

Ocena możliwości wyznaczenia sił podłużnych w szynach za pomocą bezpośrednich oddziaływań mechanicznych

W pracy [1] wskazano podstawowe kierunki badań toru bezстыkowego, sugerując konieczność opracowania metody wyznaczania sił podłużnych w szynach przy użyciu podbijarki. Wyniki wstępnych badań tego problemu przedstawia praca [5]. W pracach [6, 7] obszernie omówiono metody wyznaczania sił podłużnych w szynach. Z tych ostatnich prac wynika, że – na obecnym etapie badań – nie istnieje metoda, która nadawałaby się do powszechnego wykorzystania w bieżącej diagnostyce nawierzchni kolejowej (por. także [3]).

W artykule – na podstawie analizy modelowej – podjęto się uporządkowania wiedzy na ten temat oraz wskazano podstawowe trudności w praktycznym zastosowaniu metod bezpośredniego oddziaływania na tor w celu wyznaczenia stanu sił podłużnych w szynach toru bezстыkowego.

Reakcja szyny poddanej wymuszeniu harmonicznemu

Rozważmy model nawierzchni kolejowej jako belkę na ciągłym podłożu sprężysto-lepkim, z występowaniem siły podłużnej. Niech w punkcie $x = 0$ działa wymuszenie harmoniczne. Równanie różniczkowe układu ma postać:

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + N \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + f \frac{\partial y}{\partial t} + U_y = 0 \quad (1)$$

w wszystkich punktach, z wyjątkiem $x = 0$, gdzie działa siła skupiona:

$$P(t) = P_0 \sin \omega \cdot t \quad (2)$$

gdzie:

y – przemieszczenie pionowe lub poziome osi szyny [μm],

t – czas [s],

EI – sztywność zginania ramy torowej w odpowiedniej płaszczyźnie [kNm^2],

N – siła podłużna w szynie (znak + oznacza siłę ściskającą) [kN],

m – jednostkowa masa nawierzchni [kNs^2/m^2],

f – jednostkowy współczynnik tłumienia nawierzchni [kNs/m^2],

U – jednostkowy współczynnik sprężystości podłoża szyny [kN/m^2],

P_0 – amplituda siły wymuszającej drgania szyny [kN],

ω – częstość kołowa wymuszenia [rad/s].

Uproszczone – w stosunku do (1) – równanie różniczkowe (bez tłumienia i siły podłużnej, w naszym przypadku zatem nieprzydatne) rozpatrywał Huber [4], podając rozwiązanie analityczne. Rozpatrywany problem stanowi zatem istotne uogólnienie i – co pokażemy – nie da się go rozwiązać w postaci zamkniętej.

Założmy, że dodatnim wartościom x odpowiada rozwiązanie w postaci:

$$y = C_1 e^{-\beta x} \sin(\omega t - kx) + C_2 e^{-\beta x} \cos(\omega t - kx) \quad (3)$$

gdzie:

C_1, C_2 – stałe całkowania,

β – współczynnik zanikania drgań [1/m],

k – liczba falowa [rad/m],

a rozwiązanie jest symetryczne względem punktu $x = 0$.

Równanie postaci (3) zapewnia zanikanie drgań w nieskończoności i jest stosunkowo prostym, czytelnym rozwiązaniem problemu, przedstawionym w ujęciu falowym.

Stale całkowania wyznaczmy z warunku, określającego wyrażenie na siłę poprzeczną w punkcie dowolnie bliskim przekrojowi $x = 0$, czyli:

$$\forall t \in [0, \infty); \text{ gdy } x \rightarrow 0; EI \frac{\partial^3 y}{\partial x^3} = 0,5P(t) \quad (4)$$

Przyjmując oznaczenia:

$$A = 3\beta k^2 - \beta^3; B = 3\beta^2 k - k^3 \quad (5)$$

po zróżniczkowaniu równania (3), warunek (4) przyjmie postać:

$$\forall t \in [0, \infty); EI(C_1 A + C_2 B) \cdot \sin \omega t + EI(-C_1 B + C_2 A) \cdot \cos \omega t = 0,5P_0 \sin \omega t$$

co prowadzi do układu równań na stałe całkowania C_1 oraz C_2 :

$$\begin{aligned} C_1 A + C_2 B &= 0,5P_0/EI \\ -C_1 B + C_2 A &= 0 \end{aligned}$$

Zatem stałe całkowania mają postać:

$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{A \cdot P_0}{2EI(A^2 + B^2)} \\ C_2 &= \frac{B \cdot P_0}{2EI(A^2 + B^2)} \end{aligned} \quad (6)$$

gdzie:

A, B – według oznaczeń (5).

Zauważmy, że:

- stałe C_1 oraz C_2 określone są za pomocą parametrów modelu (EI) oraz nieznanymi na razie wielkości β , k ;
- nie ma żadnych ograniczeń na te stałe, bowiem warunek jednoczesnego zerowania się liczb A i B prowadzi do sprzeczności – por. oznaczenia (4).

Obliczając odpowiednie pochodne z wyrażenia (3) oraz wstawiając do równania (1), otrzymujemy układ równań na niewiadome β , k , wykorzystując warunek spełnienia równania przez dowolne dodatnie wartości x oraz t .

Układ ten jest następujący:

$$EI[C_1(\beta^4 + k^4 - 6\beta^2k^2) + 4C_2(\beta k^3 - \beta^3k)] + N[C_1(\beta^2 - k^2) - 2\beta k C_2] - C_1 m \omega^2 - C_2 f \omega + C_1 U = 0$$

$$EI[4C_1(\beta^3k - \beta k^3) + C_2(\beta^4 + k^4 - 6\beta^2k^2)] + N[C_2(\beta^2 - k^2) + 2\beta k C_1] - C_2 m \omega^2 + C_1 f \omega + C_2 U = 0$$

gdzie C_1 , C_2 wyznaczają równania (6) z oznaczeniami (5).

Podany układ równań jest silnie nieliniowy i musi być rozwiązywany numerycznie. Rozważmy zatem przykład drgań pionowych toru, określając parametry modelu, przypadające na jedną szynę, przyjmując że obciążenie obu szyn jest jed-

nakowe. Niech parametry modelu nawierzchni i obciążenia są następujące:

- szyna: UIC-60,
- sztywność podłoża: $U = 60\,000$ oraz $80\,000$ kN/m²,
- masa nawierzchni: $m = 0,25$ kNs²/m² [2],
- współczynnik tłumienia: $f = 103$ kNs/m² [2],
- siła wymuszająca drgania: $P_0 = 10$ kN/szyne; częstość $\omega = 2\pi 30$ rad/s,
- siła podłużna w szynie: ekwiwalent przyrostu temperatury od -20°C do $+100^\circ\text{C}$.

Podstawowe obliczenia przeprowadzono dla przypadku, gdy $U = 60\,000$ kN/m². Wyniki pokazano na rysunkach 1 i 2.

Z zaprezentowanych wyników badań oraz dodatkowych analiz wynikają następujące spostrzeżenia.

1. W całym badanym zakresie zmienności ekwiwalentnego przyrostu temperatury szyny współczynnik zanikania drgań β jest prawie liniową funkcją przyrostu temperatury i wykazuje bardzo słabą wrażliwość na zmianę siły podłużnej. Średnia wrażliwość wynosi około $0,00274$ [1/m] na każde 10°C , co stanowi $0,25\%/10^\circ\text{C}$. Podobnie małą wrażliwość na zmiany siły podłużnej wykazuje liczba falowa k , co wyrażają liczby: $0,00322$ [rad/m] na każde 10°C , co stanowi $0,24\%/10^\circ\text{C}$.

2. Największe amplitudy drgań (w punkcie $x = 0$) zmieniają się niewiele wraz ze zmianą ekwiwalentnego przyrostu temperatury. Zależność ta jest prawie liniowa lub nieliniowa (w punktach o innych odciętych). W źródle drgań wrażliwość amplitudy na temperaturę wyraża się liczbą $0,208$ mm na każde 10°C (wrażliwość amplitudy przyspieszeń drgań – $0,00735$ m/s² na 10°C).

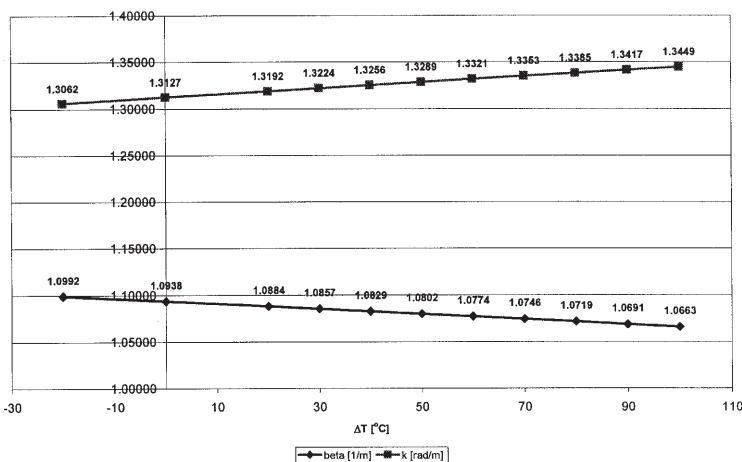
3. Dodatkowe obliczenia i analizy pokazały, że przykładowo wrażliwość fazy drgań na zmianę temperatury wynosi zaledwie $0,0407$ ms na każde 10°C , a zmiana współczynnika sprężystości podłoża z $60\,000$ kN/m² na $80\,000$ kN/m² powoduje zmianę amplitudy drgań aż o około 20%. Wynika stąd, że aby praktycznie wykorzystać metodę kontrolowanej odpowiedzi toru do wyznaczenia siły podłużnej w szynie wymaga nie tyle superprecyzyjnej aparatury pomiarowej, ile zakłócenia w „czystej”, modelowej odpowiedzi, wynikające przede wszystkim z nieliniowości i niejednorodności nawierzchni spowodują, że analizowana metoda dynamiczna w zastosowaniu do wyznaczania sił podłużnych nie będzie prawdopodobnie możliwa do praktycznego wdrożenia.

Stacyjne przemieszczenia toru, np. z wykorzystaniem podbijarki

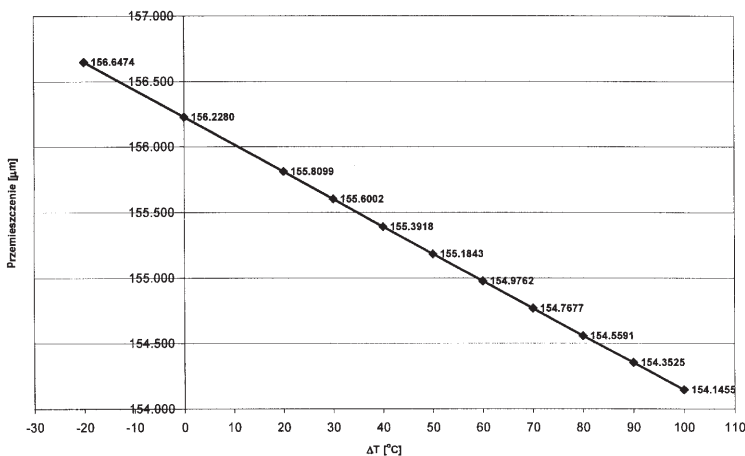
Rozważmy teraz przypadek, w którym tor kolejowy jest wyginany bądź prostowany z użyciem siły zewnętrznej, przykładowej powoli (quasistatycznie). Do analizy tego zagadnienia zastosujemy metodę energetyczną, badając bilans pracy sił zewnętrznych i energii wewnętrznej układu. Przyjmijmy, że wygięta pierwotnie (przed prostowaniem) lub odkształcona powstać osi toru na długości $2l$ opisana jest równaniem:

$$y(x) = \frac{\delta}{2} \cdot \left(1 + \cos \frac{\pi x}{l}\right) \quad (7)$$

gdzie δ – największa wartość odkształconej osi toru.



Rys. 1. Zależność współczynnika zanikania drgań β oraz liczby falowej k od ekwiwalentnego przyrostu temperatury ΔT



Rys. 2. Wpływ ekwiwalentnego przyrostu temperatury ΔT na amplitudę drgań szyny w punkcie $x = 0$ (źródło drgań)

Przyjmijmy, że równanie (7) opisuje odkształconą postać osi toru w płaszczyźnie poziomej lub pionowej, a także odkształconą oś jednej – podnoszonej przez podbijkarkę – szyny, w której – na odcinku o długości $2l$ – zwolniono przytwierdzenia. Niech w środku odkształconego odcinka, tzn. w punkcie $x = 0$, działa siła S (rys. 3).

Uwzględniając – w uproszczony sposób – wpływ nacisków kół podbijkarki na przebieg zjawiska, w przypadku działania siły rozciągającej w szynach, bilans energetyczny przy podnoszeniu szyny lub przesuwaniu toru w płaszczyźnie poziomej ma postać:

$$P_S = L_q - L_{zg} - \Delta L \quad (8)$$

gdzie:

$P_S = S \cdot \delta$ – praca siły S na przemieszczeniu δ ;

$\Delta L = EA/\eta (2\varepsilon \alpha \Delta T + \varepsilon^2)$ – wzrost energii rozciągania wskutek wydłużenia osi szyny lub toru ($\eta > 1$ – współczynnik określający wpływ odcinków przyległych, ε – odkształcenie osi toru lub szyny, spowodowane wygięciem według funkcji (7));

$L_q = q/\delta$ – praca potrzebna na podniesienie toru o masie q lub pokonanie oporów poprzecznych podsypki o stałej wartości q ;

$L_{zg} = \frac{EI\delta^2\pi^4}{8\beta^3}$ – energia zginania toru lub szyny (EI – sztywność zginania w odpowiedniej płaszczyźnie).

Rozpatrzymy teraz następujące przykłady:

- podnoszenie pojedynczej szyny,
- przesuwanie poprzeczne toru.

Przyjmijmy następujące parametry nawierzchni i obciążenia:

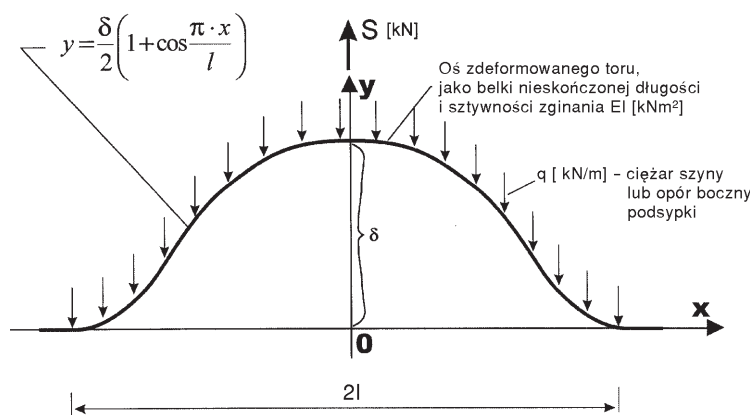
- szyny: UIC-60 (w przypadku przesuwania w płaszczyźnie poziomej przyjmijmy poczwórną i podwójną wartość sztywności zginania obu szyn [3]);
- długość odkształconego odcinka: $2l = 15$ m;
- współczynnik $\eta = 2$ oraz $1,3$ (nieco arbitralnie, ale na podstawie rozważań opisanych w [4]);
- wartość $q = 0,6$ kN/m (podnoszona jedna szyna) oraz $q = 9,5$ oraz 10 kN/m (opór poprzeczny podsypki);
- obciążenie: S – wyznaczone, ekwiwalentny przyrost temperatury: 10 – 30°C ;
- maksymalne przemieszczenie $\delta = 20$ mm.

Przyjmując te parametry będziemy badać zależność siły S od ekwiwalentnego przyrostu temperatury ΔT . Wyniki pokazano na rysunkach 4 i 5.

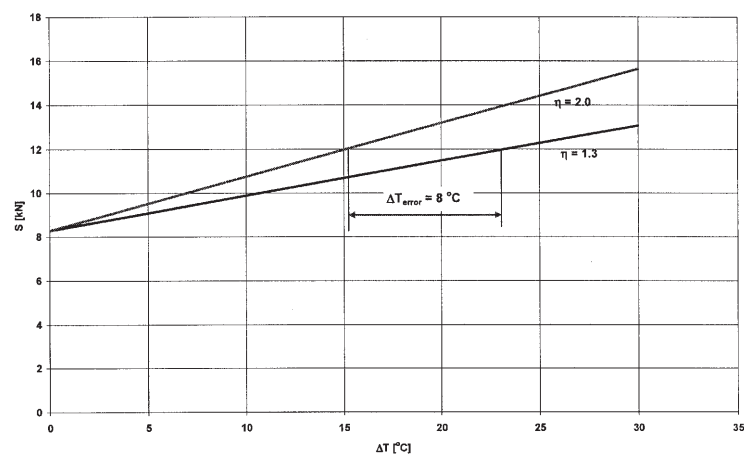
Z zaprezentowanych wyników oraz dodatkowych analiz można sformułować następujące spostrzeżenia.

- Podnoszenie szyny i przesuwanie poprzeczne toru przez podbijkarkę pozwala na oszacowanie siły podłużnej w szynach. Dokładność wyznaczenia wartości tej siły (temperatury ekwiwalentnej) będzie rzędu $7,5$ – 10°C , a nawet gorsza.
- Uzyskanie wymaganej praktycznie dokładności pomiaru (ekwiwalent termiczny 3 – 5°C) przy quasistatycznym oddziaływaniu na tor będzie prawdopodobnie bardzo trudne.
- Należy mieć na uwadze fakt, że o ile podnoszenie pojedynczej szyny nie narusza zasadniczo struktury nawierzchni

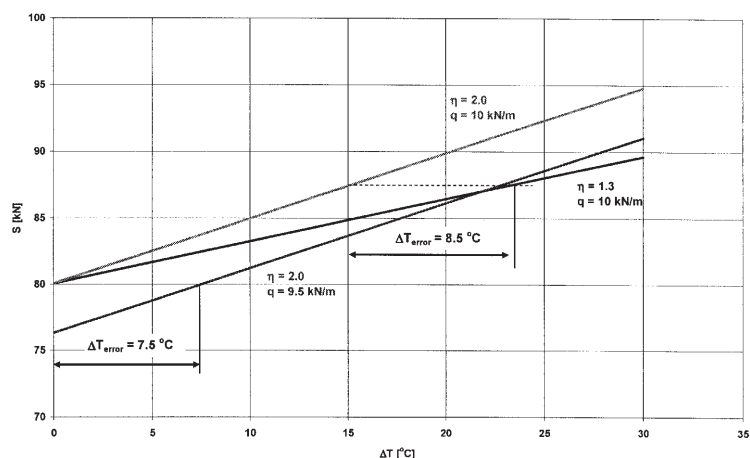
(przy zwolnieniu przytwierdzeń następuje wyrównanie sił wzdłużnych w szynach), o tyle przesuwanie toru w podsypce, nawet w zakresie do 20 mm, jest badaniem niszczącym (narusza strukturę nawierzchni, a opór podsypki po przesunięciu przez podbijkarkę zmienia się istotnie w stosunku do stanu wyjściowego).



Rys. 3. Model toru i obciążenia przyjęty do analizy statycznej



Rys. 4. Zależność siły, niezbędnej do podniesienia szyny na maksymalną wysokość 20 mm, od ekwiwalentnego przyrostu temperatury ΔT (przy sile rozciągającej w szynach)



Rys. 5. Zależność siły, niezbędnej do przesunięcia toru o maksymalną wartość 20 mm, od ekwiwalentnego przyrostu temperatury ΔT (przy sile rozciągającej w szynach)

Podsumowanie

W artykule wskazano na podstawowe trudności w praktycznym zastosowaniu metod bezpośredniego oddziaływania na tor w celu wyznaczenia sił wzdłużnych w szynach. Metoda dynamiczna, z wymuszeniem drgań szyny o amplitudach rzędu 100–200 mm, nie narusza struktury nawierzchni, lecz prawdopodobnie nie będzie możliwa do wdrożenia ze względu na trudności w wyodrębnieniu sygnału siły w stosunku do zakłóceń, spowodowanych zmiennością parametrów konstrukcyjnych nawierzchni oraz małą wrażliwością zmiany siły podłużnej w szynach na parametry odpowiedzi konstrukcji. Metoda przesuwania poprzecznego toru jest natomiast niszcząca i prawdopodobnie niewystarczająco dokładna. □

Literatura

- [1] Bałuch H.: *Kierunki badań toru bezстыkowego*. Materiały sympozjum „Nowe rozwiązania i modyfikacje w konstrukcji dróg szynowych”. Kraków-Zakopane 1994.
- [2] Czyczuła W.: *Eksploatacyjna stabilność drogi kolejowej*. Wyd. Politechniki Krakowskiej, Kraków 1992.
- [3] Czyczuła W.: *Tor bezстыkowy*. Wyd. Politechniki Krakowskiej, Kraków 2002.
- [4] Huber T. M.: *Pisma, t. III*. PWN, Warszawa 1957.
- [5] Koc W., Wilk A., Grulowski S.: *Możliwości wykorzystania pracy podbijarki w diagnostyce toru kolejowego*. II Seminarium Diagnostyki Nawierzchni Kolejowej. Gdańsk 2000.
- [6] Magiera J.: *Hybrydowa, teoretyczno-eksperymentalna metoda wyznaczania naprężeń resztkowych w szynach kolejowych* (praca doktorska). Kraków 2001.
- [7] Mazurkiewicz R.: *Wpływ sił osiowych na drgania szyn kolejowych w torze bezстыkowym* (praca doktorska). Wrocław 2000.

Autor

prof. dr inż. Włodzimierz Czyczuła

Politechnika Krakowska

Instytut Pojazdów Szynowych

Krajowa Sekcja Kolejowa Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji RP pod patronatem Prezesa Zarządu PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. ogłasza konkurs na logo sekcji

Krajowa Sekcja Kolejowa prowadzi bardzo aktywne działania w branży komunikacji kolejowej. Zrzesza przedstawicieli wszystkich dużych spółek Grupy PKP i przedstawicieli większości oddziałów SITK.

Dla zwycięzcy konkursu – nagroda 1 000 zł

Wymagania:

1. Logo powinno zawierać pełną nazwę (Krajowa Sekcja Kolejowa Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji RP) lub stosowany skrót (KSK SITK RP)
2. Możliwe jest wykorzystanie logo SITK w części lub całości
3. Preferowana kolorystyka – granat, niebieski, czarny, biały
4. Wskazane jest wykorzystanie symboliki kojarzącej się z różnymi branżami kolejowymi
5. Przedstawienie propozycji wkomponowania logo w druk firmowy

Dodatkowych informacji udzielają:

1. Katarzyna Gawlik-Tarnowska, tel. 600 084 010
2. Andrzej Koper, tel. 602 317 221
3. Dorota Przybyła, tel. 501 316 631

Forma składania ofert: wydruk formatu A4 kolorowy lub czarno-biały z opisem kolorów oraz plik CorelDraw na dyskietce lub płycie CD

Termin składania ofert: 17 stycznia 2003 r., godzina 15.00

Miejsce składania ofert: PKP Polskie Linie Kolejowe S.A., Biuro Informacji i Promocji

ul. Targowa 74, 03-734 Warszawa, Katarzyna Gawlik-Tarnowska, e-mail: k.gawliktarnowska@pkp.com.pl

Termin rozstrzygnięcia konkursu: 14 lutego 2003 r.

Oferta powinna zawierać dane personalne uczestnika: imię i nazwisko (przesłane w oddzielnej kopercie), adres zamieszkania i telefon kontaktowy lub adres e-mail

Uwagi: **Nagrodzona praca przechodzi na własność organizatora**

Przyznana zostanie tylko 1 nagroda

Każdy uczestnik konkursu może przedstawić tylko 1 pracę

**Szczegółowy regulamin konkursu jest dostępny
na stronie internetowej PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. (www.plk-sa.pl)**

*Krajowa Sekcja Kolejowa
Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji RP*