
**XXV Seminarium
NIENISZCZĄCE BADANIA MATERIAŁÓW
Zakopane, 20-22 marca 2019**

**WYKORZYSTANIE AKTYWNYCH METOD MAGNETYCZNYCH
W DIAGNOSTYCE ELEMENTÓW STALOWYCH**

dr hab. inż. Jacek DYBAŁA, prof. PW
Politechnika Warszawska
jdybala@simr.pw.edu.pl

dr inż. Marcin CEGŁA
Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia
ceglam@witu.mil.pl

mgr inż. Krzysztof NADULICZ
Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia
nadulicz@witu.mil.pl

1 WSTĘP

W sytuacji, gdy urządzenia i konstrukcje 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 bowiem 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 szczegółowa kontrola stanu technicznego nadzorowanego obiektu technicznego, zapewniająca wymagany poziom bezpieczeństwa technicznego.

Nieobojętny wpływ na stan techniczny urządzeń ma również odczuwalny wzrost obciążeń dynamicznych konstrukcji stalowych (widoczny wzrost liczby pojazdów oraz masy przewożonych ładunków), konieczne jest zatem poznanie stanu zmian charakterystyk fizycznych (degradacja techniczna) połączeń spawanych w obiektach wykonanych z materiału ferromagnetycznego. Wysoki poziom technicznej degradacji konstrukcji stalowych i niedobory środków finansowych na ich renowację lub całkowite zastąpienie powodują wzrost zainteresowania diagnostyką techniczną i metodami badań nieniszczących.

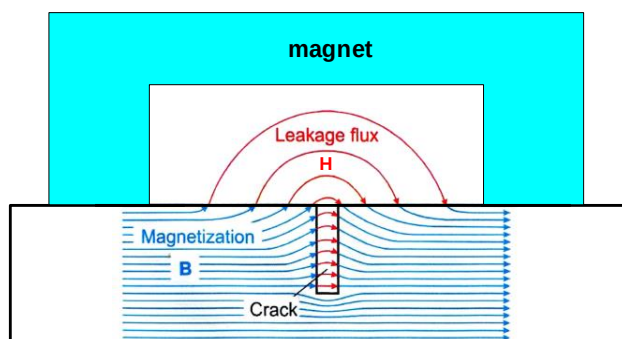
Użytkowanie obiektów o niewłaściwej sprawności technicznej znacznie zwiększa szansę ich awarii, co może stworzyć zagrożenie dla zdrowia i życia ludzi, poważne konsekwencje ekologiczne, a także znaczne straty finansowe. W takich okolicznościach konieczne jest szczegółowe zbadanie stanu technicznego monitorowanych obiektów w celu zapewnienia odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa.

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. Monitorowanie stanu technicznego konstrukcji (ang. Structural Health Monitoring) to nowa interdyscyplinarna dziedzina wiedzy, która łączy

takie nauki jak mechanika, elektronika, informatyka i materiałoznawstwo z wiedzą o obiekcie i historii jego eksploatacji. 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.

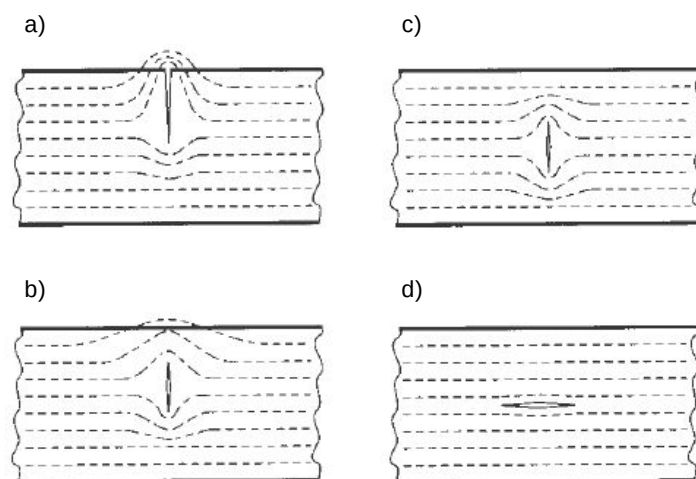
Rozwój magnetycznych metod diagnostycznych, należących do elektromagnetycznych metod badań nieniszczących, sprawił, że metody te można wykorzystać w celu stworzenia kompleksowego podejścia diagnostycznego obejmującego zarówno magnetyczną detekcję nieciągłości w elementach wykonanych z materiałów ferromagnetycznych, jak i magnetyczną ocenę stanu naprężeń i degradacji tych elementów [1, 8]. W ogólności, magnetyczne metody diagnostyczne możemy podzielić na metody pasywne i aktywne. Metody pasywne wykorzystują jedynie istnienie naturalnego pola magnetycznego Ziemi. Zastosowanie metod aktywnych wymaga natomiast poddania badanego elementu działaniu zewnętrznego, sztucznego pola magnetycznego.

Interesującym podejściem diagnostycznym umożliwiającym wykrywanie nieciągłości w materiałach ferromagnetycznych wydaje się być zastosowanie metody pomiaru natężenia magnetycznego pola rozproszonego, zaliczanej do aktywnych metod magnetycznych. Polega ona na pomiarze, za pomocą czujników pola magnetycznego, rozkładów składowych natężenia magnetycznego pola rozproszonego (ang. magnetic flux leakage) nad powierzchnią namagnesowanego ferromagnetyka oraz detekcji lokalnych charakterystycznych anomalii pola rozproszonego powstających nad powierzchnią materiału z wadą [4, 5]. Przenikający materiał strumień zewnętrznego, sztucznego pola magnetycznego ulega rozproszeniu w miejscu wystąpienia niejednorodności i następuje wyciek strumienia magnetycznego na zewnątrz badanego elementu, gdyż na brzegach nieciągłości powstają swoiste „bieguny magnetyczne” generujące pole magnetyczne nad nieciągłością (Rys. 1).



Rys. 1. Wyciek strumienia magnetycznego na zewnątrz obiektu

Stopień wycieku strumienia magnetycznego zależy od miejsca ulokowania niejednorodności w materiale oraz jej orientacji względem przenikającego materiału strumienia pola magnetycznego (Rys. 2). Wyciek strumienia magnetycznego jest najsilniejszy w przypadku poprzecznych niejednorodności powierzchniowych lub podpowierzchniowych, czyli położonych na niewielkiej głębokości pod badaną powierzchnią.

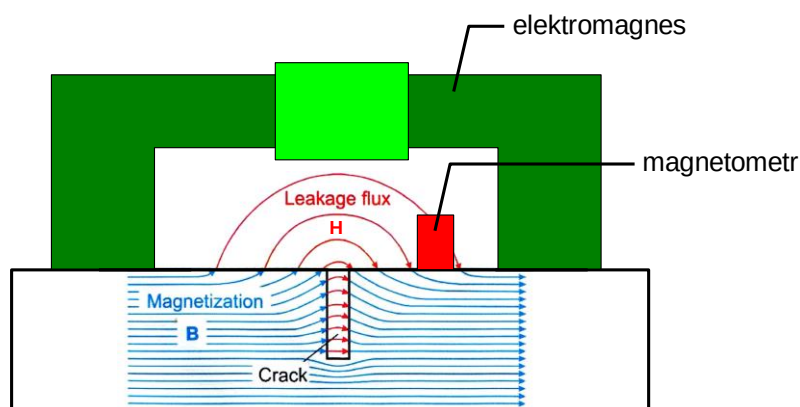


Rys. 2. Wpływ miejsca ulokowania niejednorodności w materiale oraz jej orientacji na efekt wycieku strumienia magnetycznego: a) nieciągłość powierzchniowa poprzeczna, b) nieciągłość podpowierzchniowa poprzeczna, c) nieciągłość wewnętrzna poprzeczna, d) nieciągłość wewnętrzna podłużna [6]

Stosowane są różne sposoby wykrywania wycieku strumienia magnetycznego na zewnątrz badanego elementu. W metodzie proszkowej zobrazowanie wycieku strumienia magnetycznego odbywa się za pomocą ferromagnetycznego proszku, który przyjmuje wzór linii sił pola magnetycznego [7]. Wadą takiego podejścia jest konieczność dokładnego oczyszczenia i przygotowania badanej powierzchni, co wiąże się ze zwiększeniem kosztów i większą czasochłonnością. Wyciek strumienia magnetycznego można również rejestrować za pomocą specjalnej taśmy, która zawiera drobne, dające się magnesować, cząstki ferromagnetyczne. Taśma magnetyczna styka się z powierzchnią badanego elementu i jeśli wskutek istnienia w materiale niejednorodności dochodzi do zaburzenia zewnętrznego pola magnetycznego nad powierzchnią badanego elementu, to taśma zostanie w tych miejscach namagnesowana. Utrwalony na taśmie obraz może zostać odczytany przez specjalną głowicę i przedstawiony jako obraz rozkładu pola magnetycznego. W ten sposób można identyfikować powierzchniowe zjawiska magnetyczne powiązane z występowaniem niejednorodności w badanym elemencie [2, 3].

W pełni profesjonalna analiza pomiaru natężenia magnetycznego pola rozproszonego wymaga skonstruowania specjalnego skanera magnetycznego składającego się z elektromagnesu (lub magnesów stałych) wytwarzającego stałe pole magnetyczne oraz magnetometru (matrycy magnetometrów) umieszczonego między biegunami elektromagnesu i mierzącego składowe natężenia magnetycznego pola rozproszonego nad powierzchnią badanego elementu ferromagnetycznego. Ideę działania takiego skanera magnetycznego przedstawiono na rysunku 3.

Analiza pomiarów natężenia pola magnetycznego nad powierzchnią badanego elementu zrealizowanych takim skanerem umożliwia detekcję lokalnych anomalii magnetycznych powstających nad powierzchnią materiału z niejednorodnością strukturalną lub mechaniczną.



Rys. 3. Idea działania skanera do magnetycznej detekcji defektów materiałowych

2 MAGNETYCZNE BADANIE POŁĄCZEŃ SPAWANYCH

Połączenia spawane są bardzo rozpowszechnionym sposobem łączenia elementów stalowych. Powszechność stosowania połączeń spawanych wynika z wielu zalet tego sposobu łączenia elementów, do których zaliczyć należy zwłaszcza łatwość i szybkość wykonania wytrzymałych połączeń oraz możliwość pełnej automatyzacji procesu łączenia elementów. Wykonywanie połączeń spawanych wiąże się jednak z wprowadzaniem energii cieplnej w spawany materiał, co zmienia strukturę materiału powodując niejednorodność strukturalną (pęcherze powietrza, wtrącenia innego materiału) i mechaniczną (pęknięcia, rozwarstwienia) połączenia. Pęknięcia gorącej krystalizującej spoiny powstają zazwyczaj w linii środkowej spoiny. Pęknięcia zimne powstają w końcowej fazie stygnięcia spoiny lub po upływie pewnego czasu po zakończeniu spawania i występują najczęściej obok spoiny, w strefie wpływu ciepła materiału lub w strefie wtopienia. Oprócz pęknięć będących efektem procesów wytwarzania spoiny, połączenia spawane są narażone na pojawienie się pęknięć zmęczeniowych wynikających z mechanicznego obciążenia połączenia podczas eksploatacji [9].

Jakość połączeń spawanych przekłada się na możliwości przenoszenia obciążeń przez konstrukcje, połączenia spawane stają się zatem w naturalny sposób obiektem badań diagnostycznych. Głównym celem badań połączeń spawanych jest poszukiwanie ich słabego ogniwa, czyli znalezienie i ocena diagnostyczna obszarów, w których występują nieciągłości materiału, czyli niejednorodność strukturalna lub mechaniczna złącza. Taki cel badań wynika z faktu, że występowanie obszarów niejednorodności złącza w decydującym stopniu pogarsza właściwości mechaniczne, a w szczególności wytrzymałość zmęczeniową połączenia spawanego.

2.1 Przedmioty badań

Do badań diagnostycznych połączeń spawanych wykorzystano próbki wykonane ze stalowego płaskownika (stal ST3) o wymiarach 125 x 100 x 6 mm (długość x szerokość x grubość), które zostały wykonane przez firmę Energomontaż Północ Technika Spawalnicza i Laboratorium Sp. z o. o. Połączenia spawane wykonano wykorzystując różne metody spawania:

- 111 - MMA welding (Manual Arc Welding - spawanie elektrodą w otulinie);
- 135 - MAG welding (Metal Active Gas - spawanie łukowe w osłonie gazu aktywnego chemicznie elektrodą metalową);
- 136 - MAG welding (Metal Active Gas - spawanie łukowe w osłonie gazu aktywnego chemicznie drutem proszkowym);
- 141 – TIG welding (Tungsten Inert Gas - spawanie łukowe elektrodą nietopliwą w osłonie gazów obojętnych);
- 311 – Acetylene-oxygen welding (Gas).

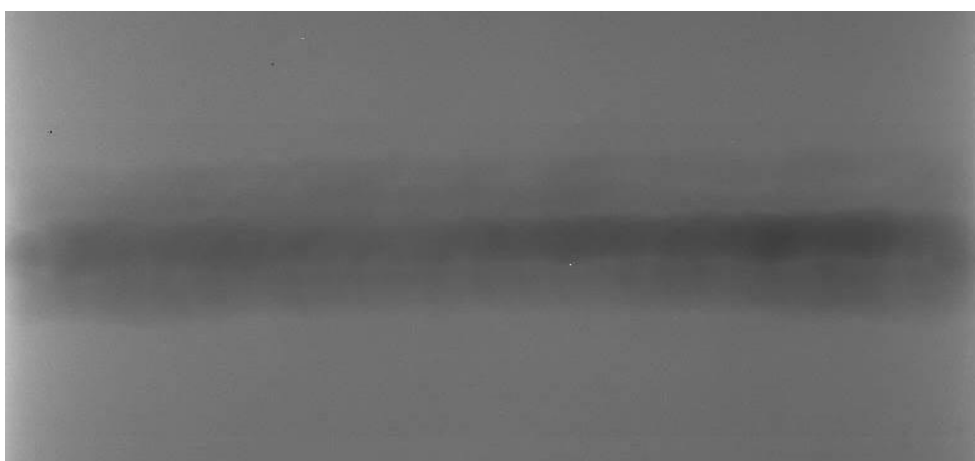
Połączenia spawane wykonano w dwóch opcjach: połączenia referencyjne (wykonane prawidłowo, bez uszkodzeń) oraz złącza wadliwe z wprowadzonym uszkodzeniem - żużel, powietrze (wprowadzane do złącza przez przerwanie procesu spawania), nieferromagnetyczne wtrącenia, przecieki złącza. Widoki połączeń spawanych przedstawiono na rysunkach 4 i 5, a ich zdjęcia rentgenowskie na rysunkach 6 i 7.



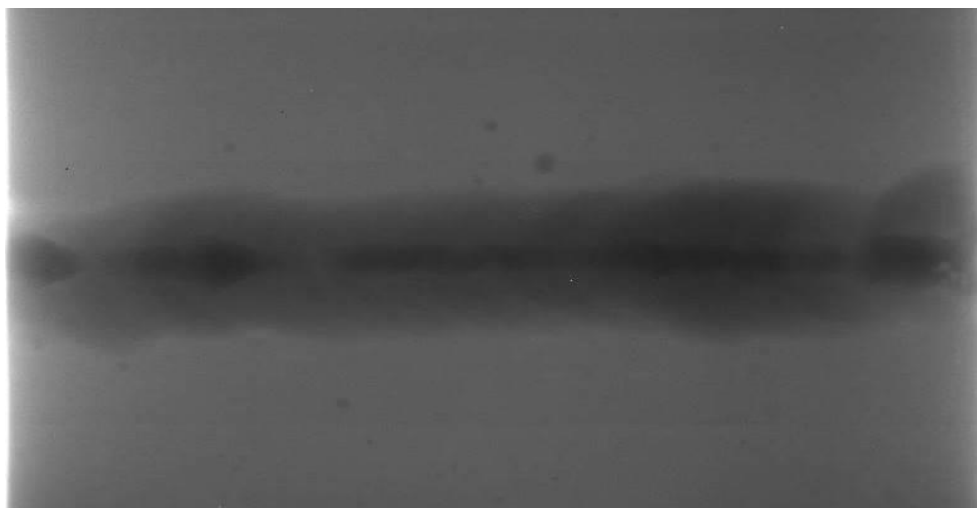
Rys. 4. Połączenie spawane wykonane metodą MAG



Rys. 5. Połączenie spawane wykonane metodą TIG



Rys. 6. Radiogram próbki wzorcowej 136/02



Rys. 7. Radiogram próbki wadliwej 136/01

2.2 Matryca pomiarowa

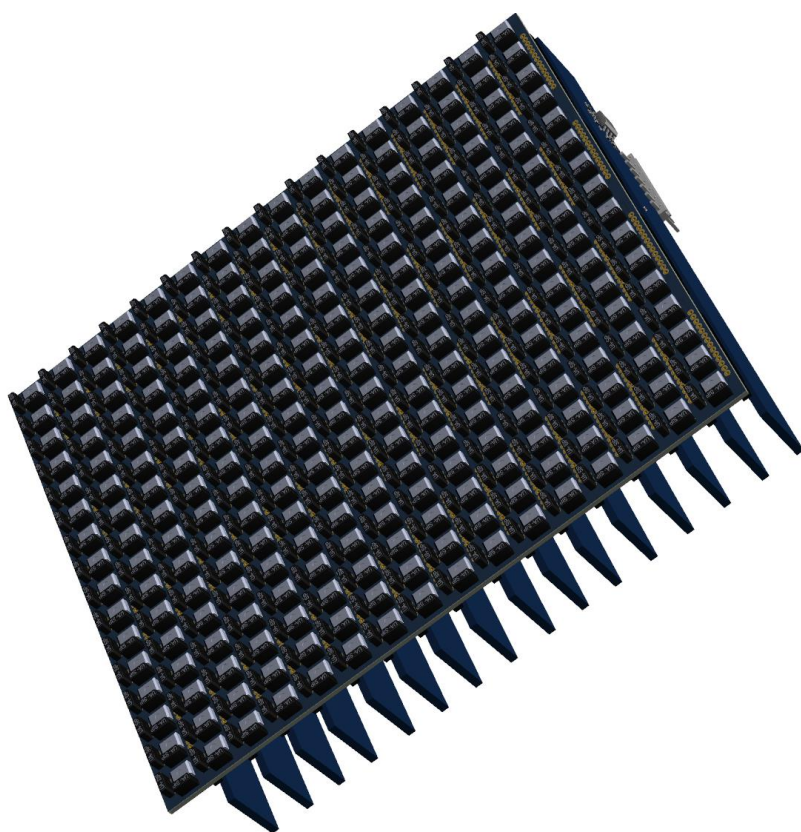
Wyciek strumienia magnetycznego rejestrowano za pomocą specjalnie skonstruowanej matrycy pomiarowej składającej się z 768 jednoosiowych miniaturowych czujników firmy Allegro MicroSystems o zakresie pomiarowym od 0 do 5 Gausów, których zasada działania oparta jest na wykorzystaniu efektu Halla. Zaprojektowana i wykonana matryca pomiarowa o wymiarach 125 x 110 mm składa się z 256 trójosiowych punktów pomiarowych /16 kolumn i 16 wierszy/ (Rys. 8 i 9). W każdym punkcie pomiarowym umieszczono trzy wzajemnie prostopadłe czujniki, które niezależnie mierzą trzy ortogonalne składowe pola magnetycznego:

- H_x - składowa prostopadła do badanej spiny i styczna do płaszczyzny próbki;
- H_y - składowa normalna do płaszczyzny próbki;
- H_z - składowa równoległa do badanej spiny i styczna do płaszczyzny próbki.

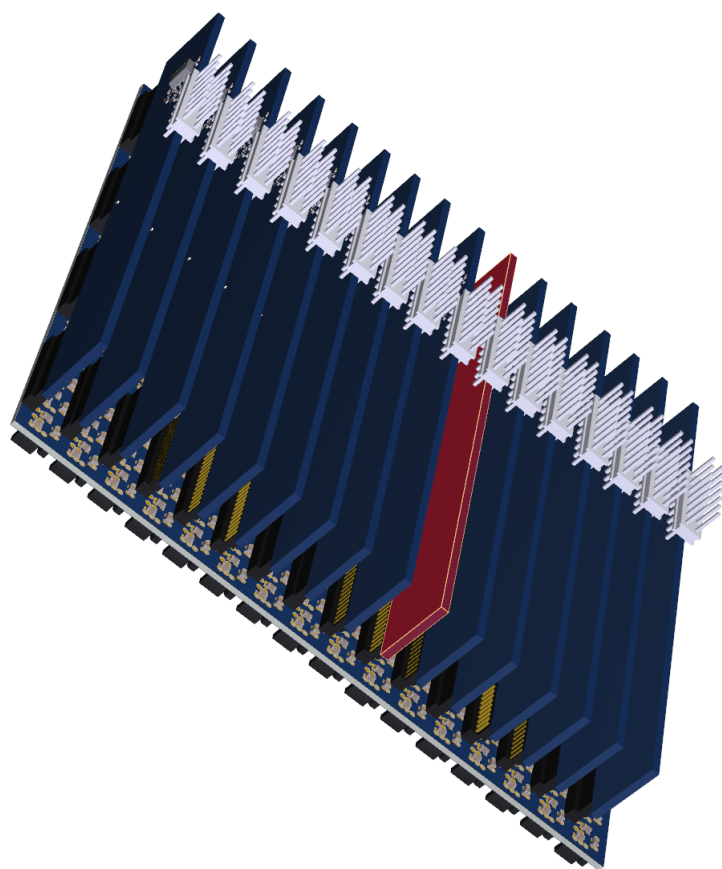
Ze względu na duży pobór prądu ograniczono pobór mocy matrycy wprowadzono sekwencyjne załączanie zasilania poszczególnych kolumn (jednocześnie 48 czujników). W celu zmniejszenia wpływu zastosowanego przełączania zasilania poszczególnych kolumn z czujnikami (multiplikacji), sygnały z pojedynczych czujników wstępnie wzmacniano we wzmacniaczu akustycznym i filtrowano w filtrze dolnoprzepustowym ograniczającym pasmo sygnału do 300 Hz. Następnie przed podaniem sygnałów pomiarowych do przetwornika A/C mikrokontrolera ponownie sygnał wzmocniono we wzmacniaczu zastosowanym do każdej kolumny pomiarowej. Łącznie źródłowe sygnały pomiarowe z czujników wzmocniono 200 krotnie.

Ponieważ podczas testów zaobserwowano rozrzut parametrów czujników, zastosowano wstępną kalibrację, którą przeprowadzano przed każdym cyklem pomiarowym. Kalibrację matrycy realizowano poprzez podanie z przetwornika mikrokontrolera Raspberry 3 na wejście każdego czujnika takiej wartości napięcia odniesienia, aby na wyjściu uzyskać z dokładnością do 1 mV poziom 2,5 V, który odpowiada zerowemu natężeniu pola magnetycznego.

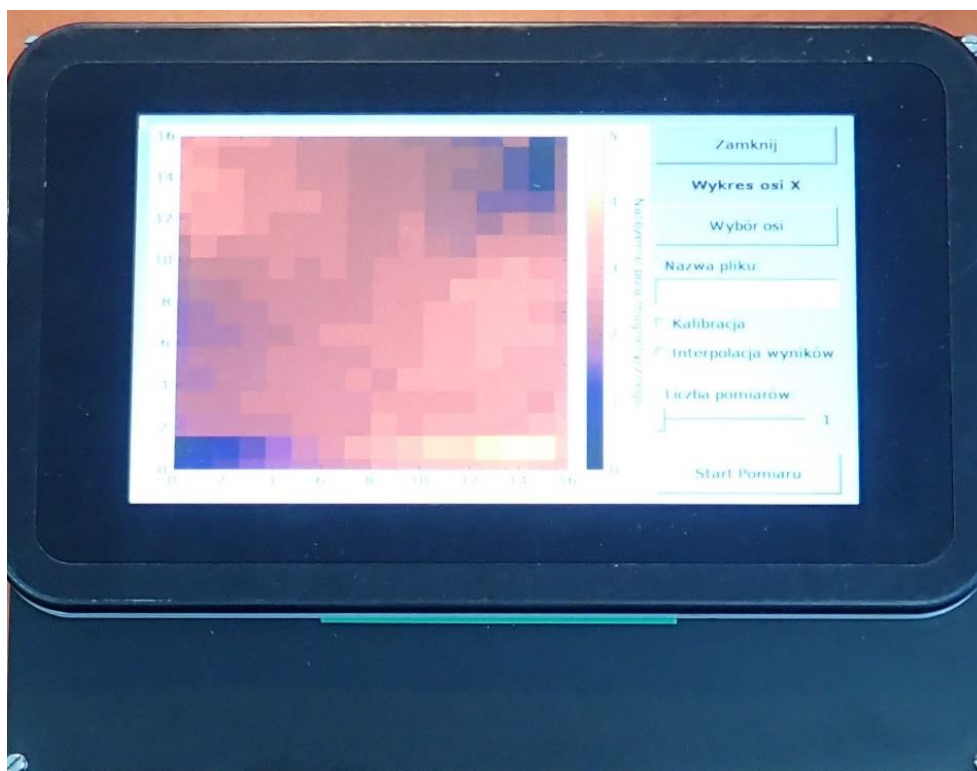
Wybór poszczególnych czujników, sterowanie zasilaniem, pomiar odbieranych sygnałów oraz zapis zrealizowano przy wykorzystaniu mikrokomputera Raspberry 3. Do wstępnego zobrazowania wyników badań zastosowano 7" dotykowy ekran wyświetlacza (Rys. 10). Zarejestrowane na karcie pamięci typu microSD wartości napięć wyjściowych magnetometrów przedstawiano w skali barw.



Rys. 8. Awers matrycy pomiarowej



Rys. 9. Rewers matrycy pomiarowej



Rys. 10. Dotykowy ekran wyświetlacza

Ponieważ wartość wyjściowego napięcia czujnika, proporcjonalna do wartości natężenia mierzonego pola magnetycznego, zawierała się w przedziale od 0 do 5 V, przed wykonaniem analiz odejmowano od wartości wyjściowego napięcia czujnika napięcie 2,5 V. Ten zabieg ułatwiał interpretację wskazań czujnika, gdyż wówczas brak pola magnetycznego sygnalizowany był zerowym napięciem wyjściowym czujnika.

2.3 Badania połączeń spawanych metodą pomiaru natężenia magnetycznego pola rozproszonego

Badane elementy były poddane działaniu zewnętrznego sztucznego pola magnetycznego generowanego za pomocą defektoskopu DMS-11 firmy TechPan zasilanego z zasilacza stabilizowanego P335 o płynnej regulacji napięcia do 35 V i prądu do 6 A. Magnesowanie próbek odbywało się bezpośrednio przed sporządzaniem magnetogramów, a jarzmo defektoskopu zasilano prądem o natężeniu 3 A. Na rysunku 11 przedstawiono zestaw pomiarowy używany podczas przeprowadzonych testów.

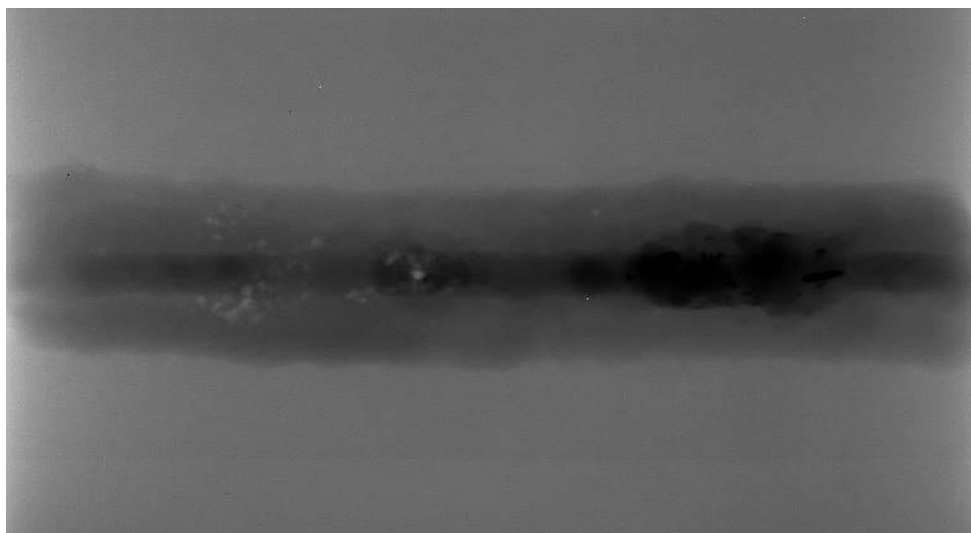
Przed przystąpieniem do badań magnetycznych, wykonano badania radiograficzne próbek. Przykładowe radiogramy próbek zamieszczono na rysunkach 12 i 13.



Rys. 11. Zestaw pomiarowy używany do aktywnych badań magnetycznych

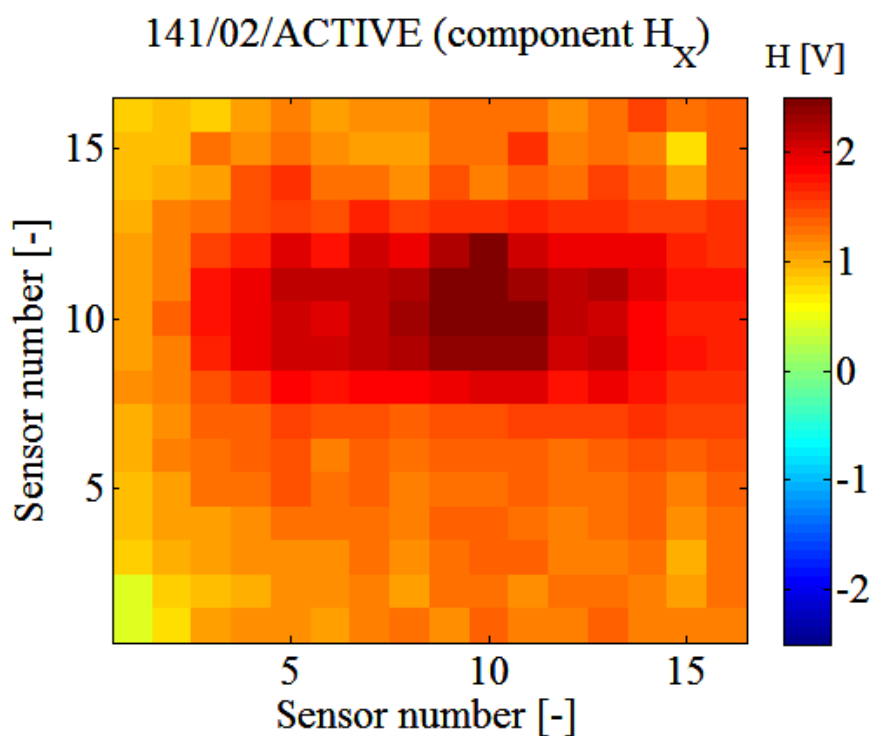


Rys. 12. Radiogram próbki wzorcowej 141/02

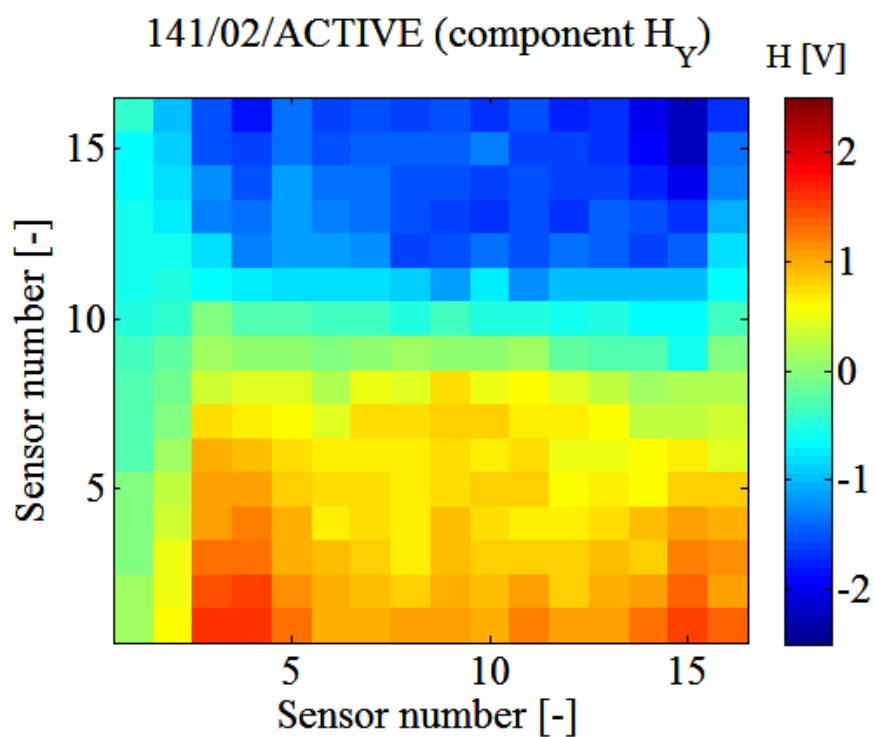


Rys. 13. Radiogram próbki wadliwej 141/01

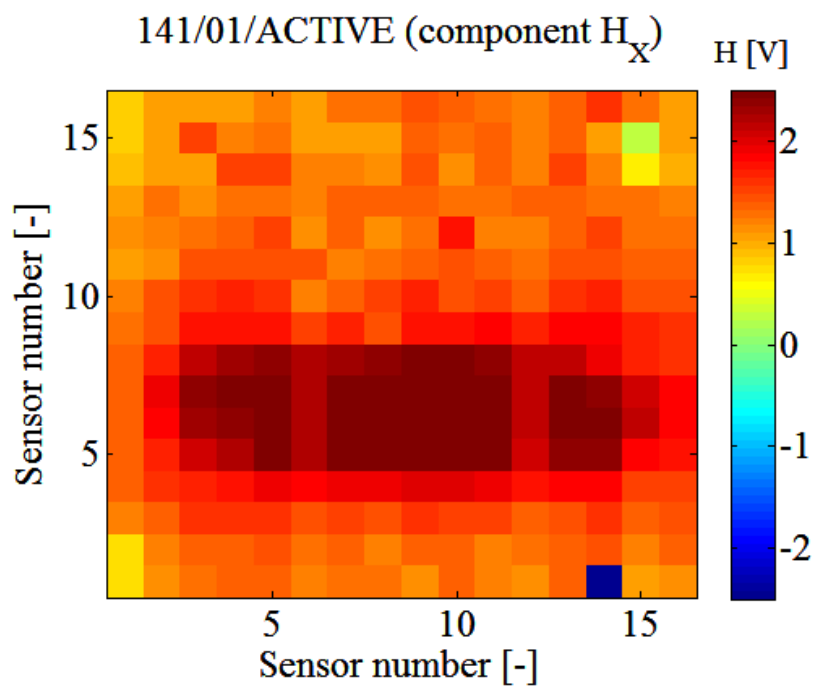
Przed każdym cyklem badań magnetycznych przeprowadzano kalibrację czujników pomiarowych. Próbkę połączeń spawanych badano trzykrotnie. Wyniki pomiarów pola magnetycznego na powierzchni próbek przed zapisaniem na karcie pamięci programowo uśredniano. Na rysunkach 14 - 17 przedstawiono przykładowe magnetogramy wykonane w trakcie badań.



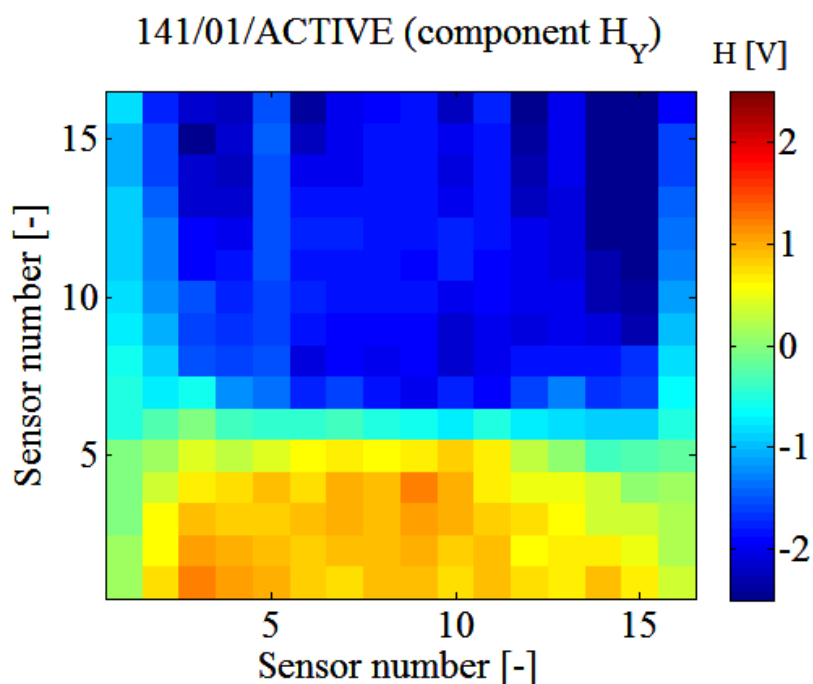
Rys. 14. Rozkład składowej H_x pola magnetycznego na powierzchni próbki wzorcowej 141/02



Rys. 15. Rozkład składowej H_Y pola magnetycznego na powierzchni próbki wzorcowej 141/02



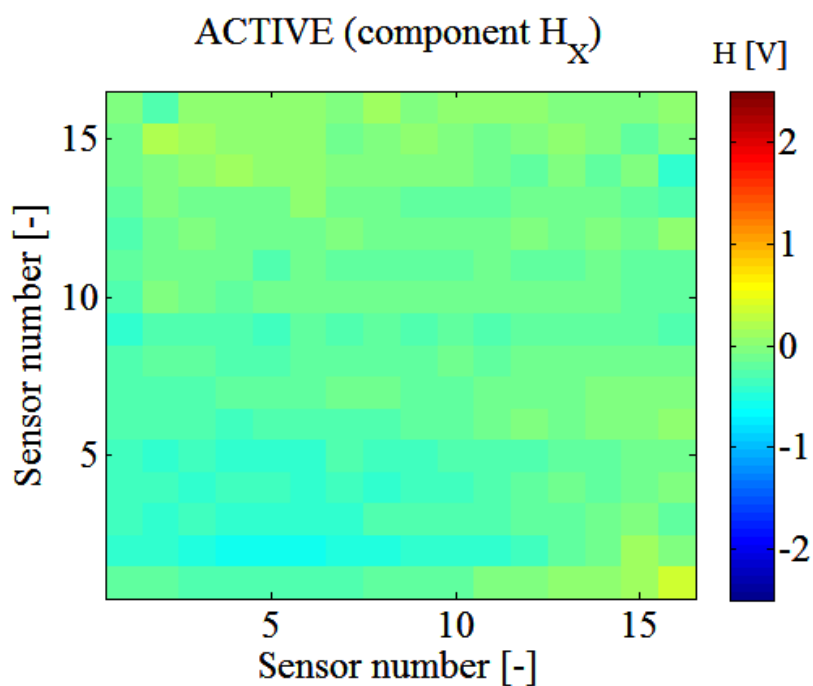
Rys. 16. Rozkład składowej H_X pola magnetycznego na powierzchni próbki wadliwej 141/01



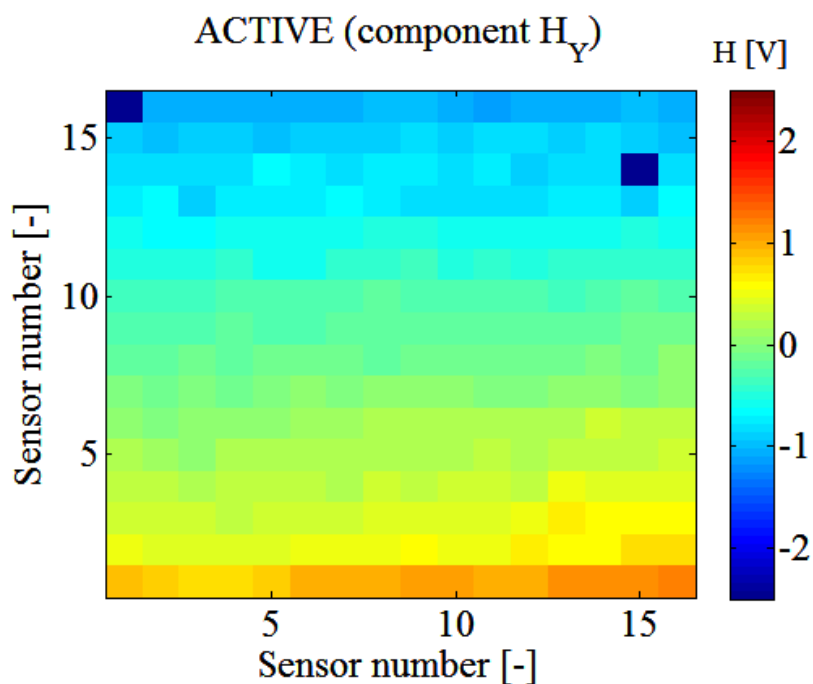
Rys. 17. Rozkład składowej H_y pola magnetycznego na powierzchni próbki wadliwej 141/01

Magnetogramy powierzchni próbek wykonane za pomocą aktywnej metody magnetycznej wykazały, że natężenie pola magnetycznego na powierzchni próbek zmieniało się w istotny sposób. Składowa H_x pola magnetycznego (prostopadła do badanej spoiny i styczna do płaszczyzny próbki) osiągała największą wartość nad spoiną. W przypadku próbki wadliwej, obszar maksymalnych wartości składowej H_x pola magnetycznego był większy, niż w przypadku próbki wzorcowej. Samo pojawienie się wyraźnego maksimum składowej H_x pola magnetycznego sygnalizuje niejednorodność próbki wywołaną obecnością spoiny, co można stwierdzić porównując magnetogram próbki ze spoiną i próbki jednolitej, bez spoiny (Rys. 18).

Składowa H_y pola magnetycznego (normalna do płaszczyzny próbki) zmieniała nad spoiną swój zwrot. W przypadku próbki wadliwej, zmiana zwrotu składowej H_x pola magnetycznego była bardziej gwałtowna, niż w przypadku próbki wzorcowej. W sytuacji braku niejednorodności próbki wywołanej obecnością spoiny, zmiana zwrotu składowej H_x pola magnetycznego dokonuje się w sposób łagodny i stopniowy, co można zaobserwować na magnetogramie próbki jednolitej, bez spoiny (Rys. 19).



Rys. 18. Rozkład składowej H_x pola magnetycznego na powierzchni jednolitej próbki (bez połączenia spawanego)



Rys. 19. Rozkład składowej H_y pola magnetycznego na powierzchni jednolitej próbki (bez połączenia spawanego)

3 WNIOSKI

Wyniki przeprowadzonych badań wskazują, że przedstawione podejście diagnostyczne stanowi dobrą metodę analizy obszarów o naprężeniach wewnętrznych, odkształceniach lub mikropęknięciach i może być stosowana jako wstępny sposób diagnozowania obiektów

technicznych. Magnetogramy uzyskane za pomocą aktywnej metody magnetycznej dostarczyły istotnych informacji o badanej powierzchni. Nieużyteczna okazała się jedynie składowa H_z pola magnetycznego (równoległa do badanej spoiny i styczna do płaszczyzny próbki). Analiza rozkładu pozostałych dwóch składowych pola magnetycznego nad badaną powierzchnią umożliwia wykrycie niejednorodności materiałowej i ocenę jej skali. Stwarza to możliwość wykrycia spoiny „zamaskowanej” (np. zeszlifowanej i zamalowanej), co może być istotne w przypadku kontroli oryginalności oznakowań identyfikacyjnych pojazdów samochodowych.

Możliwa staje się również ocena jakości wykonania spoiny lub oszacowanie stanu technicznego eksploatowanej spoiny. Ocena jest oczywiście zgrubna, gdyż wartość natężenia magnetycznego pola rozproszonego pozwala tylko ogólnie wnioskować o wielkości niejednorodności. Badania magnetyczne są jednak szybkie (krótki czas tworzenia magnetometrów, brak specjalnych przygotowań badanych powierzchni) i w konsekwencji tanie. Możliwe jest zatem zastosowanie aktywnej metody magnetycznej jako „przesiewowej” metody detekcji wad połączeń spawanych.

Warto również zaznaczyć, że diagnostyczne wykorzystanie magnetogramów badanych powierzchni nie ogranicza się jedynie do badań połączeń spawanych i może być z powodzeniem wykorzystane w detekcji innego rodzaju niejednorodności badanych elementów spowodowanych np. pęknięciami kuźniczymi, zmęczeniowymi, hartowniczymi, szlifierskimi, rozerwaniami i wgnieceniami oraz ubytkami korozyjnymi. Metodą magnetyczną mogą być badane elementy wykonane z materiałów ferromagnetycznych: stali ferrytycznych, żeliwa oraz staliwa. Elementy wykonane ze stali austenitycznych nie mogą być w ten sposób badane. Możliwym jest wykrywanie niejednorodności i nieciągłości materiałowych powierzchniowych i stosunkowo dużych podpowierzchniowych, ale położonych blisko badanej powierzchni.

LITERATURA

- [1] Augustyniak B. O przyczynach magnetycznych właściwości stali i ich wykorzystaniu w badaniach nieniszczących. Zakopane, XIV Seminarium Nieniszczące Badania Materiałów, 04.03.07.03.2008.
- [2] Czuchryj J., Wnęk T. Badania nieniszczące złączy spawanych. Wydanie II poprawione, Gliwice, Instytut Spawalnictwa, 1998.
- [3] Drop M., Litwinowicz L., Włoczyk E. Diagnostyka materiałowa elementów urządzeń energetycznych i prognozowanie trwałości. cz. II. Warszawa, Biuro Gamma, 2011.
- [4] Lewińska-Romicka A. Badania magnetyczne. Tom I. Warszawa, Biuro Gamma, 1998.
- [5] Lewińska-Romicka A. Badania magnetyczne. Tom II. Warszawa, Biuro Gamma, 1998.
- [6] Lipka M. Badania magnetyczno-proszkowe. Gliwice, Politechnika Śląska w Gliwicach, 2004.
- [7] Pashagin AI, Benklevskaya NP. Magnetic-powder testing of components using magnetic indicator packages. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2000, vol. 36, issue 9, pp. 640–646
- [8] Piech T. Badania magnetyczne. Warszawa, Biuro Gamma, 1998.
- [9] Totten G., Howes M., Inoue T. (Eds.) Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel. Ohio, ASM International, 2002.