

Metoda strumienia rozproszenia pola magnetycznego w diagnostyce wad szyn kolejowych oraz jej miejsce wśród mobilnych środków badania nieniszczącego

Vitalij NICHOKHA¹, Volodymyr SHKLIARSKYI², Volodymyr STOROZH³, Yuriy MATIIESHYN⁴,
Liubomyr VASHCHYSHYN⁵

Streszczenie

Zadaniem mobilnej diagnostyki wad szyn w torach kolejowych jest identyfikacja oraz rozpoznanie niebezpiecznych wad w celu zapobiegania wypadkom. Przedstawiono przegląd metod kontroli parametrów fizycznych oraz mechanicznych metalowych konstrukcji obiektów inżynierskich podlegających długiej eksploatacji oraz wykorzystywanych w różnych temperaturach i warunkach. Spośród metod nieniszczących wykorzystujących pola fizyczne, opisano metody magnetyczne, akustyczne, elektromagnetyczne, cieplne oraz elektryczne. Metody elektromagnetyczne są z powodzeniem wykorzystywane w różnych gałęziach przemysłu: w kolejnictwie, przemyśle metalowym, wiertniczym, składowania odpadów promieniotwórczych itd. W szczególności, w przemyśle kolejowym korzystającym z techniki pomiaru pola elektromagnetycznego prądu przemiennego są przeprowadzane kontrole wagonów kolejowych, zestawów kołowych oraz torów. Ostatnio powszechnie są używane hybrydowe systemy diagnostyczne stosujące wagony defektoskopowe do wykrywania wad torów, wykorzystujące równocześnie metody magnetyczne, ultradźwiękowe, wizualno-pomiarowe oraz optyczne do nieniszczącej kontroli [11]. Wysoka skuteczność nowych metod tworzenia informatycznego systemu diagnostycznego (ISD) mobilnej magnetycznej defektoskopii torów kolejowych zależy od skutecznego rozwiązania pewnej sprzeczności: zapewnienia wysokiej rozdzielczości oraz czułości ISD do wykrycia, rozróżnienia oraz klasyfikacji sygnałów wad z jednej strony, a z drugiej ograniczenia czasu przeznaczanego na defektoskopowe badanie w warunkach różnych przeszkód oraz potrzeby wykrycia defektów we wczesnym etapie. Rozwiązanie tej sprzeczności przy użyciu nowoczesnych metod przetwarzania sygnału defektów torów oraz nowych, niewielkich, wielokanałowych czujników komponentowych stanowi istotny problem aplikacyjny, przedstawiony w niniejszym artykule.

Słowa kluczowe: informatyczny system diagnostyczny, defektoskopia torów kolejowych, czujniki komponentowe, nieniszczące metody magnetyczne, analiza falkowa i sieci neuronowe

1. Wstęp

W dzisiejszych czasach sieci kolejowe na całym świecie są coraz bardziej obciążone szybkimi pociągami, przewożącymi znaczną liczbę pasażerów oraz transportującymi ciężkie wagony towarowe, co generuje ogromne natężenie ruchu na torach. Wszystko to prowadzi do zwiększonego zapotrzebowania na kontrolę oraz konserwację torów. Wydatki na kontrole i konserwację torów stopniowo rosną w ostatnich latach, dzięki czemu znacznie poprawiają się wskaźniki jakości, takie jak::

- wzrost bezpieczeństwa systemu kolejowego;
- rozwój sieci kolejowych w odpowiedzi na rosnące zapotrzebowanie;
- zwiększenie stabilności sieci kolejowych, zarówno w kontekście środowiskowym, jak i finansowym, przez kolejne usprawnienie oraz wykorzystanie nowinek technologicznych.

Z tych względów maksymalną niezawodność sieci kolejowej można uzyskać jedynie po odpowiedniej oraz wiarygodnej kontroli oraz konserwacji tych sieci. Wczesna defektoskopia szyn odgrywa główną

¹ Prof., dr inż.; Lviv Polytechnic National University; e-mail: nich@org.lviv.net.

² Prof., dr inż.; Lviv Polytechnic National University.

³ Dr; Lviv Polytechnic National University.

⁴ Dr; Lviv Polytechnic National University.

⁵ Doktorant; Lviv Polytechnic National University.

rolę w procesie wykrywania oraz identyfikacji niebezpiecznych pęknięć szyn, wynikających z wad kontaktowo-zmęczeniowych, w celu uniknięcia ewentualnych wypadków oraz jest niezwykle istotna do zapewnienia bezpiecznej oraz bezawaryjnej eksploatacji sieci kolejowych na całym świecie.

Pomimo tego, sprzęt kolejowy do mobilnej diagnostyki nieniszczącej defektów przez długi czas nie mógł uzyskać odpowiedniego finansowania. Stał się łatwiej dostępny dopiero po szeregu poważnych wypadków (np. w mieście Hatfield, hrabstwo Hertfordshire, Wschodnia Anglia, październik 2004). Odpowiednie wykorzystanie ograniczonego finansowania w tym przypadku jest niezwykle istotne.

W [11, 12] przeprowadzono przegląd metod kontroli fizycznych oraz mechanicznych właściwości konstrukcji metalowych obiektów inżynierskich o długim okresie eksploatacji i wykorzystywanych w różnych temperaturach oraz warunkach.

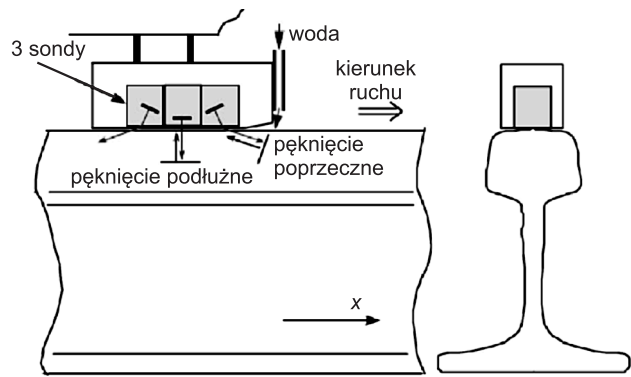
Wśród nieniszczących, magnetycznych metod kontroli, które od dawna były wykorzystywane w mobilnej diagnostyce wad torów kolejowych, najpowszechniejsza jest metoda strumienia rozproszenia pola magnetycznego oraz metoda pomiaru pola prądu przemiennego. Metody magnetyczne defektoskopii dobrze diagnozują górną część szyny, czyli jej główkę.

Metody ultradźwiękowe zajmują ważne miejsce w defektoskopii torów kolejowych [16–18]. Pomimo trudności w zapewnieniu odpowiedniej styczności dźwiękowej z powierzchnią szyny, potrzeby dużej ilości cieczy stykowej oraz ograniczenia prędkości diagnostycznej, metody diagnostyki ultradźwiękowej są w stanie diagnozować szyjkę oraz stopkę szyny. Zaletą metod ultradźwiękowych jest także możliwość oszacowania wielkości oraz położenia wady, co ma istotny wpływ na rozwój badań w tym zakresie [5, 11].

Na rysunku 1 przedstawiono zasadę pomiaru pęknięć poprzecznych, podłużnych oraz skośnych główki szyny przy użyciu trzech czujników ultradźwiękowych umieszczonych pod różnym kątem względem powierzchni szyny. Rysunek ten przedstawia przekrój poprzeczny szyny wraz z czujnikami znajdującymi się na niej.

Metody elektromagnetyczne są z powodzeniem wykorzystywane w różnych przemysłach, tj. kolejowym, metalowym, wierniczym, składowania odpadów promieniotwórczych itd. [26]. W szczególności, w przemyśle kolejowym wykorzystującym technikę pomiaru pola elektromagnetycznego prądu zmiennego, przeprowadzane są kontrole wagonów, zestawów kołowych oraz torów.

Ostatnio są używane hybrydowe systemy diagnostyczne, stosowane w wagonach defektoskopowych do wykrywania wad torów, wykorzystujące równocześnie metody magnetyczne, ultradźwiękowe, wizualno-pomiarowe oraz optyczne do nieniszczącej kontroli [11].



Rys. 1. Pomiar wad szyn w torach kolejowych metodą ultradźwiękową [11]

Wysoka skuteczność nowych metod tworzenia informatycznych systemów diagnostycznych (ISD) mobilnej magnetycznej defektoskopii torów zależy od skutecznego rozwiązania pewnej sprzeczności: mianowicie wysokiej rozdzielczości oraz czułości ISD do wykrycia, rozróżnienia oraz klasyfikacji sygnałów wad z jednej strony, a z drugiej ograniczenia czasu przeznaczanego na defektoskopowe badanie w warunkach różnych przeszkód oraz potrzeby wykrycia wad we wczesnym etapie. Rozwiązanie tej sprzeczności przy użyciu nowoczesnych metod przetwarzania sygnałów wad torów przez zastosowanie kompresji (transformaty) falkowej i sieci neuronowych oraz budowanie systemu diagnostycznego z zastosowaniem nowych, niewielkich, wielokanałowych czujników komponentowych, stanowi istotną treść problemu.

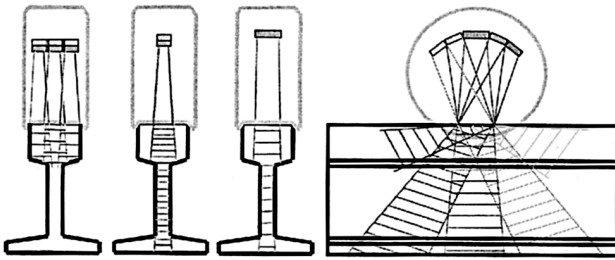
2. Ultradźwiękowe metody mobilnej diagnostyki wad szyn w torze kolejowym

Sprzęt do badania ultradźwiękowego jest szeroko stosowany w przemyśle kolejowym do kontroli wad wewnętrznych w materiałach oraz do kontroli szyn w czasie eksploatacji.

W większości przypadków badanie szyn jest przeprowadzane za pomocą specjalnych czujników ultradźwiękowych instalowanych na podwoziu pociągu testowego. W celu umożliwienia kontaktu przetworników piezoelektrycznych z szynami, stosuje się sanie ślizgowe lub czujniki kołowe. Standardowe czujniki ultradźwiękowe mają niską zdolność detekcji wad powierzchniowych lub przypowierzchniowych. Z tego powodu używa się wielu czujników ustawionych pod różnymi kątami w celu wykrycia wad powierzchniowych oraz przypowierzchniowych (rys. 2).

W czasie kontroli szyn przy użyciu konwencjonalnych czujników ultradźwiękowych, wiązka energii ultradźwiękowej w formie drgań jest przekazywana

do wnętrza szyny. Odbita energia ultradźwiękowa jest następnie wykrywana przez zastosowanie szeregu przetworników. Amplituda odbitych impulsów w czasie diagnostyki obejmuje istotne informacje dotyczące ciągłości struktury szyny oraz jej wad. W związku z tym, że wady nie są przewidywalne, rozprzestrzenienie drgań w szynie odbywa się pod różnymi kątami w celu zmaksymalizowania prawdopodobieństwa wykrycia niebezpiecznych wad w szynie. Powszechnie stosowane kąty załamania, to 0° , 37° lub 45° i 70° .



Rys. 2. Zwiększenie zdolności detekcji wad dzięki użyciu szeregu czujników [11]

W wielu krajach ta metoda jest zwykle wykorzystywana w pociągach diagnostycznych Sperry – modele UTU1, UTU2 oraz UTU5 (ang. *Ultrasonic Rail Testing Unit* – UTU).

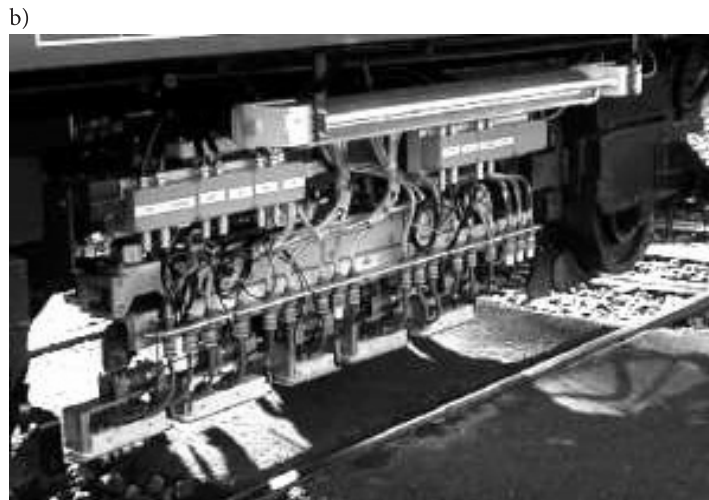
Obecność wad wykrytych przez pociąg typu UTU jest potwierdzana za pomocą przenośnych przyrządów ultradźwiękowych, tzw. Sperry Stick. Rysunek 3a przedstawia typowy, przenośny, przyrząd ultradźwiękowy, którym kieruje operator [11]. Pociągi diagnostyczne Eurailscout (Holandia, Niemcy itd.) oraz Scanmaster (Izrael) korzystają z sań ślizgowych do zamontowania systemu czujników ultradźwiękowych, jak przedstawiono na rysunku 3b. Pociągi te pracują z prędkością 72 km/h , ale możliwa prędkość kontroli wynosi maksymalnie 100 km/h [11].

Jednym z problemów, któremu muszą stawić czoła pociągi UTU1, jest nadmierna liczba „błędnych” odczytów, co powoduje wzrost kosztów czasu pracy personelu, gdyż każdą taką operację należy dokładnie przeanalizować. Problem ten został częściowo rozwiązany przez zwiększenie progu działania / reakcji oraz porównanie wyników otrzymanych z pociągu diagnostycznego z wynikami przenośnych systemów w celu udoskonalenia kryteriów wykrywania.

Sonda UTU2 zawiera wiele czujników, dzięki czemu zapewnia lepsze, pełniejsze napromieniowanie ultradźwiękowe szyny. Matryca sondy składającej się z 9 osobnych czujników znajduje się w oponie wypełnionej cieczą, zwanej *Roller Search Unit* (RSU). Sonda UTU2 ma dwa takie układy, zapewniając ciągłość badania, jeśli jeden RSU nie pracuje poprawnie lub ulegnie awarii.

Przenośne urządzenie ultradźwiękowe do kontroli Sperry Stick, to ręcznie obsługiwana wersja RSU i służy do sprawdzania danych obydwu rodzajów pociągów ultradźwiękowych. Porównanie wyników z układu UTU2 z uzyskanymi ze Sperry Stick, wskazuje na zbieżność wyników wykrywania wad na poziomie $90\text{--}95\%$.

Opracowanie oraz usprawnienie tych systemów w celu ograniczenia czasu przeznaczanego na defektoskopowe badanie przez wzrost prędkości skanowania miało miejsce w Stanach Zjednoczonych oraz Zjednoczonym Królestwie (Network Rail Company). UTU2 może pracować przy prędkości do 65 km/h , aby jednak zapewnić wysoką dokładność czujniki muszą napromieniować wadę cztery razy, dlatego w praktyce pracują z prędkością 45 km/h . Pociągi diagnostyczne UTU5 zapewniają o 40% szybsze, wydajniejsze i pewniejsze wykrycie wad szyn oraz złączy szynowych klasycznych (jak również pęknięć). Jest to możliwe dzięki wysokiej zgodności kształtu opony RSU z kształtem powierzchni szyny, nawet zużytej lub zdeformowanej.



Rys. 3. Technika defektoskopii ultradźwiękowej [11]

Sprzęt w pociągach typu UTU nie określa wielkości wszystkich istniejących wad oraz ich dokładnej lokalizacji. Sprzęt ten jest w stanie w sposób wiarygodny wskazać jedynie wady w formie głębokich pęknięć w zakresie 15–25° od pionu w dowolnym kierunku. Pęknięcia mniejsze niż 5 mm głębokości oraz pęknięcia pod innym kątem są trudne do wykrycia. Stanowi to główny problem oraz ograniczenia w pracy pociągów typu UTU:

- bardzo niska temperatura, tworzenie pośredniej warstwy ze względu na oblodzenie szyny;
- rozlany olej, który także prowadzi do powstania pośredniej warstwy, która może mieć wpływ na wyniki testu nawet do 100 m od RSU;
- zniszczenie opony RSU ze względu na uszkodzenie szyny, do czego dochodzi średnio raz w tygodniu;
- złożoność identyfikacji wad pionowych / poprzecznych;
- niska prędkość procedury diagnostyki wad przy zastosowaniu przenośnego defektoskopu RSU (2–3 km/h).

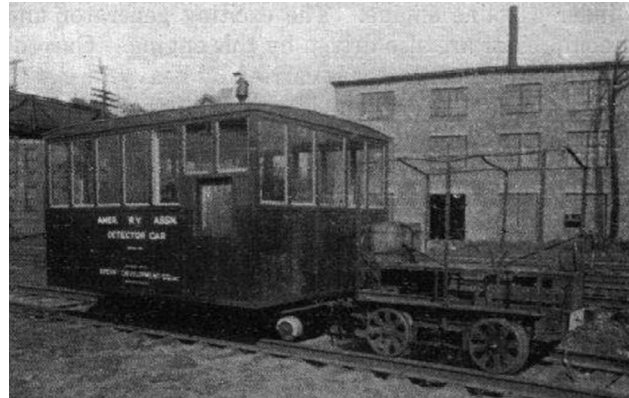
3. Metody magnetyczne mobilnej diagnostyki wad szyn w torze kolejowym

Metody magnetyczne w defektoskopii szyn mają długą historię. Początki metody magnetycznej kontroli szyn sięgają od końca lat 20. do początku lat 30. ubiegłego wieku. W tym czasie (w 1928 roku) w Japonii, M. Suzuki zaproponował pierwszy magnetyczny defektoskop, który był samobieżnym wagonem wyposażonym w system magnetyzacji w postaci elektromagnesu prądu stałego o kształcie litery P oraz w czujniki indukcyjne umieszczone między biegunami elektromagnesu i urządzeniem do rejestracji wyników testu na taśmie papierowej. Defektoskop ten umożliwiał wykrywanie wad wewnętrznych główki szyny oraz pęknięć z dostępem do powierzchni szyny przy prędkości defektoskopu do 4 km/h.

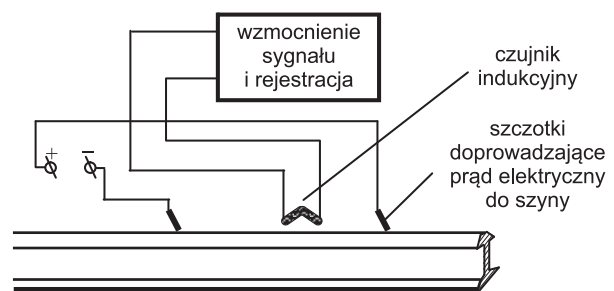
W 1928 roku na zlecenie firmy ARA (*American Railway Association* – Amerykański Związek Kolejnictwa), Elmer Sperry opracował defektoskop służący do wykrywania pęknięć poprzecznych w główce szyny (rys. 4).

Sprzęt defektoskopowy był zamontowany na wózku znajdującym się przed kabiną dla operatora i urządzenia rejestrującego. Na rysunku 5 przedstawiono funkcjonalny schemat defektoskopu.

Namagnesowanie szyn następowało wskutek przepływu przez szynę prądu stałego o znacznym natężeniu (do 3,5 kA), przy napięciu 0,8 V. Prędkość robocza defektoskopu nie przekraczała 20 km/h. Po pomyślnym wdrożeniu defektoskopu w 1928 roku, Elmer Sperry założył firmę „Sperry Rail Service” [43], która istnieje do dziś.



Rys. 4. Jeden z pierwszych wagonów defektoskopowych na świecie, opracowany przez Elmera Sperry w 1928 r. [39]



Rys. 5. Schemat funkcjonalny wagonu defektoskopowego opracowanego przez Elmera Sperry [39]

W kolejnych defektoskopach „ARA” w systemie magnetyzacji wykorzystano silne elektromagnesy prądu stałego w kształcie litery P oraz czujniki umieszczone za drugim (w kierunku ruchu) biegunem elektromagnesu, tj. poza polem magnetycznym (tryb pracy według metody szczątkowego namagnesowania szyn).

Na torach w USA oraz Francji także doszło do istotnej modyfikacji wagonu defektoskopowego firmy „Teleweld”, który pracował w trybie pola magnetycznego, tworzonego przez trzy silne elektromagnesy. Czujnik defektoskopu składa się z trzech par miejscowych cewek indukcyjnych. Cechą wyróżniającą ten defektoskop było użycie dodatkowego elektromagnesu, który tworzył słabe, zmienne pole magnetyczne demagnetyzacji warstwy powierzchniowej szyny w celu ograniczenia liczby sygnałów, które odpowiadają wadom powierzchniowym szyn. Współczesny wagon defektoskopowy wykrywa wady szyn (poza złączami szynowymi) przy prędkości do 20 km/h.

W Rosji, pierwszy magnetyczny wagon defektoskopowy powstał w 1933 roku, a jego twórcą był wynalazca – F.M. Karpov. Według jego projektu wykorzystano sprzęt kontrolno-pomiarowy, który zawierał [27]:

- urządzenie magnetyzujące z cewkami sztywno mocowanymi na osiach kół;
- czujniki żyromagnetyczne;
- urządzenia lampowe wskazujące obecność wady;
- system rejestracji sygnałów z czujników;

- urządzenia do oznaczania wadliwego obszaru w szynie.

Prąd w cewkach magnetyzujących był doprowadzany dzięki specjalnemu urządzeniu kontaktowemu. Do zasilenia cewek oraz innych urządzeń wykorzystano spalinowy, wysokoprężny generator prądu stałego o mocy 15,5 kW. Uzyskano indukcyjność magnetyczną w szynach o wielkości 1,5–2 T, co zapewniło magnetyzację do stanu nasycenia szyn między biegunami systemu magnetyzacji.

Wrażliwymi elementami były żyromagnetyczne zatraski w postaci wskaźników strzałkowych. Pod wpływem niewielkich pól wad strzałki cofają się i blokują styki, do których podłączone zostały przekaźniki kręgów (lampy sprzętu rejestrującego sygnały świetlne, rozpylacz z farbą). Możliwe było wyregulowanie czułości strzałek, co umożliwiał ich konfigurację tak, aby pierwsza reagowała wyłącznie na wady do 25% długości odcinka główki szyny, a druga – od 25% do 50% oraz trzecia – na wady na długości ponad 50%. Był to więc prototyp automatycznego separatora defektów.

Sprzęt znajdował się na dwóch wagonach. Pierwszy wagon był wagonem trakcyjnym i na nim zainstalowano sprzęt zasilania energią, na drugim wagonie zaś umieszczono sprzęt kontrolno-pomiarowy. Główną różnicą systemu F.M. Karpova w stosunku do podobnych systemów był fakt, iż czujniki pracowały w polu aktywnym, a nie wykorzystywały metody magnetyzacji szczątkowej. Prędkość takiego składu w trybie pracy wynosiła do 20 km/h. Wpłynęło to na dalszy rozwój systemu i w 1937 roku Rosja korzystała już z 4 magnetycznych wagonów F.M. Karpova. Za ich pomocą rocznie testowano około 2000 km torów oraz wykryto setki wadliwych szyn. W wagonie F.M. Karpova [27], wskutek prędkości większej o 5–10 km/h, na niektórych odcinkach torów wzrósł poziom hałasu, co uniemożliwiło dalszą kontrolę stanu szyn.

Pierwsze systemy diagnostyczne Elmera Sperry oraz Karpova doprowadziły do istotnego rozwoju środków mobilnych defektoskopii magnetycznej szyn kolejowych. W wyniku badań przeprowadzonych w wielu krajach, stworzono nową metodę szybkiej diagnostyki magnetycznej szyn kolejowych, zwanej metodą magnetodynamiczną (MDM) [29].

3.1. Metoda magnetodynamiczna (MDM)

Metoda, zwana także metodą magnetycznego strumienia rozproszenia pola magnetycznego (MFL), jest obecnie wykorzystywana w UK, Iranie, USA oraz krajach byłego ZSRR i służy do wykrywania charakterystycznych wad stalowych lin, rur, szyn kolejowych, zbiorników oraz innej infrastruktury przemysłowej o długim i intensywnym okresie pracy [51]. Pomiar dwóch komponentów rozproszenia pola magnetycz-

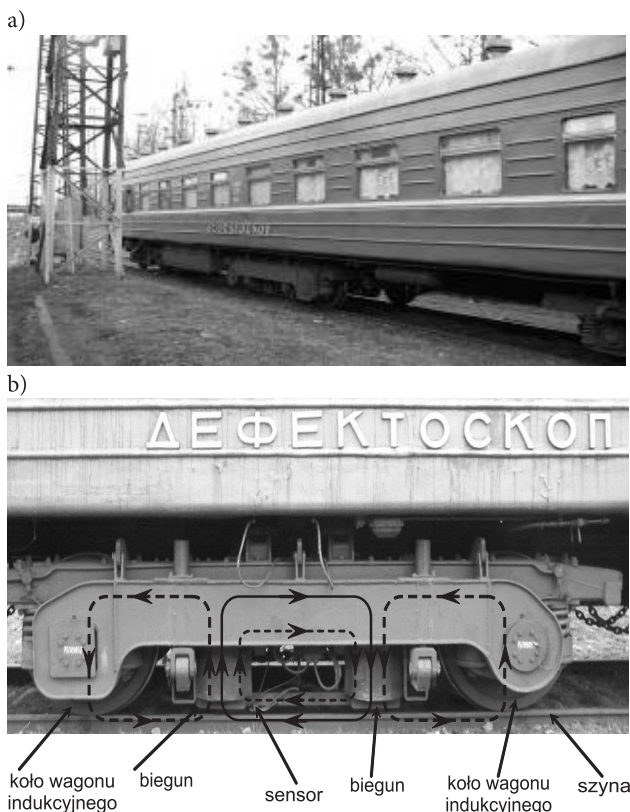
nego: pionowy (prostopadle do powierzchni badania) oraz wzdłużny (równolegle do zastosowanego pola) jest stosowany w systemach MDM [1, 33], ale użycie jedynie dwóch komponentów rozproszenia pola jest nieskuteczne, szczególnie w przypadkach, gdy forma przedmiotu badania lub wady względem pola jest przypadkowa. W celu rozwiązania problemu w trzech wymiarach, należy zarejestrować wszystkie trzy składowe pola.

W latach 50–60-tych ubiegłego wieku, na torach Związku Radzieckiego pojawiły się magnetyczne wagony defektoskopowe (MCD), które opracował sztab specjalistów ARIRT oraz Ural PTI. Umożliwiły one wykrycie, przy prędkości do 70 km/h, poprzecznych pęknięć (kody wad 20 oraz 21) [41, 42] o wielkości wady główki szyny od 25% oraz głębokości 4 mm. Ponadto, MCD skutecznie wykrywały pęknięcia poprzeczne oraz wzdłużne w szynach (kody wad 24, 25, 27, 30 V oraz 30 G), a także złamania szyn – kody 70, 74, 79 [40, 41].

System magnetyzacji MCD składał się z dwóch silnych magnesów (jeden na każdą szynę), które tworzyły w badanym miejscu strumień magnetyczny szyny w celu wykrycia wad. Przy napędowej sile magnesowej (m.d.f.) systemu cewek magnetyzujących w kształcie litery P 40 kA oraz nominalnej, wielkość przestrzeni między biegunami i szyną 8–12 mm, tworzy się strumień magnetyczny od 7 do 10 mWb [29]. Większość tego strumienia, tworzonego przez system magnetyzujący, jest zamknięta przez konstrukcję wagonu oraz powietrze i formuje strumień rozpraszający, co umożliwia uzyskanie defektogramu szyny. Czujnik sygnału znajduje się na płozie, która ciągnie się wzdłuż powierzchni główki szyny w czasie ruchu wagonu defektoskopowego, rejestrując zmianę strumienia magnetycznego na wadach powierzchniowych lub podpowierzchniowych. Wprowadzenie rejestracji komputerowej sygnałów kontroli magnetycznej [8] umożliwiło usprawnienie rozdzielczości systemu oraz wykrycie wad w spoinach oraz połączeniach śrubowych szyn (rodzaje wad 26.3 oraz 21.1), które wcześniej nie były rejestrowane przez MCD w czasie rejestru sygnałów na taśmie magnetycznej lub taśmie papierowej.

W latach 70–80-tych ubiegłego wieku, w Związku Radzieckim obsługiwano około stu MCD [29], co umożliwiało kontrolę bezpieczeństwa ruchu pociągów, przeważnie w niekorzystnych warunkach pogodowych (przy temperaturze poniżej 30°C oraz silnych opadach śniegu), w sytuacjach gdy inne metody nie mogły być wykorzystane [13]. Według [50], aż do dziś, w byłych krajach Związku Radzieckiego pracuje około stu MCD, które przeszły modernizację. Ich możliwości techniczne umożliwiają kontrolę górnej części główki szyny do głębokości 7–8 mm przy prędkości od 20 do 80 km/h w najtrudniejszych warunkach klimatycznych. Zastosowanie wagonów defektoskopowych ujawniło wiele istotnych wad:

1. Istnienie szczeliny powietrza między biegunami magnesu i szyną. Zwiększenie tej szczeliny do 20–23 mm ze względu na bezpieczeństwo ruchu prowadzi do istotnego osłabienia strumienia magnetycznego w szynie, a operator ma fałszywe wrażenie prawidłowego funkcjonowania systemu, podczas gdy sygnały o wadach szyn dostępne w MDM, nie są rejestrowane.
2. W klasycznych wagonach defektoskopowych odległość między biegunami wynosi zaledwie 80 cm (na przykład we lwowskim defektoskopie nr 422, odległość między biegunami wynosi około 1 m (rys. 6). Taka odległość między biegunami zapewnia odpowiednio namagnesowanie szyny w trybie stacjonarnym [37]. Jednak przy większych prędkościach rzędu 60–70 km/h, pole magnetyczne nie zdąży namagnesować szyny do odpowiedniej głębokości w czasie przejścia systemu magnetyzującego nad wadliwym odcinkiem. Wynika to ze znacznego wzrostu prędkości wirowego w szynie wraz ze wzrostem prędkości ruchu systemu defektoskopowego.
3. Istotne wymiary elektromagnesów systemu magnetyzacji szyny, które całkowicie zajmują przestrzeń między kołami wagonu indukcyjnego oraz ich intensywność energii. Pobór mocy elektromagnesów w przybliżeniu wynosi 15 kW.



Rys. 6. Lwowski wagon defektoskopowy nr 442 do diagnostyki MFL wad szyn [37]: a) ogólny wygląd wagonu defektoskopowego; b) wygląd wagonu indukcyjnego oraz systemu magnetyzacji wagonu defektoskopowego

Według autorów artykułu [37], wyeliminowanie lub ograniczenie do minimum wpływu tych wad może nastąpić po wprowadzeniu następujących zmian:

- 1) uciążliwy i energochłonny system magnetyzujący wykorzystujący elektromagnesy, należy zamienić na system nowoczesnych magnesów stałych, działających przez zestawy kołowe wagonu indukcyjnego [28, 31];
- 2) jednokomponentowy system ze zintegrowanymi czujnikami indukcyjnymi należy wymienić na trzykomponentowy, wielokanałowy system z czujnikami Halla, które umożliwią wdrożenie matrycy oraz wielokomponentowych czujników szyn;
- 3) należy opracować nowy sprzęt oraz oprogramowanie systemu diagnostycznego w zakresie pobierania, przekazywania oraz analizy informacji defektoskopowych, co zapewni przetworzenie wielokanałowych informacji defektoskopowych w czasie rzeczywistym.

Głównymi zaletami mobilnej defektoskopii MDM, w porównaniu do metody ultradźwiękowej, są [37]:

1. Zdolność do bezkontaktowej kontroli szyn z zachowaniem szczeliny 8–10 mm względem powierzchni szyny;
2. Wiarygodność kontroli w szerokim zakresie temperatur powietrza oraz wysokiej prędkości ruchu wagonu defektoskopowego;
3. Wyraźny obraz na defektogramach w zakresie wszystkich elementów konstrukcyjnych toru (połączenia śrubowe, izolowane oraz spawane złącza, podkłady kolejowe, krzyżownice itd.), co zapewnia jednoznacznie ustalenie położenia wady;
4. Metody robocze filtrujące wyniki badań dla poszczególnych rodzajów wad.

3.2. Metoda magnetycznej pamięci metalu MPM

To klasyczny przykład metod magnetostatycznych, w literaturze angielskiej zwany *Metal Magnetic Memory*. Metoda ta jest aktywnie opracowywana oraz wdrażana w diagnostyce szyn kolejowych [19, 20, 49].

Metoda MPM łączy możliwości kontroli nieniszczącej oraz mechanikę złamań i w tym zakresie oferuje wiele korzyści nad innymi metodami w zakresie technicznej kontroli obiektów przemysłowych. Metoda ta opiera się na rejestracji oraz analizie rozkładu własnych pól magnetycznych rozpraszających (OMSF) na powierzchni przedmiotu w celu ustalenia stref koncentracji naprężeń, wad, jednorodności struktury metalu oraz połączeń spawanych.

Magnetyczna pamięć metalu (MPM) przejawia się w postaci szczątkowej magnetyzacji metalu przedmiotu oraz połączeń spawanych powstałych w procesie produkcji i chłodzenia w słabym polu magnetycznym lub w formie nieodwracalnych zmian w ma-

gnetyzacji objętości w strefach uszkodzeń w wyniku naprężeń pochodzących z eksploatacji.

W porównaniu do znanych metod magnetycznych oraz innych tradycyjnych metod badań nieniszczących, zalety metody MPM są następujące:

- zastosowanie metody nie wymaga specjalnych urządzeń magnesujących, tak jak zjawisko magnesowania badanych przedmiotów w procesie ich działania, w tym magnetyzacja poprzez stałe pole magnetyczne na Ziemi;
- badanie przedmiotów można przeprowadzić bez wstępnego przygotowania kontrolowanej powierzchni;
- badania mogą być wykonane za pomocą niewielkich urządzeń rejestrujących z niezależnym zasilaniem;
- zastosowanie MPM umożliwia przeprowadzenie wstępnej diagnozy zużycia zmęczeniowego oraz przewidywanie niezawodności obiektu.

Wady metody są następujące:

- słaba powtarzalność wyników;
- metoda MPM może być jedynie wykorzystana do kontroli obiektów ferromagnetycznych;
- zależność poziomu mierzonych sygnałów od położenia przedmiotu względem wektora pola magnetycznego na Ziemi.

Metodę MPM można wykorzystać do diagnostyki szyn kolejowych zarówno w trybie ręcznym, jak i automatycznym. W tym drugim przypadku sprzęt znajduje się w wagonie defektoskopowym [19].

3.3. Metoda pomiaru pola prądu przemiennego (ang. ACFM)

Metoda pomiaru pola prądu przemiennego (ang. *Alternating Current Field Measurement*) została pierwotnie opracowana w połowie lat osiemdziesiątych ubiegłego wieku, jako bezstykowa wersja technologii potencjalnego spadku prądu przemiennego do dokładnego pomiaru głębokości pęknięć zmęczeniowych powierzchni przy podwodnych spoinach. Pierwsze komercyjne systemy ACFM powstały w 1991 roku do podwodnej kontroli spawanych konstrukcji morskich. Od tego czasu technologia rozszerzyła swój zakres o wiele różnych zastosowań, zarówno pod wodą, jak i w powietrzu. W szczególności są to systemy do kontroli gwintowanych połączeń w przemyśle górnym, alternatywne systemy kontroli w przemyśle naftowym i gazowym, zautomatyzowane systemy do kontroli wyściółki zbiornika reaktora koksowniczego, półautomatyczne systemy matryc do szybkiego przeglądu torów kolejowych [7, 9, 10, 24–26, 47, 48].

Technologia, to metoda elektromagnetyczna, która umożliwia wykrycie oraz wymiarowanie pęknięć powierzchni w metalach. Podstawą technologii jest

wywołanie przepływu przemiennego prądu w badanym przedmiocie. Typowa częstotliwość operacyjna wynosi 10^4 Hz. Prąd ten przepływa w cienkiej warstwie blisko powierzchni przewodnika i nie zależy od jego geometrii. W przypadku, gdy nie ma wad, prąd elektryczny jest niezakłócony, ale jeśli dojdzie do powstania pęknięcia w powierzchni, przepływ prądu jest zakłócony i odbywa się wokół końców oraz w dół pęknięcia. Pole magnetyczne powyżej powierzchni metalu, związane z prądem, również jest zakłócone.

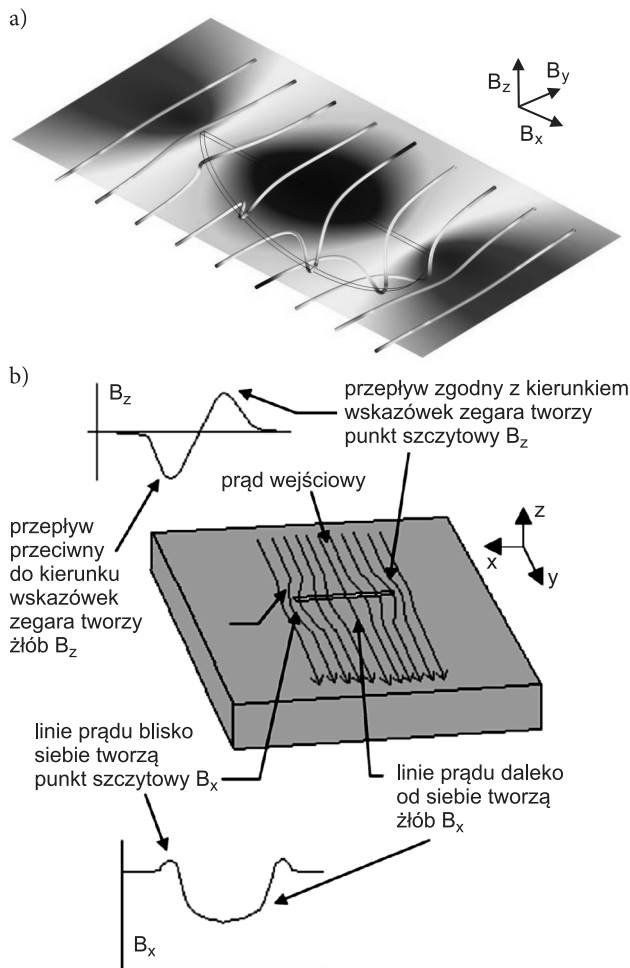
Technologia ACFM korzysta z prądu indukcyjnego zamiast prądu podanego ze wsparciem stałej siły oraz kierunku prądu. To podstawowa różnica w tej technologii względem zwykłych technologii prądów wirowych. Przez pomiar komponentów stworzonych pól magnetycznych w zakresie powierzchni oraz porównanie wyników z prognozowanym ACFM, można ustalić długość oraz głębokość wady bez konieczności kalibracji według standardów. To zapewnia możliwość zarówno wykrycia, jak i klasyfikacji pęknięć powierzchniowych w metalach. Badanie nie wymaga kontaktu elektrycznego lub magnetycznego czujników oraz przedmiotu badania i może być stosowane bez usuwania powłoki powierzchni (farba, lakier, olej, rdza itd.) lub zabrudzeń.

W tej metodzie, po usunięciu czujnika z próbki, poziom sygnału spada proporcjonalnie do kwadratu odległości, a nie sześciemu, jak to ma miejsce w czujnikach prądów wirowych. Z tego względu sygnały maleją stosunkowo wolno, nawet gdy czujnik zostanie odłączony od badanej powierzchni na odległość większą niż 5 mm. Z tego względu nierówność powierzchni lub znaczna grubość nieprzewodzącej powłoki stwarza mniej problemów niż przy zwykłej kontroli za pomocą czujników prądów wirowych, które należy umieścić w odległości mniejszej niż 2 mm od danej powierzchni.

Rysunek 7a przedstawia linie napięcia prądu przemiennego, który przepływa poprzecznie względem płaszczyzny wady, oraz system współrzędnych w celu ustalenia kierunków składowych indukcji pola magnetycznego.

Składowa indukcji pola magnetycznego równoległa do powierzchni oraz prostopadła do prądu (oznaczona jako B_x) jest proporcjonalna do gęstości powierzchni prądu, która maleje na środku pęknięcia oraz wzrasta na końcach, gdy prąd przepływa wokół pęknięcia. Wielkość redukcji w B_x jest wyznacznikiem głębokości wady. Składowa pola względem powierzchni (oznaczona B_z) jest generowana przez cyrkulację przepływów prądu. Te znajdują się wokół końców pęknięcia (w kierunku zgodnym z ruchem wskazówek zegara przy jednym pęknięciu oraz przeciwnie przy drugim), tworząc dodatnie oraz ujemne poziomy sygnały. Przy tym odległość między maksymalnymi i minimalnymi sygnałami B_z pokazuje długość pęknięcia. W celu oszacowania wielkości

wady, jedynymi wymaganymi dwoma pomiarami są redukcja procentów w B_x na środku pęknięcia oraz odległość na składowej między miejscami wartości maksymalnych oraz minimalnych w B_z (rys. 7b).

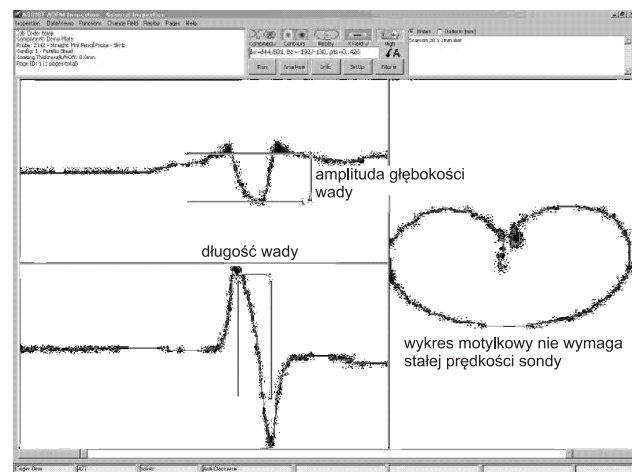


Rys. 7. Fizyczne zasady technologii ACFM [11, 26]: a) prąd zmienny przepływający wokół wady, b) składowe B_x oraz B_z indukcji pola magnetycznego tworzone przez prąd przemienny

Standardowy komputer służy do kontroli sprzętu oraz wyświetlania wyników. Pole po lewej stronie rysunku 8, pokazuje typowe, nieobrobione dane z czujników końca pęknięcia (B_z) oraz głębokości pęknięcia (B_x), zbierane z ręcznie obsługiwanej sondy. Prawa część rysunku 8 pokazuje te same dane przedstawione jako pole hodografu (krzywej), w której B_x jest odniesione do B_z . W obecności wady, pętla przypominająca kardiodoidę jest rysowana na ekranie, a operator szuka różnic w stosunku do typowego kształtu w celu podjęcia decyzji, czy jest pęknięcie, czy go nie ma. Wszystkie dane są przechowywane przez system oraz dostępne do dalszych kontroli i analiz.

Technologia ACFM znalazła również zastosowanie oraz uległa udoskonaleniu w przemyśle kolejowym w zakresie sprawdzania wagonów, zestawów

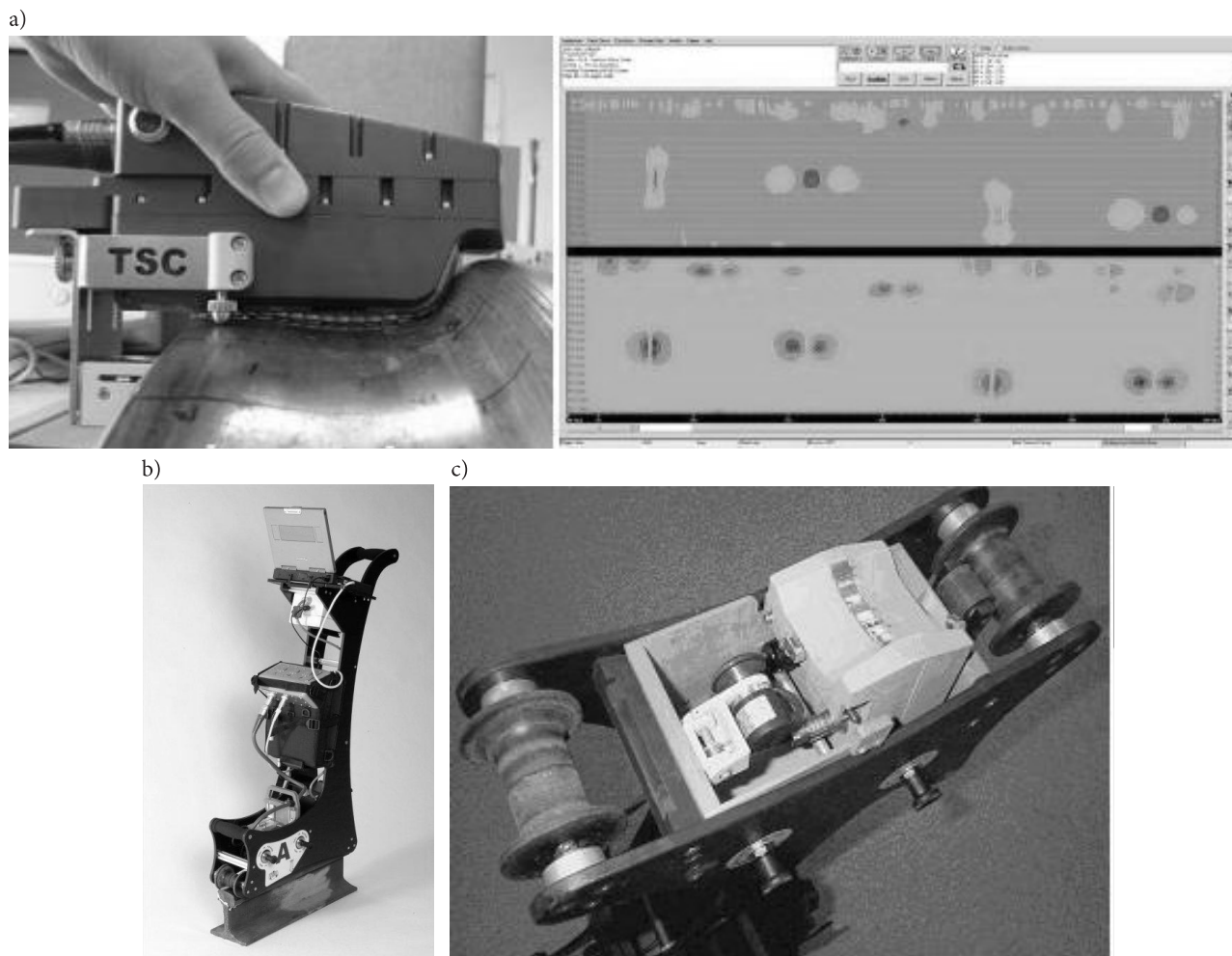
kołowych oraz szyn. Kontrola wagonów jest względnie łatwa, ponieważ są to proste, malowane, spawane konstrukcje, a prędkość kontroli zazwyczaj nie jest istotna. Zestawy kołowe mają większy wpływ na bezpieczeństwo ruchu i dlatego wymagają przeprowadzenia szerszych, bardziej precyzyjnych badań, które zapewniają wiarygodność wyników [7, 26]. Pomiary wykazały, że ACFM wyprzedza inne metody, na przykład metodę kontroli cząsteczki magnetycznej (MPI) szczególnie w zakresie dokładności wyników. W projekcie 7 R&D SAFRAIL, który uzyskał finansowanie z UE (umowa grantowa nr 218674) skonstruowano najbardziej zaawansowaną sondę ACFM. Rysunek 9 przedstawia przenośne urządzenie przeznaczone do kontroli zestawów kołowych oraz przykład wyników badania sztucznych wad. Urządzenie to obejmuje blok czujników z 4 parami czujników o kształcie pasującym do promienia przy kołnierzu koła oraz czternaście zgodnych przepychaczy (każdy zawiera dodatkową parę czujników) do kontroli głównej części koła, co ma zastosowanie nawet przy znacznym zużyciu koła w celu uniknięcia wystartowania czujników. W czasie badań nad uprzednio uszkodzonymi zestawami kołowymi, system wykrył 84% wad w porównaniu do 44% według metody MPI.



Rys. 8. Typowy sygnał w ACFM wywołany wadą [26]

W następstwie tych osiągnięć, uwagę skupiono na wymiarowaniu pęknięć zmęczeniowych RCF na szynach. Złamania szyn z pęknięć RCF, stanowiły główny problem w UK w latach 90-tych ubiegłego wieku. Zazwyczaj kontrola była przeprowadzana metodą wzrokową oraz za pomocą przenośnego przyrządu ultradźwiękowego. Kontrola wzrokowa nie pozwala na określenie głębokości wad. Ponadto, kolejnym ograniczeniem był fakt, że czujniki ultradźwiękowe nie mogły ustalić wielkości najgłębszej wady, jeśli w pobliżu była otoczona przez płytsze wady.

Wady RCF mają znacznie inną morfologię niż standardowe pęknięcia zmęczeniowe, dla których



Rys. 9. Technika ACFM [11, 26]

opracowano ACFM. Przechylają się jedynie pod kątem 30° od powierzchni, ale mogą zmieniać kierunek, aby rosnąć w kierunku powierzchni i prowadzić do utraty części powierzchni szyny lub odwrotnie, mogą kierować się gwałtownie ku dołowi przez szynę, prowadząc do jej pęknięcia. Poza tym, przednia część pęknięcia jest zwykle szersza pod powierzchnią niż na powierzchni, a głębokość pęknięcia będzie znaczna w porównaniu do jej wymiarów powierzchniowych. Wszystkie te czynniki oznaczają, że model wymiarowania teoretycznego, opracowany w latach 80-tych ubiegłego wieku, nie odpowiada pęknięciom RCF. Aby obejść ten problem, zrealizowano próby kalibracji trwałej przy użyciu szyny z faktycznymi pęknięciami RCF. Wyniki wymiarowania przy użyciu nowej procedury kalibracji zostały następnie porównane do wyników dotyczących innych wadliwych szyn i znaleziono odpowiednie rozwiązanie [26, 48].

Stworzono specjalne oprogramowanie wprowadzające nowy algorytm wymiarowania. Oprogramowanie to także obejmowało automatyczną detekcję, a także zgłaszanie najgłębszej wady, zidentyfikowanej

w danym odcinku szyny. Matryca czujników ACFM, o kształcie dopasowanym do profilu szyny, została zamocowana do przenośnego systemu diagnostycznego (rys. 9c), wyposażonego w zmodyfikowany szybki instrument Amigo oraz laptop. Jest to w pełni niezależne urządzenie, które potrafi przeprowadzać 8-godzinną, niezależną kontrolę szyn [26].

Zwiększając częstotliwość próbkowania do 50 kHz, przenośny system diagnostyczny uzyskał prędkość skanowania rzędu 0,75 m/s (w ciągu godziny można skontrolować szynę na odcinku od 2 do 3 km, rysunek 9b). Trzeba podkreślić, że należy nie tylko zebrać odpowiednie dane, aby wykryć wadę, ale także użyć specjalnego oprogramowania do ustalenia jej wielkości [11].

Obecnie w UK (firmy Bombardier Transportation, TSC oraz Network Rail) prowadzone są dalsze badania w celu przyspieszenia przepustowości danych oraz pracy systemów ACFM przy wysokiej prędkości, umożliwiając instalację ACFM na pojazdach kolejowych, np. wagonach oraz pociągach testowych, jadących z prędkością od 15 km/h do 100 km/h.

Czujniki ACFM są dostępne jako standardowe czujniki ołówkowe oraz wieloelementowe czujniki matrycowe. Czujniki ołówkowe ACFM mogą wykrywać wady powierzchniowe w dowolnym kierunku, jednak w celu zwiarytowania, powinny być ułożone pod kątem między 0° – 30° i 60° – 90° względem kierunku ruchu sondy. Ten problem został rozwiązany w matrycach ACFM przez użycie wielokierunkowych pól magnetycznych oraz dodatkowych czujników do analizy tych pól w różnych kierunkach. Jest to szczególnie użyteczne w sytuacjach, gdy kierunek pęknięcia jest nieznan lub zróżnicowany [26].

4. Pomiar wzrokowy oraz metody optyczne diagnostyki mobilnej

Do niedawna kontrola wzrokowa była wykonywana jedynie przez doświadczonych pracowników, którzy przemierzali się wzdłuż toru kolejowego w poszukiwaniu wad. Jest to potencjalnie niebezpieczna praktyka, mimo że często wykorzystywana przez operatorów kolei. W ostatnich kilku latach na kolei wdrożono wiele różnych systemów monitoringu wideo [2, 11, 21]. Można je sklasyfikować zgodnie z ich celem funkcyjnym na cztery główne grupy:

- 1) systemy kontroli wzrokowej toru;
- 2) systemy kontroli wzrokowej pociągu;
- 3) system konserwacji oraz obsługi;
- 4) systemy dotyczące pasażerów.

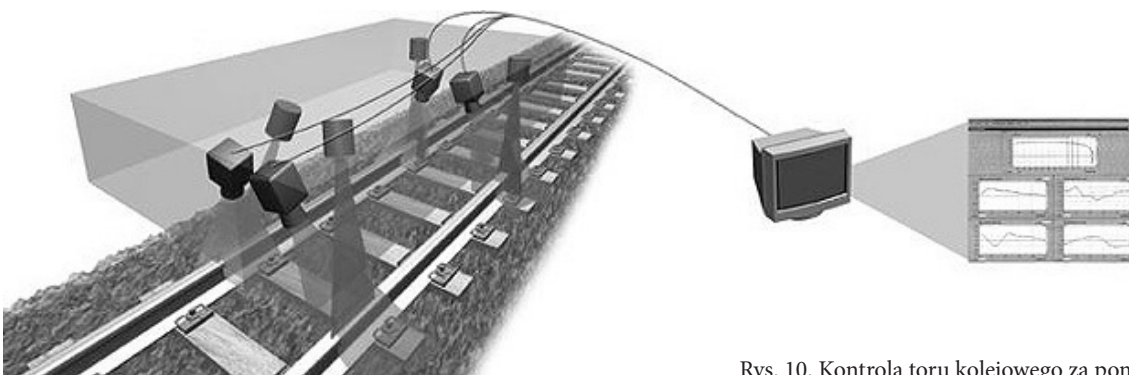
Podstawą automatycznych systemów wizualnych jest użycie szybkiej kamery, która jest w stanie utrwalić obraz toru kolejowego w czasie, gdy pociąg nad nim przejeżdża. Uzyskane w ten sposób zdjęcia są następnie automatycznie poddawane analizie przy użyciu oprogramowania do analizy obrazów. Analiza polega na identyfikacji obiektów lub wad wykrytych dzięki korelacji krzyżowej oraz metodom transformaty falkowej, a dane są klasyfikowane za pomocą planu uczenia nadzorowanego oraz teorii sieci neuronowej.

Rozpoznanie obiektu przez użycie technologii badawczej na próbkach dotyczy problemów obliczeniowych. Aby osiągnąć tryb czasu rzeczywistego, łączny czas obliczeń powinien być krótki. Próbuąc wykryć mniejsze objekty, tj. wady na powierzchni szyn, rozdzielczość utrwalonego obrazu powinna być większa w celu zapewnienia wiarygodnych danych do analizy. Jednak wraz ze wzrostem rozdzielczości obrazu, liczba otrzymywanych danych wzrasta, a w konsekwencji również czas trwania obliczeń niezbędnych do ukończenia analizy. W efekcie prędkość kontroli należy dostosować do prędkości analizy danych.

Zautomatyzowane systemy kontroli wzrokowej toru można wykorzystać do kontroli oraz pomiaru profilu główki szyny oraz stopnia zużycia (w procentach), luzów w stykach szyn, przesunięcia podkładów kolejowych, braku części podsypki między końcami podkładów i ławą torowiska, stanu płyty nośnej w nawierzchniach bezpodsypkowych, brakujących śrub montażowych oraz uszkodzenia powierzchni itd. Prędkość pracy tych systemów może zmieniać się od 60 km/h do 320 km/h, w zależności od rodzaju kontroli oraz wymaganej rozdzielczości. Kontrola falistego zużycia szyn jest znacznie szybsza niż w zakresie pęknięć zmęczeniowych RCF, jednak automatyczne systemy kontroli wzrokowej nie zapewniają wszystkich informacji dotyczących obecności wad wewnętrznych i dlatego nie można ich w pełni zastąpić zamiast kontroli ultradźwiękowej.

W *Société Nationale des Chemins de fer* (SNCF) do kontroli torów kolejowych stosowane są kamery wysokiej prędkości zainstalowane na nowym pojeździe IRIS 320, który może osiągnąć prędkość 320 km/h. Kontrole te są przeprowadzane co 15 dni w celu wykrycia widocznych wad powierzchniowych na liniach dużych prędkości oraz liniach głównych o prędkości ≥ 160 km/h. Rysunek 10 przedstawia zasadę kontroli wzrokowej toru kolejowego.

Podobne systemy opracowano także w Niemczech (*Bildverarbeitungssysteme GmbH*) oraz we Włoszech (*MERMEC*). Ich cechą charakterystyczną jest możliwość zapewnienia regularnej automatycznej kontro-



Rys. 10. Kontrola toru kolejowego za pomocą kamer [11]

li wzrokowej torów kolejowych przy precyzyjnym, wczesnym wykryciu wad oraz wysokiej prędkości przetwarzania. Te wizualno-pomiarowe systemy można wykorzystać zarówno do sprawdzania całej powierzchni szyny, jak i do stwierdzenia braku przytwierdzeń, uszkodzeń podkładów i podsypki.

5. Hybrydowe systemy diagnostyki mobilnej wad szyn w torze kolejowym

Ostatnio w Niemczech, Holandii oraz innych krajach wprowadzono systemy hybrydowe korzystające z jednoczesnego użycia czujników wiroprowadowych [14, 15, 38, 45, 46] oraz konwencjonalnych czujników ultradźwiękowych do szybkiej kontroli torów kolejowych. Czujniki wiroprowadowe mogą dokładnie wykrywać pęknięcia o średniej wielkości (~4 mm) oraz pracować przy prędkości do 72 km/h bez znacznych różnic w wydajności pracy. Jednak produktywność czujników wiroprowadowych zależy w znacznym stopniu od jednakowej odległości do powierzchni, co oznacza, że niektóre wady powierzchniowe mogą wciąż pozostać pominięte w czasie kontroli. Z tego powodu, obecnie jest prowadzone badanie na dużą skalę w celu opracowania nowego sprzętu o wysokiej prędkości dla systemów hybrydowych diagnostyki mobilnej wad torów kolejowych, w tym szybkich kamer, elektromagnetycznych przetworników akustycznych (EMAT), ultradźwiękowych układów antenowych fazowanych (UFA), laserów ultradźwiękowych oraz czujników wirowych prądów o wielu częstotliwościach, innych metod użycia promieniowania laserowego (np. skaterometrii laserowej) itd. [11, 22, 23].

Na terytorium byłego ZSRR trwa badanie rozwoju systemów hybrydowych do mobilnej diagnostyki wad w torach kolejowych. W szczególności na Białorusi, JSC Gomel VSZ produkuje łączone detektory wagonu defektoskopowego do nowego rodzaju wa-

gonu pasażerskiego z nadwoziem model 61-537.1 (rys. 11a) [6].

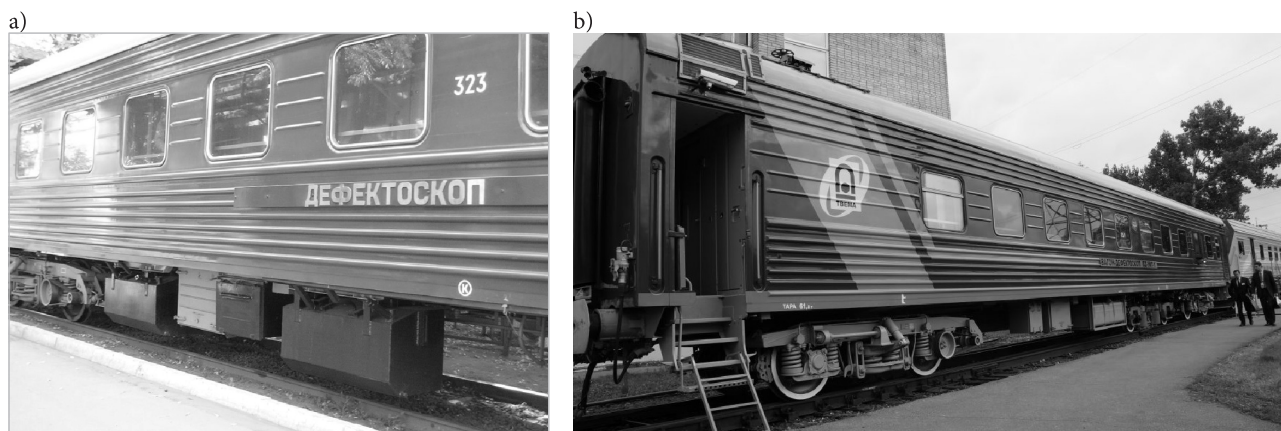
W pomieszczeniu operatora wagonu defektoskopowego znajdują się: sprzęt komputerowy, wyspecjalizowany zestaw defektoskopowy, sprzęt do ultradźwiękowej i magnetycznej kontroli kanałów informacyjnych oraz inne sprzęty specjalistyczne. Zasilanie tego sprzętu oraz systemu magnetyzacji defektoskopowej zapewnia generator spalinowo-elektryczny o mocy 13 kW.

Szybkość pracy wagonu defektoskopowego przy kontroli toru kolejowego metodą magnetyczną wynosi 60 km/h, a metodą ultradźwiękową – 40 km/h.

Rosyjska firma TVEMA (Moskwa) od 2009 roku produkuje wagony defektoskopowe nowej generacji VD-UMT-1 (rys. 11b), które są wyposażone w nowe środki kontroli ultradźwiękowej oraz magnetycznej (wielokanałowy defektoskop ECHO-COMPLEX-2) [3]. W czasie przeprowadzania procedury monitoringu stanu torów kolejowych, detekcja wad jest prowadzona trzema metodami badań nieniszczących – ultradźwiękową, magnetyczną oraz optyczną.

Metoda magnetyczna umożliwia kontrolę wad w szynie, nawet przy temperaturach od -50°C do $+50^{\circ}\text{C}$, podczas gdy praca ultradźwiękowych systemów defektoskopowych jest trudna przy temperaturze poniżej -30°C ze względu na możliwość zamarznięcia cieczy stykowej na bazie mieszaniny wody z alkoholem. System magnesujący MARS z silnym strumieniem magnetycznym zapewnia głęboką magnetyzację szyn umożliwiającą wykrycie wad na wczesnym etapie ich opracowywania [3, 4].

Wagon defektoskopowy jest wyposażony w specjalny wózek na kołach zawieszony przegubowo, w celu uzyskania stałego kontaktu z szyną, zwłaszcza w torach położonych w łukach. Pozycjonowanie ultradźwiękowej płozy względem osi wzdłużnej główki szyny jest zapewnione nie przez mechaniczny kontakt z szyną, ale przez metodę magnetyczną bezstykową, co umożliwia:



Rys. 11. Hybrydowe wagony defektoskopowe [3, 4, 6]

- wyeliminowanie mechanicznego kontaktu systemu centrującego z szyną, co tworzy dodatkowy hałas oraz ogranicza możliwości systemu centrującego;
- zminimalizowanie zależności dokładności centrowania od stanu powierzchni roboczej główki szyny;
- zapobieganie zakłóceń kontaktu akustycznego z powodu śniegu zalegającego między szyną i płożą;
- zapewnienie przejścia przez tor o dowolnych strzałkach nierówności poziomych;
- wzrost prędkości roboczej.

Kamery o obrazie liniowym i wysokiej rozdzielczości oraz system oświetlenia wykorzystują system do identyfikacji wzrokowej oraz do pomiaru wad na powierzchni szyn oraz ich przytwierdzeń (SVOD-2), co prowadzi do automatyzacji oraz uproszczenia monotonnego procesu ciągłej kontroli optycznej oraz eliminuje „czynnik ludzki” i ogranicza prawdopodobieństwo pojawienia się błędów.

W roku 2015 firma TVEMA rozpoczęła produkcję jeszcze bardziej nowoczesnych wagonów defektoskopowych VD-UMT-2 [4], które mają następujące zalety w stosunku do VD-UMT-1:

- użycie ulepszonych środków oraz systemów kompleksowej diagnostyki nieniszczącej (ultradźwiękowe, magnetyczne, wizualno-pomiarowe oraz optyczne);
- możliwość zastosowania łącznej kontroli przy prędkości do 60 km/h;
- rozszerzony zakres klimatyczny eksploatacji itd.

Poza wymienionymi systemami kontroli, w tym wagonie defektoskopowym wykorzystano wysokiej prędkości system pomiaru parametrów torów kolejowych SOKOL-2 a do otrzymania oraz przetworzenia danych dotyczących stanu elementów toru w wagonie, wykorzystano kompleks rejestrujący oraz wyspecjalizowane oprogramowanie INTEGRAL, które zapewnia:

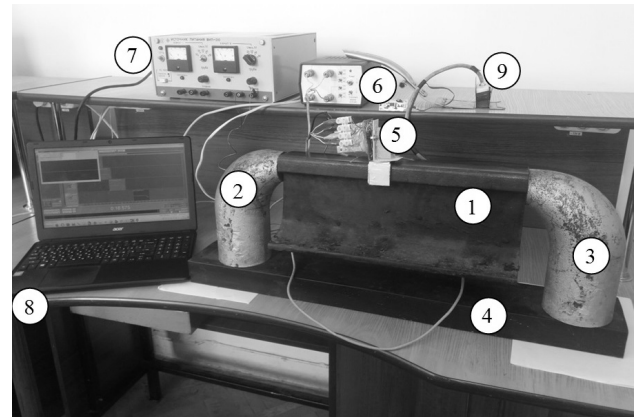
- rejestrację danych ze sprzętu defektoskopowego o stanie elementów torów kolejowych oraz o aktualnych współrzędnych ścieżki, a także prędkości wagonu defektoskopowego;
- archiwizację oraz przechowywanie dokumentów do kontroli wszystkich systemów diagnostycznych.

System automatycznego przetwarzania wyników kontroli ASTRA umożliwił przeprowadzenie zautomatyzowanego dekodowania rodzajów wad w szynach oraz innych dodatkowych parametrów badania nieniszczącego. Istnieje także system monitorowania obserwacyjnego stanu elementów torów.

Na Ukrainie, w Instytucie Telekomunikacji, Radioelektroniki oraz Inżynierii Elektronicznej Narodowego Uniwersytetu Politechniki Lwowskiej od dłuższego

czasu grupa naukowców prowadzi badanie w zakresie defektoskopii MFL przy użyciu naturalnych eksperymentów Lwów MCF nr 442.

W zakresie badań laboratoryjnych dotyczących diagnostyki MFL toru kolejowego, wykorzystywane jest eksperymentalne stanowisko zaprojektowane specjalnie dla instytutu, w którym główne pole magnetyczne w odcinkach wadliwych szyn jest wzbudzone przez silne magnesy stałe [30]. Wygląd stanowiska eksperymentalnego przedstawiono na rysunku 12.



Rys. 12. Stanowisko do badań sygnałów wad na odcinkach szyn: 1) odcinek szyny z badaną wadą, 2) i 3) bieguny magnesów stałych, 4) przewód magnesu jarzmowego, który łączy bieguny magnesów stałych, 5) mobilny wagon z czujnikami Halla oraz wzmacniaczami kanału, 6) konwerter analogowo-cyfrowy (ADC), 7) zasilanie, 8) komputer, 9) integralny czujnik indukcyjny na płożu z magnetycznego wagonu defektoskopowego [opracowanie własne]

W wyniku przeprowadzonych badań, opracowano roboczy model nowego, wielokanałowego systemu diagnostycznego, który wdraża diagnostykę MFL szyn kolejowych z zastosowaniem czujników Halla [30, 32, 34-36, 42, 44].

6. Podsumowanie i wnioski

Na podstawie analizy i porównania nowoczesnych metod oraz środków defektoskopii torów kolejowych, można wywnioskować, iż pomimo znacznego postępu w tym zakresie, możliwość ich dalszego usprawnienia jest wciąż realna.

W szczególności, w zakresie metody strumienia rozproszenia pola magnetycznego defektoskopii, możliwości zwiększenia prędkości w czasie diagnostyki, co istotnie zależy od parametrów systemu namagnesowania oraz jego możliwości do magnesowania szyny, nie zostały w pełni wykorzystane.

Ułatwia to wzrost odległości między biegunami magnesów, z kontrolą położenia czujników wyszukujących nad powierzchnią szyny w lukach.

Do rzetelnej identyfikacji oraz rozróżnienia sygnałów wad, niezbędne jest zwiększenie możliwości informacyjnych systemu defektoskopowego przez użycie wielokanałowych, wielokomponentowych czujników. Co istotne, autorzy stwierdzili, że pionowa składowa rozproszenia pola magnetycznego wady również dostarcza informacji, których kompatybilna analiza zwiększa wiarygodność detekcji oraz rozróżnienia wad. Dalsze istotne sukcesy w szybkiej detekcji kompleksowych pęknięć z niestandardową „geometrią bryły” można uzyskać przez rejestrację wszystkich trzech składowych MFL wady.

Użycie wielokanałowych systemów do przetwarzania informacji defektoskopowych z rejestracją trzech składowych sygnału wraz z kompatybilną analizą kształtu oraz amplitudy sygnałów na każdym kanale, umożliwi jednoznaczne ustalenie przybliżonych wymiarów wady, zlokalizowanie jej położenia w przekroju głowki szyny oraz sklasyfikowanie wady. Prowadzi to do istotnego wzrostu efektywności systemu defektoskopowego informacyjnego, w tym wykrywania wad w szynach we wczesnych fazach powstawania oraz ustalenia stopnia zagrożenia.

Wzrost informacji defektoskopowych znacznie komplikuje pracę operatora wagonu defektoskopowego, która jest dość wymagająca oraz może powodować zwiększenie liczby przeoczonych wad. To prowadzi do konieczności opracowania specjalnych narzędzi oprogramowania do automatycznej detekcji oraz rozróżnienia sygnałów wad w czasie rzeczywistym. Algorytmy wykrywania oraz rozróżnienia sygnałów defektoskopowych można realizować w oparciu o kompatybilne użycie transformacji falkowych oraz metody sieci neuronowych w analizie sygnałów wad na podstawie rzeczywistych sygnałów defektoskopowych.

Ze względu na szersze zastosowanie oraz wdrożenia zaproponowanych środków diagnostyki wad szyn w torach kolejowych, oczekuje się wzrostu niezawodności oraz wydajności sygnałów wad w procesie skanowania wraz ze wzrostem prędkości wagonów defektoskopowych.

Literatura

1. Antipov A., Markov A.: *Automation of the analysis of signals of magnetodynamic control of rails*, NDT World Review, № 2(64), June 2014, s. 25–30.
2. Bojarczak P.: *Wizyjna diagnostyka toru kolejowego*, Monografia, Radom ITE – PIB, Radom 2013, p. 146.
3. Carriages-defectoscopes VD-UMT-1: Electronic resource, [access: 9 October 2017], available on <https://tvema.all.biz/vagony-defektoskopy-vd-umt-1-g874151>.
4. Carriages-defectoscopes VD-UMT-2: Electronic resource, [access: 9 October 2017], available on <https://tvema.ru/516>.
5. Clark R., Singh S., Haist C.: *Ultrasonic characterization of defects in rails*, Insight, Vol. 44, № 6, June 2002, p. 341–347.
6. Combined carriage-defectoscope: Electronic resource, [access: 9 October 2017], available on <http://vsz.gomel.by/index.php/ru/vagons/specialnogo-naznacheniya/252-sovmeschennyi-vagon-defektoskop.html>.
7. Gaynor T. and others: *Reduction in Fatigue Failures through Crack Detection by Alternating Current Field Measurements*, IADC/SPE Drilling Conference, New Orleans (Louisiana, USA) 12-15 March 1996, IADC/SPE 35033 Conference Paper.
8. Halileev P.A.: *Birth of Nondestructive Testing*, Defektoskopiya, № 12, 1999, p. 73–82.
9. Howitt M.: *Bombardier brings ACFM into the Rail Industry*, Insight, Vol. 44, № 6, June 2002, p. 379–382.
10. Hughes G., Gittleman M.: *A Robotic End Effector for Visual and Electromagnetic Inspection of Waste Storage Tank Walls*, The ANS 6th Topical Meeting on Robotics and Remote Systems, American Nuclear Society Inc., La Grange Park, (IL, USA) 1995, p. 347–354.
11. INNOTRACK (Innovative Track Systems) D4.4.1 – Rail Inspection Technologies, Integrated Project no. TIP5-CT-2006-031415, University of Birmingham, Great Britain 2008, p. 42.
12. Karpash A.: *Analysis of known methods for controlling the physical and mechanical characteristics of metal*, Oil and Gas Energy: All-Ukrainian Sci.-Tech. Journ., № 1(17), IFNTUNG, Ivano-Frankivsk (Ukraine) 2012, p. 70–82.
13. Kononov O. and others: *Defectoscopic complex of magnetic carriage-defectoscope*, Path & track economy, № 5, Moscow 2000, p. 23–25.
14. Krull R. and others: *Eddy-current detection of head checks on the gauge corners of rails: Recent results*, 6th International Conference & Exhibition on Railway Engineering, CD, Edinburgh: Engineering Technics Press, London 2003, 8 p.
15. Krull R. and others: *Non-destructive testing of rails today and in the future*, ZEVrail Glasers Annalen, nr. 127, 2003, p. 286–296.
16. Lesiak P.: *Mobilna diagnostyka szyn w torze kolejowym*, Wydawnictwo Politechnika Radomska, seria monografie, nr. 116, Radom 2008, s. 202.
17. Lesiak P. Migdal M.: *Cluster analysis of head checking flaws in railway rails subjected to ultrasound*, Archives of Transport, nr. 21, 2009, p. 51–65.
18. Lesiak P., Bojarczak P.: *Application of wavelets and fuzzy sets to the detection of head-checking defects in railway rails*, 10th Conference on Transport Systems Telematics (TST'2010), Communications in Computer and Information Science 104, Pub.:

- Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Katowice – Us-tron (Poland) 20-23 October 2010, p. 327–334.
19. Lesiak P., Radziszewski A.: *Diagnostyka szyn meto-dą magnetycznej pamięci metalu*, Prace Naukowe Politechniki Radomskiej, Elektryka, nr. 2(8) 2004, Radom 2004, s. 103–110.
 20. Lesiak P., Bojarczak P.: *Application of neural classi-fier to railway flaw detection in the method of metal magnetic memory*, The 6th International Confer-ence „Environmental Engineering”, Selected Pa-pers, Vol. 2, Vilnius (Lithuania) 26-27 May 2005, pp. 744–747.
 21. Lesiak P., Bojarczak P.: *Przetwarzanie i analiza ob-rzów w wybranych badaniach defektoskopowych*, Monograficzna seria wydawnicza Biblioteka Pro-blemów Eksploatacji, Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji – PIB, Radom 2012, s. 185.
 22. Lesiak P., Szumiata T., Wlazło M.: *Laser scat-terometry for detection of squat defects in railway rails*, The Archives of Transport, Vol. 33, Issue 1, Warszawa 2015, s. 47–56.
 23. Lesiak P., Sokołowski A., Wlazło M.: *Cross-correlation function in identifying head checking defects of the rail-way rails*, Diagnostyka, Vol.18, nr 2, 2017, s. 65–73.
 24. Lugg M., Topp D.: *Recent developments and applica-tions of the ACFM inspection method and ACSM stress measurement method*, 9th European Conference on NDT, Berlin (Germany) September 2006, Tu. 3.6.5.
 25. Lugg M.: *Applications of ACFM for Weld Inspection by ROV*, Singapore International NDT Conference & Exhibition, Singapore 3-4 November 2011, s. 8.
 26. Lugg M.: *The First 20 years of the A.C. field Mea-surement Technique*, 18-th World Conference on Non-Destructive Testing, vol. 1, Durban (South Africa) 16-20 April 2012, s. 494–500.
 27. Magnetic flaw detectors of the inventor F.M. Kar-pov, VNTM, Moscow 1939.
 28. Magnetizing system. OOO NPF „Polus-N”: Elec-tronic resource, [dostęp: 9 October 2017], available on <http://www.polus-n.com/defectoscop.html>.
 29. Markov A., Antipov A.: *Magnetodynamic method for rails Inspection*, NDT World Review, nr 3(57), September 2012, s. 66–71.
 30. Matiieshyn Yu. and others: *Modern methods of mobile diagnostics of railway tracks defects*, 6th International Conference Advanced Rail Technologies (ART 2017), Warsaw (Poland) 15–16 November 2017, s. 71.
 31. Merezhin N., Maksimov M., Legin A.: *Experimen-tal studies of rails magnetization system using per-manent magnets*, Izvestia of Southern Federal Uni-versity – Technical sciences, nr 11 (160), Rostov-on-Don (Russia) November 2014, pp. 135–145.
 32. Nichoga V. i in.: *Kierunki w modernizacji lwowskie-go wagonu-defektoskopu magnetycznego przy zasto-sowaniu magneto-dynamicznej metody diagnostyki szyn torów kolejowych*, Międzynarodowa konferen-cja naukowa „Transport XXI wieku”, Arłamów (Pol-ska) 30 sierpnia – 2 września 2016 r., s. 339–340.
 33. Nichoga V., Dub P., Storozh I.: *Component sensors for magnetic diagnostics of railroad track rails tech-nical condition*, Information and control systems on the railway transport, № 3, Kharkiv (Ukraine) 2014, s. 34–43.
 34. Nichoga V., Storozh I., Vashchyshyn L.: *Model of rail crack based on a discrete set of loops with cur-rent*, Diagnostyka, Vol.14, nr 2, PTDT, Warszawa 2013, s. 67–71.
 35. Nichoga V., Storozh I.: *Multi-channel magnetic de-fectoscope rails coupling block*, Pat. 77065 Ukraine, MPK G11B 20/10 (2006.01), applicant and patent holder Lviv Polytechnic National University, – nr u201208870, apl. 18.07.2012, publ. 25.01.2013.
 36. Nichoga V., Vashchyshyn L., Saldan O.: *Analysis of rail defects signals by the Matlab Wavelet Toolbox Programme*, Bulletin of Lviv Polytechnic National University – Radioelectronics and Telecommuni-cations, nr 796, Lviv Polytechnic National Univer-sity, Lviv 2014, s. 8–13.
 37. Nichoha V. and others: *The magnetic flux leakage method of railway track diagnostics and ways of it modernization*, Bulletin of Lviv Polytechnic Na-tional University – Radioelectronics and Telecom-munications, nr 849, Lviv Polytechnic National University, Lviv 2016, s. 99–116.
 38. Pohl R., Krull R., Meierhoffer R.: *A new eddy cur-rent instrument in a grinding train*, 9th European Conference on NDT, Berlin (Germany) September 2006, Poster 178.
 39. Rail Inspection: Electronic resource [dostęp: 25 January 2015], available on www.nde-ed.org/AboutNDT/SelectedApplications/RailInspection/RailInspection.htm.
 40. Rybkin V. i in.: *Classification and catalogue of de-fects and damages of elements of railway transfers on the railways of Ukraine*, CP-0284, Ministry of Infrastructure of Ukraine, State Administration of Railway Transport of Ukraine, Ukrzaliznyt-sya, Main Department of Tracking, Inpress, Kyiv (Ukraine) 2013, s. 1–108.
 41. Rybkin V. I in.: *Classification and catalogue of defects and damages of rails on the railways of Ukraine*, CP-0285, Ministry of Infrastructure of Ukraine, State Administration of Railway Transport of Ukraine, Ukrzaliznytsya, Main Department of Tracking, In-press, Kyiv (Ukraine) 2013, s. 109–194.
 42. Saldan O. and others: *Experimental research of signals of defects such as the transverse cracks on the rail imitator*, XIIIth International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Tele-

- communications and Computer Science (TCSET'2016), Lviv–Slavske, (Ukraine) 22–26 February 2016, ps. 222–225.
43. Sperry: *Electronic resource* [dostęp: 25 January 2015], available on www.sperryrail.com.
44. Storozh I., Nichoga V.: *The eight-channel active sensor for magnetic diagnostics of a railway track*, Bulletin of Lviv Polytechnic National University – Radioelectronics and Telecommunications, nr 705, Lviv Polytechnic National University, Lviv 2011, s. 171–175.
45. Thomas H. and others: *Pioneering inspection of railroad rails with eddy currents*, 15th World Conference on NDT, CD, Italian Society for Non-Destructive Testing and Monitoring Diagnostics, Roma (Italy) 2000.
46. Thomas H., Heckel T., Hanspach E.: *Advantage of a combined ultrasonic and eddy current examination for railway inspection trains*, 9th European Conference on NDT, Berlin (Germany) September 2006, Wed. 4.5.3.
47. Topp D., Smith M.: *Application of the ACFM inspection method to rail and rail vehicles*, Insight, Vol. 47, № 6, June 2005, s. 354–357.
48. Topp D.: *Use of the ACFM Inspection Method to reduce Downhole Drillstring Failures*, Australia Oil & Gas Conference, 2001.
49. Vlasov V.G., Dubov A.A.: *Physical basis of the method of metal magnetic memory*, ZAO „TISSO”, Moscow 2004, s. 424.
50. Vorobyov V., Shur E.: *Transition to a new quality of non-destructive control of rails*, Path & track economy, nr 10, Moscow 2013, s. 24–26.
51. Wilson J., Tian G.: *3D magnetic field sensing for magnetic flux leakage defect characterisation*, Insight, Vol. 48, nr 6, June 2006, s. 357–359.