

Jim Costain¹, Neil R. Pearson¹, Matthew A. Boat¹, Radosław Boba^{2*}

¹Swansea Enterprise Park, Great Britain

²Jaworzno, Polska

Możliwości współczesnych skanerów den zbiorników działających w oparciu o metodę strumienia rozproszenia pola magnetycznego

Capability of modern tank floor scanning with Magnetic Flux Leakage

ABSTRACT

The article below depicts the current state of MFL technology utilized in testing of storage tanks floor. The main advantage of the MFL is the capability of locating and appraising the size of the defects on large areas in a fast and effective way. Similarly as with other testing methods there are limitations which can have influence on consistency and credibility of the reported defects, however quite often the MFL is considered to be an easy screening method, in which every competent inspector can easily interpret the results. There are many wrong opinions concerning MFL which are mainly caused by lack of knowledge or awareness. Additionally, the article will also cover the solutions used in MFL scanners available on the market that allow the users to obtain high resolutions of scanning as well as the making the distinction between faults and defects located on the surface from the tested side and those located on the opposite side.

Keywords: magnetic flux leakage, MFL, inspection, storage tank floor

STRESZCZENIE

Niniejszy artykuł przedstawia obecny stan metody magnetycznego strumienia rozproszenia (MFL) wykorzystywanej do badania den zbiorników magazynowych. Podstawową zaletą MFL jest możliwość zlokalizowania i oszacowania wielkości defektów na dużych obszarach. Istnieją ograniczenia, które mogą mieć wpływ na spójność i wiarygodność raportowanych wad. Często metoda MFL jest traktowana jako prosta metoda przesiewowa, w której każdy kompetentny inspektor może łatwo interpretować wyniki. Istnieje wiele błędnych opinii dotyczących MFL, które wynikają głównie z braku wiedzy lub nieświadomości. W artykule zostaną przedstawione ograniczenia oraz wskazówki, w jaki sposób je zredukować. Omówione zostaną rozwiązania stosowane w skanerach MFL pozwalające na uzyskanie wysokich rozdzielczości skanowania oraz rozróżnienie wad na powierzchniach od strony badania od wad po przeciwległej stronie.

Słowa kluczowe: strumień rozproszenia pola magnetycznego, MFL, badania, dno zbiornika magazynowego

1. Wprowadzenie

Metoda strumienia rozproszenia pola magnetycznego (MFL) jest szeroko stosowana do badań nieniszczących dużych konstrukcji stalowych takich jak naziemne zbiorniki magazynowe [1]. Badanie MFL doskonale sprawdza się w inspekcji den ze względu na możliwość szybkiego badania dużych powierzchni. Obszary te, mogące mieć setki m², wymagają od urządzeń MFL zlokalizowania wad z milimetrowymi dokładnościami oraz precyzyjnego określenia ubytku materiału. Oznacza to, że jednocześnie sprzęt MFL musi zapewniać wysoką dokładność, powtarzalność i wiarygodność obrazowania wad.

Badania nieniszczące zbiorników magazynowych mogą obejmować wiele różnych metod, jednak to MFL jest używana do pokrycia największej powierzchni den. Ograniczenie wykorzystania takich urządzeń jest podyktowane głównie ich konstrukcją, a w przypadku MFL ograniczenie wynika z wielkości jarzm magnetycznych. Jakość kontroli jest zmienna i zależy od prawidłowej konfiguracji, odpowiedniego określenia przedmiotu badania oraz poziomu wiedzy operatora na temat samej technologii.

*Autor korespondencyjny. E-mail: radoslaw.boba@casp.pl

Badania UT to szczególnie przypadek, w którym istnieją różne poziomy wykształcenia i kwalifikacji. Obecnie badaniom MFL poświęca się mniejszą uwagę niż innym metodom, nie dostrzegając możliwości tej metody, co wynika głównie z braku wiedzy oraz braku dostępu do szkoleń i dostępności urządzeń.

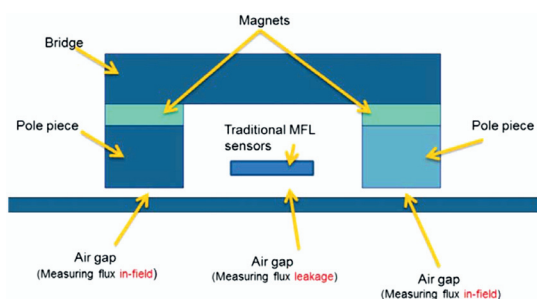
Niniejszy artykuł ma odpowiedzieć na podstawowe pytania pojawiające się w odniesieniu do samej technologii, jak i możliwości nowoczesnych skanerów MFL.

2. Podstawy MFL

Podstawową zasadą inspekcji elementów ferromagnetycznych metodą MFL jest uzyskanie odpowiedniego nasycenia polem magnetycznym materiału w obszarze badania. W sąsiedztwie wady wzrasta opór do indukowania pola magnetycznego i jeśli jest on wystarczająco wysoki, pole magnetyczne rozchodzi się wokół ubytku materiału. To pole może opływać wadę w otaczającym materiale, a także "rozpraszać się" poza jego granice. Ilość rozpraszanego pola magnetycznego można mierzyć przy użyciu odpowiednio umieszczonych czujników magnetycznych, które zwykle znajdują się w pobliżu powierzchni. Dla szybkiej kontroli den zbiorników przeważnie wykorzystuje się skanery z zabudowaną macierzą czujników ułożoną w linii prostopadłej do kierunku jazdy, co pozwala na mapowanie ubytków

w materiale przy jednym przejeździe skanera.

Obwód magnetyczny jest wytwarzany w układzie jarzma przedstawionym na Rys. 1. i składa się z dwóch magnesów, pomostu i dwóch nabiegowników. Jarzmo magnetyczne znajduje się blisko badanej powierzchni, na wysokości około 4 mm. Czujniki magnetyczne do pomiaru magnetycznego pola rozproszenia usytuowane są w równej odległości pomiędzy dwoma biegunami. Regulując wysokość czujników MFL nad badaną powierzchnią, można regulować wzmocnienie sygnału MFL.

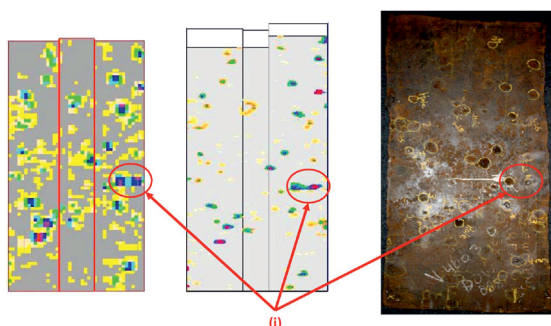


Rys. 1. Elementy jarzma magnetycznego oraz usytuowanie tradycyjnych czujników MFL względem siebie oraz względem badanego materiału.

Fig. 1. Elements of magnetic yoke and the placement of traditional MFL sensors in regard to one another as well as the tested material.

3. Możliwości i ograniczenia MFL

W ostatnich latach technologia MFL szybko ewoluowała i znacznie rozszerzono możliwości urządzeń kontrolnych opartych na MFL. Osiągnięcia w tym zakresie reprezentuje np. urządzenie Floormap3DiM firmy Silverwing [2]. Jednak nawet jeżeli ogólne czynniki wpływające na możliwości metody MFL są znane, konieczne jest przybliżenie technologii oraz ograniczeń metody.



Rys. 2. Dwa badania MFL próbek podłogi rzeczywistego zbiornika. Skany płyty (po prawej) wykonane przy użyciu FloormapVS2i (po lewej) i Floormap3DiM (w środku). Zestawienie sygnałów MFL i zdjęcie rzeczywistej płyty z oznaczonym obszarem (i) z dwoma oddzielnymi otworami.

Fig. 2. Two MFL tests of samples from the bottom of real storage tanks. The scans of the plate (at the right) are done using FloormapVS2i (at the left) and Floormap3DiM (in the middle). The correlation of the MFL signals and the photo of the real plate with "i" area marked, as well as two separate holes.

Podstawowym ograniczeniem w stosowaniu metody MFL jest to, że obecne standardy jej wykorzystania są znacznie niższe niż w innych badaniach, jak np. UT. MFL jest postrzegana jako niszowa i prosta metoda kontroli w porównaniu z innymi metodami NDT. Sygnały MFL są uważane za znacznie

prostsze i wymagają mniej interpretacji ze strony operatora. Jednakże w sygnale MFL zapisane jest wiele informacji - poza sygnałem amplitudy zapisana jest faza sygnału, która może określać czy sygnał pochodzi od spoiny, czy od wady.

Duże zagęszczenie czujników może dostarczyć dodatkowych informacji, pomagając lepiej oszacować kształt wady, co pozwala określić kształt powierzchni. Ulepszone rozwiązania technologiczne oraz wiedza o MFL mogą prowadzić do identyfikacji i klasyfikacji fałszywych wskazań pochodzących od zmiany odległości magnesów i czujników od badanej powierzchni, niejednorodności powłok lub fałszywych wskazań wynikających ze źle przygotowanych lub źle oczyszczonych powierzchni.

Mimo że badanie MFL jest stosunkowo proste i surowe, ocena rozmiaru wady wymaga określonych umiejętności i doświadczenia. W przeciwieństwie do panującego przekonania, MFL wymaga starannej konfiguracji urządzenia, kalibracji w określonym zakresie oraz właściwego użycia urządzenia. Interpretacja sygnałów może być obciążona błędem tak jak w innych metodach NDT, jeżeli nie weźmie się pod uwagę takich czynników, jak stan powierzchni płyty, grubość powłok, stan zabrudzenia dna zbiornika. Mimo że istnieje wiele parametrów MFL, które muszą być dopasowane do aplikacji, takie jak np. nasycenie, istnieją dwa kluczowe parametry wad, które są potrzebne do interpretacji.

Pierwszym z nich jest zdolność do określenia geometrii wad, a drugi odnosi się do wiedzy na temat ich pochodzenia. Kolejna sekcja rozważa te parametry w odniesieniu do rozwiązań technologicznych i możliwości ułatwienia interpretacji sygnałów MFL.

4. Nowoczesne funkcje MFL

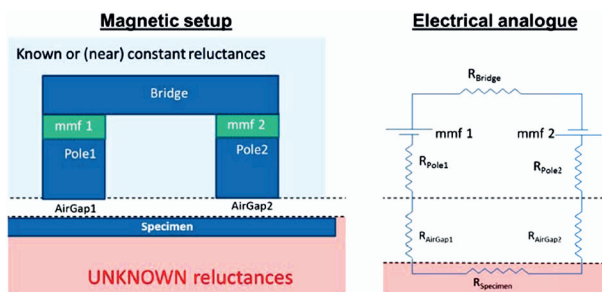
W tej sekcji zaprezentowane zostaną dwa kluczowe rozwiązania w inspekcji MFL den zbiorników magazynowych. Pierwsze dotyczy rozdzielczości czujników i jej wpływu na analizę kształtu ubytku. Drugie rozwiązanie oparte na dodatkowym zestawie czujników pozwala rozróżnić miejsce występowania ubytków pomiędzy powierzchnią dolną i górną płyty.

4.1 Rozdzielczość

Na Rys. 2. przedstawiono przykłady mapy MFL zarejestrowanej przy użyciu urządzeń o dwóch różnych gęstościach czujników. Każdy obraz pochodzi z tej samej stalowej płyty i składa się z trzech skanów, które po połączeniu razem tworzą widok płyty. Na podstawie obu obrazów można stwierdzić, że na płycie istnieje znaczna liczba obszarów z ubytkami materiałowymi. Mapa z ubytkami FloormapVS2i jest generowana na podstawie matrycy czujników z 16 kanałami. Odpowiada to rozdzielczości około 15 x 15 mm. Każdy pomiar jest reprezentowany przez kwadratowy blok i oznaczony kolorem proporcjonalnym do natężenia MFL: niskie wartości MFL są przedstawione kolorem żółtym i zielonym, wyższe wartości pola rozproszenia są przedstawione kolorem niebieskim i różowym, a maksymalny ubytek materiału kolorem czerwonym.

Na mapie korozji pochodzącej z Floormap3DiM widać wyraźnie odstęp pomiędzy wadami. Dzięki odległości między czujnikami 4,5 mm, próbkującymi co 2 mm, zastosowanie

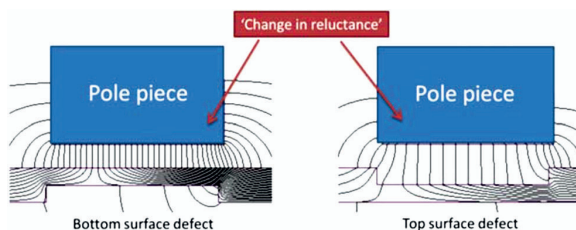
3DiM oznacza wzrost rozdzielczości o współczynnik 22,5, co zwiększa prawdopodobieństwo znalezienia mniejszej wady. Kolejnym efektem zwiększonej rozdzielczości jest prezentacja kształtu ubytku, co jest niemożliwe w rozwiązaniach niskiej rozdzielczości jak VS2i. Na podstawie Rys. 2. można również stwierdzić, że zwiększona rozdzielczość może umożliwić także segregację i klasyfikację poszczególnych wad.



Rys. 3. Poglądowe zobrazowanie elementów jarzma magnetycznego i jego odpowiednik w postaci elektrycznego obwodu analogowego.

Fig. 3. Outlook visualization of the magnetic yoke elements as well as its counterpart in form of analog electrical circuit.

Istnieją jednak pewne warunki, kiedy wady lub otwory w bliskim sąsiedztwie generują tak wysokie poziomy pola rozproszenia, że pojawiający się sygnał wynikowy MFL łączy je, obrazując jedną wadę. Takie sygnały scalone są obecne niezależnie od gęstości czujników magnetycznych, a zatem są wynikiem indukowanego pola magnetycznego. Przykład scalonych wskazań MFL z dwóch oddzielnych wad jest oznaczony (i). Chociaż może to być postrzegane jako ograniczenie MFL, większość uszkodzeń może być jednoznacznie powiązana z wadami występującymi na obrazie rzeczywistej płyty.



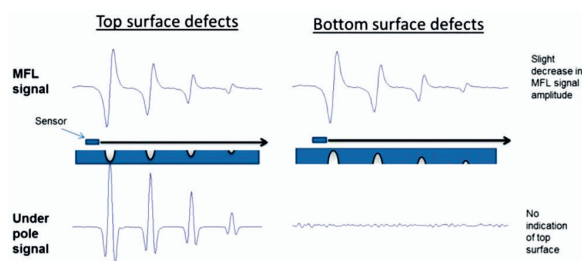
Rys. 4. Rozkład linii strumienia magnetycznego pod biegunem magnesu, gdy wada jest na górze oraz gdy równoważna wada jest na dole. Należy zauważyć, że tylko jeden nabiegownik w obwodzie magnetycznym jest przedstawiony, a wielkość wady jest wybrana dla celów ilustracyjnych. Ponieważ odległość między dolną powierzchnią bieguna, a powierzchnią badaną wzrasta, gęstość linii strumienia magnetycznego spada, a tym samym następuje zmiana oporu, która następnie jest mierzona.

Fig. 4. The dispersion of the magnetic flux lines under the magnetic pole, if the fault is on top, and if an equivalent fault is down. It is important to notice that only one pole piece in the magnetic circuit is depicted, and the size of the fault is picked for illustrational purposes. Since the distance between the lower surface of the pole, and the inspected surface increases, the density of the magnetic flux lines is decreasing, which in turn causes the change in resistance which is measured.

4.2 Odróżnienie wad występujących na powierzchni dolnej i górnej płyty

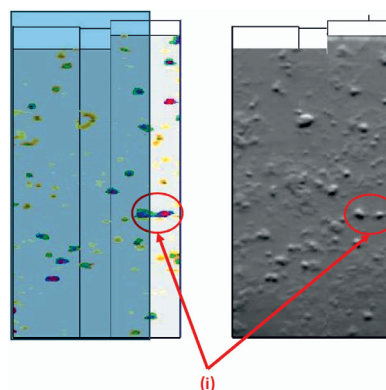
Jarzmo magnetyczne pokazane wcześniej na Rys. 1. zostało zilustrowane na Rys. 3. wraz z jego odwzorowaniem

w postaci analogowego układu elektrycznego. Na jego podstawie można wyjaśnić sposób rozpoznania wady występującej na powierzchni dolnej i górnej. Ze schematu obwodu magnetycznego widać, że wartość magnetycznego oporu jarzma obu nabiegowników i do pewnego stopnia badanego materiału mają stałe parametry. Należy zauważyć, że dwa magnesy mmf1 i mmf2 pokazane są na schemacie elektrycznym jako źródła napięcia. Przez tę prostą analogię, przy pominięciu zmian potencjału wynikających z występującej wady na płycie, jedyne różnice oporu w obwodzie magnetycznym są wynikiem zmian w szczelinie powietrznej. Przy większej szczelinie powietrznej opór magnetyczny będzie większy. Jest to równoznaczne ze zwiększeniem rezystancji szczeliny powietrznej w układzie elektromagnetycznym. Zmiany szczeliny powietrznej można przypisać do kilku czynników, w tym odkształcenia płyty i uszkodzeń na górnej powierzchni próbki. W przypadku wad powierzchniowych zmiany w odległości pomiędzy dnem nabiegownika (magnes 1 lub 2) będą wpływać na szczelinę powietrzną w niemal liniowy sposób [3]. W przypadku wady, większa głębokość zwiększy wielkość szczeliny powietrznej (czyli odległość pod nabiegownikiem) i proporcjonalnie zwiększy opór szczeliny powietrznej. Zatem pomiar wad powierzchniowych może być zrealizowany przy użyciu odpowiednio położonych czujników pod magnesami.



Rys. 5. Sygnał MFL i odpowiedź czujników STAR dla wad występujących na górnej i dolnej powierzchni.

Fig. 5. MFL signal and the response of the STAR sensors for faults existing on upper and lower surface.



Rys. 6. Wyniki MFL i odpowiadające mu wyniki STARS (górna powierzchnia) mapowania fragmentu dna zbiornika pokazanego na Rys. 2. Zobrazowanie z użyciem STARS jest znacznie czytelniejsze niż z wykorzystaniem tylko MFL.

Fig. 6. The MFL results and corresponding STARS results (upper surface) of mapping the fragment of the storage tank bottom shown on picture 2. Visualized with usage of STARS makes it much more legible than when it is done only by using MFL.

Pomiar zmian szczeliny powietrznej realizowany jest przy użyciu czujników magnetycznych (używanych do mierzenia MFL), które są w stanie zmierzyć zmienność gęstości strumienia magnetycznego będącego funkcją wielkości szczeliny powietrznej.

Na Rys. 4. w postaci linii przedstawiono gęstość strumienia magnetycznego w przypadku wady występującej na górnej i dolnej powierzchni. Wysokość szczeliny powietrznej jest funkcją oporu magnetycznego oraz innych parametrów, takich jak przenikalność magnetyczna w szczelinie powietrznej. Można jednak przyjąć, że przenikalność magnetyczna w szczelinie jest wartością stałą.

Pomiary sygnału pod magnesem zostały zaimplementowane w skanerze dna zbiornika Floormap3DiM i mogą dostarczać informację rozróżniającą miejsce występowania wady po zestawieniu z konwencjonalnym sygnałem MFL. Takie uzupełnienie tradycyjnej technologii skanowania den zbiorników MFL zostało zaprojektowane i opracowane przez firmę Silverwing (UK) Ltd i jest nazywane STARS.

Przykładowy zapis danych z MFL i STARS dla wad znajdujących się na górnej i dolnej powierzchni płyty ze stali pokazano na Rys. 5. Na rysunku przedstawiono przekrój wzdłuż osi płyty z wadami o głębokości 20%, 40%, 60% i 80%. Pierwszy obraz przedstawia odpowiedź MFL, gdy wady występują po stronie badania, a drugi obraz, gdy są na dole płyty. Wady te mają profile sferyczne. Tradycyjne dwubiegunowe sygnały MFL pochodzące z pojedynczego czujnika magnetycznego poruszającego się wzdłuż osi płyty na wysokości 4,1 mm zostały pokazane w górnej części Rys. 5. Jako że kolejne ubytki są coraz mniejsze, intensywność sygnału MFL proporcjonalnie maleje. Można zauważyć, że sygnał nie jest proporcjonalny do głębokości wady, a do jej objętości jak opisano w pracach Saundersona [4]. Jak wskazano w kilku publikacjach [5, 6, 3, 7, 8], sygnały MFL mają podobną charakterystykę dla wad o podobnej geometrii występujących na powierzchni od strony badania i po przeciwległej stronie płyty. Mimo że istnieje jeszcze niewielki wzrost amplitudy generowany przez wady na powierzchni od strony badania, to sygnały można uznać za wiarygodne i poddać dalszemu przetwarzaniu. Dzięki temu technologia STARS jest wykorzystywana do pomiaru wad na powierzchni od strony badania. Znając odpowiedź układu MFL dla wad występujących od czoła i na dnie płyty, przy użyciu czujników STARS można jednoznacznie stwierdzić, na której powierzchni występują ubytki korozyjne.

Rys. 6. pokazuje typowe zobrazowania, które mogą być uzyskane przy użyciu technologii STARS. Mapa MFL pokazana po lewej i STARS po prawej stronie wykonane zostały na płycie przedstawionej na Rys. 2. Pomijając paletę kolorów, istnieje wyraźna różnica w prezentacji pomiędzy dwiema mapami. Sygnały MFL zostały zoptymalizowane, aby pokazać intensywność, jednak dwubiegunowy charakter STAR i przejrzystość prezentacji wad pozwala na ich czytelne przedstawienie w skali szarości. Będąc dwubiegunowym, mediana sygnału, która wskazuje na brak ubytków na górnej powierzchni jest przedstawiana kolorem szarym. Należy zauważyć, że zarówno dla MFL, jak i STARS wykorzystywane

są czujniki o tej samej rozdzielczości, ale STARS zapewnia lepsze zobrazowanie kształtu ubytku. MFL dąży do scalenia wad, które generują duży wpływ pola i znajdują się w bliskiej odległości, jednak odpowiadające im sygnały STARS pokazują wyraźne i odrębne wady. Wyraźne rozróżnienie dwóch połączonych wad opisanych w sekcji 2 jest wskazane przez (i). Większość wad w przykładowej płycie znajduje się na górnej powierzchni i tylko otwory zostałyby wykryte przez STARS, jeżeli skanowanie wykonano od drugiej strony.

5. Wnioski

W przeszłości metoda MFL postrzegana była jako dość prymitywna i niezbyt powtarzalna. Dostępne obecnie technologie pozwalają traktować technikę MFL na równi z innymi metodami badań nieniszczących, jednak ze względu na ograniczony dostęp do urządzeń oraz szkoleń, nadal na rynku funkcjonują błędne opinie. Podnoszenie kwalifikacji personelu badań nieniszczących dla lepszego zrozumienia techniki MFL oraz pewności interpretacji wyników badań den zbiorników może prowadzić do upowszechnienia metody. Równocześnie istotne jest zakwalifikowanie samej metody przez służby dozоровe i właścicieli zbiorników magazynowych jako metody powtarzalnej i wiarygodnej.

W artykule pokazano, w jaki sposób niektóre ograniczenia były i są nadal postrzegane oraz jak obecny stan techniki pozwala te ograniczenia likwidować. Narzędzia wykorzystywane w obecnie dostępnych na rynku skanerach MFL gwarantują dużą rozdzielczość badania, wysoką jakość gromadzonych danych, ich intuicyjną analizę oraz łatwe sposoby raportowania i zobrazowania danych.

6. Literatura/References

- [1] Jim Costain, Neil R. Pearson, Matthew A. Boat. Capability of modern tank floor scanning with Magnetic Flux Leakage. 19th World Conference on Non-Destructive Testing 2016.
- [2] Silverwing (UK) Ltd. website. <http://www.silverwingndt.com/magnetic-fluxleakage/floormap3di-mfl-tank-floor-scanner>, March 2016.
- [3] P. C. Charlton. Atheoretical and experimental study of the magnetic flux leakage method for the analysis of corrosion defects in carbon steel plate. PhD Thesis, Swansea institute of higher education, 1995.
- [4] D. H. Saunderson. The MFE tank floor scanner - a case history. IEE colloquium on non-destructive evaluation, 1988.
- [5] A. R. Ramirez, J. S.D. Mason, and N. R. Pearson. Experimental study to differentiate between top and bottom defects for mfl tank floor inspections. NDT&E international, 42:16–21, 2009.
- [6] D. L. Atherton and M. G. Daly. Finite element calculation of magnetic flux leakage detector signals. NDT international, 1987.
- [7] S. Lukyanets, A. Snarskii, M. Shamonin, and V. Bakaev. Calculation of magnetic leakage field from a surface defect in a linear ferromagnetic material: an analytical approach. NDT & E International, 36, 2003.
- [8] J. Wilson, M. Kaba, G. Y. Tian, and S. Licciardi. Feature extraction and integration for the quantification of PMFL data. Nondestructive Testing And Evaluation, 25:101–109, June 2010.