



ZASTOSOWANIE METODY MAGNETYCZNEJ PAMIĘCI METALU W DIAGNOSTYCE OBIEKTÓW TECHNICZNYCH

Jacek DYBAŁA

Politechnika Warszawska

Krzysztof NADULICZ

Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia

Streszczenie: W artykule zaprezentowano metodę Magnetycznej Pamięci Metalu (MPM) umożliwiającą wykonanie nieniszczących badań różnych obiektów technicznych, zarówno urządzeń mających znaczenie wojskowe, jak i wielkogabarytowych konstrukcji cywilnych. W pracy przedstawiono podstawy fizyczne stosowanej metody, wyniki przeprowadzonych badań oraz zalety i wady pasywnej diagnostyki magnetycznej. W artykule wykazano, że metoda MPM jest szybkim narzędziem pasywnej analizy obszarów, w których występowały bądź występują naprężenia wewnętrzne lub odkształcenia i można ją stosować, jako wstępną metodę diagnozowania obiektów technicznych. Zwrócono również uwagę na konieczność prowadzenia dalszych prac badawczych nad rozwojem zaprezentowanego podejścia diagnostycznego. Spodziewanym efektem tych prac będzie zwiększenie efektywności pasywnej diagnostyki magnetycznej umożliwiające jej zastosowanie w nowych obszarach aplikacyjnych.

Słowa kluczowe: metoda Magnetycznej Pamięci Metalu, pasywna diagnostyka magnetyczna, badania nieniszczące

1. Wstęp

W sytuacji, gdy urządzenia i konstrukcje o przeznaczeniu wojskowym oraz cywilnym osiągają zaawansowany stopień degradacji technicznej, a brak środków finansowych uniemożliwia ich regenerację lub masową wymianę, dużego znaczenia nabiera diagnostyka techniczna oraz badania metodami nieniszczącymi. Eksploatacja obiektów technicznych znajdujących się w złym stanie technicznym zwiększa prawdopodobieństwo ich awarii, które mogą spowodować zagrożenie dla zdrowia i życia ludzi, dotkliwe skutki ekologiczne, a także znaczne straty ekonomiczne. W takich okolicznościach konieczna jest wnikliwa kontrola stanu technicznego nadzorowanego obiektu technicznego, zapewniająca wymagany poziom bezpieczeństwa technicznego.

Współczesna diagnostyka techniczna w szerokim zakresie wykorzystuje nieinwazyjne metody diagnostyczne, które stwarzają możliwość diagnozowania lub monitorowania (ciągłej kontroli) bez przerywania normalnej pracy obiektu. W wielu przypadkach są to jednak metody pracochłonne i co za tym idzie – kosztowne. Ponadto część tych metod to metody aktywne, które wymagają doprowadzenia do badanego obiektu zewnętrznej energii. Ogranicza to możliwość stosowania tych metod w sytuacjach, w których posługiwanie się zewnętrznym źródłem energii jest zabronione ze względów bezpieczeństwa. Tego typu ograniczenia napotykamy np. podczas badania konstrukcji o przeznaczeniu wojskowym lub policyjnym, zawierającej wysokoenergetyczne materiały napędowe bądź wybuchowe. W świetle powyższych rozważań oczywista staje się konieczność poszukiwań takich pasywnych metod diagnostycznych, które umożliwią szybką ocenę stanu technicznego konstrukcji i ograniczą koszty badań diagnostycznych. Metodą spełniającą te warunki jest metoda

Magnetycznej Pamięci Metalu (ang. Metal Magnetic Memory Method) reprezentująca dziedzinę pasywnej diagnostyki magnetycznej.

2. Opis metody Magnetycznej Pamięci Metalu

Monitorowanie stanu technicznego konstrukcji (ang. Structural Health Monitoring - SHM) to nowa interdyscyplinarna dziedzina wiedzy, która łączy takie nauki podstawowe jak mechanika, elektronika, informatyka i materiałoznawstwo z wiedzą o obiekcie i historii jego eksploatacji [7]. Typ układu pomiarowego wchodzącego w skład systemu diagnostycznego zależy w dużej mierze od przewidywanego rodzaju wykrywanych uszkodzeń, stosowanych materiałów i zjawisk fizycznych wykorzystywanych w zastosowanym podejściu diagnostycznym. Interesującą perspektywą pozyskiwania informacji diagnostycznej jest możliwość wykorzystania w tym celu magnetometrów. Ich zastosowanie umożliwiają dwa czynniki: istnienie naturalnego pola magnetycznego Ziemi oraz fakt, że materiały, z których są wykonane elementy krytyczne obiektów technicznych to w dużej mierze materiały ferromagnetyczne. Przykładem metody reprezentującej dziedzinę pasywnej diagnostyki magnetycznej jest metoda Magnetycznej Pamięci Metalu [8, 10] – unormowana, ale ciągle kontrowersyjna metoda magnetycznych badań nieniszczących. Według deklaracji autorów metody MPM, metoda ta umożliwia wiarygodną identyfikację wczesnej fazy degradacji struktury materiału i detekcję stref koncentracji naprężeń (ang. stress concentration zones - SCZs). W kontekście tego, metoda nadaje się do zastosowania w systemach SHM umożliwiając monitorowanie postępującej degradacji technicznej krytycznych elementów nadzorowanych obiektów technicznych.

Podstawą działania metody MPM, reprezentującej pasywne metody magnetyczne, jest wykorzystanie magnetyzmu ziemskiego. Metoda MPM bazuje na trzech zjawiskach fizycznych:

- odwrotny efekt magnetostrykcyjny (efekt Villariego), czyli zmiana magnesowania materiału pod wpływem naprężenia mechanicznego;
- odwrotny efekt magnetoplastyczny, czyli zmiana namagnesowania materiału występująca w strefach odkształceń plastycznych i wywołana deformacją materiału;
- efekt przecieku strumienia wektora natężenia pola magnetycznego spowodowany przez mechaniczne i strukturalne niejednorodności materiału (rys. 1).

Istotą metody MPM jest pomiar i interpretacja lokalnego zaburzenia pola magnetycznego spowodowanego występowaniem lokalnych naprężeń w materiale, miejscowym odkształceniem plastycznym materiału lub obecnością nieciągłości materiałowych, zarówno mechanicznych (pęknięcia, rozwarstwienia), jak i strukturalnych (wtrącenia innego materiału). Mierzoną wartością jest wartość wybranej składowej natężenia pola magnetycznego H zmierzona w pobliżu diagnozowanego obiektu.

$$H = \frac{B}{\mu_r \cdot \mu_0} \quad (1)$$

gdzie:

H - natężenie pola magnetycznego [A/m];

B - indukcja magnetyczna [T];

μ_r - względna przenikalność magnetyczna [-];

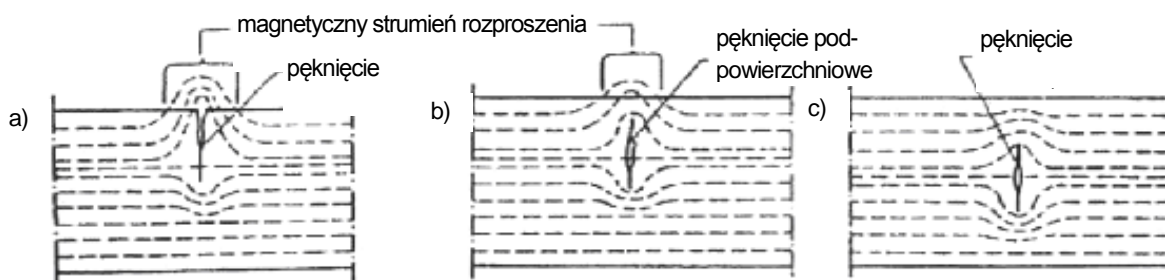
μ_0 - przenikalność magnetyczna próżni [$4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ H/m].

Efekt przecieku strumienia wektora natężenia pola magnetycznego spowodowany przez niejednorodności materiału został przedstawiony na rysunku 1. W obszarze występowania niejednorodności materiałowej strumień wektora natężenia pola magnetycznego ulega zaburzeniu i następuje przeciek strumienia na zewnątrz badanego elementu. W momencie „przejścia” magnetometru nad obszarem z defektem następuje gwałtowna zmiana znaku składowej natężenia

poła magnetycznego pochodzącej z przecieku strumienia wektora natężenia pola magnetycznego, co uwidacznia się lokalnym wzrostem wartości gradientu natężenia pola magnetycznego. Dlatego wnioskowanie diagnostyczne odbywa się zazwyczaj na podstawie analizy gradientu mierzonego natężenia pola magnetycznego H względem wybranego wymiaru obiektu x .

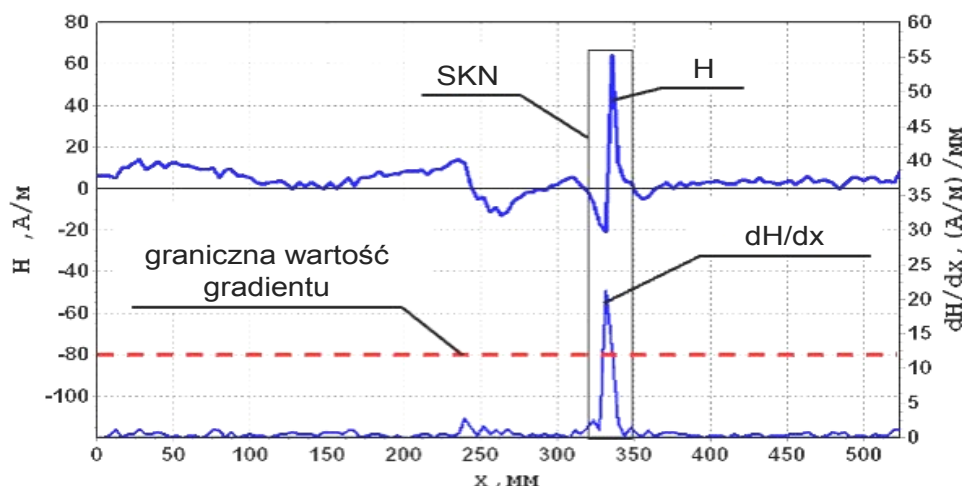
$$\frac{dH}{dx} = \frac{\Delta H}{\Delta x} \quad (2)$$

Duża wartość gradientu sygnalizuje zazwyczaj miejsce wystąpienia defektu lub strefę koncentracji naprężeń. Interpretacja wyników badań diagnostycznych metodą MPM to przede wszystkim interpretacja jakościowa, a określenie relacji diagnostycznych bazuje najczęściej na wzorcach uzyskanych dla danego materiału, struktury i wady. Zazwyczaj określa się pewne graniczne wartości gradientu natężenia pola magnetycznego, których przekroczenie sygnalizuje położenie obszaru z wadą strukturalną lub strefę koncentracji naprężeń (SKN) w materiale (Rys. 2). Analogicznie, niskie wartości gradientu odpowiadają obszarom bez wad materiałowych i strefom koncentracji naprężeń. Dzieje się tak, gdyż strumień wektora natężenia pola magnetycznego istniejący wewnątrz zamkniętego obwodu magnetycznego o jednakowym przekroju i jednorodnych właściwościach magnetycznych nie ma przecieków, zatem natężenie pola magnetycznego przy powierzchni badanego jest stałe i bliskie zera, nie wywołując efektu wzrostu wartości gradientu.

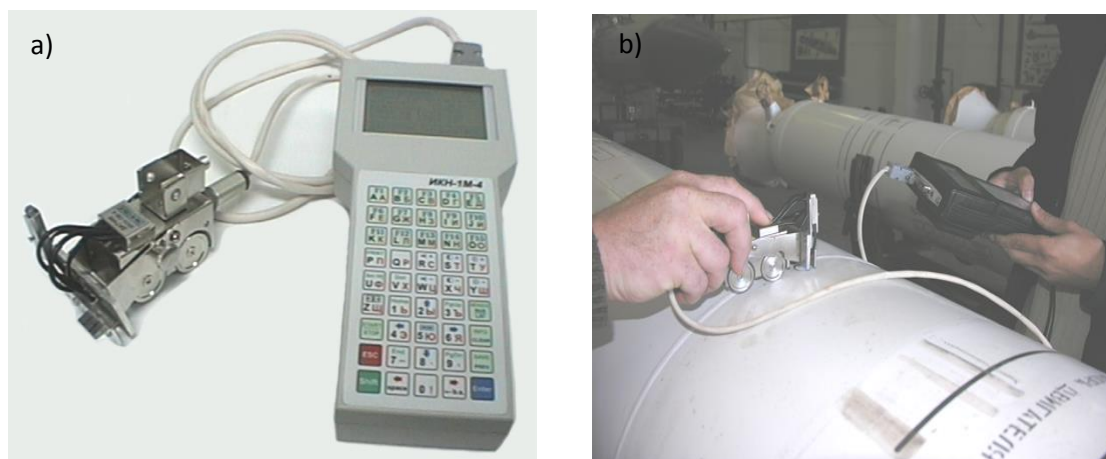


Rys. 1. Efekt przecieku strumienia magnetycznego wywołany niejednorodnością materiałową [6]

Na rysunku 3a przedstawiono wprowadzone na rynek przez firmę *Energodiagnostika* z Rosji urządzenie pomiarowe IKN-1M-4 z sondą skanującą, wykorzystane podczas badań prowadzonych w Wojskowym Instytucie Technicznym Uzbrojenia w warunkach laboratoryjnych oraz u użytkownika w miejscu przechowywania badanych obiektów (rys. 3b).



Rys. 2. Przykład detekcji strefy koncentracji naprężeń (SKN) w materiale metodą MPM



Rys. 3. a) Urządzenie IKN-1M-4 oraz wózek z dwoma sondami pomiarowymi, b) Pomiar rozkładu pola magnetycznego w połączeniu spawanym dwóch elementów silnika raketowego [5]

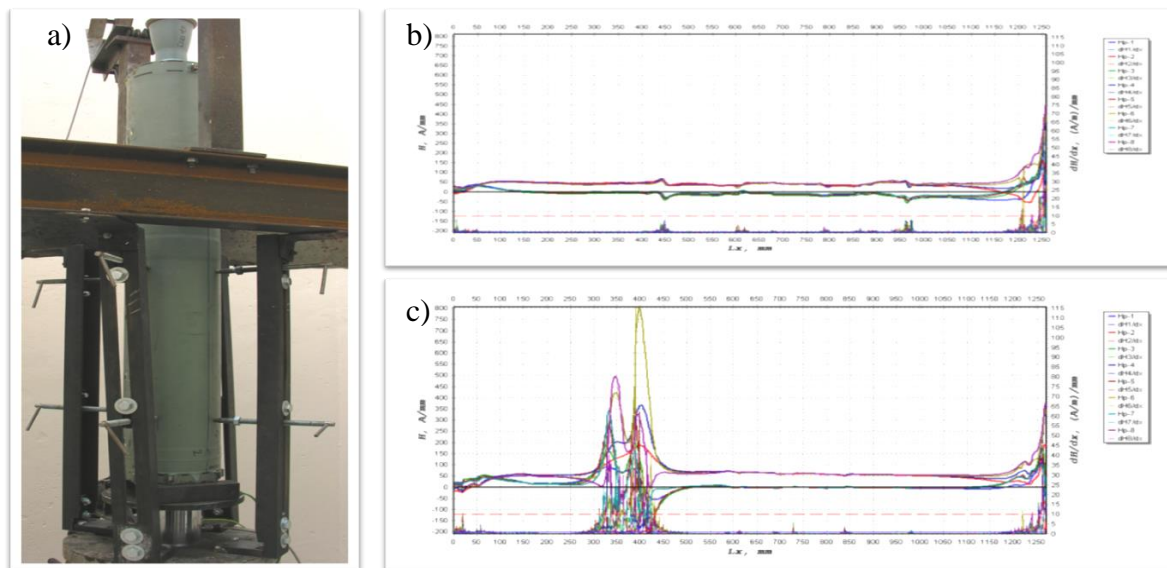
3. Badania raket

Rozwój procesów degradacyjnych oraz zmęczeniowych zachodzących w obiektach technicznych powoduje lokalne zaburzenia pola magnetycznego. Przeprowadzana analiza zaburzeń pola magnetycznego umożliwia wykrycie takich miejsc, w których degradacja obiektu zachodzi szczególnie intensywnie. Badania stanu technicznego obiektów technicznych nabierają szczególnego znaczenia w przypadku obiektów będących nośnikami materiałów wysokoenergetycznych. Do tego typu obiektów zaliczamy rakiety. Ich uszkodzenie może doprowadzić do rozszczelnienia komory spalania i wydostania się produktów spalania raketowych materiałów napędowych z boku korpusu rakiety. Pojawienie się dodatkowego, niekontrolowanego, bocznego ciągu może wprowadzić tak znaczny błąd w procesie naprowadzania rakiety na cel, że w rezultacie układ sterowania i stabilizacji lotu nie będzie w stanie skorygować tak dużego odchylenia pocisku od wyliczonej trajektorii. W konsekwencji raketa nie trafi w cel, bądź spadnie niszcząc ugrupowanie wojsk własnych.

Na rysunku 4a przedstawiono silnik raketowy zamocowany na hamowni. Przed uruchomieniem silnika przeprowadzono badania korpusu komory spalania metodą MPM. W wyniku przeprowadzonych badań nie zarejestrowano istotnych zmian pola magnetycznego. Wartość składowej natężenia pola magnetycznego H kształtuje się na względnie stałym poziomie i nie obserwujemy dużych wartości gradientu dH/dx (rys. 4b). Na tej podstawie możemy stwierdzić, że nie występuje istotny przeciek pola magnetycznego, co świadczy o tym, że niejednorodności struktury badanego obiektu są niewielkie.

Po wykonaniu pierwszych badań nastąpiło uruchomienie silnika raketowego. Podczas pracy silnika raketowego zmierzono ciśnienie w komorze spalania oraz temperaturę, które wyniosły odpowiednio 1,2 MPa i 3100 °K. Następnie ponownie przeprowadzono badanie metodą MPM. W miejscu, gdzie poprzednio zarejestrowano niewielką anomalię magnetyczną (Rys. 4b) powstał dużo większy przeciek strumienia magnetycznego wywołany niejednorodnością badanego obiektu (rys. 4c). Wykryta poprzednio niewielka zmiana w strukturze korpusu komory spalania silnika znacznie się powiększyła pod wpływem krótkotrwałego (około 5 min.) oddziaływania temperatury i ciśnienia.

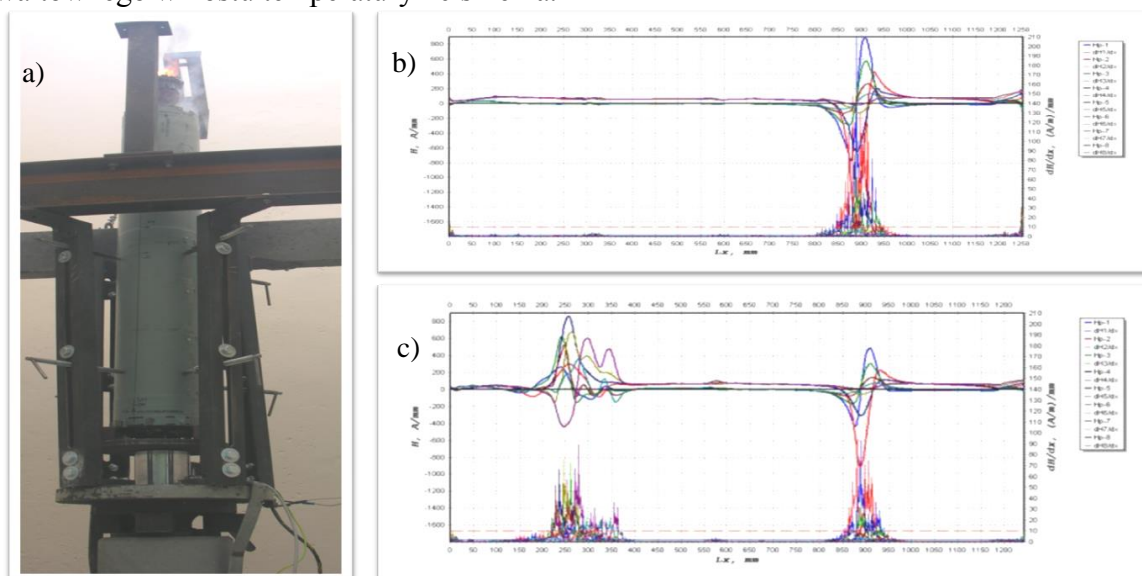
Kolejny przedstawiony przykład stanowi odmienną sytuację. Przed uruchomieniem silnika raketowego (rys. 5a) wykonano pomiar rozkładu pola magnetycznego H oraz jego gradientu dH/dx , wzdłuż komory spalania badanego obiektu, który ujawnił występującą anomalię



Rys. 4. a) Silnik raketowy na hamowni, b) magnetogram z pomiaru przed uruchomieniem silnika, c) magnetogram po uruchomieniu silnika

magnetyczną. Widzimy to na magnetogramie (rys. 5b). Możemy stwierdzić, że podczas eksploatacji powstała strefa koncentracji naprężeń (SKN) charakteryzująca się lokalnym wzrostem wartości gradientu natężenia pola magnetycznego.

Po uruchomieniu silnika raketowego i zarejestrowaniu, podczas spalania raketowego materiału napędowego, zbliżonych do poprzednich wartości ciśnienia i temperatury, ponownie przeprowadzono badanie komory spalania silnika metodą MPM. Stwierdzono, że uprzednio zarejestrowana anomalia magnetyczna zmniejszyła się. Jednocześnie wykryto nową anomalię magnetyczną w miejscu niewielkich zaburzeń pola magnetycznego zarejestrowanych uprzednio (rys. 5c). Można wnioskować, że pod wpływem temperatury wewnątrz komory spalania oraz ciśnienia rozrywającego działającego na ścianki komory, naprężenia wewnętrzne powstałe w czasie eksploatacji zostały zrelaksowane w czasie pracy silnika raketowego. Natomiast pojawienie się drugiej anomalii magnetycznej jest wynikiem zwiększenia się w tym miejscu naprężeń wewnętrznych w siatce elementarnej lub w ziarnie krystalicznym pod wpływem gwałtownego wzrostu temperatury i ciśnienia.

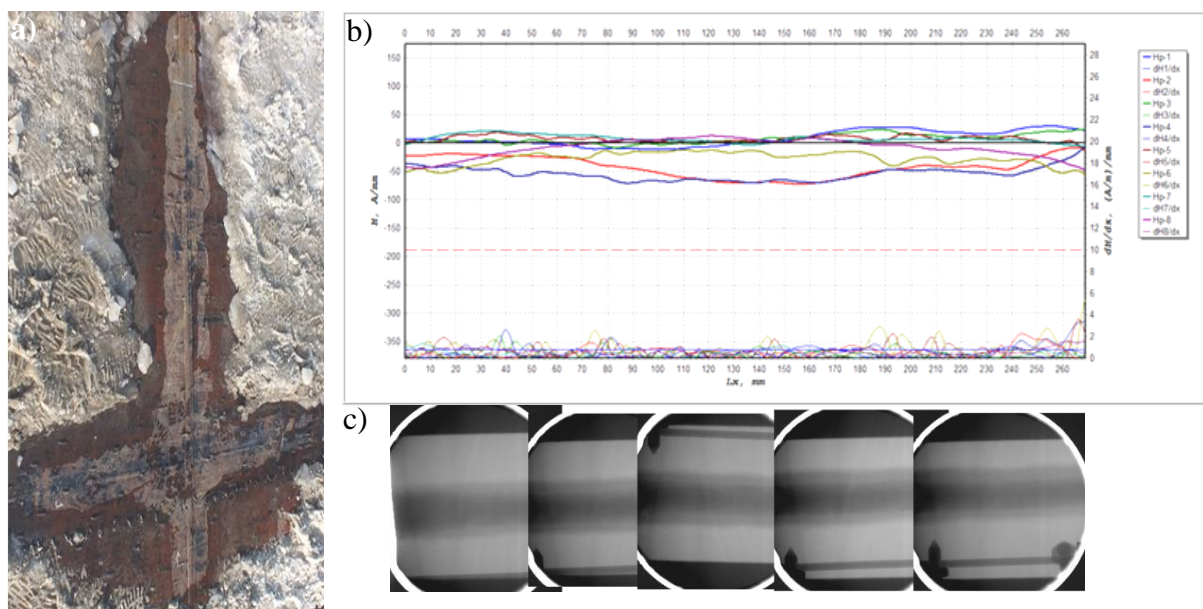


Rys. 5. a) Silnik raketowy na hamowni, b) magnetogram z pomiaru przed uruchomieniem silnika, c) magnetogram po uruchomieniu silnika

Potwierdza się fakt, że zwiększenie jednego z czynników oddziaływania (temperatura, ciśnienie) może doprowadzić do zmian naprężeń w przekroju badanego obiektu i w konsekwencji do rozerwania komory silnika rakiety.

4. Badania mostów

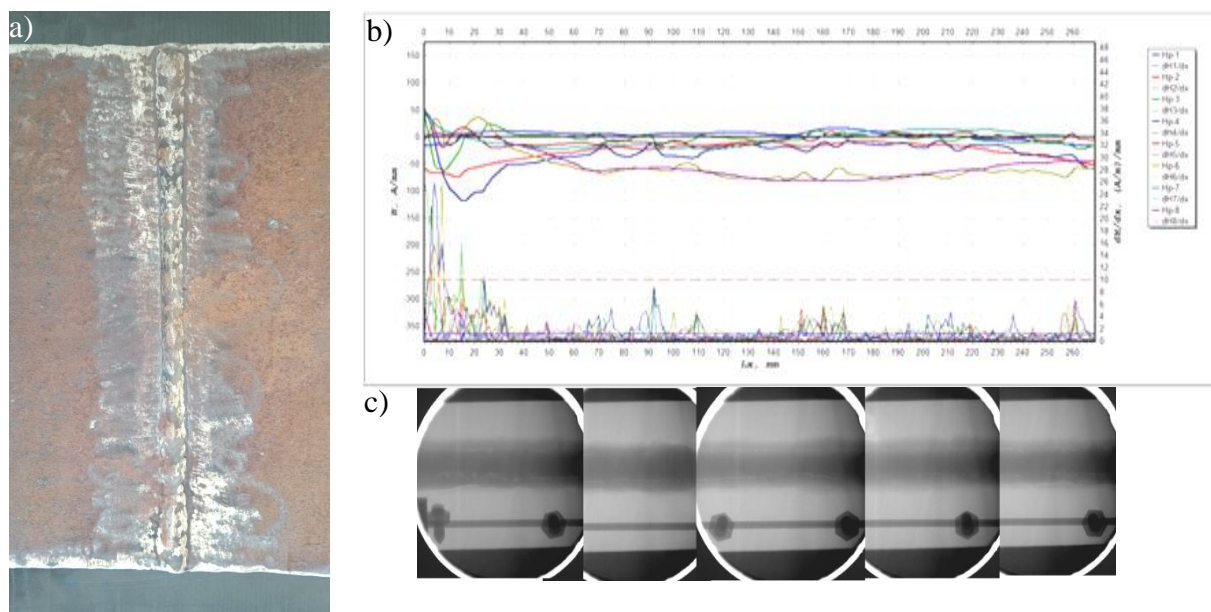
Mając na uwadze zwiększające się natężenie transportu kołowego, a tym samym znaczny wzrost obciążenia jednostkowego konstrukcji oraz środki potrzebne na konserwację lub naprawę wiaduktów i mostów, zaproponowano zastosowanie metody MPM do diagnostyki eksploatacyjnej drogowych i kolejowych konstrukcji mostowych wykonanych z elementów stalowych. W dniach 3÷6 lutego 2014 roku przeprowadzono badania remontowanego mostu Grota-Roweckiego. Zbadano połączenia spawane 30-to letnich płyt stalowych na moście. Na zdjęciu (rys. 6a) widzimy fragment badanej na moście płyty stalowej. Badaniu poddano miejsca połączeń spawanych wskazane przez wykonawcę remontu. Podczas badań nie stwierdzono występujących anomalii magnetycznych w miejscach połączeń spawanych, spowodowanych wtrąceniem materiału nieferromagnetycznego (rys. 6b).



Rys. 6. a) Płyta remontowanego mostu Grota - Roweckiego, b) magnetogram z pomiaru, c) rentgenogram potwierdzający badania metodą MPM

Po usunięciu przez wykonawcę płyt stalowych z mostu, otrzymano fragmenty badanych wcześniej połączeń spawanych. Ponownie wykonano badania dostarczonych elementów płyt stalowych w Wojskowym Instytucie Technicznym Uzbrojenia (WITU) w Zielonce w warunkach laboratoryjnych oraz potwierdzono uzyskane wyniki metodą rentgenograficzną (rys. 6c i rys. 7c).

Podczas badań wykryto wady w połączeniu spawanym. Badany odcinek łączący dwie płyty stalowe (rys. 7a) zawierał wtrącenia materiału nieferromagnetycznego. Przeprowadzone badania uwiarykowały istotne zmiany pola magnetycznego. Zaobserwowane duże wartości gradientu dH/dx (rys. 7b) sygnalizowały obecność nieciągłości materiałowych w spoinie. Wykonany rentgenogram (rys. 7c) wykazał, że badany materiał nie jest jednorodny (białe linie na całej długości magnetogramu). Spoina została wykonana wadliwie – występował w niej żużel i powietrze. Można stwierdzić z dużym prawdopodobieństwem, że eksploatacja tak połączonych elementów może doprowadzić do pęknięcia połączenia spawanego [1, 5].



Rys. 7. a) Płyta z remontowanego mostu Grota - Roweckiego, b) magnetogram z pomiaru, c) rentgenogram potwierdzający badania metodą MPM

5. Podsumowanie

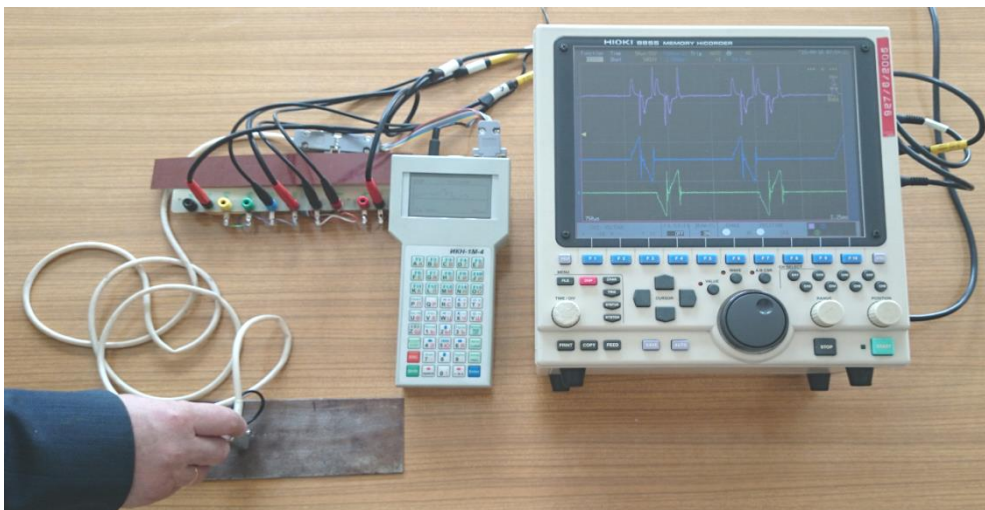
Metoda Magnetycznej Pamięci Metalu jest szybką, pasywną metodą diagnostyczną umożliwiającą realizację badań diagnostycznych elementów obiektów technicznych wykonanych z materiałów ferromagnetycznych. Stosując ją możliwe jest wykrycie miejsc defektów materiałowych lub stref koncentracji naprężeń już na etapie ich powstawania, co jest bardzo istotne w kontekście postulatu, aby wykrycie uszkodzenia następowało na wczesnym etapie jego rozwoju [2, 3].

Metoda MPM jest skuteczna przy wykrywaniu wad metalu rodzimego badanego elementu i podczas wykrywania wad połączeń spawanych. Użytkową zaletą metody MPM jest to, że nie wymaga ona specjalnego przygotowania powierzchni do badań. Duże znaczenie ma również to, iż w tym przypadku czas badań diagnostycznych jest krótki, a przekłada się to na niski koszt takich badań. Ważne jest również, że metoda nie wymaga specjalnego magnesowania badanych obiektów, wykorzystuje się, bowiem magnetyzm szczątkowy powstały w wyniku ich normalnej eksploatacji.

Pewną słabością metody MPM jest to, że umożliwia ona przede wszystkim ocenę jakościową stanu technicznego badanego obiektu. Można jednoznacznie stwierdzić, że doszło do zaburzenia jednorodności pola magnetycznego w strukturze, ale nie wiemy jak duże są zmiany i na ile wada zagraża dalszej eksploatacji badanego obiektu. Określenie ilościowych relacji diagnostycznych w tej metodzie jest istotnie utrudnione. Ten brak ilościowej oceny (np. informacji o rozmiarze wykrytej nieciągłości materiałowej) wymusza często przeprowadzenie innego badania nieniszczącego, które uzupełni wyniki uzyskane metodą MPM [4].

Istnieje potrzeba prowadzenia dalszych prac nad rozwojem pasywnej diagnostyki magnetycznej, których efekty powinny przyczynić się do uzyskiwania bogatszej, w stosunku do metody MPM, informacji diagnostycznej z opracowanych nowych metod. Niezbędne do osiągnięcia tego celu badania zostaną wykonane w trakcie realizacji rozpoczętego projektu Nr DOB-BIO6/21/8/2014 finansowanego przez NCBiR w ramach konkursu nr 6/2014 na wykonanie projektów w zakresie badań naukowych lub prac rozwojowych na rzecz obronności bezpieczeństwa państwa.

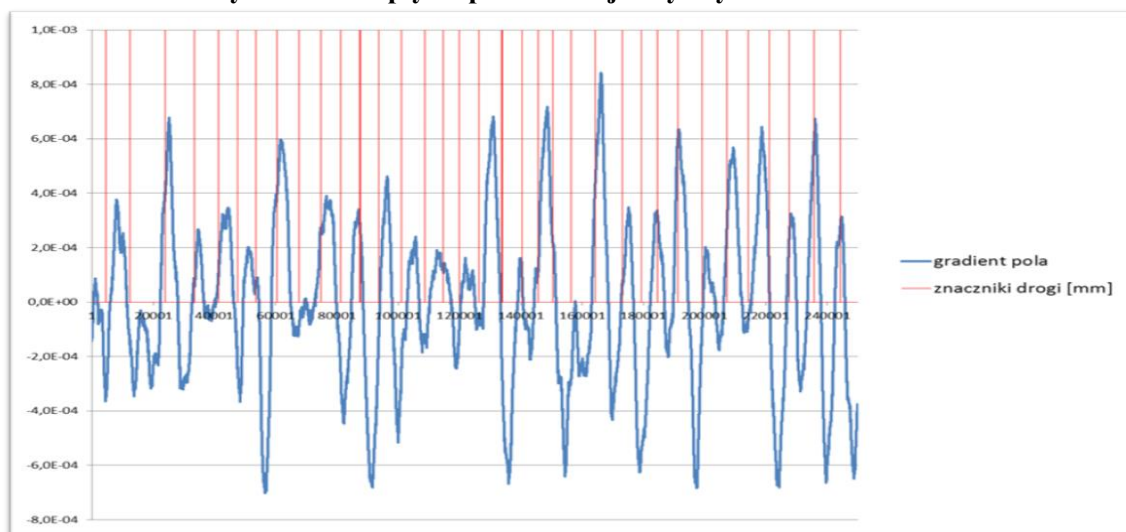
Rozpoczęto już pierwsze prace w tym kierunku i wykorzystując możliwości pomiarowe współczesnych magnetometrów podjęto próbę określenia położenia i rozmiarów wady na podstawie zmiany indukcji magnetycznej. W tym celu zestawiono stanowisko pomiarowe (rys. 8) i zarejestrowano zaburzenia pola magnetycznego elementu ferromagnetycznego (blacha o grubości 3,5 mm) wywołane wprowadzeniem do badanego elementu naprężeń spowodowanych wykonaniem pola numerowego (rys. 9). Badania magnetyczne przeprowadzono zarówno po stronie awers, jak i rewers.



Rys. 8. Stanowisko pomiarowe wykorzystane do sprawdzenia możliwości metody



Rys. 9. Awers płytki pomiarowej z wybitym numerem



Rys. 10. Przebieg gradientu sygnału napięciowego proporcjonalnego do własności magnetycznych

Rys. 10 przedstawia wartości pola magnetycznego w postaci gradientu sygnału napięciowego, proporcjonalnego do własności magnetycznych badanej próbki w funkcji

przebytej drogi. Wartości amplitudy uzyskano przez porównanie (odjęcie) odległych o około 1 mm uśrednionych wyników pomiarów i odfiltrowanie zakłóceń. Autorzy referatu spodziewają się, że zmieniając rozdzielczość i czułość pomiaru oraz doskonaląc metody przetwarzania rejestrowanych sygnałów będzie można uzyskać rzeczywisty obraz struktury badanego obiektu. W tym kierunku zostaną przeprowadzone dalsze prace badawcze.

Literatura

- [1] Dubov A.A., Колокольников С. М, Ocena jakości połączeń spawanych metodą magnetycznej pamięci metalu w porównaniu z metodami radiologiczną i ultradźwiękową, *Energo diagnostyka*, Warszawa, 2007.
- [2] Dubov A.A., Określanie lokalnych stref koncentracji naprężeń w wyrobach przemysłu maszynowego – brakujące ogniwo w systemie badań nieniszczących, *Energo diagnostyka*, Moskwa, 2009.
- [3] Dubov A.A., Диагностика турбинного аборудования с использование магнитной памяти металла, *Energo diagnostyka*, Moskwa, 2009.
- [4] Dubov A.A. Метод магнитной памяти мталла, *Известия*, Moskwa, 2011.
- [5] Dubov A.A., Dubov Ал.А., Колокольников С. М., Метод магнитной памяти металла и приборы контроля, *Снектр*, Moskwa, 2012.
- [6] Lewińska-Romicka A., Badania magnetyczne, *Biuro Gamma*, Warszawa 1998.
- [7] Uhl T., Współczesne metody monitorowania i diagnozowania konstrukcji, *Wyd. Fundacja im. Wojciecha Świątosławskiego na Rzecz Wspierania Nauki i Rozwoju Potencjału Naukowego w Polsce*, Gliwice, 2010, str. 193÷254.
- [8] Własow W. T., Dubow A. A., Fizyczne podstawy metody magnetycznej pamięci metalu, *Energo diagnostyka*, Warszawa, 2008.
- [9] <http://www.energo diagnostika.ru>, 03.03.2015 r.
- [10] PN-ISO 24497-1÷3:2009. *Badania nieniszczące – Magnetyczna pamięć metalu. Część 1: Słownictwo, Część 2: Wymagania ogólne, Część 3 – Kontrola złączy spawanych.*

Artykuł został opracowany na podstawie badań przeprowadzonych w ramach projektu Nr DOB-BIO6/21/8/2014 finansowanego przez NCBiR w ramach konkursu nr 6/2014 na wykonanie projektów w zakresie badań naukowych lub prac rozwojowych na rzecz obronności i bezpieczeństwa państwa.

USE OF METAL MAGNETIC MEMORY METHOD IN DIAGNOSTICS OF TECHNICAL OBJECTS

Jacek DYBAŁA

Warsaw University of Technology, Poland

Krzysztof NADULICZ

Military Institute of Armament Technology

Abstract: The article shows the Metal Magnetic Memory (MMM) method that allows the execution of passive non-destructive testing of various technical objects, both military devices and civilian large structures. The paper presents a physical basis of used method, the results of conducted tests and advantages and disadvantages of passive magnetic diagnostics. The article shows that the MMM method is a fast tool for the passive analysis of areas where internal stresses or deformations exist and it can be used as a preliminary method for diagnosing technical objects. It is also highlighted the need for further research work on the development of the presented diagnostic approach. The expected result of these works will increase the efficiency of passive magnetic diagnostics enabling its use in new areas of application.

Keywords: Metal Magnetic Memory method, passive magnetic diagnostics, non-destructive testing

1. Introduction

In many cases when the equipment and infrastructure of military and civilian designation reach a high level of technical degradation in the face of financial resources for a regeneration or mass replacement the meaning of technological diagnostics by non-destructive methods increases. The use of technical objects being in poor technical effectiveness increases a probability for their malfunctions that may cause a threat for the people live or health or severe ecological results or substantial financial losses. In such circumstances a detailed survey of technical status of monitored technical object is needed to provide the required level of technical safety.

In present times technical diagnostics uses widely non-invasive methods of diagnosis which provide procedures for diagnostic or monitoring process (permanent inspection) without interruptions in regular operation of the equipment. In many cases these methods are time consuming and expensive. Moreover some of those methods can be classified as the active ones what requires an external energy to be delivered to the tested object. It limits the use of these methods in the cases when the external source of energy is not allowed from the safety reasons. These types of limitations happen usually at testing military or police equipment that includes high energetic propellants or explosives. Taking into account the above mentioned it seems that passive diagnostic methods enabling the quick evaluation of equipment technical status at minimum costs of tests may be the most suitable solution. A method that complies with these requirements is the Metal Magnetic Memory method.

2. Description of Metal Magnetic Memory method

Structural Health Monitoring (SHM) is a new interdisciplinary domain of knowledge that combines such basic Sciences as mechanics, electronics, information technology and material engineering with the information about the object and the history of its use [7]. A type of measurement system that is a part of the diagnostic system depends on predicted types of detected defects, applied materials and physical phenomena exploited by a diagnostic method. An interested perspective for acquisition of diagnostic data is the use of magnetometers. Two factors decide that they can be used: the existence of Earth natural magnetic field and the fact that the critical components of technical objects are often made of ferromagnetic materials.

An example of the method that represents the domain of passive magnetic diagnostics is the Metal Magnetic Memory method [8, 10] that is standardised but still considered as a controversial magnetic method for non-destructive testing. According to the declaration of authors this method enables a reliable identification of early material structure degradation phases and the detection of stress concentration zones (SCZs). In this context the method is suitable to be used in SHM systems to monitor progressing technical degradation of critical components in surveyed technical objects.

The principle of MMM method representing in fact passive magnetic methods is the exploitation of Earth's magnetism. The MMM method is based on three physical phenomena:

- Reverse magnetostriction effect (Villary effect) i.e. the change of magnetic field intensity caused by the mechanic strain
- Reverse magneto-plastic effect i.e. the change of magnetic field intensity existing in the zones of plastic deformations and caused by the deformation of material
- Magnetic field intensity vector stream leaking effect caused by material mechanical and structural inconsistencies (Fig. 1).

The essence of MMM method is the measurement and interpretation of local magnetic field disturbances caused by the existence of local material strains or material plastic deformations or material inconsistencies having both mechanical (cracks, delaminating spots) and structural (different material) character. The measured value is a value of selected magnetic field intensity component H measured in the vicinity of tested object.

$$H = \frac{B}{\mu_r \cdot \mu_0} \quad (1)$$

where:

H – magnetic field intensity [A/m];

B – magnetic induction [T];

μ_r – relative magnetic permeability [-];

μ_0 – vacuum magnetic permeability [$4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ H/m].

The effect of magnetic field intensity vector stream leaking caused by the material non-homogeneities is presented in figure 1. In the zone of existing material non-homogeneities the magnetic field intensity vector stream is disturbed and an external leak of the stream happens from a tested component. In the moment when the magnetometer passes over the defective zone a complete and rapid change of magnetic field component orientation takes place for the leaking magnetic field intensity vector stream what is demonstrated by a local increase of magnetic field intensity gradient. For this reason the diagnostic decisions usually are taken on the base of measured magnetic field intensity H gradient analysis regarding a selected object dimension x .

$$\frac{dH}{dx} = \frac{\Delta H}{\Delta x} \quad (2)$$

Great value of the gradient usually indicates a spot of the defect or a strain concentration zone. The interpretation of MMM method diagnostic results is most of all a quantitative interpretation and the determination of diagnostic relations is usually based on the patterns obtained for the specific material, structure and defect. Typically some boundary values of magnetic field intensity gradient are determined and the higher values inform about a structural flaw zone or strain concentration zone (SCZ) in material (Fig. 2). For the same the low values of the gradient correspond to areas without the flaws in material and strain concentration zones. This is because the magnetic field intensity vector stream existing within a closed magnetic circuit possessing the same cross-section and homogeneous magnetic properties has no leaks and the intensity of the magnetic field at the surface of tested object is constant and its value is close to zero and it does not cause any increase of the gradient value.

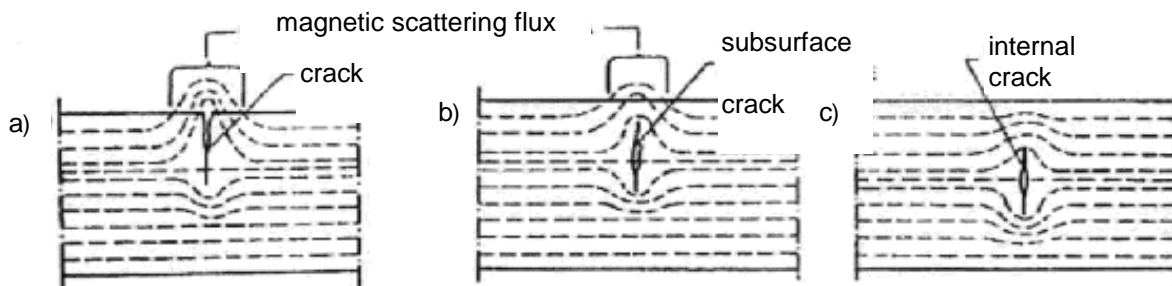


Fig. 1. Effect of magnetic stream leaking caused by material non-homogeneity [6]

Figure 3a shows IKN-1M-4 instrument with a scanning probe offered by Russian company *Energodiagnostika* that was used for tests in the Military Institute of Armament Technology at laboratory conditions and in user's site where the objects are stored (Fig. 3b).

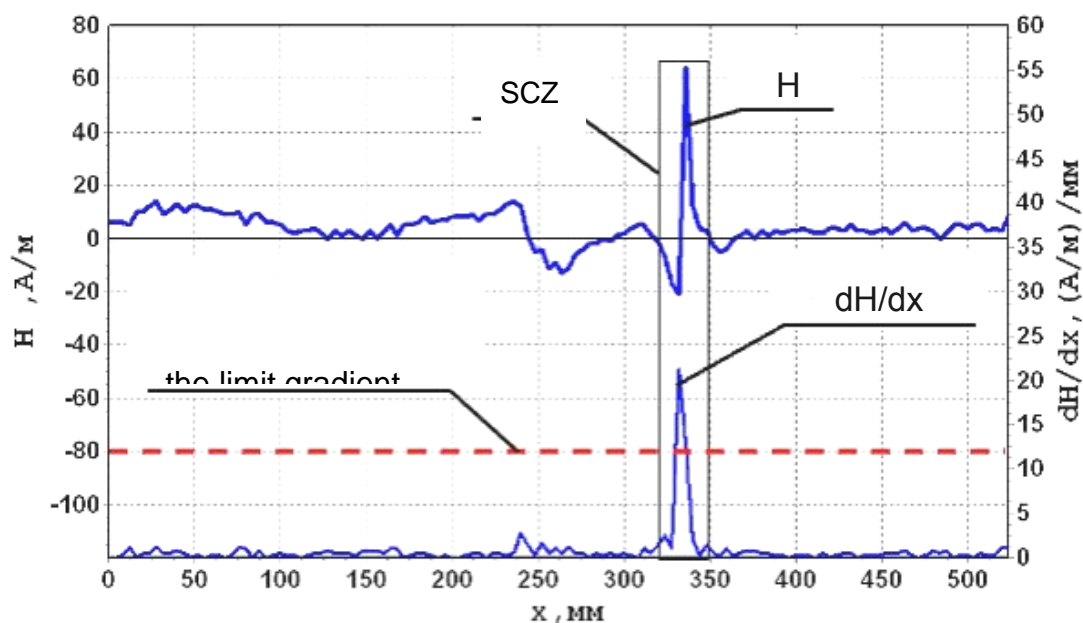


Fig. 2. An example of strain concentration zone (SCZ) detection in material [9].

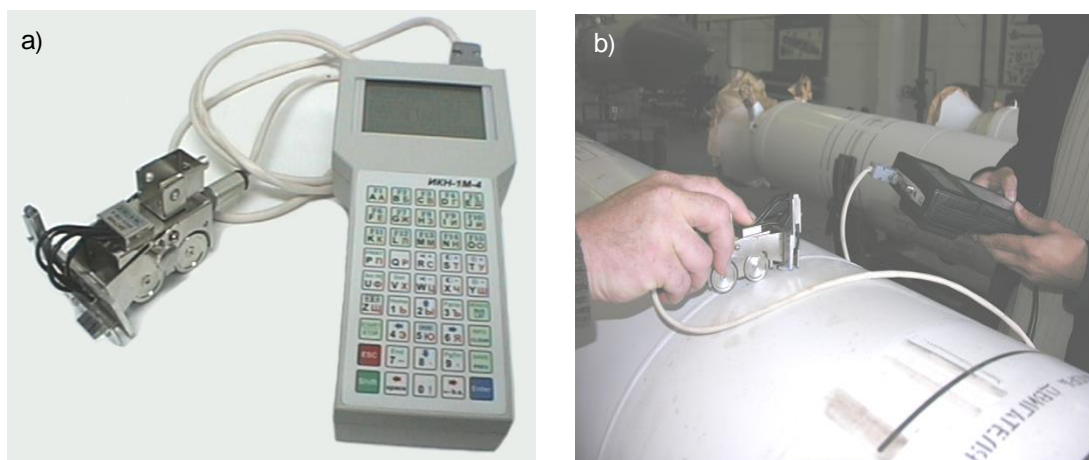


Fig. 3. a) Instrument IKN-1M-4 and the rolled carriage with two measurement probes, b) Measurement of magnetic field distribution on a welded joint of rocket motor [5]

3. Testing missiles

The growth of degradation and wearing processes taking place in technical objects causes local disturbances of magnetic field. The analysis of magnetic field disturbances gives a possibility for indication the spots with especially intense degradation. Tests of object technical status become highly important in the case of objects with high-energetic materials. Missiles belong for certain to this category. Their damage may lead to losing the tightness of motor burning chamber and the expansion of rocket propellant burning products through the missile side wall. The existence of an uncontrolled side thrust may cause such great error in the missile guidance process on a target that the flight control and stabilisation system fails to correct such great missile deviation from the calculated trajectory. In the result of that the missile may miss the target or cause collateral damages.

The rocket motor on testing stand is presented in figure 4a. The walls of burning chamber were tested by MMM method before the motor ignition. During the test no great changes of magnetic field intensity were observed. Magnetic field intensity component H is on relatively constant level without great values of gradient dH/dx (Fig. 4b). Basing on this it may be stated that there is no substantial leak of magnetic field and small quantity of structural non-homogeneities in tested object.

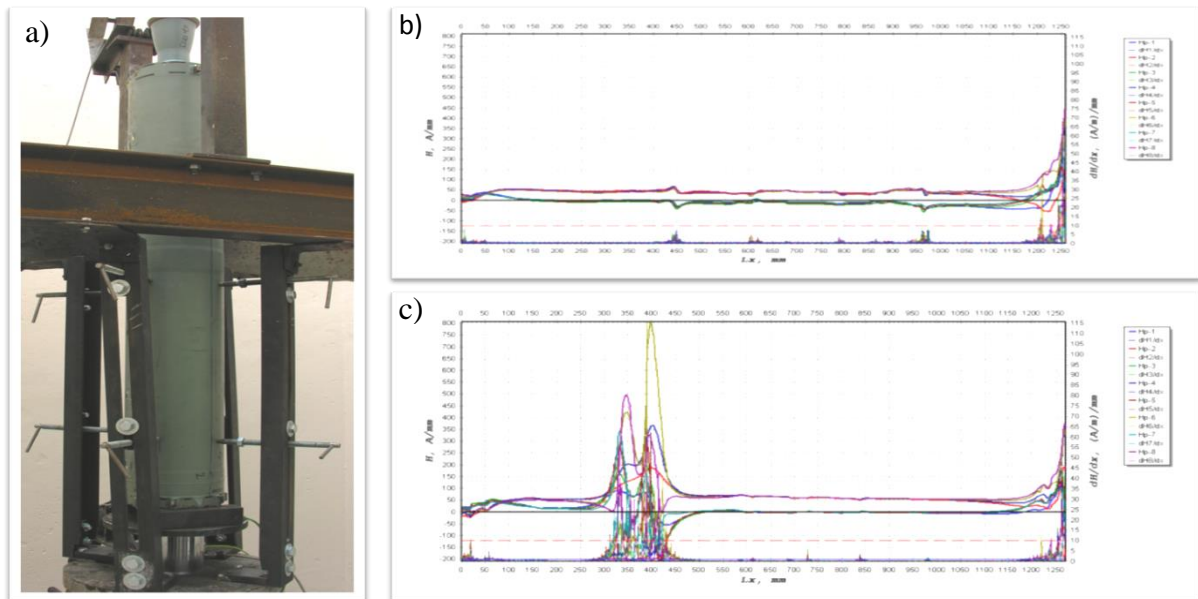


Fig. 4. a) Rocket motor on test bed, b) Magnetograph taken before motor ignition, c) Magnetograph after motor burning out.

After completing the first part of tests the rocket motor was started. During the motor operation the pressure and temperature was measured in the combustion chamber and the values were respectively 1.2 MPa and 3100 °K. In the next step the tests by MMM method were repeated. In the spot where previously a small magnetic anomaly was recorded (Fig. 4b) now a much bigger leak of the magnetic stream has existed and it was caused by the non-homogeneity of tested object (Fig. 4c). A small change in the motor combustion chamber wall structure that was detected in the first step was enlarged greatly after the short term (around 5 min) action of temperature and pressure.

The next example presented by authors illustrates a different situation. Before starting the rocket motor (Fig. 5a) the measurements of magnetic field H and its gradient dH/dx distributions were carried out along the combustion chamber of tested object where a magnetic anomaly was found. It is presented in the magnetograph (Fig. 5b). It may be stated that in the

service process a strain concentration zone (SCZ) was created and it is characterised by a local increase of magnetic field intensity gradient value.

After starting the rocket motor up and recording at rocket propellant burning the values of temperature and pressure that were similar to the previous case the motor combustion chamber was tested again by the MMM method. It was found out that the earlier detected magnetic anomaly was diminished. At the same time a new magnetic anomaly was spotted in the place where only some small magnetic disturbances were recorded in the first step (Fig. 5c). The conclusion may be drawn that under the influence of temperature inside the combustion chamber and the pressure acting onto the walls of the chamber during the operation of rocket motor the internal stresses created during the service life were relaxed. The appearance of the second magnetic anomaly is a result of increasing in this place internal stresses within the elementary net or in crystal grain caused by a rapid growth of temperature and pressure. It is a confirmation of the fact that an increase of one of acting factors (temperature, pressure) may lead to changes of strains in the cross-section of tested objects and finally to the disruption of rocket motor chamber.

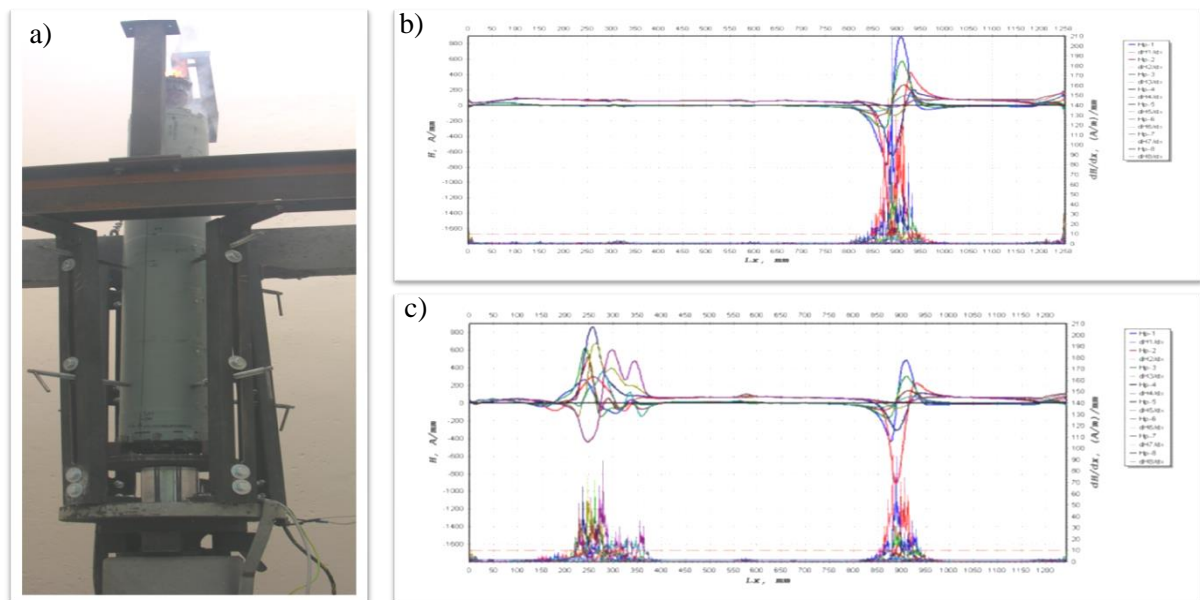


Fig. 5. a) Rocket motor on testing bed, b) Magnetograph before motor ignition, c) Magnetograph after motor operation

4. Testing bridges

The MMM method is proposed to be used in diagnostics of road and railway bridges made from the steel as the intensity of the wheeled transport has increased recently and the rate of construction load both with the costs of maintenance and repairs of bridges and overpasses have also raised. The Grot-Rowecki Bridge was examined during its repair on 3÷6 February, 2014. The bridge steel welded joints after 30 years of use were tested. The picture (Fig. 6a) shows a part of tested bridge steel plate indicated by the Contractor of repair work. There were no magnetic anomalies spotted in the welded joints caused by non-ferromagnetic insertions (Fig. 6b).

After removing by the Contractor the above said parts of steel plates were delivered to the Military Institute of Armament Technology where they were tested again in the laboratory conditions and the obtained results were confirmed by X-ray method (Fig. 6c and Fig. 7c).

Some defects were detected in the welded joints. The tested part of two steel plates joint (Fig. 7a) included insertions of non-ferromagnetic material. The carried out tests showed

substantial changes of magnetic field. The great values of dH/dx gradient were observed (Fig. 7b) and they inform about the presence of material non-continuities in the welding. The X-ray picture (Fig. 7c) shows that the tested sample is not homogeneous (the white streaks along the whole X-ray picture). The joint was made defectively – there was the slag and the air. It may be stated with a great certainty that the use of such joined components can lead to breaking the welded joint [1, 5].

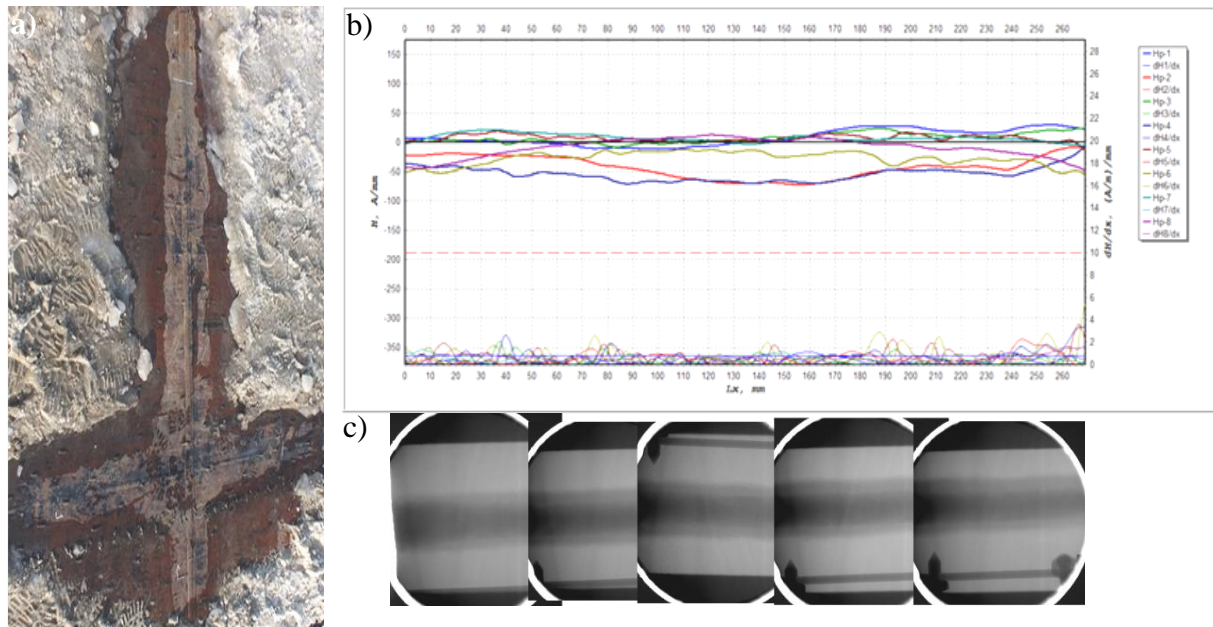
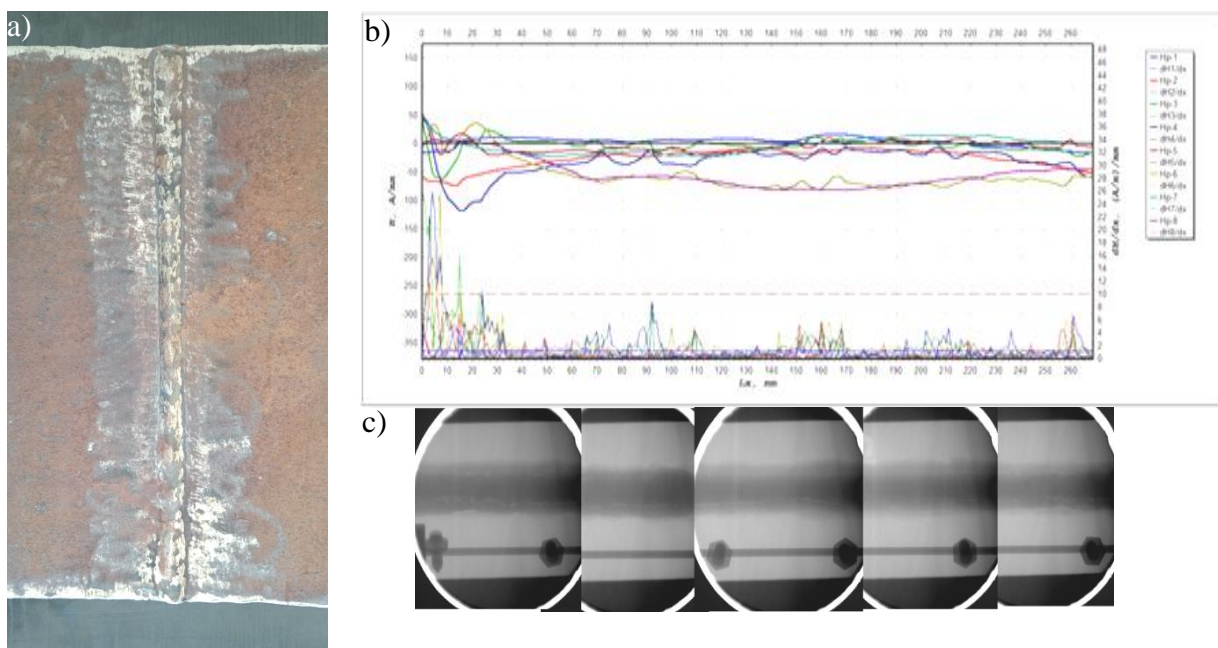


Fig. 6. a) A plate of the repaired Grot-Rowecki Bridge, b) Measured magnetograph, c) X-ray picture confirming MMM method results



Rys. 7. a) The plate of the repaired Grot-Rowecki Bridge, b) Measured magnetograph, c) X-ray picture confirming MMM method results

5. Summary

Metal Magnetic Memory method is the quick and passive diagnostic method providing possibilities for diagnostic tests of technical components made from ferromagnetic components. The method enables the detection of defective material spots or strain concentration zones just in the moment of their creation what is very important regarding a tendency of detecting defects at the earliest stage of their development [2, 3].

The MMM method is effective for detection of original metal defects in tested sample and as it was presented in the paper at detection of defects in welded joints. It is certainly a great advantage of MMM method that it does not need any special preparation of the surface before testing. The method can be also characterised by great functionality and short time and the low costs of diagnostic measurements. Moreover the method does not need any special magnetising procedures for tested objects as it exploits a residual magnetism created at their regular use conditions.

The fact of providing a quantitative evaluation of object's technical status by the MMM method is its certain disadvantage. It can be clearly stated that there is a disturbance of magnetic field homogeneity in a structure but it is still unknown how great the changes are and most of all how the defect threatens the effective use of tested objects. Determination of qualitative diagnostic characteristics is a bit difficult in this method. The lack of the qualitative evaluation (e.g. lack of information about the size of detected material discontinuity) often makes it necessary to carry out another non-destructive test that completes the results obtained by MMM method [4].

Authors propose the further work has to be carried out on the development of passive magnetic diagnostics in order to get in the result more detailed information than it is now. Necessary tests and researches to aim this objective will be performed under the lead of newly originated project No DOB-BIO6/21/8/2014 funded by National Centre of Research and Development in the frame of competition No 6/2014 for the performance of projects on scientific research work or development projects of state defence and security.

The work has started recently and it has been focused on the use of modern magnetometer measurement capacities to precise the position and size of the defect basing on the changes of magnetic induction. For this reason a setup was arranged (Fig. 8) to measure the magnetic field disturbances of a ferromagnetic sample (plate of 3.5 mm thickness) caused by the material strains of pressed numbers (Fig. 9). The tests were performed both on the obverse and reverse sides of the plate.

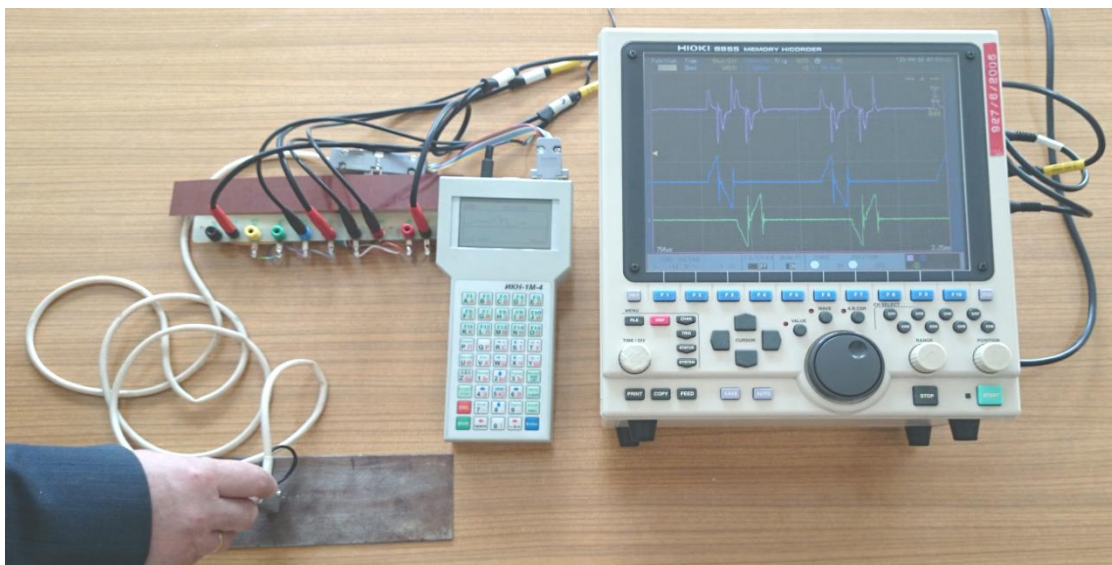


Fig. 8. The measurement setup used for testing method's efficiency

Figure 10 presents magnetic field values in the form of gradient signal values representing the magnetic characteristics of tested sample in the function of shifting. The amplitude values were obtained by a comparison (subtraction) the averaged results measured at different distances which are separated ca. 1 mm and by filtering the interference signals.



Fig. 9. The obverse of measured plate sample with hammered numbers

The authors have expectations that by changing the resolution and sensitivity of measurements and improving processing methods of recorded signals a real picture of tested object structure could be obtained. This is the direction of further research work.

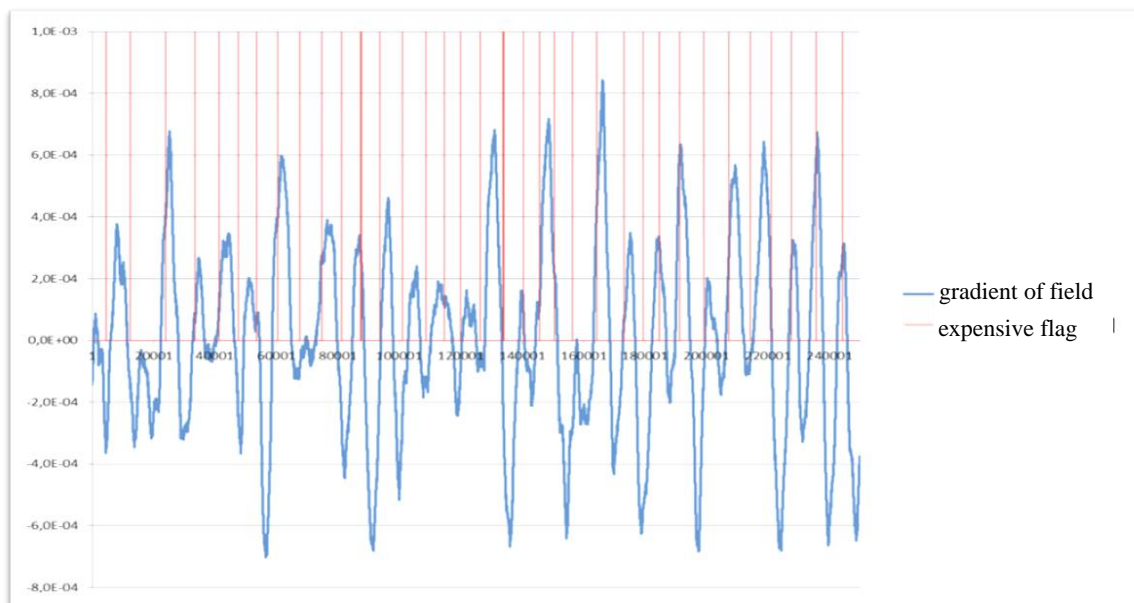


Fig.10. Signal amplitude graph proportional to magnetic characteristics

Literature

- [1] Dubov A.A., Колокольников С. М, Ocena jakości połączeń spawanych metodą magnetycznej pamięci metalu w porównaniu z metodami radiologiczną i ultradźwiękową, *Energodiagnostyka*, Warszawa, 2007.
- [2] Dubov A.A., Określanie lokalnych stref koncentracji naprężeń w wyrobach przemysłu maszynowego – brakujące ogniwo w systemie badań nieniszczących, *Energodiagnostyka*, Moskwa, 2009.
- [3] Dubov A.A., Диагностика турбинного аборудования с использование магнитной памяти металла, *Energodiagnostyka*, Moskwa, 2009.
- [4] Dubov A.A. Метод магнитной памяти мталла, *Известия*, Moskwa, 2011.

- [5] Dubov A.A., Dubov Ал.А., Колокольников С. М., Метод магнитной памяти металла и приборы контроля, *Спектр*, Moskwa, 2012.
- [6] Lewińska-Romicka A., Badania magnetyczne, *Biuro Gamma*, Warszawa 1998.
- [7] Uhl T., Współczesne metody monitorowania i diagnozowania konstrukcji, *Wyd. Fundacja im. Wojciecha Świątosławskiego na Rzecz Wspierania Nauki i Rozwoju Potencjału Naukowego w Polsce*, Gliwice, 2010, str. 193÷254.
- [8] Własow W. T., Dubow A. A., Fizyczne podstawy metody magnetycznej pamięci metalu, *Energo diagnostyka*, Warszawa, 2008.
- [9] <http://www.energo diagnostika.ru>, 03.03.2015 r.
- [10] PN-ISO 24497-1÷3:2009. *Badania nieniszczące – Magnetyczna pamięć metalu. Część 1: Słownictwo, Część 2: Wymagania ogólne, Część 3 – Kontrola złącz spawanych.*

The paper was prepared basing on tests carried out under the project No DOB-BIO6/21/8/2014 financed by the National Research and Development Centre in the frame of competition No 6/2014 for the performance of projects on scientific researches or development projects for state defence and security.