

Techniki badań nieniszczących oraz monitorowanie stanu konstrukcji w Kolei Dużych Prędkości

Non-destructive testing techniques and structural health monitoring in high-speed railways



Dyduch Janusz

Prof. dr hab. inż.

Prezes Honorowy SITK RP
Prezes SITK RP Oddział w Radomiu
Uniwersytet Radomski



Perzyński Tomasz

Dr hab. inż., prof. UR

Dziekan Wydziału Transportu,
Elektrotechniki i Informatyki
Uniwersytet Radomski



Palczewski Ryszard

Dr inż.

Ekspert SITK RP

Streszczenie: Artykuł prezentuje metody badań nieniszczących oraz systemy monitorowania stanu konstrukcji w zastosowaniu do Kolei Dużych Prędkości. Przedstawiono połączenie klasycznego modelowania z nowoczesnymi technologiami pomiarowymi, które umożliwiają ocenę stanu infrastruktury w czasie rzeczywistym. Techniki NDT stanowią istotny element utrzymania infrastruktury kolejowej, jednak stwierdzono, że w warunkach HSR ich stosowanie wyłącznie w trybie okresowych kontroli jest niewystarczające. Zaleca się zatem wdrażanie systemów SHM wspierających utrzymanie predykcyjne.

Pozwoli to na wczesną identyfikację uszkodzeń oraz optymalizację w strategii utrzymaniowej i eksploatacyjnej.

Słowa kluczowe: *Badania nieniszczące; Systemy monitorowania; Koleje Dużych Prędkości*

Abstract: This article presents non-destructive testing methods and structural health monitoring systems applied to high-speed rail. It demonstrates the combination of classical modeling with modern measurement technologies, which enable real-time assessment of infrastructure condition. NDT techniques are an essential element of rail infrastructure maintenance, but it has been found that in high-speed rail conditions, their use solely for periodic inspections is insufficient. Therefore, it is recommended to implement SHM systems supporting predictive maintenance. This will enable early identification of damage and optimization of maintenance and operational strategies.

Keywords: *n-destructive testing; Monitoring systems; High-speed railways*

Wprowadzenie

Techniki badań nieniszczących (NDT) od wielu lat są intensywnie rozwijane i szeroko stosowane w celu zapewnienia bezpieczeństwa eksploatacji oraz poprawy komfortu jazdy w systemach kolejowych. Wraz z postępem w obszarze NDT, monitorowanie stanu konstrukcji (SHM) otworzyło nową erę oceny kondycji infrastruktury kolejowej w czasie rzeczywistym, bez konieczności przerywania ruchu pociągów. Ma to szczególne znaczenie w przypadku kolei dużych prędkości (HSR), gdzie wymagania dotyczące niezawodności i bezpieczeństwa są wyjątkowo wysokie.

Współczesne systemy kolejowe podlegają intensywnemu rozwojowi technologicznemu wynikającemu z

rosnącego zapotrzebowania na szybki, bezpieczny i efektywny transport. Szczególnym obszarem tego rozwoju jest kolej dużych prędkości (HSR – High-Speed Rail), gdzie elementy infrastruktury oraz tabor poddawane są ekstremalnym obciążeniom dynamicznym, termicznym i eksploatacyjnym. W takich warunkach niezbędne staje się zastosowanie zaawansowanych metod diagnozowania stanu technicznego, które pozwalają na wczesne wykrycie uszkodzeń, ograniczenie ryzyka katastrof oraz minimalizację kosztów utrzymania. Tradycyjne, okresowe przeglądy techniczne stają się niewystarczające wobec wymagań szybko poruszających się składów. Odpowiedzią na te wyzwania są:

- techniki badań nieniszczących

(NDT – Non-Destructive Testing),

- monitorowanie stanu konstrukcji (SHM – Structural Health Monitoring).

Połączenie NDT i SHM stanowi fundament dla współczesnej diagnostyki infrastruktury HSR.

Rozwój kolei dużych prędkości stanowi istotny kierunek modernizacji współczesnych systemów transportu szynowego, [13, 16]. Wraz ze wzrostem prędkości eksploatacyjnych do poziomu 250–350 km/h rośnie znaczenie zjawisk dynamicznych, falowych i zmęczeniowych zachodzących w konstrukcji toru oraz w obszarze kontaktu koło–szyna, [4, 10]. W takich warunkach tradycyjne podejścia projektowe i diagnostyczne oparte na analizach statycznych

są niewystarczające, a kluczową rolę odgrywają zaawansowane modele dynamiczne oraz systemy monitorowania stanu konstrukcji.

W artykule przedstawiono zintegrowane ujęcie diagnostyki infrastruktury kolei dużych prędkości, łączące klasyczne techniki badań nieniszczących (NDT) z systemami monitorowania stanu konstrukcji (SHM) oraz modelowaniem fizycznym toru i układu pojazd–tor. W odróżnieniu od typowych opracowań przeglądowych skoncentrowanych na pojedynczych technologiach diagnostycznych, zaproponowano podejście systemowe, w którym dane pomiarowe interpretowane są z wykorzystaniem modeli dynamicznych, falowych i zmęczeniowych. Pozwala to na powiązanie sygnałów rejestrowanych w systemach SHM z rzeczywistymi parametrami fizycznymi infrastruktury oraz prognozowanie jej trwałości w warunkach eksploatacji kolei dużych prędkości. Szczególną uwagę poświęcono możliwościom implementacji takich rozwiązań w systemie kolejowym w Polsce.

Techniki badań nieniszczących (NDT) w systemach kolejowych

Badania NDT umożliwiają ocenę stanu technicznego elementów infrastruktury bez konieczności ingerencji w ich strukturę, demontażu czy zatrzymywania ruchu, [1]. Metody te są powszechnie stosowane do diagnostyki:

- szyn,
- zestawów kołowych,
- osi,
- elementów rozjazdów,
- konstrukcji wsporczych (mosty, wiadukty).

Do wybranych rodzajów badań nieniszczących stosowanych w kolejnictwie możemy zaliczyć:

- Badania ultradźwiękowe (UT)
Badania ultradźwiękowe stanowią podstawową metodę oceny wewnętrznych defektów ma-

teriałowych. Fale ultradźwiękowe wprowadzane do materiału rozchodzą się w nim i odbijają od nieciągłości. Analiza sygnału odbitego pozwala określić typ i położenie defektu. Znajdują one zastosowanie m.in. w diagnostyce osi zestawów kołowych, wykrywaniu pęknięć wewnętrznych szyn, ocenie zmęczeniowej.

- Badania prądami wirowymi (ET)
Metoda ta opiera się na zjawisku indukowania prądów wirowych w przewodzących materiałach. Znajduje zastosowanie w wykrywaniu pęknięć powierzchniowych kół czy diagnostyce stopki i główki szyny.
- Badania magnetyczno-proszkowe (MT)
Wykorzystywane są do lokalizacji pęknięć powierzchniowych i podpowierzchniowych w elementach ferromagnetycznych.
- Termografia (IRT)
Metoda pasywna i aktywna, wykrywająca anomalie cieplne związane z uszkodzeniami. Znajduje zastosowanie w ocenie zużycia hamulców, diagnostyce rozgrzewania się panewek oraz monitorowaniu przegrzewania elementów układu jezdnego
- Wizualne NDT (VT) oraz systemy wizyjne
Współczesne systemy wizji maszynowej wykorzystują uczenie maszynowe, głębokie sieci neuronowe i kamery wysokiej rozdzielczości.

Monitorowanie stanu konstrukcji (SHM)

Structural Health Monitoring (SHM) stanowi zespół metod i technologii umożliwiających ciągłe, automatyczne oraz zdalne monitorowanie stanu technicznego elementów infrastruktury kolejowej i taboru, [2, 11]. Systemy SHM pozwalają na wczesne wy-

krywanie uszkodzeń, ocenę trwałości konstrukcji oraz planowanie działań utrzymaniowych w oparciu o rzeczywisty stan obiektów, a nie wyłącznie o harmonogramy okresowe. W kolei dużych prędkości (HSR – High-Speed Rail) znaczenie SHM jest szczególnie istotne ze względu na wysokie obciążenia dynamiczne, duże prędkości eksploatacyjne oraz niewielkie tolerancje geometryczne toru. Nawet niewielkie uszkodzenia mogą prowadzić do gwałtownego wzrostu naprężeń i przyspieszonej degradacji infrastruktury.

Do podstawowych funkcji systemów SHM należą:

- ciągła rejestracja drgań, przeciążeń i deformacji,
- detekcja uszkodzeń w czasie rzeczywistym,
- modelowanie prognostyczne trwałości konstrukcji,
- redukcja kosztów utrzymania poprzez wdrożenie predykcyjnego planowania napraw.

Stała obserwacja parametrów pracy infrastruktury pozwala na przejście od modelu utrzymania reaktywnego do predykcyjnego, co przekłada się na zwiększenie bezpieczeństwa oraz optymalizację kosztów eksploatacji. Typowy system SHM składa się z kilku współpracujących warstw funkcjonalnych:

1. Warstwa sensoryczna – czujniki pomiarowe:
 - światłowodowe FBG (Fiber Bragg Grating),
 - czujniki piezoelektryczne,
 - tensometry,
 - czujniki MEMS i akcelerometry.
2. Warstwa transmisyjna – systemy przesyłu danych:
 - sieci IoT i IIoT,
 - bezprzewodowe sieci 5G/NR,
 - transmisja światłowodowa.
3. System akwizycji danych – urządzenia zbierające i synchronizujące dane pomiarowe w czasie rzeczywistym.

4. Warstwa analityczna – algorytmy przetwarzania i interpretacji danych:
 - metody sztucznej inteligencji i uczenia maszynowego,
 - analiza sygnałów drganiowych,
 - detekcja kompresyjna.
5. Cyfrowy bliźniak (Digital Twin) – wirtualny model konstrukcji lub systemu transportowego, aktualizowany na podstawie danych rzeczywistych, umożliwiające symulacje i prognozowanie.

System SHM dla kolei dużych prędkości składa się z wielowarstwowej architektury obejmującej warstwę sensoryczną, system akwizycji danych, transmisję, analizę sygnałów oraz cyfrowy bliźniak infrastruktury. Integracja danych pomiarowych z modelami fizycznymi umożliwia detekcję uszkodzeń, prognozowanie trwałości oraz wdrażanie strategii utrzymania predykcyjnego. Schemat architektury przedstawiono na rys. 1.



1. Architektura systemu Structural Health Monitoring (SHM) dla infrastruktury i taboru kolei dużych prędkości [źródło: opracowanie własne]

Warstwa sensoryczna

Czujniki światłowodowe z siatką Bragga (FBG) należą do najważniejszych elementów systemów SHM w infrastrukturze kolejowej. Do zalet czujników można zaliczyć: odporność na zakłócenia elektromagnetyczne, możliwość instalacji na dużych odległościach, wysoka czułość na odkształcenia i temperaturę, możliwość pracy w trudnych warunkach środowiskowych. Czujniki te znajdują zastosowanie w monitoringu mostów i wiaduktów kolejowych, ocenie drgań szyn i podtorza, pomiarach sił w konstrukcjach wsporczych i słupach trakcyjnych.

Czujniki piezoelektryczne są szeroko stosowane w technice emisji akustycznej (AE – Acoustic Emission). Umożliwiają detekcję mikroskopijnych zmian strukturalnych materiału. Znajdują zastosowanie w wykrywaniu mikropęknięć i inicjacji uszkodzeń, detekcji uderzeń koła o uszkodzoną szynę, monitoringu dynamicznych

zmian obciążenia konstrukcji.

Czujniki MEMS oraz akcelerometry stosowane są głównie do monitorowania parametrów dynamicznych ruchu pociągu i toru. Zakres pomiarów czujników to drgania pionowe i boczne, prędkość przejazdu, stan zawieszenia i wózków, nierówności toru.

Obciążenia dynamiczne w kolei dużych prędkości

Ruch pociągów dużych prędkości generuje złożone zjawiska dynamiczne wpływające na trwałość infrastruktury:

- falowanie podtorza,
- zjawisko fal Schallera (tzw. falowanie toru - track wave propagation),
- rezonanse w konstrukcji toru,
- efekt sprężysty w łukach i rozjazdach.

Przy prędkościach eksploatacyjnych 250-350 km/h nawet niewielkie defekty geometryczne toru mogą powodować:

- wzrost obciążeń dynamicznych oraz przyspieszoną degradację infrastruktury

- efekt „uderzenia koła” o szynę,
- przyspieszone powstawanie zmęczeniowych pęknięć powierzchniowych (RCF – Rolling Contact Fatigue).

Zjawiska te uzasadniają konieczność stosowania ciągłego monitoringu SHM w systemach HSR.

SHM w kolei dużych prędkości – systemy pokładowe i naziemne

Systemy pokładowe instalowane bezpośrednio na pojazdach kolejowych obejmują:

- czujniki drgań i przyspieszeń,
- czujniki temperatury osi i łożysk,
- skanery laserowe profilu toru,
- systemy pomiaru zużycia kół i obręczy.

Pozwalają one na bieżącą ocenę interakcji koło-szyrna oraz wykrywanie nieprawidłowości podczas eksploatacji. Systemy naziemne instalowane w infrastrukturze obejmują:

- portale diagnostyczne na liniach HSR,
- systemy monitoringu mostów i tuneli,

- diagnostykę rozkładu nacisku kół na tor,
- systemy wczesnego ostrzegania o uszkodzeniach toru.

Integracja monitoringu pokładowego i naziemnego umożliwia kompleksową ocenę stanu systemu transportowego.

Analiza danych w SHM – metody nowoczesne

Nowoczesne systemy SHM wykorzystują algorytmy AI/ML w analizie dużych zbiorów danych pomiarowych [2, 11, 15]. Zastosowania obejmują:

- klasyfikację typów uszkodzeń,
- predykcję czasu do awarii (Remaining Useful Life – RUL),
- analizę sygnałów drganiowych z wykorzystaniem sieci CNN i RNN,
- wykrywanie anomalii w czasie rzeczywistym.

Detekcja kompresyjna (Compressed Sensing)

Detekcja kompresyjna pozwala na redukcję objętości danych przy zachowaniu kluczowych informacji diagnostycznych. Jest szczególnie przydatna w systemach o ograniczonej przepływności transmisji.

Transmisja bezprzewodowa

Rozwój komunikacji bezprzewodowej umożliwia efektywną transmisję danych SHM:

- sieci 5G/6G,
- IoT i IIoT,
- redukcja infrastruktury kablowej,
- transmisja w czasie rzeczywistym do centrów diagnostycznych.

Kierunki rozwoju SHM w kolei dużych prędkości

Rozwój technologii SHM w systemach HSR koncentruje się na następujących obszarach:

- rozwój zaawansowanych materiałów konstrukcyjnych (np. szyny bainityczne, kompozyty),

- pełna automatyzacja procesów utrzymaniowych,
- wdrażanie cyfrowych bliźniaków toru i taboru,
- integracja SHM z systemami sterowania ruchem kolejowym (ERTMS),
- rozwój autonomicznych systemów diagnostycznych opartych na AI.

Implementacja zaawansowanych systemów SHM stanowi jeden z kluczowych elementów zapewnienia bezpieczeństwa, niezawodności i efektywności ekonomicznej kolei dużych prędkości w perspektywie rozwoju inteligentnej infrastruktury transportowej.

Modelowanie konstrukcji kolejowych w HSR

Skuteczna interpretacja danych rejestrowanych przez systemy SHM wymaga odniesienia do modeli fizycznych opisujących dynamikę toru oraz interakcję pojazd–tor. Same pomiary drgań, odkształceń czy temperatur nie pozwalają na jednoznaczną ocenę stanu infrastruktury bez znajomości mechanizmów fizycznych odpowiedzialnych za ich powstawanie. Z tego względu w dalszej części artykułu przedstawiono podstawowe modele dynamiczne i zmęczeniowe wykorzystywane w analizach kolei dużych prędkości oraz ich rolę w interpretacji danych diagnostycznych.

Modelowanie konstrukcji kolejowych dla HSR obejmuje analizę propagacji drgań i fal sprężystych w torze, mechaniki kontaktu koło–szyna, procesów zmęczeniowych typu RCF (Rolling Contact Fatigue) oraz dynamicznej interakcji pojazd–tor. Integracja tych modeli umożliwia nie tylko opis aktualnego stanu infrastruktury, lecz także prognozowanie jej degradacji oraz planowanie działań utrzymaniowych.

Model dynamiczny toru kolejowego

Podstawowym elementem infrastruktury kolejowej podlegającym analizie dynamicznej jest szyna wraz z podtorzem. W modelowaniu konstrukcji torowej powszechnie stosowany jest model belki Eulera–Bernoulliego na sprężystym podłożu typu Winklera, [4, 6]. Model ten umożliwia opis propagacji drgań giętnych oraz analizę wpływu parametrów toru na odpowiedź dynamiczną konstrukcji. Równanie ruchu szyny można zapisać w postaci:

$$EI \frac{\partial^4 w(x, t)}{\partial x^4} + m \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial t^2} + Kw(x, t) = q(x, t) \quad (1)$$

gdzie: E oznacza moduł Younga materiału szyny, I moment bezwładności przekroju, m masę jednostkową szyny, K sztywność podłoża, natomiast $q(x, t)$ reprezentuje obciążenie dynamiczne od koła pojazdu.

Model belkowy pozwala na analizę odpowiedzi dynamicznej toru w funkcji prędkości pojazdu, obciążenia osiowego oraz parametrów konstrukcyjnych podtorza.

W przypadku kolei dużych prędkości szczególnego znaczenia nabiera wpływ sztywności podłoża oraz tłumienia na charakter propagacji drgań. Nawet niewielkie zmiany tych parametrów mogą prowadzić do wzrostu amplitud drgań, powstawania rezonansów oraz przyspieszonej degradacji elementów toru. W analizach HSR model belki na sprężystym podłożu stanowi podstawę symulacji numerycznych wykorzystywanych w projektowaniu toru, ocenie jego trwałości oraz interpretacji danych pomiarowych z systemów monitorowania.

Propagacja fal sprężystych w torze kolejowym

Wraz ze wzrostem prędkości jazdy pociągów rośnie znaczenie zjawisk falowych w konstrukcji toru. Obciąż-

żenia dynamiczne generowane przez koła pojazdu powodują powstawanie fal sprężystych propagujących się wzdłuż szyny oraz w podtorzu. Analiza tych zjawisk jest kluczowa dla oceny stanu infrastruktury oraz identyfikacji uszkodzeń. Zakładając rozwiązanie falowe równania ruchu szyny, otrzymuje się relację dyspersyjną fal giętych, [3]:

$$\omega(k) = k^2 \sqrt{\frac{EI}{m}} \quad (2)$$

Relacja ta wskazuje na dyspersyjny charakter fal w szynie – prędkość propagacji zależy od częstotliwości. W praktyce oznacza to, że różne składowe widma drgań przemieszczają się z różnymi prędkościami, co prowadzi do zniekształceń sygnału podczas propagacji. W analizie falowej istotne znaczenie mają prędkość fazowa i prędkość grupowa. Ich zmiany mogą wskazywać na lokalne zmiany właściwości dynamicznych toru. Obecność pęknięć, degradacja podsypki lub utrata sztywności podłoża powodują odbicia fal oraz modyfikację charakterystyk propagacyjnych. Dzięki temu analiza sygnałów drganiowych umożliwia lokalizację uszkodzeń w torze kolejowym. W systemach SHM stosuje się porównanie sygnałów bieżących z sygnałami referencyjnymi, co pozwala na wykrywanie niewielkich zmian strukturalnych jeszcze przed osiągnięciem przez defekty rozmiaru krytycznego.

Mechanika kontaktu koło–szyna

Kontakt pomiędzy kołem a szyną ma charakter nieliniowy i stanowi kluczowy element modelowania konstrukcji kolejowych. W pierwszym przybliżeniu opisuje go teoria Hertza opisująca elipsoidalny rozkład nacisków kontaktowych [8]. Zgodnie z teorią obszar kontaktu ma kształt elipsy, a rozkład nacisków jest maksymalny w jej centrum. Parametry kontaktu zależą od geometrii koła i szyny, obciążenia osiowego, właściwości materiałowych oraz prędkości jazdy. W warunkach HSR naciski kontaktowe

są wysokie, a obciążenia mają charakter cykliczny, co sprzyja powstawaniu zmęczenia kontaktowego. Analiza rozkładu naprężeń kontaktowych pozwala określić obszary najbardziej narażone na inicjację pęknięć zmęczeniowych. W szczególności dotyczy to pęknięć typu RCF występujących w warunkach intensywnej eksploatacji HSR [12], które rozwijają się w wyniku wielokrotnych cykli obciążenia i mogą prowadzić do poważnych uszkodzeń szyn.

Modelowanie zmęczenia kontaktowego RCF

Propagacja pęknięć zmęczeniowych w szynach może być opisywana równaniem Paris'a zgodnie z klasycznym ujęciem propagacji pęknięć zmęczeniowych [9]:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (3)$$

gdzie: a oznacza długość pęknięcia, N liczbę cykli obciążenia, ΔK zakres współczynnika intensywności naprężeń, C i m są stałymi materiałowymi.

Model ten umożliwia ilościową ocenę tempa rozwoju pęknięć oraz prognozowanie momentu osiągnięcia długości krytycznej. W systemach SHM integruje się go z modelami kontaktu oraz pomiarami dynamicznymi, co pozwala na ocenę pozostałego czasu bezpiecznej eksploatacji elementów infrastruktury. Takie podejście stanowi podstawę utrzymania predykcyjnego, w którym działania serwisowe planowane są na podstawie prognozowanego stanu konstrukcji, a nie jedynie harmonogramów czasowych.

Dynamika układu pojazd–tor

Interakcja pomiędzy pojazdem a torem ma kluczowe znaczenie dla trwałości infrastruktury oraz komfortu jazdy. W analizach dynamicznych stosuje się modele skupione opisujące interakcję pojazd–tor [4,10], gdzie wózek kolejowy i tor stanowią układ mas, sprężyn i tłumików. Odpowiedź

dynamiczną układu opisuje funkcja odpowiedzi częstotliwościowej (FRF). Charakterystyka FRF zawiera informacje o częstościach własnych układu oraz jego tłumieniu. Zmiany w położeniu pików rezonansowych mogą wskazywać na degradację elementów zawieszenia, wzrost luzów konstrukcyjnych lub lokalne zmiany sztywności toru. W kolejach dużych prędkości analiza FRF jest szczególnie istotna, ponieważ nawet niewielkie zmiany parametrów dynamicznych mogą prowadzić do wzrostu obciążeń dynamicznych i przyspieszonej degradacji infrastruktury.

Wpływ prędkości eksploatacyjnej na konstrukcję toru

Wraz ze wzrostem prędkości jazdy pociągów rośnie częstość wymuszeń dynamicznych oraz udział wysokich częstotliwości w widmie drgań. W kolei dużych prędkości prowadzi to do silniejszego pobudzania fal giętych o krótkich długościach, które są szczególnie wrażliwe na lokalne nieciągłości strukturalne. W praktyce obserwuje się przesunięcie maksimum amplitudy odpowiedzi dynamicznej w kierunku wyższych częstotliwości. Wymaga to stosowania czujników o wysokiej rozdzielczości oraz zaawansowanych metod analizy sygnałów. Jednocześnie wzrasta czułość systemów diagnostycznych na wczesne stadia uszkodzeń, co umożliwia ich szybszą identyfikację.

Integracja modeli w systemach monitorowania

Integracja modeli dynamicznych toru oraz układu pojazd–tor z systemami monitorowania stanu konstrukcji (SHM) stanowi istotny element współczesnych strategii utrzymania infrastruktury kolei dużych prędkości. Zastosowanie modeli belkowych toru na sprężystym podłożu, modeli kontaktu koło–szyna oraz modeli propagacji fal sprężystych umożliwia powiązanie sygnałów rejestrowanych przez czujniki drgań, tensometry

czy czujniki światłowodowe z rzeczywistymi parametrami fizycznymi konstrukcji. W efekcie dane pomiarowe nie są analizowane wyłącznie statystycznie, lecz interpretowane w odniesieniu do właściwości dynamicznych toru, takich jak sztywność podtorza, tłumienie czy lokalne zmiany warunków kontaktu.

W praktyce eksploatacyjnej pozwala to na wyznaczenie parametrów dynamicznych infrastruktury na podstawie zarejestrowanych odpowiedzi drganiowych oraz identyfikację odchyłań od stanu referencyjnego. Połączenie modeli mechanicznych z systemami SHM sprzyja przejściu od diagnostyki reaktywnej do utrzymania predykcyjnego. Integracja danych pomiarowych z modelami zmęczeniowymi, w tym opartymi na równaniu Parisa, umożliwia prognozowanie tempa propagacji pęknięć oraz określenie pozostałego czasu bezpiecznej eksploatacji elementów toru. Takie podejście zwiększa wiarygodność decyzji utrzymaniowych i ogranicza ryzyko nagłych uszkodzeń. W warunkach kolei dużych prędkości, gdzie oddziaływania dynamiczne w istotny sposób wpływają na trwałość infrastruktury, powiązanie modeli fizycznych z systemami SHM stanowi ważny element zapewnienia bezpieczeństwa oraz racjonalizacji kosztów eksploatacji.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono metody badań nieniszczących oraz systemy monitorowania stanu konstrukcji w zastosowaniu do kolei dużych prędkości. Zwrócono uwagę na połączenie klasycznego modelowania z nowoczesnymi technologiami pomiarowymi, które umożliwiają ocenę stanu infrastruktury w czasie rzeczywistym, bez konieczności wstrzymywania ruchu pociągów. Techniki NDT pozostają niezbędnym elementem utrzymania infrastruktury kolejowej, jednak w warunkach HSR ich stosowanie wyłącznie w trybie okresowych kontroli jest niewystarczające.

Z tego względu uzasadniony jest rozwój i wdrażanie ciągłych systemów SHM wspierających utrzymanie predykcyjne

Modelowanie konstrukcji kolejowych w kolejach dużych prędkości stanowi podstawę nowoczesnych metod projektowania, diagnostyki i utrzymania infrastruktury. Zastosowanie modeli dynamicznych, falowych i zmęczeniowych pozwala na kompleksową ocenę stanu toru oraz prognozowanie jego trwałości.

Integracja modeli fizycznych z systemami SHM umożliwia wczesne wykrywanie uszkodzeń, optymalizację strategii utrzymania oraz zwiększenie bezpieczeństwa eksploatacji. Wraz z dalszym rozwojem technologii pomiarowych i metod analizy danych modelowanie konstrukcji kolejowych będzie odgrywać coraz większą rolę w rozwoju kolei dużych prędkości. Oddzielny element analiz może stanowić wpływ prędkości na wzrost emisji drgań i hałasu toczenia, [7, 14].

Przedstawione w pracy zagadnienia pokazują, że połączenie klasycznych modeli mechaniki kontaktu i drgań z nowoczesnymi technologiami pomiarowymi stanowi skuteczne narzędzie oceny stanu infrastruktury kolei dużych prędkości. Rozwijane systemy SHM mają potencjał znaczącego zwiększenia poziomu bezpieczeństwa, niezawodności oraz efektywności ekonomicznej eksploatacji linii HSR, stanowiąc ważny kierunek dalszych badań i wdrożeń inżynierskich. Wdrażanie systemów SHM w infrastrukturze kolejowej w Polsce może stanowić istotny element modernizacji linii kolejowych dużych prędkości oraz poprawy efektywności utrzymania sieci kolejowej. ◀

Materiały źródłowe

- [1] Smith J.: Non-Destructive Testing in Railway Engineering. Springer, 2021
- [2] Zhou M., i in.: Real-time SHM systems for high-speed railways. „IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement”, 2020, t.

- 70
- [3] Doyle J.T.: Wave Propagation in Structures. Springer, 1997
- [4] Knothe K., Grassie S.L.: Modelling of railway track and vehicle/track interaction. „Wear”, 1996, nr 191, s. 274–282
- [5] Ritchie R.O.: Mechanics of fatigue crack propagation. „International Journal of Fracture”, 1979
- [6] Grassie S.L.: Railway Track Engineering. CRC Press, 2009
- [7] Remington P.J.: Wheel/Rail rolling noise: What do we know? „Journal of Sound and Vibration”, 1976, t. 46, nr 3, s. 359–370
- [8] Hertz H.: On the contact of elastic solids. „Journal für die reine und angewandte Mathematik”, 1882, t. 92, s. 156–171
- [9] Paris P., Erdogan F.: A critical analysis of crack propagation laws. „Journal of Basic Engineering”, 1963, t. 85, s. 528–533
- [10] Zhai W., Wang K.: Dynamic interaction between vehicle and track. „Vehicle System Dynamics”, 2004, t. 42, s. 1–26
- [11] Gao L., i in.: Structural health monitoring for high-speed railway infrastructure. „Sensors”, 2018, t. 18, nr 12, s. 1–25.
- [12] Sun Y., Liu Z.: Rolling contact fatigue in rails of high-speed railways. „Engineering Failure Analysis”, 2020, t. 115, art. 104642
- [13] UIC: High Speed Rail – Fast Track to Sustainable Mobility. International Union of Railways, Paris 2021
- [14] Thompson D.: Railway Noise and Vibration. Elsevier, 2008
- [15] Zhao Y, Liu Z, Yi D, Yu X, Sha X, Li L, Sun H, Zhan Z, Li WJ. A Review on Rail Defect Detection Systems Based on Wireless Sensors. Sensors (Basel). 2022 Aug 25;22(17):6409. doi: 10.3390/s22176409
- [16] Dyduch, Janusz. "Monitorowanie i eksploatacja rozjazdów kolei dużej prędkości". BUILDER 272, 3 (2020): 36-40