2007.
- [4] A. Kondej, A. Szczepański, „Zminiaturyzowane urządzenie pomiarowe do badań nieniszczących metodą prądów wirowych – Wirotest serii M”, *Przegląd Spawalnictwa*, vol. 89, no. 9, pp. 26-30, 2017. DOI 10.26628/ps.v89i9.808
- [5] A. Kondej, M. Baranowski, K. Niedźwiedzki, S. Jończyk, A. Szczepański, „Automatyczne stanowisko do badań nieniszczących metodą prądów wirowych”, *Inżynieria Powierzchni*, no. 1, pp. 57-62, 2014.
- [6] A. Kondej, „Zminiaturyzowane urządzenie pomiarowe do badań nieniszczących metodą prądów wirowych Wirotest M1 – możliwości zastosowania”, *Inżynieria Powierzchni*, no. 3, 2017, w druku
- [7] S. Jończyk, T. Samborski, S. Włodarczyk, „Nieniszczące badania metodą prądów wirowych w odniesieniu do pomiarów twardości HV jako komplementarna kontrola jakości wyrobów mosiężnych”, *Inżynieria Powierzchni*, no. 1, pp. 18-23, 2016.
- [8] A. Kondej, M. Baranowski, „Badania złączy spawanych ze stali martenzytycznej metodą prądów wirowych”, *Przegląd Spawalnictwa*, vol. 86, no. 6, pp. 12-16, 2014. DOI 10.26628/ps.v86i6.66
- [9] S. Jończyk, A. Kondej, M. Baranowski, S. Włodarczyk, T. Samborski, „Warstwy nawęglane - korelacja oznaczeń metodą prądów wirowych i pomiarów twardości”, *Przegląd Spawalnictwa*, vol. 88, no. 10, pp. 16-19, 2016. DOI 10.26628/ps.v88i10.678

- 1) Prof. zw. dr inż. dr h.c. Ryszard Sikora, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
- 2) Prof. dr hab. inż. Jerzy Nowacki, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
- 3) Dr inż. Przemysław Łopato, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
- 4) Dr Barbara Grochowalska, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
- 5) Mgr inż. Marek Lipnicki, Koli sp. z o.o.
- 6) Dr hab. inż. Jacek Szelażek, prof. IPPT, IPPT PAN
- 7) Dr inż. Michał Kawiak, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
- 8) Dr inż. Grzegorz Psuj, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie