



## Współczynniki dynamiczne nawierzchni kolejowej w świetle eksperymentów i obserwacji

HENRYK BAŁUCH

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Inżynierii Lądowej i Geodezji,  
Katedra Inżynierii i Komunikacji, 00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

**Streszczenie.** W ostatnich dziesięcioleciach opublikowano wiele badań charakterystyk dynamicznych toru kolejowego. Istnieją też liczne narzędzia pomiarowe do ocen stanu toru. Artykuł przedstawia pomiary przyspieszeń na łożyskach osiowych (maźnicach), które mogą wykazać wady na główce szyny. Przyspieszenia te są również szczególnie przydatne do oceny sił działających na szyny. Analiza tych sił wykazała, że współczynnik dynamiczny toru różni się od modeli analitycznych. Krótkie wady na główkach szyn mogą powodować uszkodzenia przytwierdzeń, podkładów i podsypki.

**Słowa kluczowe:** tor kolejowy, współczynnik dynamiczny, wady

### 1. Wstęp

Klasyczna teoria nawierzchni kolejowej opiera się na założeniu, że wartość oddziaływań dynamicznych, a zatem naprężeń w szynach, podkładach i podsypce, wzrasta monotonicznie wraz ze wzrostem prędkości pojazdów szynowych. Funkcje opisujące ten wzrost, nazywane współczynnikami dynamicznymi, są dość zróżnicowane. Badania oddziaływań dynamicznych nowoczesnych lokomotyw na nawierzchnię wykazują, że wywierane przez nie siły są mniejsze niż obliczane z dotychczasowych modeli.

W tym samym czasie obserwuje się narastanie uszkodzeń kontaktowo-zmęczeniowych szyn oraz wpływ bardzo krótkich nierówności na powierzchni tocznej nie tylko na ich pęknięcie, lecz również na uszkodzenia złączy, podkładów i podsypki. Obserwacje te skłaniają do przesunięcia uwagi z oceny konstrukcji nawierzchni jako układu, którego degradacja jest powodowana zmniejszaniem charakterystyk geometrycznych szyn (momentu bezwładności, wskaźnika wytrzymałości) wskutek

postępującego zużycia, na zjawiska kontaktowo-zmęczeniowe, których rozwój jest trudniejszy do prognozowania.

## 2. Funkcje opisujące współczynniki dynamiczne

Częściej spotykanymi wzorami opisującymi współczynniki dynamiczne  $\Psi$  w funkcji prędkości  $V$  [km/h] są wzory empiryczne:

$$\Psi = (1 + 0,12V)^{\frac{2}{3}} \quad (\text{Shakhunyants}) \quad (1)$$

$$\Psi = 1 + \frac{V^2}{30000} \quad (2)$$

$$\Psi = 1 + \frac{V - 60}{140} \quad (\text{Eisenmann}) \quad (3)$$

$$\Psi = 1 + 1,5 \cdot 10^{-5} \left( 3V^2 - \frac{V^3}{100} \right) \quad (\text{Schramm}) \quad (4)$$

Funkcje opisane tymi wzorami przedstawia rysunek 1.

W monografii [4] zaproponowano wzór

$$\Psi = 1 + 5 \cdot 10^{-4}V + 4 \cdot 10^{-5}V^2 - 1,3 \cdot 10^{-7}V^3, \quad (5)$$

który na odcinku  $AB$  (rys. 1), tj. w przedziale prędkości 120-200 km/h, opisuje krzywa 5. Wartości obliczone wg wzorów (4) i (5) wyraźnie odbiegają od pozostałych, które — jak to wykażą pomiary scharakteryzowane w punkcie 3 — dają wyniki zdecydowanie zawyżone.

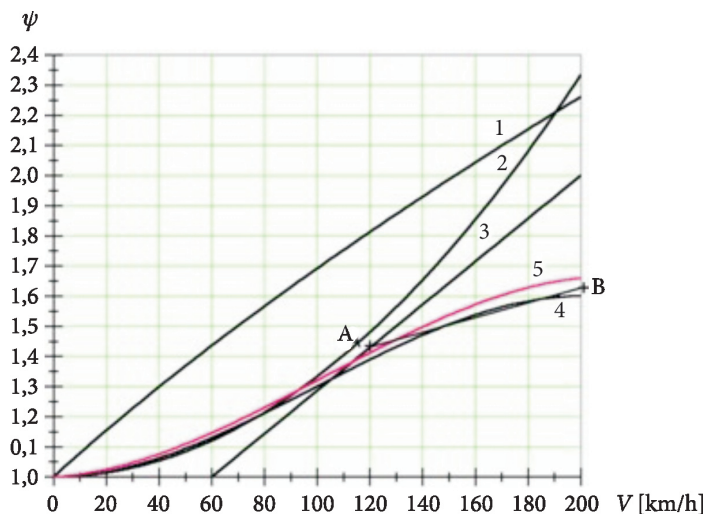
Oprócz funkcji ciągłych określających współczynniki dynamiczne, znane są ich wartości dyskretne. I tak np. w pracy [7] podano następujące wartości tych współczynników:

- dla  $V = 120$  km/h —  $\psi = 1,45$ ,
- dla  $V = 250$  km/h —  $\psi = 1,75$ ,
- dla  $V = 350$  km/h —  $\psi = 2,00$ .

W badaniach oddziaływań dynamicznych pociągu z wagonami o nacisku osi 200 kN na nawierzchnię typu 60E1, na podkładach betonowych B70 z przytwierdzeniem Skl, uzyskano momenty zginające w szynach przy prędkości 40 km/h równe 25,28 kNm i przy prędkości 180 km/h równe 36,57 kNm [10], a więc wzrost o 45%.

Wartość współczynnika dynamicznego zależy w znacznym stopniu od stanu nawierzchni [3, 6] oraz rodzaju i stanu pojazdów szynowych. Te dwie ostatnie

cechy, które charakteryzują nowoczesne lokomotywy elektryczne o dużej mocy, nabrały największego znaczenia.

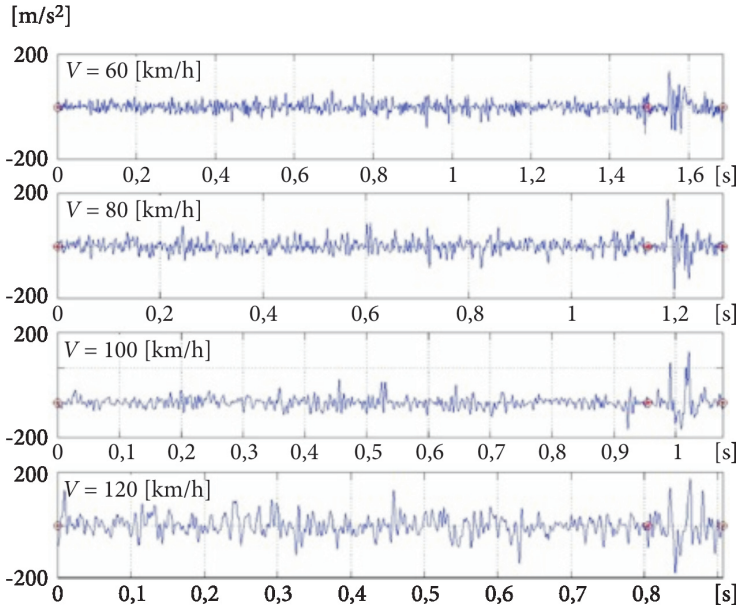


Rys. 1. Wykresy funkcji określonych wzorami (1-5)

### 3. Pomiary przyspieszeń

Pomiary przyspieszeń mas nieusprężynowanych pojazdów szynowych, tj. pomiary wykonywane na łożyskach osiowych (maźnicach), umożliwiają wykrycie krótkich nierówności toków szynowych, szczególnie zaś nierówności na powierzchni tocznej szyn. Pomiary te wykonywane w ramach pracy [8] miały na celu wyjaśnienie, jaki wpływ na oddziaływania dynamiczne wywierają nieciągłości toków szynowych w krzyżownicach rozjazdów zwyczajnych, ułożonych na podsypce z matami. Oprócz pomiarów przyspieszeń na maźnicach wykonywano podczas tych badań pomiary przyspieszeń mas odsprężynowanych, tj. nadwozi oraz sił pionowych i poprzecznych przekazywanych przez koła na szyny rozjazdu. Na rysunku 2 przedstawiono jeden spośród kilkudziesięciu oscylogramów pomierzonych przyspieszeń przy prędkościach 60-120 km/h. Miejsce ułożenia krzyżownicy jest oznaczone dwoma punktami z prawej strony wykresu. Wartość tych przyspieszeń jest w tym miejscu wyraźnie większa niż na pozostałej części rozjazdu.

Interesujące badania przy zastosowaniu przyspieszeń mas nieusprężynowanych wykonano na kolejach japońskich [11, 12], wykazując, że między przyspieszeniami pomierzonymi na maźnicach wagonów a siłami pionowymi występuje zależność korelacyjna przy współczynnikach korelacji około 0,8.



Rys. 2. Pomiar przyspieszeń masy nieusprężynowanej na rozjeździe typu 60E1-300-1:9 (częstotliwość odcięcia 200 Hz przy stosowaniu filtra dolnoprzepustowego, na osi odciętych czas przejazdu)

Wzór empiryczny opracowany na podstawie tych eksperymentów ma postać:

$$P = \kappa_1 P_0 + \kappa_2 ma, \quad (6)$$

gdzie:  $P$  — nacisk dynamiczny koła;

$P_0$  — nacisk statyczny koła;

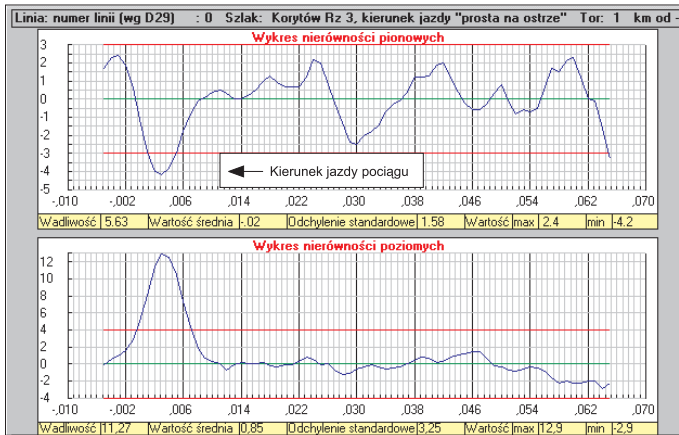
$m$  — masa koła;

$a$  — przyspieszenie;

$\kappa_1, \kappa_2$  — współczynniki ( $\kappa_1 = 1,2, \kappa_2 = 0,6-0,7$ ).

Do przyjmowania wyników badań prowadzonych w innych warunkach, mimo że są wykonywane przez renomowane placówki naukowe, należy podchodzić z ostrożnością i weryfikować je na podstawie własnych pomiarów. Do tego celu wykorzystano wyniki pomiarów wykonanych na Centralnej Magistrali Kolejowej<sup>1</sup>. Obejmowały one przyspieszenia na maźnicy nowoczesnej lokomotywy elektrycznej w czasie jazd doświadczalnych po torach i rozjazdach. Pomiarami tymi objęto m.in. rozjazd, którego stan geometryczny przedstawia rysunek 3. W zwrotnicy tego

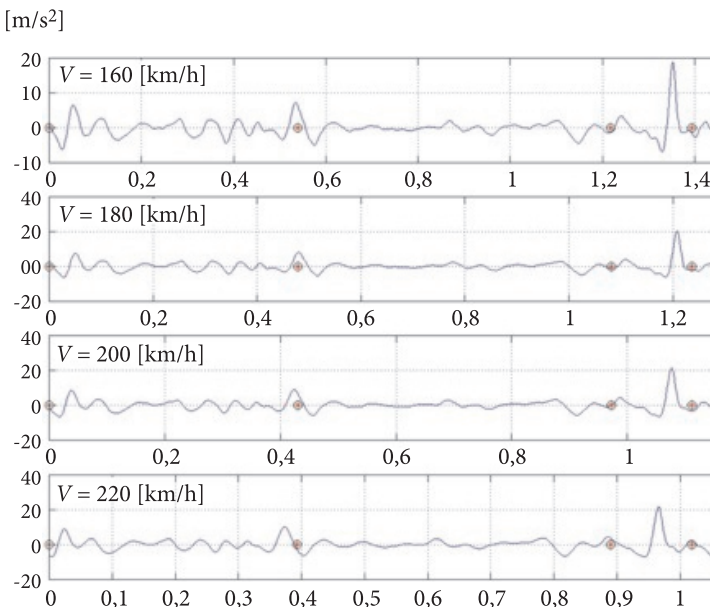
<sup>1</sup> Pomiaru te wykonało Laboratorium Dynamiki Instytutu Kolejnictwa. Autor artykułu uczestniczył w ich analizach.



Rys. 3. Nierówności pionowe i poziome [mm] na rozjeździe typu 60E1-1200-1:18,5 (pomiar od strony styku przedgłowego, tj. od strony lewej)

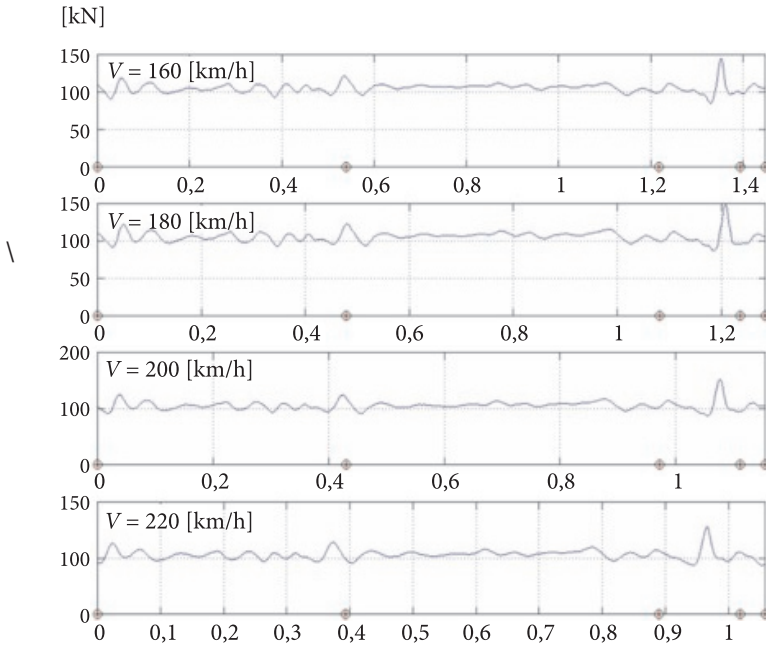
rozjazdu występuje wyraźna nierówność pionowa i pozioma, przy czym ta druga jest zobrazowaniem celowego wygięcia opornicy.

Skutek nierówności pionowej jest widoczny w pomiarach przyspieszeń, które w tej strefie, w całym przedziale prędkości, niewiele się różnią i które można oszacować na ok.  $6 \text{ m/s}^2$  (rys. 4).



Rys. 4. Przyspieszenia na maźnicy lokomotywy, na rozjeździe typu 60E1-1200-1:18,5; filtr dolno-przepustowy 40 Hz, strefę zwrotnicy wyznaczają dwa punkty z lewej, krzyżownicę — trzy punkty z prawej, na osi odciętych czas przejazdu przez rozjazd [s]

W tej samej strefie rozjazdu zauważalne są większe siły pionowe<sup>2</sup>, których wartość na podstawie wykresów we wszystkich przedziałach prędkości można określić jako 120 kN (rys. 5).



Rys. 5. Siły pionowe na rozjeździe, na którym pomierzono przyspieszenia pokazane na rysunku 4, na osi odczytanych czas przejazdu [s]

Podstawiając wartość przyspieszenia  $6 \text{ m/s}^2$  do wzoru (6), przyjmując współczynnik  $\kappa_2 = 0,60$ , nacisk statyczny koła lokomotywy  $106 \text{ kN}$  i jego ciężar  $10 \text{ kN}$ , otrzymujemy:

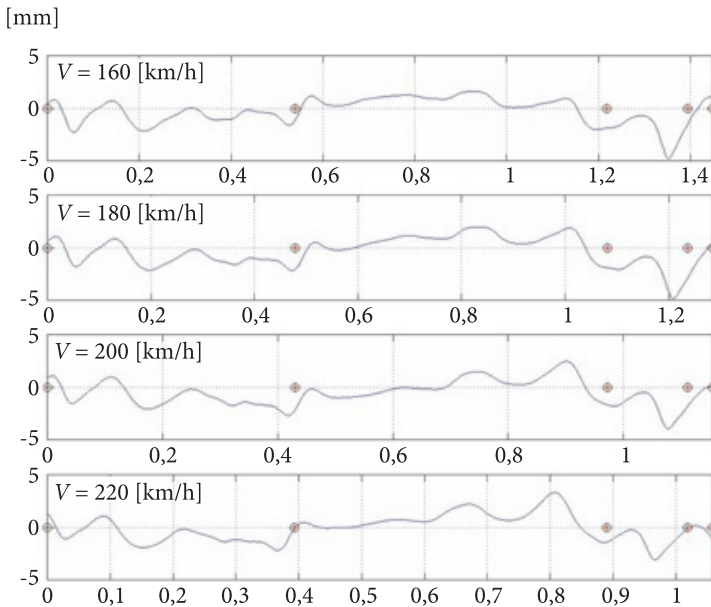
$$P = 1,2 \cdot 106 + \frac{0,60 \cdot 10 \cdot 6}{9,81} = 131 \text{ kN.}$$

Przyspieszenie w krzyżownicy tego rozjazdu, w miejscu przetaczania się koła z szyny skrzydłowej na dziób, wynosi ok.  $21 \text{ m/s}^2$ . Wstawiając tę wartość do wzoru (6), przy pozostałych parametrach bez zmian, otrzymuje się siłę  $140 \text{ kN}$ . Na podstawie wykresów siłę tę można oszacować na  $150 \text{ kN}$ , a więc również i w tym przypadku istnieje duża zbieżność wyników obliczeń z wynikami japońskimi.

<sup>2</sup> Siły te były obliczane na podstawie podwójnego całkowania sygnału przyspieszeń z uwzględnieniem pomierzonych przemieszczeń między nadwoziem i maźnicą.

Z rysunku 5 wynika, że w całym przedziale badanych prędkości różnice między siłami są niezauważalne. To samo można stwierdzić na oscylogramach pozostałych badanych rozjazdów. Wyjaśnienie tego zjawiska, nieodpowiadającego przytoczonym funkcjom opisującym współczynniki dynamiczne, znajdujemy w pomiarach przemieszczeń nadwozia lokomotywy względem maźnicy, które można też zinterpretować jako pionowy ruch nadwozia względem toru.

Trajektoria tego ruchu (rys. 6) przy jeździe z szyny skrzydłowej na dziób krzyżownicy obniża się przy prędkościach 160 i 180 km/h o 5 mm, przy prędkości 200 km/h o 4 mm i przy 220 km/h tylko o 3 mm. To zmniejszenie wartości obniżania się przy większych prędkościach wynika stąd, że skraca się czas opadania nadwozia.



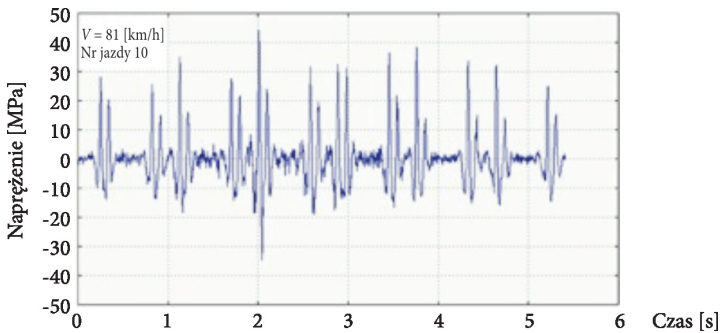
Rys. 6. Trajektoria przemieszczeń nadwozia lokomotywy względem maźnicy, na osi odciętych czas przejazdu [s]

Scharakteryzowane pomiary wyjaśniają więc pozorne anomalie, za które uważa się fakt, że niekiedy przy większych prędkościach pociągów oddziaływania dynamiczne maleją, a nie rosną. Brak wyraźnego wzrostu sił pionowych uzasadniają też w konkretnym przypadku wykonane pomiary naprężeń rozciągających w szynach przy zginaniu, które w całym przedziale badanych prędkości, pod oddziaływaniem tej samej lokomotywy, wahały się w przedziale 40-50 MPa.

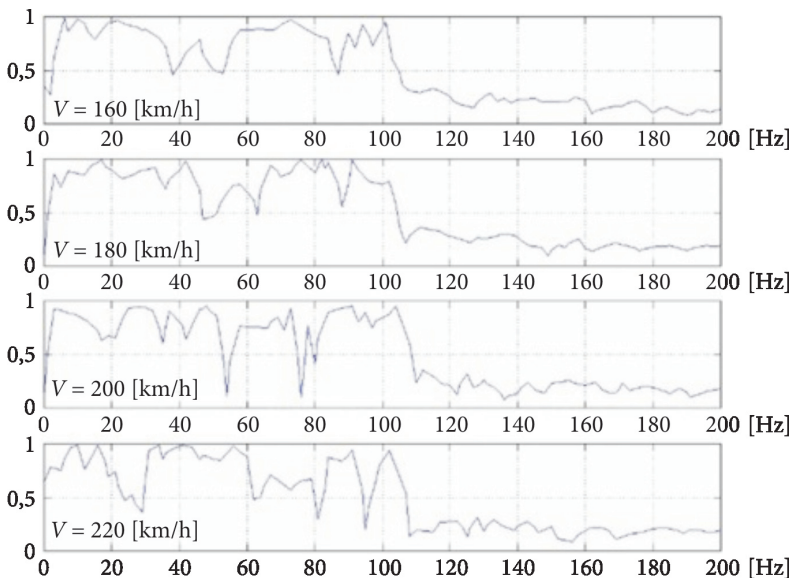
Analizując wykresy tego typu jak na rysunku 5, można stwierdzić, że na długości szyn łączących, tj. w środkowej części rozjazdów, oddziaływania dynamiczne są znacznie mniejsze. Podobne wartości sił występują w normalnym torze. Obliczone

na tej podstawie współczynniki dynamiczne, dla konkretnej lokomotywy, są dużo mniejsze niż te, które przedstawia rysunek 1 i tylko oddziaływania w strefie krzyżownicy osiągają wartość odpowiadającą współczynnikowi dynamicznemu 1,5.

Wyniki te odnoszą się do konkretnej nowoczesnej lokomotywy, znajdującej się w bardzo dobrym stanie. Nie można zatem uogólniać ich na wszystkie pojazdy szynowe, a zwłaszcza te, które znajdują się w złym stanie. Świadczy o tym rysunek 7, przedstawiający pomiar naprężeń pod pociągiem doświadczalnym złożonym z wagonów o jednakowej konstrukcji, lecz o różnym stanie utrzymania. Pierwszy zestaw kołowy trzeciego wagonu powoduje tu naprężenia o 40-50% większe od pozostałych.



Rys. 7. Zróżnicowane wartości naprężeń w szynach pod pociągiem doświadczalnym, złożonym z wagonów o różnym stanie utrzymania



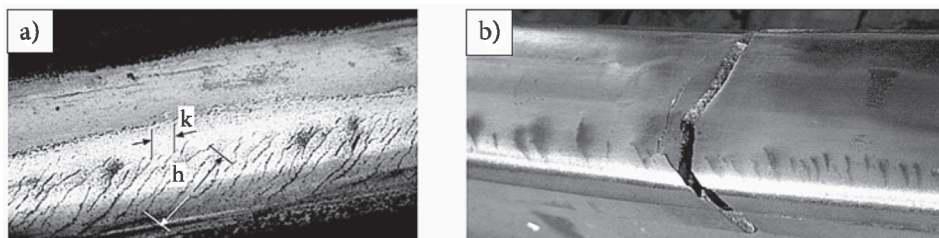
Rys. 8. Funkcja koherencji między przyspieszeniem, którego dotyczą wykresy na rysunkach 4 i 5, a siłą pionową na rozjeździe



Ostrożność należy zachować korzystając z wzorów empirycznych, na podstawie których, mając tylko stosunkowo łatwo mierzalne przyspieszenia, można obliczać siły pionowe. Wynika to stąd, że funkcja koherencji między tymi wielkościami, nawet w przedziale o częstotliwości 0-40 Hz, w którym zbliża się do 1, wykazuje duże wahania (rys. 8).

#### 4. Współczynniki dynamiczne a obserwacje eksploatacyjne

Na podstawie przedstawionych wyników można by wyciągnąć wniosek, że wprowadzanie nowoczesnych pojazdów szynowych, które wywierają mniejsze naciski dynamiczne, ułatwi utrzymanie nawierzchni kolejowej przy zwiększonych i dużych prędkościach pociągów. Obserwacje eksploatacyjne na liniach kolejowych wielu krajów, w tym mających wysoki poziom techniki kolejowej, dostarczają jednak dowodów na szybki rozwój uszkodzeń kontaktowo-zmęczeniowych szyn. Uszkodzenia tego typu są obserwowane również coraz częściej w Polsce. Oprócz znanego od wielu dziesięcioleci falistego zużycia szyn [1], na zaokrągleniu główek szyn tworzą się rysy (*head checks*), które nieusunięte w porę mogą doprowadzić do pęknięcia szyny (rys. 9). O zagrożeniach wynikających z istnienia rys świadczy m.in. katastrofa pociągu pod Hadfield w październiku 2000 roku. Pociąg ten wykołcił się przy prędkości 185 km/h na szynie mającej rysy, która rozpadła się na kilkaset części [9]. Obecnie jedynym sposobem usuwania rys jest szlifowanie szyn [1].

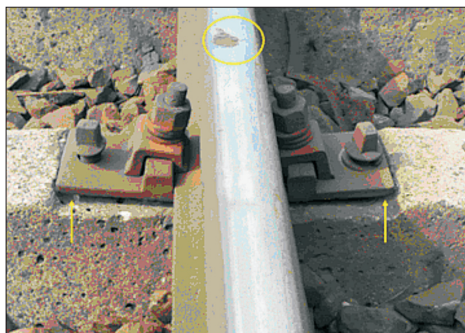


Rys. 9. Rysy na powierzchni główki szyny (a) oraz spowodowane nimi pęknięcie (b)

Degradację nawierzchni kolejowej przyspieszają również krótkie nierówności na powierzchni szyny powodujące uszkodzenia przytwierdzeń, podkładów oraz podsypki [2].

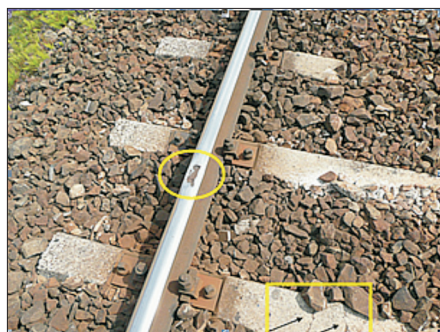
Dowodem wpływu krótkiej wady na powierzchni tocznej szyny na przytwierdzenia jest rysunek 10. W przytwierdzeniu tym nie ma już przekładki pod podkładką stalową, podkładka zagłębia się w beton, wskutek czego została trwale wygięta i spowodowała poderwanie wkrętów, pod którymi wcześniej pękły pierścienie sprężyste. Wymiana tej podkładki, nawet po usunięciu wady na powierzchni tocznej szyny, może się okazać mało skuteczna z dwóch powodów:

- powstałego na powierzchni podkładu wgłębienia,
- częściowego naderwania gwintu w dyblach przez wyrywane wkręty.



Rys. 10. Uszkodzenie przytwierdzenia szyny do podkładu betonowego w strefie wady na powierzchni toczonej szyny

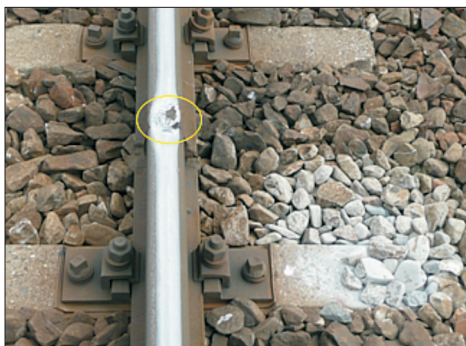
Dowodem wpływu krótkich wad na stan podkładów jest rysunek 11. Podkład ten nie zagraża bezpieczeństwu jazdy, jednak w miarę narastania obciążenia widoczne na nim rysy przekształcą się w pęknięcia z wykruszeniami betonu, powodując obnażenie zbrojenia, co zmniejszy jego trwałość. Usunięcie wady powierzchniowej mogłoby jednak w tym przypadku znacznie spowolnić postęp degradacji.



Rys. 11. Pęknięcia podkładu (oznaczone strzałkami) w strefie powierzchniowej wady szyny

Wpływ innej wady powierzchniowej (zwanej *squat*) na podsypkę znajdującą się pod najbliższym podkładem przedstawiono na rysunku 12. Wada ta powstała wskutek uplastycznienia końców szyn zespawanych termitowo. Zwiększone oddziaływania dynamiczne doprowadziły tu do tzw. podkładu wiszącego i wytrysków wody zalegającej w pustej przestrzeni między podstawą podkładu a podsypką.

Podkłady wiszące powstają wskutek dużych nacisków powodujących miejscowe zagęszczenie podsypki. Sztywność szyn powoduje jednak, że po ustaniu obciążenia



Rys. 12. Wytrysk pod podkładem znajdującym się w pobliżu wady *squat* na spoinie termitowej

unoszą się one wraz z szyną o kilka milimetrów, a pustą przestrzeń między podstawą podkładu a górną zagęszczoną warstwą podsypki wypełnia woda, która następnie pod każdym zestawem kołowym jest wypychana na zewnątrz. Nawodnienie podsypki zmniejsza jej odporność na odkształcenia, co powoduje stopniowe zwiększanie się strefy wytrysków.

Na wykresach przyspieszeń pionowych mierzonych na maźnicach pojazdów szynowych każda z takich wad powierzchniowych szyn jest sygnalizowana wyraźnym impulsem. Ułatwia to zarejestrowanie miejsc, w których wady te się znajdują. Określenie ich rodzaju i głębokości, a więc danych, na podstawie których można ustalić sposób naprawy (szlifowanie, napawanie ze szlifowaniem, lub konieczność wymiany szyny), wymaga jednak diagnostyki wizualnej. Podejmowane są próby zastosowania do tego celu rejestracji obrazów wad przez szybkie kamery umieszczone na pojazdach pomiarowych, a następnie identyfikacji tych obrazów przy zastosowaniu sztucznych sieci neuronowych.

## 5. Podsumowanie

Zalety pomiarów przyspieszeń uzasadniają celowość ich wykonywania również na maźnicach drezyn pomiarowych, jako uzupełnienia wykonywanych przez nie pomiarów geometrycznych. Rozbudowa pod tym kątem urządzeń pomiarowych drezyn, wraz z instalacją szybkich kamer, jest stosunkowo łatwa i mało kosztowna. Umożliwiłoby to rejestrację krótkich wad na powierzchni tocznej szyn, które obecnie stają się jedną z groźniejszych postaci degradacji nawierzchni kolejowej. Wykazanie stosunkowo dużej zależności między przyspieszeniami i siłami działającymi na szyny wzbogaciłoby też standardową diagnostykę nawierzchni o cechy dynamiczne, tzn. o rejestrację sił pionowych.

Artykuł wpłynął do redakcji 9.06.2010 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w lutym 2011 r.

#### LITERATURA

- [1] H. BAŁUCH, *Planowanie szlifowania szyn w torach kolejowych*, Biul. WAT, 1, 2008.
- [2] H. BAŁUCH, *Wady na powierzchni szyn — geneza i możliwości usuwania techniką spawalniczą*, IV Ogólnopolska Konferencja „Spawalnictwo dróg szynowych — jakość, niezawodność, bezpieczeństwo”, Bochnia, maj 2010.
- [3] M. BAŁUCH, *A vasuti felipitmeny dinamicus tenyezozenek alakja (Rozszerzona postać współczynnika dynamicznego nawierzchni)*, VI Konferencja Naukowa SZIME, Győr, 1991,
- [4] M. BAŁUCH, *Interpretacja pomiarów i obserwacji nawierzchni kolejowej*, Monografie nr 789, Wydawnictwo Politechniki Radomskiej, 2005.
- [6] J. EISENMANN, *Zuverlässigkeit des Oberbaues als Voraussetzung für hohe Betriebsqualität*, Eisenbahn Technische Rundschau, 1989, nr 7-8.
- [7] A. HETTLER, *Bleibende Setzungen des Schotteroberbaues*, Eisenbahn Technische Rundschau, 11, 1984.
- [8] *Eksploatacyjne metody zwiększania trwałości rozjazdów kolejowych*, praca CNTK finansowana ze środków na naukę w latach 2006-2009 jako projekt badawczy nr N509 00131/0045, wykonana pod kierunkiem Marii Bałuch.
- [9] *Hadfield derailment investigation*, Interim recommendations of the Investigation Board, Office of Rail Regulation, August 2002.
- [10] J. SADEGHI, F. HASHEMI, *Influences of rail support condition on mechanical behaviour of railway track system*, Transaction of the CSME, 32, 3-4, 2008.
- [11] Y. SUNAGA, I. SANO, T. IDE, *A method to control short wave track irregularities utilizing axlebox acceleration*, Quarterly Report of RTRI, 4, 1997.
- [12] H. TANAKA, A. FURUKAWA, *Management method for large wheel loads and lateral forces using axle-box acceleration and track irregularity*, Quarterly Report of RTRI, 2, 2009.

## H. BAŁUCH

### **Dynamic coefficient of railway track in the light of experiments and observations**

**Abstract.** A number of investigations of the dynamic characteristics of modern railway track have been found in the past decades. There are also a number of measuring tools for rail track assessment. This paper describes axle-box accelerations, which can detect short defects on the rail head. These accelerations are also particularly valuable to evaluate the vertical forces acting on the rails. The analysis of these forces has shown that dynamic coefficient of railway track varies from analytical models. The short defects on rail head can cause damage of the fastening, sleepers and ballast.

**Keywords:** railway track, dynamic coefficient, defects