
XXVII Seminarium
NIENISZCZĄCE BADANIA MATERIAŁÓW
Zakopane, 14-17 maja 2024

**METODA PRĄDÓW WIROWYCH Z ZASTOSOWANIEM SOND
WIELOCEWKOWYCH W BADANIACH OTWORÓW**

Dominik KUKLA^{1,2}, Adam KONDEJ², Sylwester JOŃCZYK², Mateusz KOPEĆ¹

¹ Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa

² Sieć Badawcza Łukasiewicz – Warszawski Instytut Technologiczny

dkukla@ippt.pan.pl

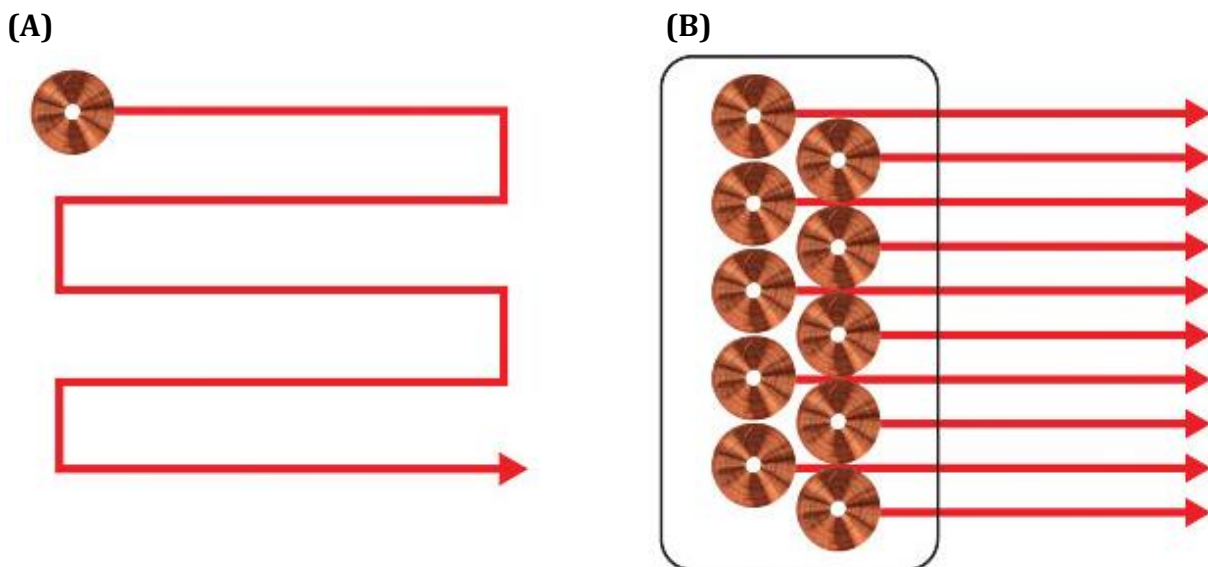
STRESZCZENIE

W pracy przedstawiono możliwości metody prądów wirowych z wykorzystaniem sond wielocewkowych (ECA - Eddy Current Array) do oceny stanu technicznego gładko-lufowych armat czołgowych oraz otworów rotorów pompy zębatej. Badania dotyczyły identyfikacji pęknięć oraz ubytków powłok ochronnych na powierzchni wewnętrznej otworów. Wskazano możliwości zastosowania skanera do badania powierzchni otworów i oceniono efektywność rozwiązań własnych jak i komercyjnych. Opracowane urządzenie skanujące współpracujące z elastyczną sondą wielocewkową pozwala na nieinwazyjną ocenę stanu powierzchni wewnętrznej otworów na obecność defektów i ubytków eksploatacyjnych w czasie kilku minut. Z uwagi na łatwość wykonania pomiaru oraz mobilny charakter aparatury pomiarowej możliwe jest wykonanie pomiarów w niemal dowolnych warunkach. Możliwa jest także implementacja procedur monitorujących, pozwalających na oszacowanie czasu bezpiecznej eksploatacji w oparciu o cyklicznie wykonywane badania stanu powierzchni. Przewaga opisanej metody w porównaniu do stosowanych w tym obszarze badań endoskopowych wynika z możliwości detekcji nieciągłości, w tym podpowierzchniowych, mogących mieć krytyczny wpływ na bezpieczeństwo eksploatacji. Opisano ponadto najnowsze rozwiązania w zakresie techniki ECA dotyczące sond dedykowanych do badania spoin, przekładni zębatach oraz rur z zastosowaniem zarówno sond wewnętrznych jak i systemów skanujących powierzchnie zewnętrzne rurociągów.

1. WSTĘP

Diagnostyka elementów maszyn i konstrukcji metodą prądów wirowych (ET – Eddy Current Testing) obejmuje przede wszystkim detekcję nieciągłości (pęknięć) oraz ubytków w strukturze materiałów konduktywnych, czyli defektoskopię. W ostatnich latach powstały zespoły badawcze, podejmujące badania także w strukturoskopii, między innymi w obszarze oceny zmian mikrostruktury materiałów, powstałych w efekcie przeprowadzonych obróbek cieplnych i cieplno-chemicznych [1][2], powierzchniowych obróbek wykańczających [3][4] oraz lokalnych zmian właściwości na skutek oddziaływania warunków eksploatacyjnych. Powyższe badania realizowane są głównie za pomocą komercyjnych defektoskopów obsługujących jednocewkowe sondy absolutne lub, jak w przypadku diagnostyki rur wymienników, sond różnicowych. Rzadziej wykorzystywane są autorskie rozwiązania, takie jak seria urządzeń pod nazwą WIROTEST opracowanych i wykonywanych przez kadrę badawczą Łukasiewicz - Warszawskiego Instytutu Technologicznego [5][6].

Z początkiem XXI wieku pojawiła się technika ECA pozwalająca na zwiększenie szybkości i efektywności badania poprzez możliwość skanowania dużej powierzchni, dzięki wykorzystaniu sond wielocewkowych. Jest to rozwinięcie metody prądów wirowych, w której stosuje się sondy zbudowane z wielu cewek ułożonych liniowo, najczęściej w dwóch liniach przesuniętych względem siebie o promień cewki. Rozwiązanie to ma zapewnić całkowite „krycie” skanowanej powierzchni i zapobiega pominięciu pęknięcia zorientowanego równoległe do kierunku skanowania oraz położonego pomiędzy dwiema sąsiednimi cewkami. Ponadto pozwala to wyeliminować skanowanie rastrowe, niezbędne w badaniu sondą tradycyjną (rys. 1a), co w znaczący sposób zwiększa szybkości badania, a także jego precyzję.



Rys. 1. Schemat badania powierzchni sondą absolutną (pojedyncza cewka) [A] i sondą wielocewkową ECA [B] [7]

W sondach wielocewkowych stosuje się multiplikację sygnału, polegającej na chwilowej (piko

sekundowej) aktywacji i dezaktywacji cewek w określonych sekcjach sondy. Zastosowana multiplikacja sygnału pozwala uniknąć zakłóceń pochodzących od wzbudzenia prądów wirowych w sąsiednich cewkach (wzajemna indukcyjność). Multiplikowanie sygnału maksymalizuje także rozdzielczość sondy. Schemat działania multiplikatora pokazano na rysunku 2.



Rys. 2. Sonda wielocewkowa z pokazanym mechanizmem multiplikacji sygnału [7]

Multiplikacja sygnału to proces, w którym wiele analogowych sygnałów z pojedynczej cewki jest połączony w jeden cyfrowy sygnał. Takie rozwiązanie ułatwia transmisję danych, ich obróbkę oraz interpretację wyników, dzięki zobrazowaniu w postaci tzw. C-skanu, czyli mapy powierzchniowej badanego detalu, gdzie defekty ujawniane są z różną intensywnością barwy w zależności od ich wielkości oraz głębokości ich zalegania. Jest to odwzorowanie zmiany amplitudy sygnału na palecie barwnej. W stosunku do tradycyjnego badania pojedynczą sondą absolutną (lub różnicową) do istotnych zalet metody ECA można zaliczyć:

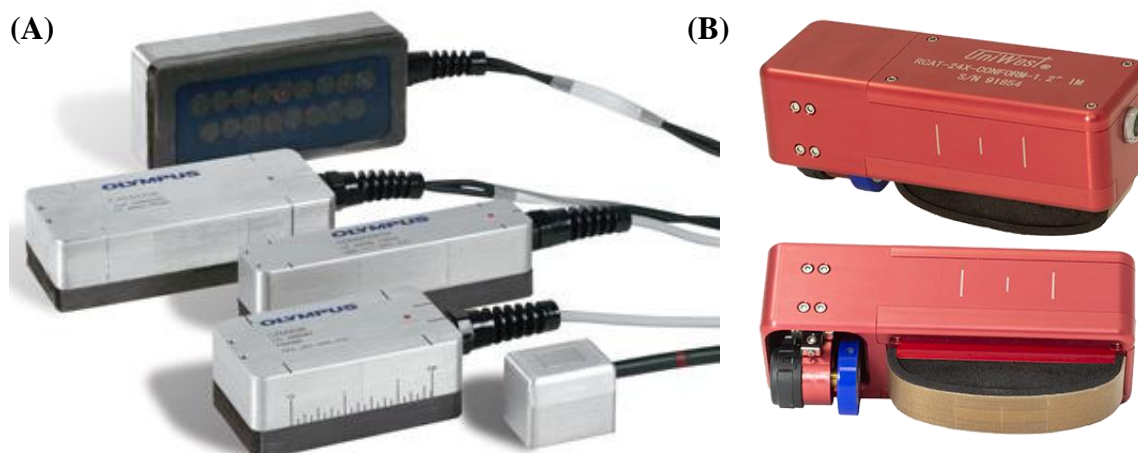
- możliwość skanowania znacznie większego obszaru za jednym razem przy zachowaniu wysokiej rozdzielczości,
- mniejsze zapotrzebowanie na skomplikowaną automatykę w celu zapewnienia powtarzalnego prowadzenia sondy podczas skanowania badanej powierzchni,
- zwiększona efektywność identyfikacji i oceny defektów dzięki obrazowaniu wyników techniką C-skan,
- możliwość diagnozowania detali o rozwiniętej powierzchni, dzięki zastosowaniu sond elastycznych dających dopasować się do profilu badanej części.

Techniką ECA, określaną mianem macierzowych prądów wirowych, mogą być wykrywane defekty powierzchniowe i podpowierzchniowe oraz efekty korozji. Może być ona stosowana w diagnostyce przemysłowej takich obiektów jak zbiorniki magazynowe różnych kształtów, rurociągi, czy konstrukcje stalowe. Technikę tę można stosować zarówno do pomiaru grubości stali, jak i wykrywania i mapowania ubytków korozyjnych oraz pęknięć, czy inspekcji spoin, zarówno w materiałach ferro jak i nieferromagnetycznych.

2. SONDY WIELOCEWKOWE

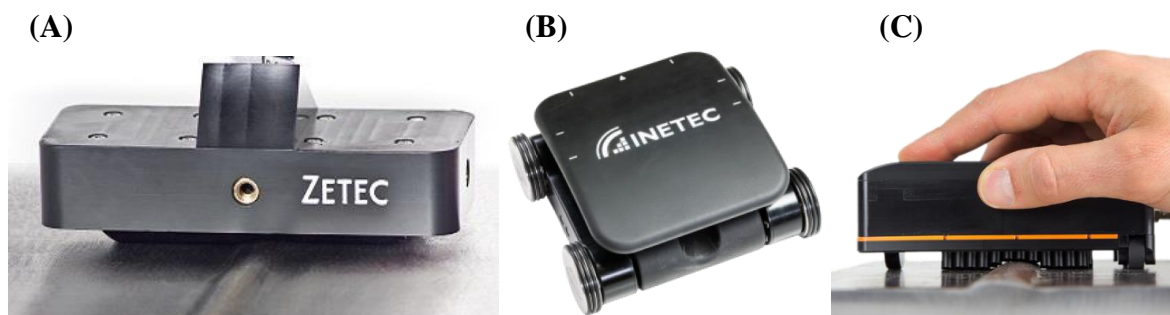
Sondy wielocewkowe w komercyjnej ofercie dedykowane są do badania powierzchni płaskich (rys. 3), spoin (sondy z kompensacją efektu oddalenia, np. sonda typu Sharck firmy EDDYFI – rys. 4), otworów i rur (sondy wewnętrzne, często wyposażone także w cewki obwodowe, pracujące w technice ECT - Eddy Current Testing lub RFT - Remote Field Testing – rys. 5)

oraz detali o złożonej geometrii (sondy elastyczne - rys. 6). Sondy wszystkich producentów wyposażone są (standardowo lub opcjonalnie) w enkodery ułatwiające lokalizację identyfikowanych uszkodzeń. Nie dotyczy to większości sond wewnętrznych, z uwagi na ich ograniczenia wymiarowe.



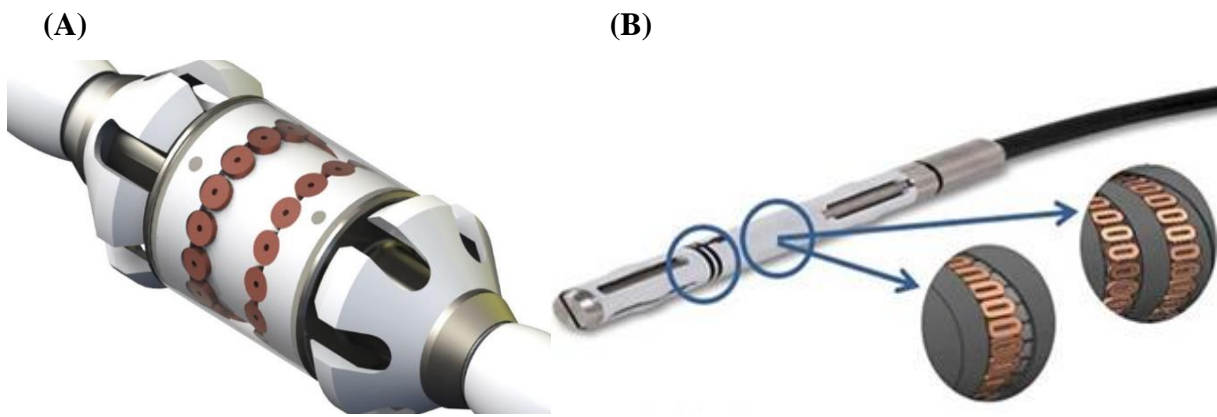
Rys. 3. Przykładowe sondy ECA do badania powierzchni płaskich firmy OLYMPUS (A) [7] oraz UNIVEST (B) [8]

Sondy ECA opracowane do badania spoin wyposażone są w zestaw cewek umieszczonych na sprężynach, dzięki czemu dopasowują się do geometrii lica lub grani spoiny, potrafią w jednym przesunięciu wykryć wżery i pęknięcia powierzchni w dowolnej orientacji, zarówno w spoinie jak i w strefie wpływu ciepła. Sondy zintegrowane są z przetwornikiem ruchu liniowego, co umożliwia pozycjonowanie i wymiarowanie defektów.



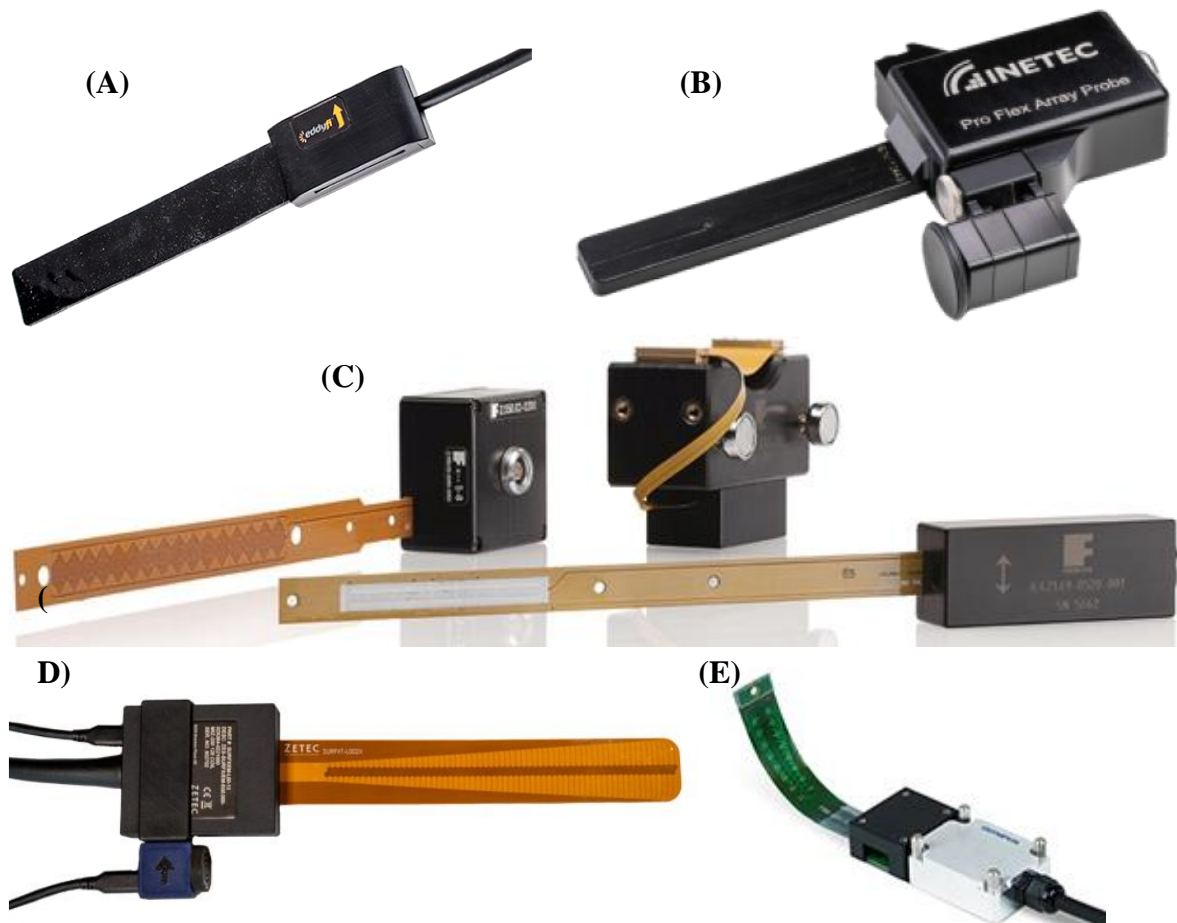
Rys. 4. Przykładowe sondy ECA dedykowane do inspekcji spoin firmy ZETEC (A) [9], INETEC (B) [10] oraz EDDYFI (C) [11]

W obszarze defektoskopów prądowiowych, wyposażonych w opcję multiplikacji sygnału i obsługę sond wielocewkowych, na rynku światowym dostępna jest obecnie oferta firm OLYMPUS, EDDYFI (wzbogacona potencjałem firmy ZETEC, przejętej w 2022 roku), UNIWEST, FOERSTER, INETEC oraz chińskiego producenta EDDYSUN.



Rys. 5. Sondy wielocewkowe z obwodowym ułożeniem cewek, przeznaczone do badania rur i otworów. Grafiki prezentowane przez firmy EDDYFI (A) [11] oraz ZETEC (B) [9]

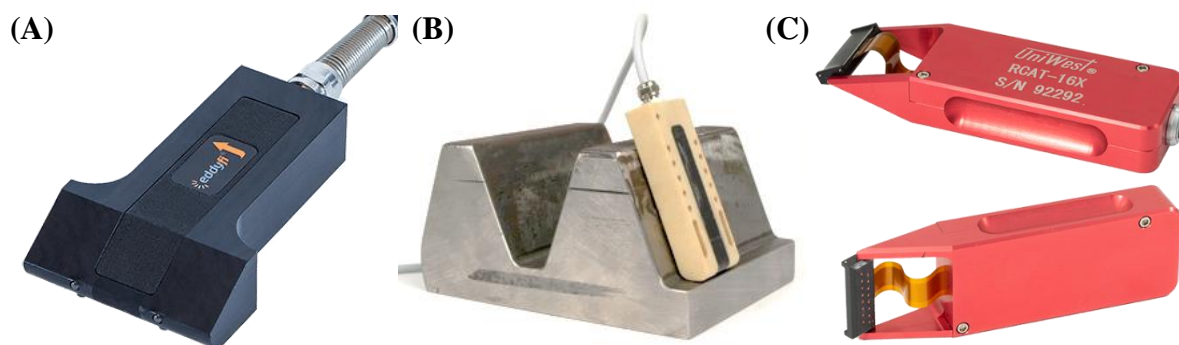
Sondy elastyczne mają w większości ofert odłączany enkoder oraz złącze modułu elektronicznego, co daje możliwość wymiany zestawów cewek. Możliwe jest również użycie tej samej sondy z dwiema różnymi konfiguracjami cewek.



Rys. 6. Różne rozwiązania elastycznych sond wielocewkowych, dostępnych w ofercie firmy EDDYFI (A) [11], INETEC (B) [10], FOERSTER (C) [12], ZETEC (D) [9], OLYMPUS (E) [7]

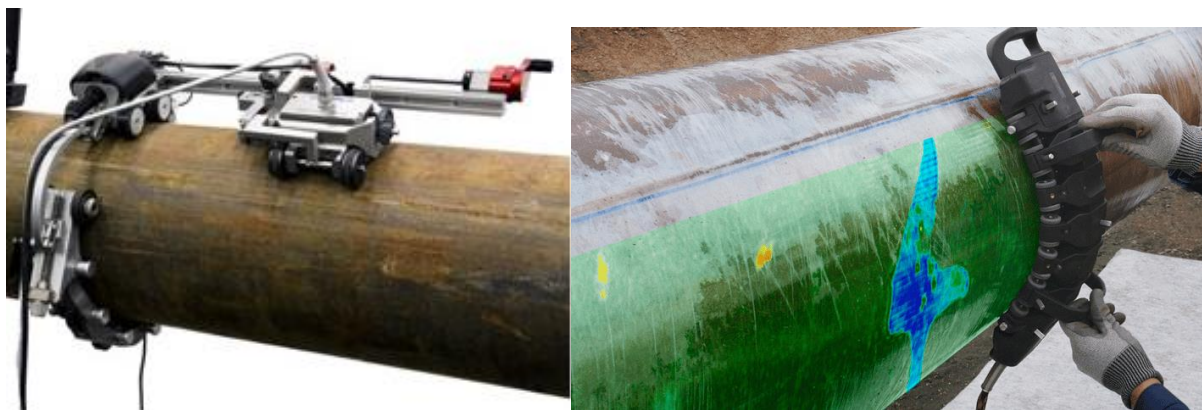
Najbardziej rozbudowane sondy potrafią obsługiwać 128 cewek i umożliwiają przebadanie

odcinka o szerokości sięgającej 225 mm w jednym przesunięciu. Niektórzy producenci aparatów obsługujących sondy wielocewkowe posiadają w ofercie sondy przeznaczone do badania jednego typu elementów, np. przekładni zębatach. W tym przypadku użycie sond elastycznych wiąże się z ryzykiem ograniczonego przebadania powierzchni wrębów, z uwagi na ograniczony dostęp. Z pomocą przychodzą systemowe rozwiązania, opracowane przez takie firmy jak OLYPMUS, EDDYFI, czy UNIWEST (rys. 7), które są zaprojektowane pod kątem diagnostyki kół przekładni zębatach o różnej geometrii.



Rys. 7. Rozwiązania sond ECA o geometrii dedykowanej do badania elementów przekładni zębatach firmy EDDYFI (A), OLYMPYS (B) oraz UNIWEST (C)

Innym rozwiązaniem są sondy kształtowe o geometrii zaprojektowanej do skanowania powierzchni zewnętrznych rur. W przypadku większych średnic proponowane są zintegrowane systemy wielu sond. Tego typu rozwiązania często wyposażone są w układy napędowe (rys. 8).



Rys. 8. Zaawansowane rozwiązania systemów do badania powierzchni o ustalonej krzywiznie

Kalibracja sond wielocewkowych (macierzowych) przebiega podobnie, jak kalibracja konwencjonalnych sond absolutnych, czy różnicowych. Pewnym ograniczeniem w stosunku do techniki klasycznej jest przygotowanie wzorca, którego geometria musi zapewnić pełny kontakt całej głowicy z podłożem podczas skanowania przez wady referencyjne. Zalecana jest kalibracja na próbkach odniesienia z defektami referencyjnymi różniącymi się zarówno głębokością (w zakresie $0,1 \div 1$ mm), jak i szerokością. Bardziej skomplikowanej procedury

kalibracyjnej wymagają sondy wielocewkowe wyposażone w zestaw rejestrujący w technice RFT i/lub ECT, gdzie wymagana jest kalibracja na kilku kanałach pomiarowych.

Pomimo szerokiej oferty rozwiązań bazujących na wykorzystaniu sond macierzowych brakuje na rynku rozwiązań dedykowanych do badania powierzchni wewnętrznych otworów o średnicy powyżej $\varnothing 100$ mm, dlatego też wykorzystanie stykowych sond wielocewkowych, pracujących w technice ECA, oraz skanera zaprojektowanego do badania powierzchni wewnętrznych otworów o większych średnicach, może być pomocne w diagnostyce obiektów o takiej geometrii.

3. DIAGNOSTYKA LUFY CZOŁGOWEJ

3.1. WARUNKI PRACY LUFY CZOŁGOWEJ

Kryteria eksploatacji luf czołgowych są bardzo surowe, zwłaszcza w reżimie warunków bojowych. Na przykład lufa armaty czołgu T-72 (PT-91) ulega zużyciu po oddaniu 200 - 300 strzałów pociskami podkalibrowymi bojowymi, a lufa czołgu Leopard 2A4 wytrzymuje ponad 700 strzałów. Tak szybkie zużycie luf czołgowych jest wynikiem oddziaływania gazów prochowych o wysokiej temperaturze, tarcia pocisku o ścianki oraz chemicznych reakcji zachodzących pomiędzy aktywnymi produktami spalania prochu i materiału lufy. Efektem działania powyższych czynników jest powstawanie ubytków materiału, pęknięć oraz odprysków powłoki ochronnej (jeżeli jest zastosowana) w przewodzie lufy. Intensywność i charakter tych zjawisk jest zależny od kalibru lufy, używanych typów pocisków oraz rodzaju stosowanych materiałów miotających. Z punktu widzenia użytkownika istotne jest pogorszenie właściwości balistycznych wskutek zachodzących zmian erozyjnych w przewodzie lufy oraz niebezpieczeństwo jej rozerwania przy przekroczeniu granicznej wytrzymałości zmęczeniowej materiału. W lufach pokrywanych chromem lub innym materiałem, np. irydem, średnica lufy w zasadzie nie zwiększa się, lecz w miejscach gdzie powłoka uległa zniszczeniu powstają wżery pogłębiające się w miarę oddawania kolejnych wystrzałów [13].

Opracowanie procedur diagnostycznych stanu powierzchni wewnętrznej lufy czołgu, zarówno w zakresie identyfikacji i lokalizacji pęknięć, jak i ubytków powłok ochronnych wydaje się istotne z punktu widzenia poprawy żywotności lufy, zwiększenia bezpieczeństwa załogi, a także możliwości otrzymania optymalnych właściwości balistycznych.

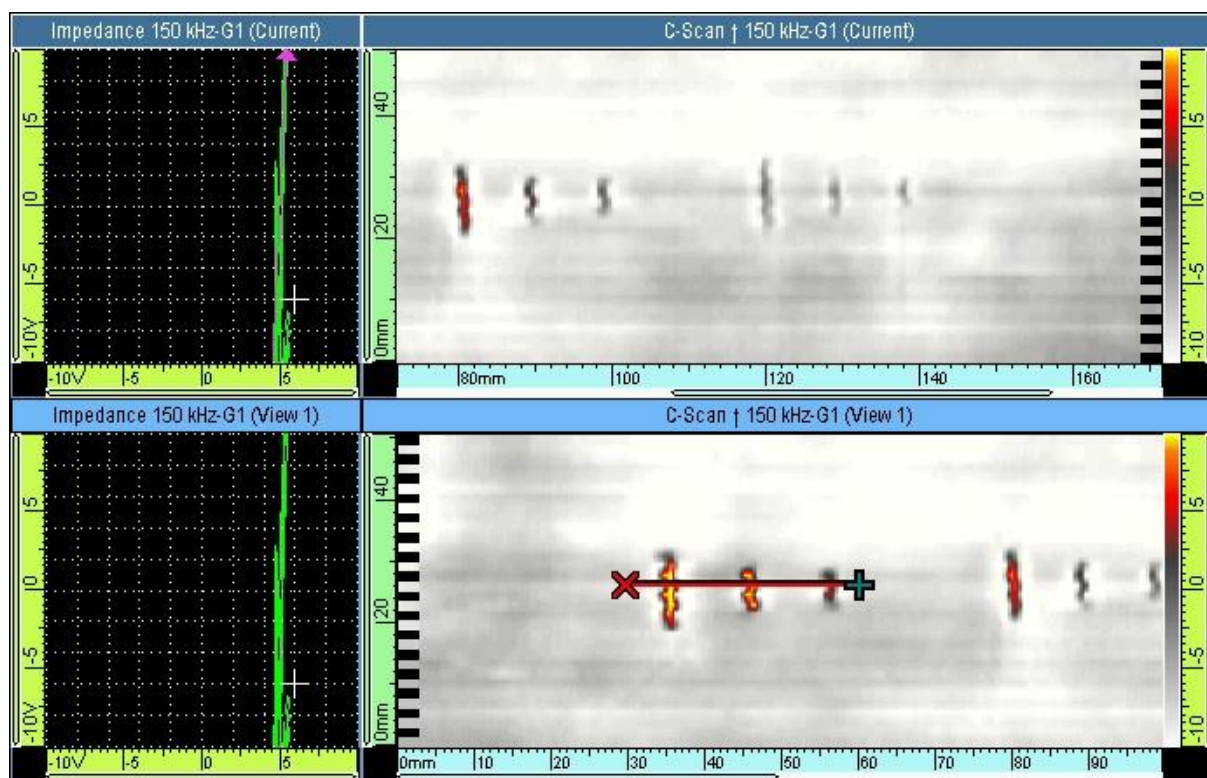
3.2. BADANIE LUFY

W pierwszej kolejności dokonano kalibracji sondy na próbce referencyjnej z zestawem nieciągłości o głębokości 0,2 mm, 0,5 mm oraz 1 mm i długościach wad 5, 10 i 20 mm. Próbkę wykonano z płytki ze stali duplex (1.4462) o wymiarach 250x150x5 mm (rys. 9).



Rys. 9. Próbką odniesienia z zestawem nieciągłości referencyjnych

Nieciągłości wykonano za pomocą obróbki elektroerozyjnej. Odzworowanie wad na próbce referencyjnej w postaci wskazań na płaszczyźnie impedancyjnej oraz w postaci C-skanu pokazano na rysunku 10.



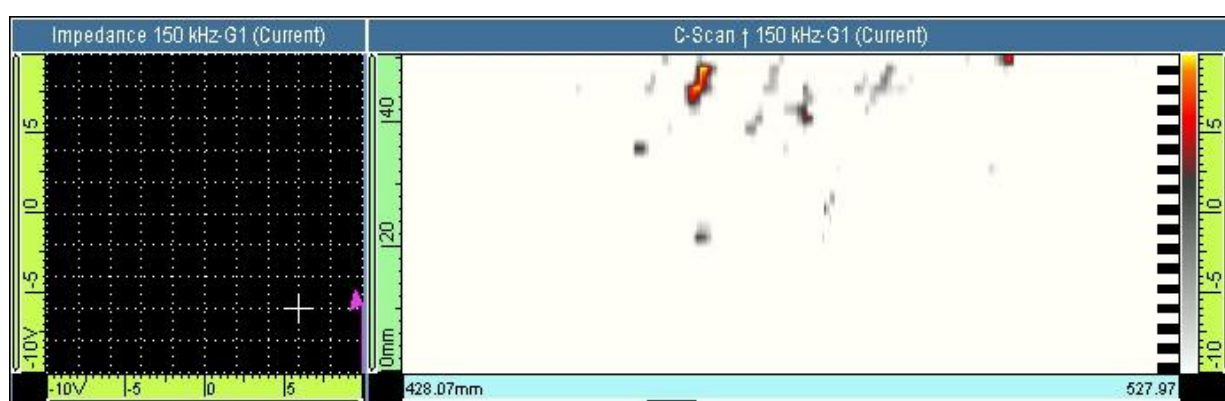
Rys. 10. Zobrazowanie C-skan z odzworowaniem wad na powierzchni próbki referencyjnej

W kolejnym kroku zamontowano sondę do ręcznego skanera zaprojektowanego do badania otworów o średnicy $\varnothing 120$ mm, tworząc zestaw widoczny na rysunku 11, który wprowadzono do otworu lufowego. Badanie przeprowadzono w trybie skanowania obwodowego, realizowanego poprzez obrót sondy na uchwycie skanera, a następnie, przesunięcie o długość części pomiarowej sondy. W ten sposób przebadano 100% powierzchni wewnętrznej lufy na odcinku około 2000 mm - od krawędzi lufy, aż po zamek.



Rys. 11. Zdjęcia skanera zintegrowanego z głowicą ECA w czasie badań lufy

Badania wykonano bezpośrednio przed strzelaniem, w pełnym zakresie opisanym powyżej, oraz po trzykrotnym wystrzale pociskiem podkalibrowym na odcinku około 1000 mm od wylotu lufy z uwagi na wysoką temperaturę. Wyniki badań nie wykazały nieciągłości o charakterze pęknięć, a jedynie ubytki powłoki niklowej, zlokalizowane głównie w górnej części lufy na całej jej długości. Przykładowe zobrazowanie C-skan przedstawiające ubytki warstwy niklowej pokazano na rysunku 12.



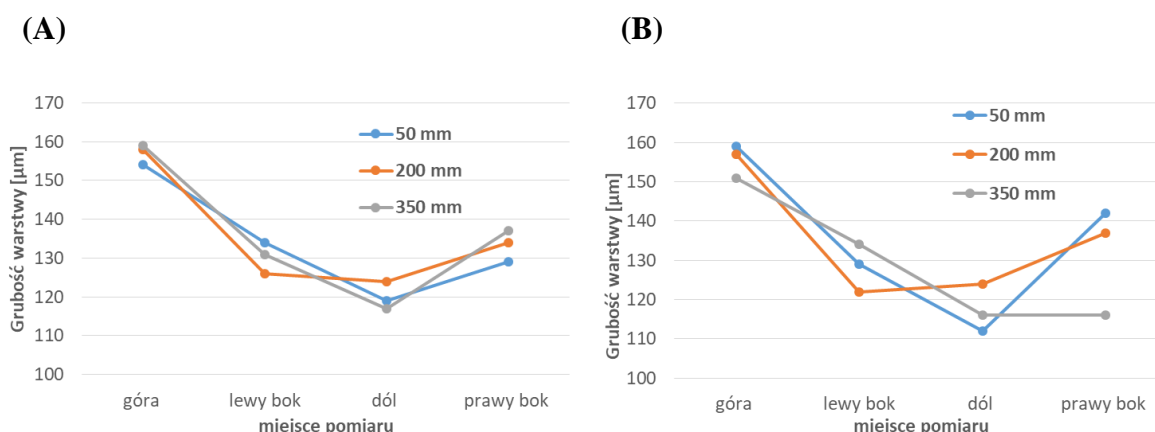
Rys. 12. Zobrazowanie C-skan lokalnych ubytków w warstwie niklowej

W związku z identyfikacją ubytków w powłoce niklowej, z których największe sięgały średnicy około $\text{Ø}30\div40$ mm, dokonano oceny jej grubości na powierzchni wewnętrznej lufy za pomocą defektoskopu OLYMPUS NORTEC 600D posiadającego możliwość pomiaru grubości powłok/warstw konduktywnych na podłożach ferromagnetycznych. Pomiaru dokonano w

czterech punktach na obwodzie lufy (0°, 90°, 180°, 270°), w odległości około 50, 200 i 350 mm od krawędzi wylotu lufy oraz krawędzi otworu od strony zamka. Dla każdego punktu wykonano trzy pomiary. Wartości średnie z pomiarów zestawiono w tabeli 1 oraz na wykresach (rys. 13).

Tabela 1. Wyniki pomiarów grubości powłoki niklowej na powierzchni wewnętrznej lufy

Grubość powłoki	Odległość od strony zamka			Odległość od strony wylotowej		
	50 mm	200 mm	350 mm	50 mm	200 mm	350 mm
góra lufy	154 μm	158 μm	159 μm	159 μm	157 μm	151 μm
lewy bok	134 μm	126 μm	131 μm	129 μm	122 μm	134 μm
dół lufy	119 μm	124 μm	117 μm	112 μm	124 μm	116 μm
prawy bok	129 μm	134 μm	137 μm	142 μm	137 μm	116 μm



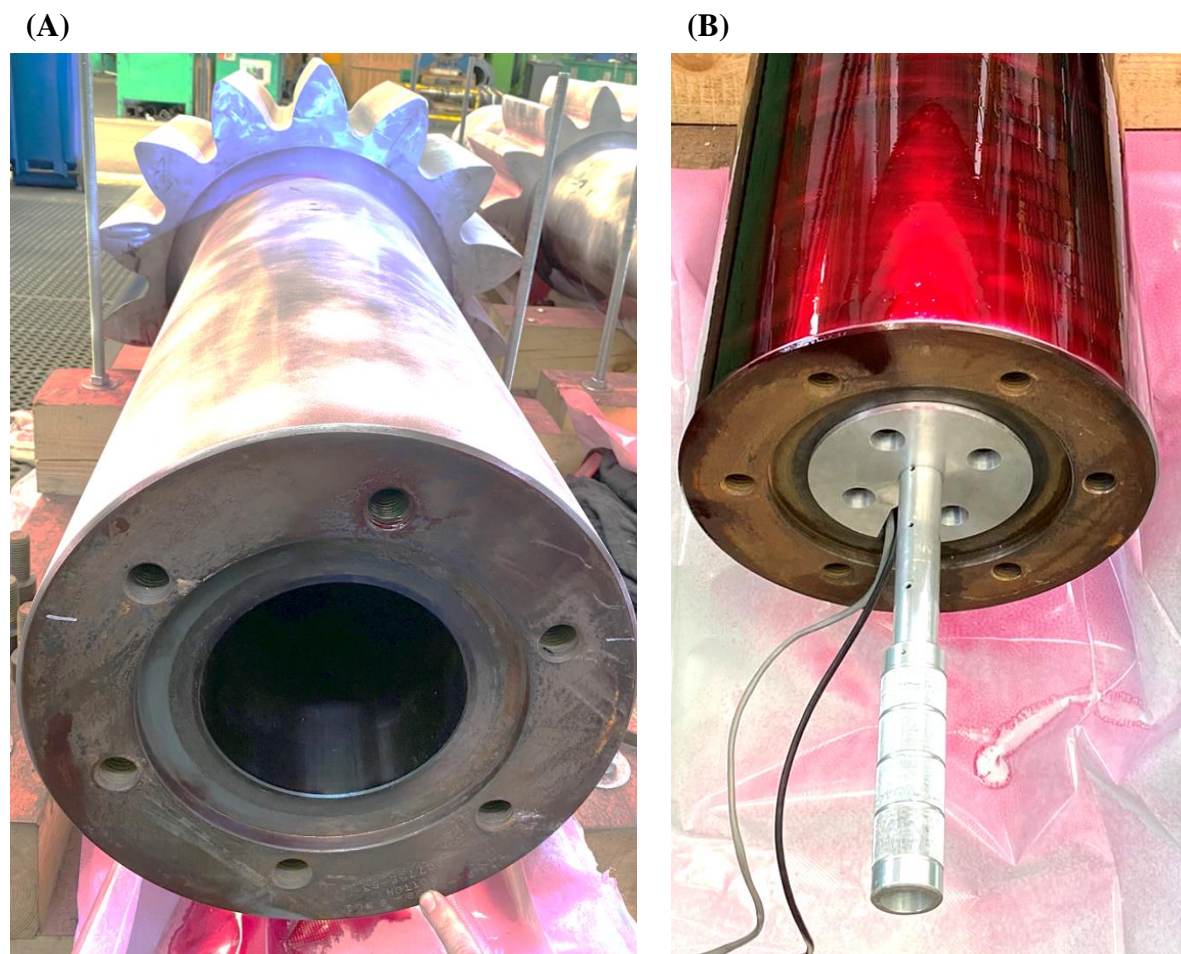
Rys. 13. Grubość powłoki niklowej na powierzchni wewnętrznej lufy od strony zamka (A) oraz od strony wylotowej (B)

Na podstawie wyników oceny grubości powłoki można stwierdzić, że najwyższą wartość grubości zarejestrowano w górnej części lufy, natomiast najmniejszą w najniższym jej obszarze, co może być spowodowane wytarciem powłoki przez pocisk w trakcie eksplozji ładunku.

4. BADANIE ROTORA POMPY ZĘBATEJ

Badanie z wykorzystaniem techniki ECA obejmowało ocenę stanu powierzchni wewnętrznej otworu oraz tworzącej powierzchni zewnętrznej rotora. Powierzchnię wewnętrzną otworu badano za pomocą opracowanego skanera do badania otworów, z wkładką dedykowaną do

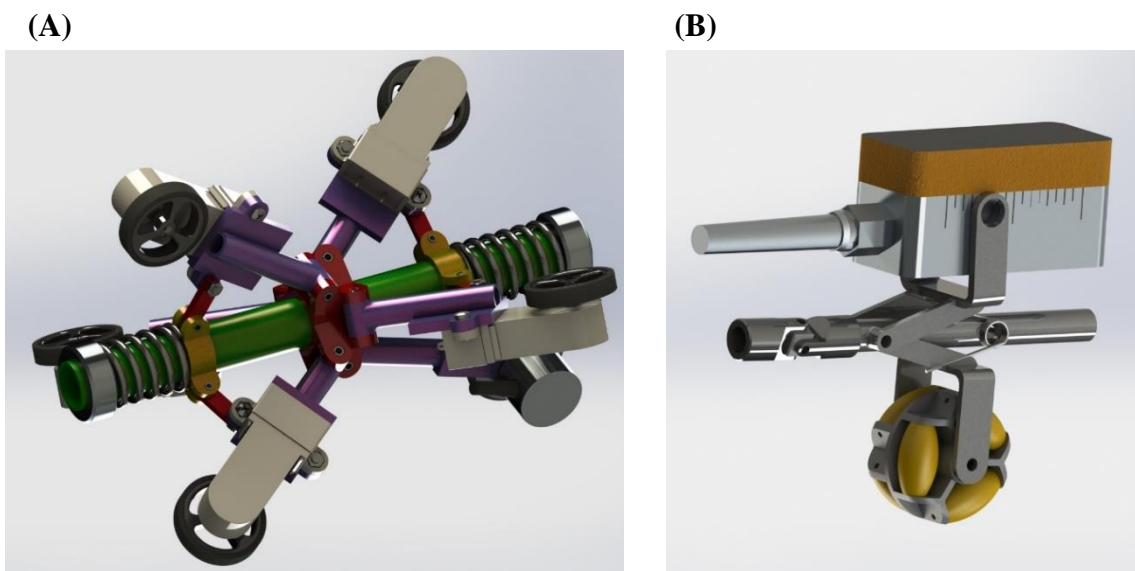
otworów o średnicy $\varnothing 150$ mm (rys. 14). Powierzchnie przekładni zębatej oraz powierzchnie czołowe rotora przebadano z zastosowaniem sondy ołówkowej, klasyczną techniką EC.



Rys. 14. Otwór rotora pompy otwarty (A) oraz po wprowadzeniu skanera (B) (widoczna zatyczka centrująca)

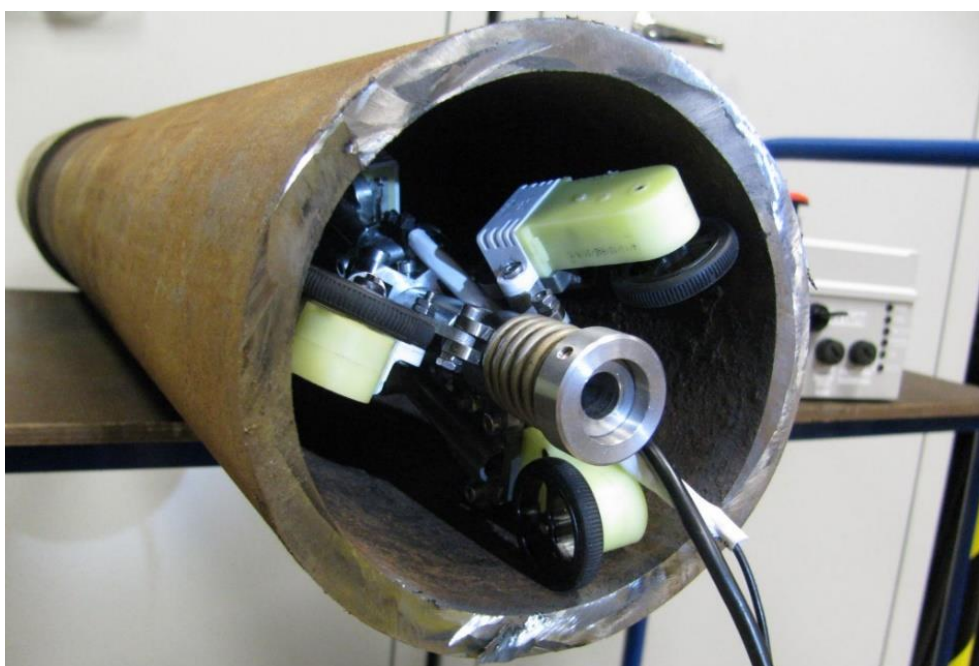
5. SKANER

Wykorzystanie skanera ręcznego może być użyteczne w badaniu powierzchni pojedynczych otworów i rur o znaczącej średnicy. W badaniach na większą skalę warto wykorzystywać rozwiązania bardziej zautomatyzowane, jak np. skaner opracowany w ramach współpracy Łukasiewicz - Warszawskiego Instytutu Technologicznego z Wydziałem Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej. Opracowany skaner obsługuje także inne metody badawcze. Model takiego skanera wraz z uchwytem sondy ECA pokazano na rysunku 15.



Rys. 15. Skaner do badania otworów technikami nieniszczącymi (A) wraz z opcjonalnym uchwytem sondy ECA (B)

Dzięki wykorzystaniu techniki ECA wraz z dedykowanym skanerem możliwa jest szybka i skuteczna inspekcja 100% powierzchni wewnętrznej lufy gładkiej. Inspekcja taka pozwala na identyfikację i lokalizację pęknięć, ubytków korozyjnych oraz erozyjnych, a także przy odpowiedniej konfiguracji pocienień grubości ścianek. System badawczy składa się ze skanera, defektoskopu prądowirowego z systemem ECA oraz sondy wielocewkowej. Skaner przemieszcza się automatycznie wewnątrz rury za pomocą dwóch sekcji trzech kół napędowych, rozmieszczonych co 120° . Zamocowana na nim głowica przylega do powierzchni wewnętrznej rury i skanuje ją w 100% w pełnym zakresie kątowym 360° . Zdjęcia skanera przedstawiono na rysunku 16.



Rys. 16. Zdjęcie skanera do badań ET powierzchni wewnętrznej rur

6. PODSUMOWANIE

Możliwości aplikacyjne techniki opartej na wykorzystaniu sond macierzowych rozwijają się intensywnie w kierunku rozbudowy systemów (zwiększenie liczby cewek), adaptacji do różnych geometrii elementów badanych (sondy elastyczne i kształtowe) oraz oprogramowania (wydajność multiplikacji, przetwarzania i archiwizacji danych pomiarowych). Jednak bogactwo ofert sond wewnętrznych do badania otworów z wykorzystaniem techniki ECA ogranicza się tylko do średnic typowych dla wymienników ciepła i chłodziw. W przypadku średnic powyżej $\varnothing 100$ mm konieczne jest opracowanie własnych rozwiązań, m.in. takich jak przedstawionych w niniejszej pracy. Być może problemy związane z diagnostyką otworów dużej średnicy, czy luf czołgowych są obecnie zbyt marginalne, aby uruchomić produkcję skomercjalizowanych rozwiązań.

LITERATURA

- [1] D. Kukła and M. Wyszowski, "Ocena twardości warstw hartowanych indukcyjnie na podstawie analizy sygnału prądów wirowych Hardness assessment of induction hardened layers based on the analysis of eddy current signal," vol. 24, 2019, doi: 10.5604/01.3001.0013.9724.
- [2] T. Matsumoto *et al.*, "Investigation of electromagnetic nondestructive evaluation of residual strain in low carbon steels using the eddy current magnetic signature (EC-MS) method," *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 479, pp. 212–221, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.jmmm.2019.01.103.
- [3] K. Dychtoń, A. Gradzik, Ł. Kolek, and K. Raga, "Evaluation of thermal damage impact on microstructure and properties of carburized aisi 9310 gear steel grade by destructive and non-destructive testing methods," *Materials (Basel)*, vol. 14, no. 18, Sep. 2021, doi: 10.3390/ma14185276.
- [4] D. Kukła, Ł. Kolek, and A. Gradzik, "Evaluation and classification of grinding burns by eddy current method."
- [5] A. Kondej and A. Szczepański, "The amplitude-frequency measurement in non-destructive testing using the eddy current method," *Weld. Technol. Rev.*, vol. 90, no. 11, Nov. 2018, doi: 10.26628/wtr.v90i11.973.
- [6] A. Kondej, S. Jończyk, and P. Lasota, "Detection of quenching cracks in 100Cr6 bearing steel by the eddy current method," *Weld. Technol. Rev.*, vol. 95, pp. 87–93, Nov. 2023, doi: 10.26628/simp.wtr.v95.1172.87-93.
- [7] "OmniScan MX ECA." <https://www.olympus-ims.com/en/omniscan-eca/> (accessed Apr. 15, 2024).
- [8] "NDT Solutions & Eddy Current Instruments | UniWest." <https://uniwest.com/> (accessed Apr. 15, 2024).
- [9] "Expert Eddy Current Testing (ECT) & Inspection Company." <https://www.zetec.com/products/eddy-current/> (accessed Apr. 15, 2024).
- [10] "INETEC." <https://www.inetec.hr/> (accessed Apr. 15, 2024).

- [11] "Non-Destructive Testing Solutions and Technologies | Eddyfi."
<https://www.eddyfi.com/> (accessed Apr. 15, 2024).
- [12] "Eddy current testing | Institut Dr. Foerster GmbH und Co. KG."
<https://www.foerstergroup.com/en/usa/technology/eddy-current-testing/>
(accessed Apr. 15, 2024).
- [13] "Żywotność luf 120 mm armat czołgowych - Problemy Techniki Uzbrojenia - Tom R. 37, z. 107 (2008) - BazTech - Yadda."
<http://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-article-PWAA-0016-0009> (accessed Apr. 11, 2024).