

TOMASZ KRAKOWSKI

Badania magnetyczne lin stalowych w miejscach trudno dostępnych

Rosnące wymagania dotyczące bezpieczeństwa, niezawodności oraz jakości powodują, że badania lin stalowych stały się nieodłącznym elementem zarówno etapu produkcji, jak i eksploatacji. Podstawową metodą stosowaną w tym zakresie jest metoda badań magnetycznych lin stalowych (MTR). Mimo szeroko rozwiniętej wiedzy, aparatury i metod analizy sygnałów diagnostycznych trudno dostępne miejsca oraz zakończenia lin stalowych nie są w pełni objęte diagnostyką. Kontrola wizualna, która jest jedną z podstawowych metod badań nieniszczących w tym obszarze, ma istotne ograniczenia. Defektoskopia magnetyczna to dziedzina, w której powstają nowe rozwiązania i konstrukcje przeznaczone do badań lin stalowych. W artykule przedstawiono przykłady rozwiązań wykorzystywanych do diagnostyki miejsc o utrudnionym dostępie. Opisano nową koncepcję układu diagnostycznego do badań magnetycznych lin w tych odcinkach. Zaprezentowano również wyniki wstępnych laboratoryjnych pomiarów weryfikacyjnych nowego rozwiązania.

Słowa kluczowe: liny stalowe, diagnostyka, badania magnetyczne lin stalowych

1. WPROWADZENIE

Metoda badań magnetycznych lin stalowych jest techniką nieniszczącą. Polega na wykrywaniu wad i uszkodzeń lin stalowych uprzednio namagnesowanych stałym polem magnetycznym. W przypadku istnienia wady wokół badanego ferromagnetyka, namagnesowanego stałym polem magnetycznym pojawia się zaburzenie linii sił pola magnetycznego. Wielkość zaburzenia, występującego także w przestrzeni otaczającej obiekt, może być interpretowana i analizowana jako zewnętrzne magnetyczne pole rozproszenia. Zaburzenie to jest zazwyczaj związane z wielkością i położeniem wady. Podstawowy zestaw aparatury pomiarowej składa się z dwóch zespołów: zespołu głowicy pomiarowej i zespołu rejestratora lub innego urządzenia przetwarzającego sygnał diagnostyczny. Efektem pomiaru jest defektogram z zarejestrowanymi wynikami, który jednak wymaga dalszego opracowania [1, 2].

Badanie magnetyczne polega na namagnesowaniu liny wzdłuż jej osi stałym polem magnetycznym (za pomocą głowicy magnetycznej), obserwacji i rejestracji zjawisk, które zachodzą podczas namagnesowywania, interpretacji i obliczaniu na podstawie otrzymanych

sygnałów stopnia zużycia liny. Główne elementy głowicy magnetycznej to obwód magnetyczny, który definiuje się jako zamkniętą drogę strumienia indukcji magnetycznej, będącą częścią pola magnetycznego o większej gęstości energii na jednostkę w porównaniu z częściami otaczającymi, oraz czujniki, które umieszczone są w płaszczyźnie symetrii obwodu magnetycznego [2].

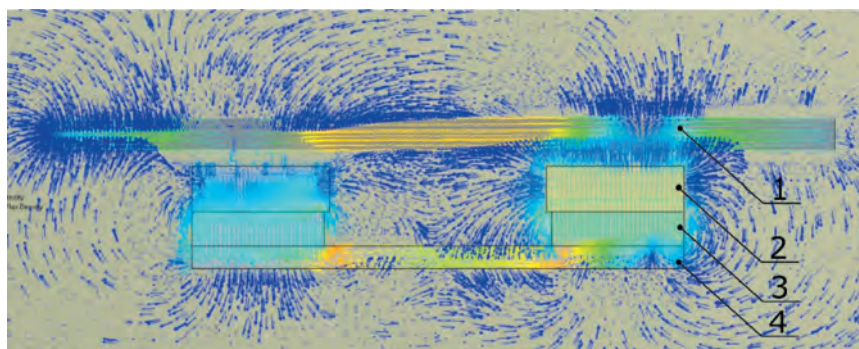
W skład obwodu magnetycznego wchodzi (rys. 1): badany element (lina stalowa), nabiegunniki (zapewniają lepsze wnikanie strumienia magnetycznego w linę), magnesy trwałe (źródło pola magnetycznego, od ich energii magnetycznej zależą: wykrywalność wad, gabaryty i masa głowicy, stosuje się magnesy wykonywane ze stopów lub spieków Ne-Fe-B, Al-Ni-Co, Sm-Co), zwora magnetyczna (zamyka obwód magnetyczny).

W defektoskopii magnetycznej lin stalowych wykorzystywane są obecnie dwa rodzaje czujników. Czujnik indukcyjny, służący do wykrywania nieciągłości o charakterze skokowym (pęknięte druty, brak drutu, naddatek). Czujnik hallotronowy umożliwia wykrycie tzw. uszkodzeń ciągłych, takich jak starcia, korozja itp. oraz uszkodzeń quasi-ciągłych, w tym zagęszczone pęknięcia drutów wzdłuż długości liny, wżery korozyjne, rozluźnienie spletek. W stosowanej aktualnie aparaturze

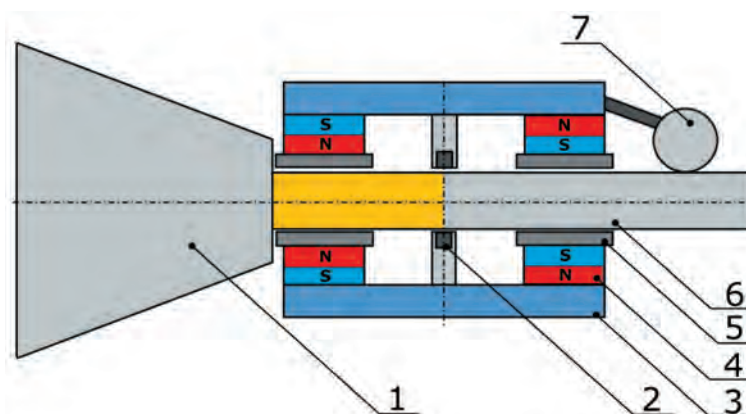
pomiarowej wykorzystuje się czujniki rejestrujące zmianę składowej radialnej wartości magnetycznego strumienia rozproszenia nad badanym elementem.

Dostępne na rynku głowice magnetyczne znakomicie sprawdzają się w badaniach długich odcinków lin stalowych. Ich konstrukcja wiąże się jednak z istotnym ograniczeniem – trudnościami w diagnostyce miejsc o ograniczonej dostępności, takich jak odcinki

z zamontowanymi zaciskami czy zakończenia lin. Ograniczenie to wynika bezpośrednio z budowy aparatury badawczej, w której zespół czujników umieszczony jest w centralnej części obwodu magnetycznego. Taka konstrukcja obwodu magnetycznego i umieszczonego w jego centralnej części czujnika sprawia, że zawsze pozostaje pewien nieprzebadany odcinek liny (rys. 2).



Rys. 1. Magnetowód i rozkład indukcji magnetycznej głowicy:
1 – badana lina, 2 – nabiegownik, 3 – magnes stały, 4 – zwora magnetyczna



Rys. 2. Schemat głowicy do badań lin stalowych z niezbadanym odcinkiem liny oznaczonym kolorem żółtym:
1 – uchwyt stożkowy, 2 – czujnik magnetyczny, 3 – zwora magnetyczna, 4 – magnes stały, 5 – nabiegownik,
6 – badana lina, 7 – przetwornik drogi

2. GŁOWICE POMIAROWE DO BADANIA MIEJSCOWEGO LIN STALOWYCH

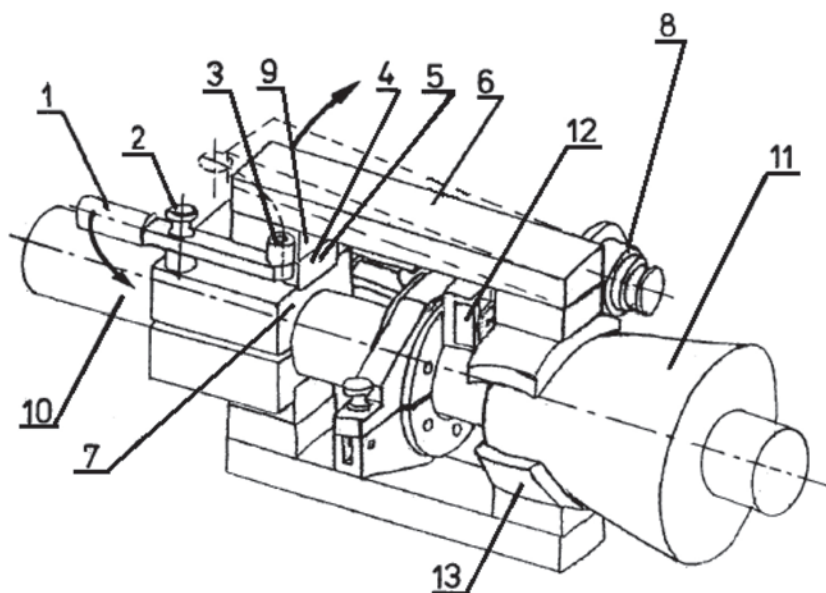
Twórcami metody magnetycznej byli profesorowie Akademii Górniczo-Hutniczej, Mieczysław Jeżewski, Ludger Szklarski i Zygmunt Kawecki. Swoje badania rozpoczęli w 1946 roku od stworzenia podstaw teoretycznych i pierwszych prób zbudowania aparatury pomiarowej. Wcześniej próby wykrywania uszkodzeń wewnętrznych lin bez ich rozplatania prowadzone były w latach 20 XX wieku w USA przez R. Sanforda oraz w latach 30. XX wieku przez A. Otto i F. Wevera,

jednakże wyniki pomiarów nie zgadzały się ze stanem faktycznym. Badania na AGH rozpoczęto od udowodnienia tezy, że uszkodzenia wewnątrz liny powodują zmiany pola magnetycznego. Wyniki badań laboratoryjnych weryfikowane były na obiektach rzeczywistych. W 1962 r. został opatentowany pierwszy na świecie defektograf magnetyczny do badań lin, prętów i rur stalowych. W 1963 roku natomiast twórcy opatentowali nowe rozwiązanie czujnika pomiarowego, które umożliwia wyznaczenie odległości uszkodzenia od osi badanej liny [3]. Przez kolejne lata metoda badań magnetycznych była rozwijana w zakresie jej aplikacji w badaniach lin stalowych oraz takich ele-

mentów, jak np. taśmy przenośnikowe z linkami stalowymi [4], liny stalowo-gumowe [5], ciągną stalowo-poliuretanowe [6], układy prowadzenia dźwigów osobowych [7]. Rozwój metody magnetycznej w obszarze diagnostyki lin stalowych w miejscach trudno dostępnych prowadzony jest przez wiele lat, w wyniku czego powstały między innymi koncepcje zgłoszone jako patenty lub wzory użytkowe [8–11] oraz opisane w publikacjach [12–16]. W większości przypadków są one oparte na rozwiązaniu, w którym w obszarze nieruchomego obwodu magnetycznego magnesującego linę wzdłużnie czujnik magnetyczny przemieszcza się obwodowo lub wzdłużnie względem badanego trudno dostępnego fragmentu liny. Wybrane przykłady takich rozwiązań przedstawiono poniżej.

Pierwszym z przykładów takiej aparatury jest głowica magnetyczna przedstawiona na rysunku 3. Zgodnie z opisem patentowym [8] składa się ona z nabiegunków umieszczonych zarówno na linie, jak i jej

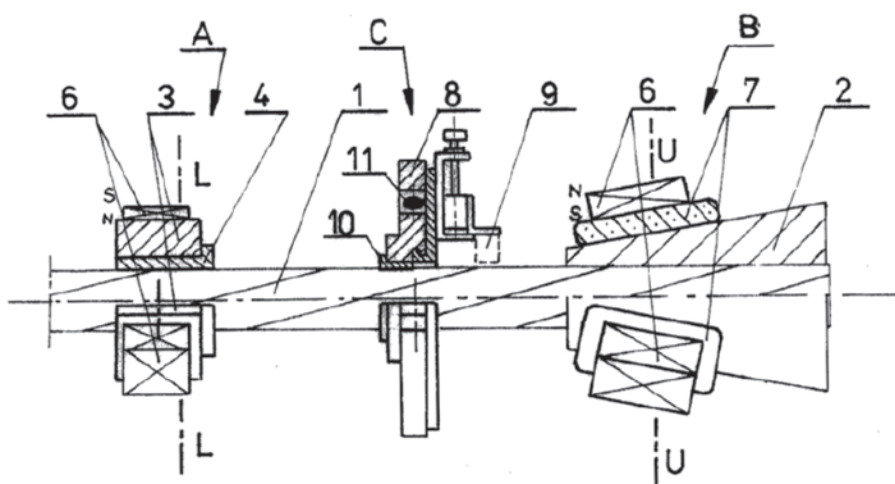
zakończeniu, magnesów trwałych – umieszczonych bezpośrednio na nabiegunkach, oraz zamykających obwód magnetyczny zwór magnetycznych. Przedstawiony na rysunku 3 wynalazek [9] pozwala na diagnostykę wybranego przekroju liny (12) w dowolnych jej fragmentach, również przy ich zakończeniach, przykładowo przy uchwycie stożkowym. W skład urządzenia wchodzi dwuczęściowy korpus, który jest miejscem mocowania elementów obwodu magnetycznego: nabiegunków (7), magnesów trwałych (4), wkładek kształtowych dopasowanych do średnicy liny (7) i uchwytu stożkowego (13) oraz zwory magnetycznej (6). Obwód magnetyczny zamykany jest przez badaną linę i magnesuje ją wzdłuż jej długości. Czujnik (12) przemieszcza się obwodowo z wykorzystaniem zespołu napędowego (8). Przeszczanie układu czujnika pomiarowego i jego napędu może się odbywać również między nabiegunkami (12), co umożliwia przebadanie kolejnego przekroju liny [9].



Rys. 3. Urządzenie do miejscowego badania lin stalowych [9]

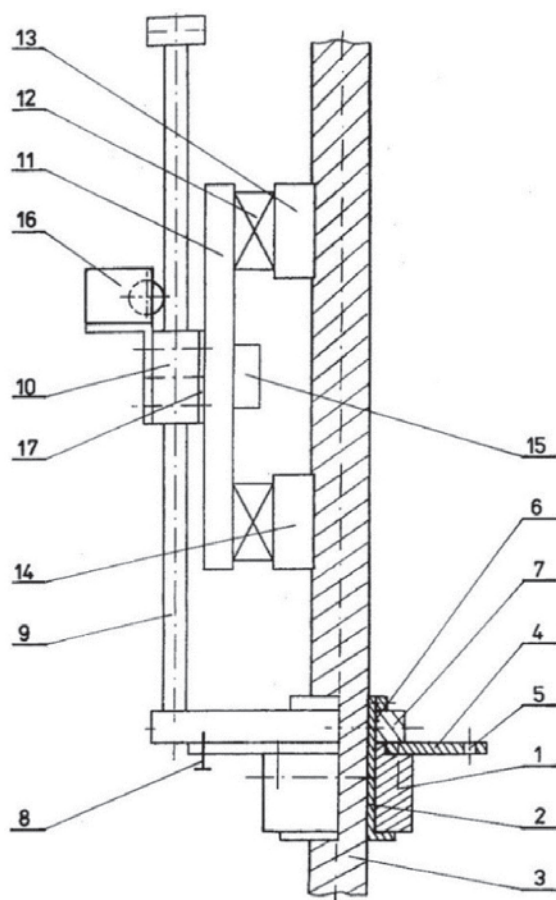
Kolejna koncepcja, zgodnie z wzorem użytkowym [10], zakłada, że urządzenie (rys. 4) zbudowane jest z odpowiednio względem siebie spolaryzowanych zespołów magnesujących umieszczonych na linie (A) i uchwycie stożkowym (B). Zespoły magnesujące zbudowane są z magnesów trwałych (6) oraz nabiegunków (3, 7) – ich kształt i wymiary dostosowane są do elementów, na których są mocowane. Nabiegunek mocowany na linie za pomocą wkładki (4), natomiast nabiegunek (7) mocowany na uchwycie stożkowym jest wykonany z odkształcalnego materiału. W odróżnieniu od rozwiązania [8] obwód magnetyczny nie

posiada zwory, a zespoły magnesujące mocowane są na linie i jej zakończeniu dzięki sile przyciągania magnesów. Obwód ten jest niezależny od układu czujników i umieszczony jest na linie oraz jej zakończeniu w sposób nieruchomy. Rejestracja zaburzenia magnetycznego pola rozproszenia wokół liny, która magnesowana jest wzdłużnie, odbywa się z wykorzystaniem zespołu czujnika. Ustrój znajduje się pomiędzy magnesami i ma możliwość regulacji odległości czujnika zarówno wzdłuż osi liny, jak i odległości od liny. Pomiar odbywa się podczas ruchu czujnika dookoła liny [10].



Rys. 4. Zestaw do magnetycznego badania lin stalowych w strefie uchwytu stożkowego [10]

Kolejne rozwiązanie (rys. 5) zbudowane jest z dwuczęściowej obejmy zaciskowej (1), na której zainstalowany jest mechanizm umożliwiający zmianę pozycji obwodu magnetycznego wzdłuż i wokół badanej linii. Tak jak we wcześniej opisanych rozwiązaniach obwód magnetyczny magnesuje badaną linię stalową wzdłużnie i składa się z co najmniej jednego magnesu (12), zwory (11) i nabiegunków (13, 14), pomiędzy który-



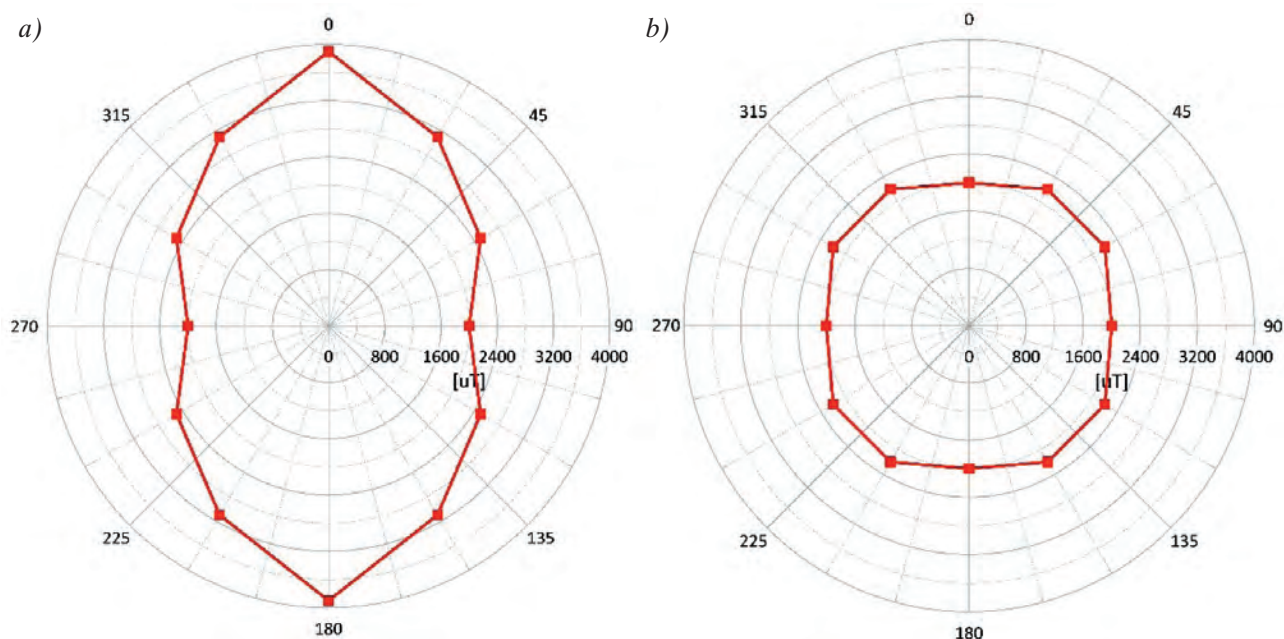
Rys. 5. Urządzenie do badania nieruchomych lin stalowych na krótkich odcinkach [11]

mi znajduje się czujnik pomiarowy (15). Pomiar odbywa się w obwodzie magnetycznym o niezmiennych parametrach, ze stałym położeniem czujnika pomiarowego względem nabiegunków. Sygnał pomiarowy rejestrowany jest zarówno w funkcji długości, jak i kąta środkowego, co pozwala uzyskać przestrzenny obraz rozkładu uszkodzeń [11].

Analiza budowy rozwiązań [8–11] oraz wyników opisanych w publikacjach [12–17] wykazały, że w warunkach laboratoryjnych możliwe jest wykorzystanie metody magnetycznej do badań lin stalowych w miejscach o utrudnionym dostępie i przy ich zakończeniu. Omawiane rozwiązania nie są jednak pozbawione niedoskonałości o charakterze użytkowym i metrologicznym. Duże siły spójności od magnesów stałych są znacznym utrudnieniem przy montażu i demontażu obwodu magnetycznego. W miejscach o ograniczonej dostępności montaż i przemieszczanie omawianych urządzeń, o dużych wymiarach obwodu magnetycznego, może prowadzić do trudności lub nawet braku możliwości ich zastosowania. Z kolei wybór układu bez zwory, który charakteryzuje się mniejszą masą, dużo prostszą budową i sposobem montażu, wymaga użycia większej liczby magnesów lub magnesów o większej energii magnetycznej, co również sprawia problemy użytkowe. Podstawowy problem metrologiczny dotyczy asymetrii rozkładu pola magnetycznego w obszarach linii oddalonych od źródła pola magnetycznego, zwłaszcza w rozwiązaniu [8, 9]. Związane jest to ze stałym usytuowaniem obwodu magnetycznego, względem którego przemieszcza się czujnik rejestrujący zmianę magnetycznego pola rozproszenia. Brak jednorodnego rozkładu pola magnetycznego wpływa na właściwości diagnostyczne rozwiązań i uzyskiwaną dokładność pomiarową. Problem ten zo-

stał znacznie poprawiony w układzie bez zwory magnetycznej [10], ze zwiększoną liczbą magnesów na obwodzie badanej liny. Rozwiązanie to wiąże się jednak z zapewnieniem odpowiednio wysokiej wartości

indukcji magnetycznej umożliwiającej wykrywalność wad w cięgnach, tym samym wartość sygnału użytecznego jest mniejsza niż w przypadku tradycyjnych głowic [12].



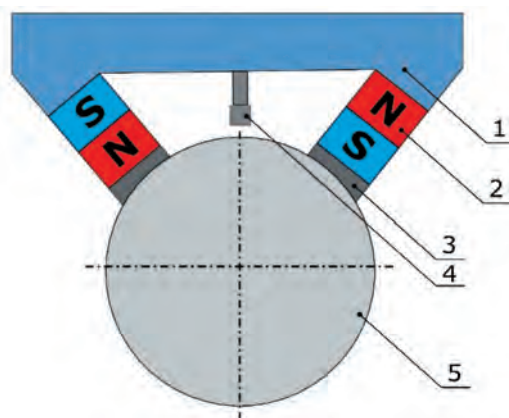
Rys. 6. Rozkład pola magnetycznego dla głowic magnetycznych w płaszczyźnie normalnej do osi liny o średnicy 34 mm, w odległości 20 mm od płaszczyzny czołowej stożka:

a) układ ze zworą magnetyczną wg patentu [8]; b) układ bez zwory wg zgłoszenia [10, 12]

3. KONCEPCJA UKŁADU DIAGNOSTYCZNEGO

Analiza różnego rodzaju koncepcji układów do badań magnetycznych lin w miejscach trudno dostępnych przyczyniła się do postawienia założeń konstrukcyjnych, funkcjonalnych i metrologicznych, w efekcie czego została opracowana nowa koncepcja układu diagnostycznego. W odróżnieniu od opisywanych wcześniej rozwiązań założono, że obwód magnetyczny magnesujący linę wzdłużnie lub poprzecznie przemieszcza się wraz z czujnikiem wokół badanej liny. Koncepcja ta została przedstawiona na rysunku 7. Przy projektowaniu nowego rozwiązania postawiono tezę, że jego zastosowanie w przypadku braku defektu lub zmian geometrii powoduje, że magnetyczne pole rozproszenia w obszarze rejestracji pozostaje na podobnym poziomie, gdyż czujnik znajduje się w tym samym miejscu obwodu magnetycznego i przemieszcza się wraz z nim, a nie względem niego. Zastosowanie takiego rozwiązania, przy braku defektów, pozwoli na uzyskanie symetrycznego i jednorodnego rozkładu pola magnetycznego. Połączenie takiej konstrukcji z analizą wszystkich składowych rozkładu magnetycznego pola rozproszenia umożliwi wykrycie anomalii magnetycz-

nych pochodzących od uszkodzeń liny. Zmiana układu magnesującego będącego podstawową częścią aparatury diagnostycznej umożliwi spełnienie założeń konstrukcyjnych, poprawi jego właściwości użytkowe, zapewni uniwersalność konstrukcji i możliwość zastosowania przy różnych średnicach liny i ograniczeniach geometrycznych zakończeń i miejsc trudno dostępnych.

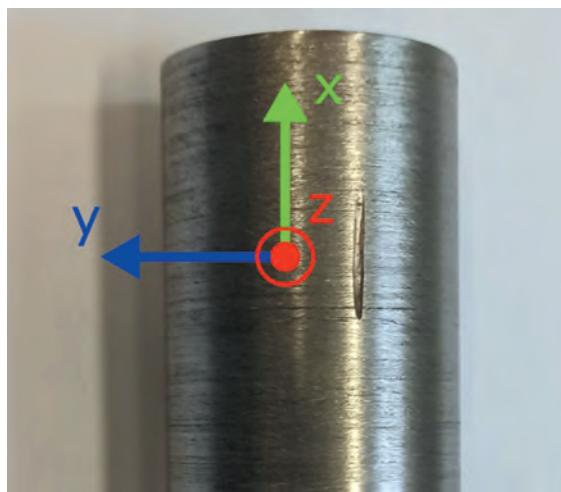


Rys. 7. Schemat projektowanego urządzenia:

1 – zwora magnetyczna, 2 – magnes stały,
3 – nabiegunnik, 4 – czujnik magnetyczny,
5 – badana lina

4. POMIARY I ICH WYNIKI

W celu weryfikacji przyjętych założeń przeprowadzono badania wstępne. Miały one potwierdzić tezę, że zaproponowany układ pomiarowy umożliwi uzyskanie jednorodnej i symetrycznej wartości magnetycznego pola rozproszenia wokół badanego obiektu. Ze względu na minimalizację wpływu dużej ilości zmiennych, przede wszystkim geometrii badanego elementu, na uzyskiwane wyniki i chęć potwierdzenia postawionej tezy dotyczącej stałości rozkładu pola magnetycznego w badaniach posłużono się maksymalnie uproszczonym modelem. Był to stalowy walec o średnicy 35 mm, na którego powierzchni bocznej wykonano nacięcie o szerokości i głębokości około 1 mm (rys. 8).

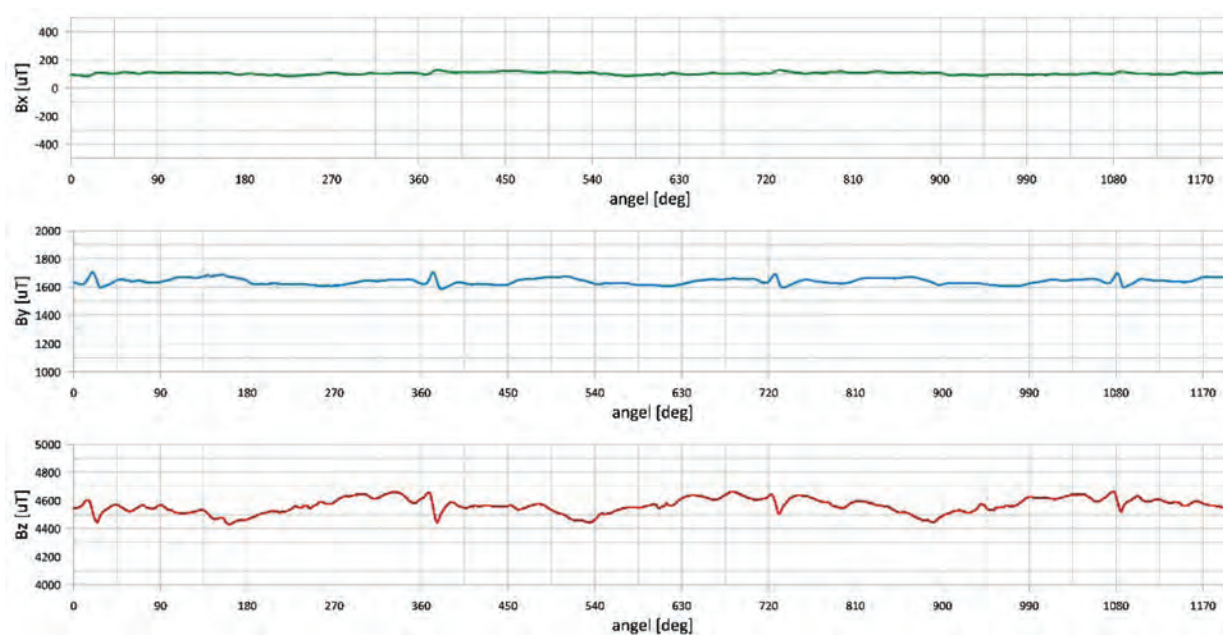


Rys. 8. Zamodelowane uszkodzenie – nacięcie na powierzchni

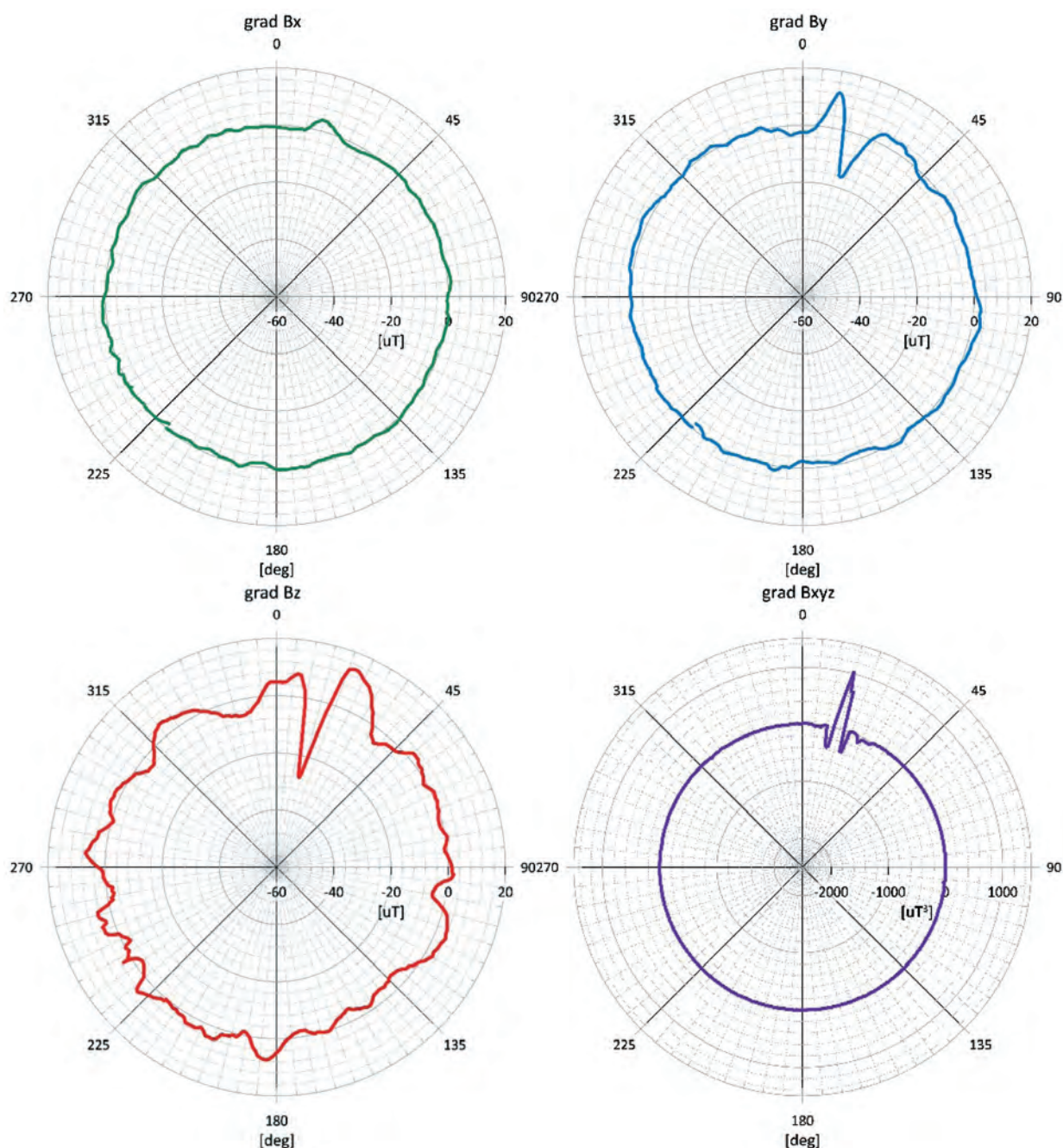
W badaniach wykorzystano układ magnesowania zgodny z opisaną wcześniej koncepcją (rys. 7). Jako źródła pola magnetycznego użyto 10 płytowych magnesów neodymowych N42 o wymiarach $25 \times 25 \times 10$ mm. Na obwód magnetyczny składała się zwora oraz nabiegunki o kształcie dopasowanym do badanego obiektu. Układ pomiarowy zbudowano z części rejestrującej magnetyczne pole rozproszenia, tj. z trójosiowego, cyfrowego magnetometru MLX90393 i mikrokontroler ArduinoMega oraz części do rejestracji przemieszczenia, która składała się z enkodera inkrementalnego Eltra ER30 oraz karty pomiarowej NI USB-6216. Rejestrację sygnałów z obydwu modułów przeprowadzono z wykorzystaniem specjalnie do tego celu opracowanego programu w środowisku LabView. Elementy mocowania i prowadzenia zostały wykonane z materiałów niemagnetycznych, przede wszystkim w technologii druku 3D.

Czujnik pomiarowy oddalony o 1 mm od powierzchni badanego elementu przemieszczany był obwodowo wraz z magnetowodem. W ramach badań podczas czterech obrotów wokół badanej powierzchni rejestrowano trzy składowe indukcji pola magnetycznego (B_x , B_y , B_z – rys. 8). Zarejestrowane wyniki przedstawiono na rysunku 9. Widoczne, pojawiające się cyklicznie co 360° , zaburzenia pola magnetycznego trzech składowych są sygnałami od nacięcia znajdującego się na powierzchni badanego obiektu.

W celu zwiększenia możliwości identyfikacji miejsca występowania uszkodzenia wyznaczono gradient zarejestrowanego sygnału $\text{grad } B_x$, $\text{grad } B_y$, $\text{grad } B_z$ oraz iloczyn tych gradientów $\text{grad } B_{xyz}$, zaś wyniki zaprezentowano na rysunku 10.



Rys. 9. Zarejestrowane wartości indukcji pola magnetycznego, trzy składowe: B_x , B_y , B_z



Rys. 10. Gradient zarejestrowanego sygnału B_x , B_y , B_z oraz iloczyn tych gradientów $\text{grad } B_{xyz}$

5. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania laboratoryjne potwierdziły stawianą tezę. Zastosowanie zaproponowanego rozwiązania umożliwiło uzyskanie jednorodnej i symetrycznej wartości magnetycznego pola rozproszenia wokół badanego elementu. W miejscu występowania uszkodzenia widoczna jest zmiana wartości indukcji magnetycznej. Wykorzystanie w analizie sygnału gradientów zarejestrowanych wartości indukcji magnetycznej oraz iloczynu gradientów trzech składowych pozwoliło na jednoznaczną lokalizację zamode-

lowanego uszkodzenia. W przeprowadzonych badaniach laboratoryjnych opracowany układ pomiarowy cechował się pożądanymi właściwościami funkcjonalnymi. Dalsze badania laboratoryjne związane są z aspektami metrologicznymi, takimi jak optymalizacja obwodu magnetycznego, doboru odpowiednich czujników magnetycznych oraz sposobu ich prowadzenia, sposobem analizy sygnałów oraz kwestiami konstrukcyjnymi i funkcjonalnymi wynikającymi z rodzaju badanych lin. Konieczna staje się również weryfikacja rozwiązań na modelu uszkodzeń o większej spójności z obiektem rzeczywistym.

Literatura

- [1] Kawecki Z., Stachurski J.: *Defektoskopia magnetyczna lin stalowych*. Wydawnictwo „Śląsk”, Katowice 1969.
- [2] Kwaśniewski J.: *Badania magnetyczne lin stalowych : system certyfikacji personelu w metodzie MTR*. Wydawnictwa AGH, Kraków 2010.
- [3] Hansel J.: *Badania magnetyczne lin stalowych: 60 lat rozwoju metody w AGH*. Zeszyty Naukowo-Techniczne nr 35, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Katedra Transportu Linowego, Kraków 2006.
- [4] Tytko A., Kwaśniewski J., Lankosz L.: *Aparatura do badań nieniszczących lin stalowo-gumowych i taśm przenośnikowych zbrojonych linkami stalowymi/ Apparatus for non-destructive testing of rubber coated flat ropes and wire rope reinforced conveyor belts*. Zeszyty Problemowe: Badania Nieniszczące 2000, 5: 71–76.
- [5] Kwaśniewski J., Molski S.: *Rozwój metodologii oceny stanu technicznego taśm z linkami stalowymi w Akademii Górniczo-Hutniczej/ Development of the methodology for assessing the working condition of belts reinforced with steel cords at the AGH-UST*. Transport Przemysłowy i Maszyny Robocze 2016, 3: 22–26.
- [6] Ruta H., Krakowski T., Lonkwa P.: *Optimisation of the magnetic circuit of a measuring head for diagnostics of steel-polyurethane load-carrying belts using numerical methods*. Sustainability 2022, 14, 5: 1–19.
- [7] Lonkwa P., Krakowski T., Ruta H.: *Application of stray magnetic field for monitoring the wear degree in steel components of the lift guide rails system*. Metals 2020, 10, 1008.
- [8] Hansel J., Kwaśniewski J., Lankosz L.: *Urządzenie do miejscowego badania lin stalowych*. Patent 201156.
- [9] Kwaśniewski J., Lankosz L., Molski S., Franczyk J.: *Urządzenie do miejscowego badania lin stalowych*. Patent 209211.
- [10] Kwaśniewski J., Ruta H.: *Zestaw do magnetycznego badania lin stalowych w strefie uchwytu stożkowego. Wzór użytkowy PL065600*.
- [11] Hansel J., Tytko A., Koszyk M., Zawada K., Kubas B., Enders I.: *Urządzenie do badania nieruchomych lin stalowych na krótkich odcinkach*. Patent 209599.
- [12] Kwaśniewski J., Ruta H.: *Wykorzystanie analiz numerycznych przy projektowaniu urządzenia do badania lin stalowych w miejscach ich zamocowań*. Biuletyn WAT 2010, LIX, 4.
- [13] Kwaśniewski J., Ruta H.: *Evolution of equipment for testing of wire ropes in the tapered end sections*. The International Journal of Transport & Logistics 2010, 7: 8–16.
- [14] Kowalski J., Kwaśniewski J., Lankosz L., Machula T., Molski S., Tytko A.: *Zastosowanie stałego pola magnetycznego w aparaturze do badania lin stalowych i w innych przyrządach pomiarowych*. Zeszyty Naukowo-Techniczne Katedry Transportu Linowego AGH 2006, 36.
- [15] Tytko A., Kwaśniewski J., Lankosz L., Koszyk M.: *Potentials of magnetic testing of hoisting ropes at the fixing points*. Zeszyty Naukowo-Techniczne Katedry Transportu Linowego AGH 2003, 31: 88–102.
- [16] Tytko A., Koszyk M.: *Non-destructive testing of guy rope ends*. Zeszyty Naukowo-Techniczne Katedry Transportu Linowego AGH 2002, 29: 59–65.
- [17] Krakowski T., Ruta H., Roskosz M.: *Application of the Magnetic Method in the Diagnostics of Wire Ropes at Tapered Sockets*. Biuletyn Instytutu Spawalnictwa 2020, 1, 19–24.

dr inż. TOMASZ KRAKOWSKI
AGH Akademia Górniczo-Hutnicza
al. A. Mickiewicza 30,
30-059 Kraków
tomasz.krakowski@agh.edu.pl