

OCENA WPŁYWU KONSTRUKCJI NAWIERZCHNI NA PARAMETRY JEJ DRGAŃ PRZY RÓŻNYCH PRĘDKOŚCIACH POCIĄGU

Dorota Karolina Błaszkwicz

Mgr.inż., Politechnika Krakowska, ul. Warszawska 24,
31-155 Kraków, Katedra Infrastruktury Transportu
Szynowego i Lotniczego, e-mail: dorotablaszkiewicz@
gmail.com

Włodzimierz Czyczula

Prof. dr hab. inż., Politechnika Krakowska, ul. War-
szawska 24, 31-155 Kraków, Katedra Infrastruktury
Transportu Szynowego i Lotniczego, tel.: (12) 6282358,
e-mail: czyczula@pk.edu.pl

Streszczenie. W pracy przedstawiono wybrane wyniki badań teoretycznych, dotyczących odpowiedzi różnych typów nawierzchni przy obciążeniu dynamicznym. Badania te przeprowadzone zostały w ramach projektu rozwojowego „Nawierzchnia kolejowa o podwyższonym standardzie i zmniejszonym oddziaływaniu na środowisko”, finansowanym przez NCBiR. Rozważano nowe i innowacyjne konstrukcje nawierzchni oraz konstrukcje istniejące. Przeprowadzono analizę porównawczą parametrów drgań podkładów badanych typów konstrukcji. W podsumowaniu przedstawiono kierunki dalszych prac w tym zakresie.

Słowa kluczowe: nawierzchnia kolejowa, odpowiedzi na obciążenia dynamiczne nawierzchni kolejowej, LONGASF

1. Wprowadzenie

Badaniu oddziaływań w elementach nawierzchni kolejowej przy przejeździe pociągu z różnymi prędkościami poświęcono wiele opracowań. W pracy [1] przedstawiono wyniki badań francuskich i japońskich w zakresie do 250-330 km/h, wykazując, że drgania szyny, podkładu i podsypki rosną wraz z prędkością. Podobne rezultaty otrzymano w pracy [2], gdzie wykazano, że przyspieszenia drgań szyny w zakresie do 190 km/h rosną silniej niż liniowo, podkładu prawie liniowo, a podsypki wolniej niż liniowo. Wiele innych prac z zakresu dynamiki nawierzchni i pojazdów pokazuje, że – generalnie – oddziaływania dynamiczne zarówno w nawierzchni, jak i w pojeździe rosną wraz z prędkością pociągu (por. np. [3, 4]). W pracy przedstawiono wybrane elementy analiz teoretycznych, jakie przeprowadzono w ramach projektu rozwojowego „Nawierzchnia kolejowa o podwyższonym standardzie i zmniejszonym oddziaływaniu na środowisko” [5], finansowanego przez NCBiR. Analizy te dotyczą wpływu konstrukcji nawierzchni na drgania jej elementów nawierzchni przy różnych prędkościach pociągów.

2. Badane typy konstrukcji i obciążenia

Oceny wpływu konstrukcji nawierzchni na parametry jej drgań dokonano na podstawie analiz dynamicznych modeli teoretycznych nawierzchni kolejowych. Wartości parametrów modeli matematycznych przyjęto głównie na podstawie badań laboratoryjnych [5], lecz także i innych danych, uzyskanych we wcześniejszych analizach przez innych badaczy, cytowanych w [5]. Analizy te zostały przeprowadzone przy obciążeniu nieinercyjnym (analizy w trzech kierunkach, tzn. wzdłużnym, pionowym i poprzecznym do osi toru, przy zastosowaniu modeli liniowych, z elementami modeli nieliniowych), dla różnych prędkości pociągu (max. 250 km/h). Analizie poddano sześć typów konstrukcji nawierzchni kolejowej, z których trzy konstrukcje stanowią koncepcję nowych i innowacyjnych rozwiązań dla nawierzchni kolejowej.

Część z podstawowych parametrów do obliczeń przyjęto niezależnie od typu badanej nawierzchni:

- szyna typu 60E1;
- prędkości przejazdu pociągu: 0; 50; 100; 200; i 250 km/h;
- obciążenie podstawowe: lokomotywa EP-09; współczynnik dynamiczny przy obciążeniach pionowych (nierówności długie): $\psi = 1 + (18,9 \cdot 10^{-6}) \cdot v^2$, przy obciążeniach poziomych (niezrównoważone przyspieszenie 1,2 m/s² przy każdej prędkości pociągu): $Y = Q \cdot 0,122$, gdzie Q – nacisk statyczny osi; a przy wyznaczeniu odpowiedzi wzdłużnej także pociągi (por. [5]):
 - a) ciężki - kolei DB: o długości 640 m i ciężarze jednostkowym 86,25 kN/m;
 - b) ciężki - PKP: o długości 580 m i ciężarze jednostkowym 55,34 kN/m;
 - c) lekki - PKP: o długości 305 m i ciężarze jednostkowym 23,7 kN/m.

Analizie poddano następujące typy nawierzchni:

- a) nawierzchnia z podkładami typu Y i przytwierdzeniem S-15,;
- b) nawierzchnia z podkładami typu Y i przytwierdzeniem CS-01,
- c) nawierzchnia podsypkowa z podkładami wzdłużnymi, przytwierdzenia ICOSTRUN-03 (rozstaw przytwierdzeń co 0,75 m);
- d) Nawierzchnia bezpodsypkowa z podkładami wzdłużnymi, przytwierdzenia ICOSTRUN-03 (rozstaw przytwierdzeń co 0,75 m);
- e) nawierzchnia z podkładami PS-94, przytwierdzenia CS -03 (rozstaw przytwierdzeń co 0,6 m),
- f) nawierzchnia z podkładami PS-94, przytwierdzenia CS -03 (rozstaw przytwierdzeń co 0,6 m).

Każdą z nawierzchni scharakteryzowano odpowiednimi parametrami (głównie na podstawie badań laboratoryjnych [5] oraz innych prac tam cytowanych). Dla każdej z nawierzchni określono zastępczą sztywność podsypki i podtorza przyjętą na podstawie danych eksperymentalnych. Sztywność przytwierdzenia oraz współczynnik tłumienia wiskotycznego (w kierunku pionowym, poprzecznym i wzdłużnym) wyznaczone zostały w warunkach laboratoryjnych (por. [5]). Każdy rodzaj nawierzchni charakteryzował się inną masą (podkłady wypełnione podsypką i dodatkowo wraz ze stowarzyszoną masą podsypki) oraz powierzchnią pod podsypką.

3. Modele teoretyczne – analizy dynamiczne przy obciążeniu nieinercyjnym

3.1. Linia ugięcia szyny

Do obliczeń przyjęto model toru, jako belki na sprężystym podłożu bez tłumienia, obciążonej symetrycznie względem osi toru. Przy takich założeniach rozważano jedną szynę, której właściwości zostały określone przez moduł Younga E i moment bezwładności I .

Ekwiwalentną sztywność podłoża podkładów obliczono przy założeniach, że zginanie podkładu ma znikomy wpływ na sztywność układu, korzystając ze wzoru:

$$k_f = A \cdot C_e \text{ [MN/m]} \quad (1)$$

gdzie:

A – powierzchnia połowy spodu podkładu,

C_e – moduł podłoża podkładów [MN/m³].

Sztywność jednostkową podłoża szyny wyznaczmy ze wzoru:

$$U = k_e / l_s \text{ [kN/m}^2\text{]} \quad (2)$$

gdzie:

k_e – ekwiwalentna sztywność podłoża szyny, wyznaczana ze znanych wartości k_e , oraz k_f - jako sprężyn równoległych,

l_s – oznacza rozstaw podkładów.

Jeżeli założymy, że obciążeniem toru (szyny) jest jedna siła $P=1$, poruszająca się ze stałą prędkością v , a właściwości toru są stałe na długości, to uzyskamy znane równanie ugięcia:

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + m \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + U y = l \delta(x, t) \quad (3)$$

gdzie:

EI – sztywność zginania szyny [Nm²],

m – masa jednostkowa toru [kg/m],

δ – dystrybucja Diraca (x – położenie siły w chwili t).

W układzie związanym z poruszającą się siłą $\xi = x - vt$ oraz wprowadzając oznaczenia:

$$L = \sqrt[4]{\frac{4EI}{U}} \text{ [m]}; \lambda = \sqrt{\frac{4EI}{m}} \text{ [m}^2\text{/s]}; \alpha = \sqrt{\frac{1}{L^2} - \frac{v^2}{\lambda^2}} \text{ [1/m]}; \beta = \sqrt{\frac{1}{L^2} + \frac{v^2}{\lambda^2}} \text{ [1/m]}, \quad (4)$$

$$v_{kr} = \sqrt{\frac{4EIU}{m^2}} \text{ [m/s]} \quad (5)$$

otrzymamy rozwiązanie stacjonarne w postaci:

$$y(\xi) = \frac{P=1}{2UL} \cdot \psi_1 \cdot e^{-\alpha\xi} \cdot \left(\frac{\alpha}{\beta} \sin\beta\xi + \cos\beta\xi \right); \text{ dla } \xi \geq 0 \quad (6)$$

i rozwiązanie jest symetryczne względem punktu $\xi = 0$.

W równaniu (6) symbol ψ_1 oznacza czynnik dynamiczny toru bez nierówności i bez tłumienia i ma postać:

$$\psi_1 = \sqrt{1 - \frac{v^2}{v_{kr}^2}} \quad (7)$$

3.2. Rozkład linii ugięcia szyny w szeregu Fouriera

Następnym krokiem analizy był rozkład linii ugięcia szyny w szereg Fouriera; w ogólności jest to pełny szereg, z wartością stałą oraz składnikami sinusowymi i cosinusowymi. Analizy numeryczne pokazały, że zgodność linii ugięcia z rozwinięciem (na poziomie dziesiątych promila wartości maksymalnych), przy obciążeniu lokomotywą EP-09, zapewnia uwzględnienie około 150 wyrazów szeregu. Jeśli całkowitą długość linii ugięcia, którą przyjmujemy do analizy (rozstaw skrajnych osi taboru powiększony o około 5 m przed i około 5 m za pociągiem) oznaczymy przez LC, to poszczególne częstotliwości rozwinięcia w szereg mają postać:

$$\Omega_i = \frac{2\pi \cdot i}{LC} \text{ [rad/m]} \quad (8)$$

gdzie:

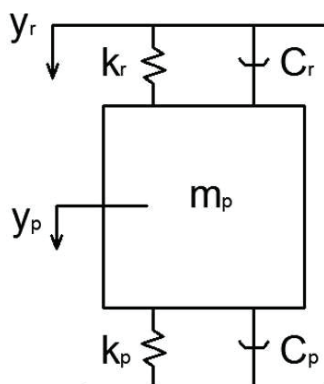
$i = 1, \dots, n$ – kolejny składnik rozwinięcia w szereg (oprócz stałego składnika),
 n – liczba wyrazów, uwzględnionych w analizie.

3.3. Drgania podkładu

W obliczeniach jako stałe przyjęto właściwości nawierzchni wzdłuż toru, natomiast każdorazowo, w zależności od typu nawierzchni, przyjmowano parametry opisujące właściwości podkładu.

Przyjęto, że dynamiczna linia ugięcia szyny, jest wymuszeniem kinematycznym drgań podkładu jako ciała o jednym stopniu swobody.

Na rysunku 3.1 przedstawiono schemat podkładu jako ciała o jednym stopniu swobody.



Rys. 1. Schemat podkładu jako ciała o jednym stopniu swobody

Mając daną stacjonarną linię ugięcia i jej rozwinięcie w szereg Fouriera, przy podstawieniu:

$$\omega_i = \Omega_i \cdot v \text{ [rad/s]} \quad (9)$$

gdzie:

v [m/s] – prędkość pociągu,

Ω_i – jak we wzorze (8),

uzyskano poszczególne składowe rozwinięcia w szereg linii ugięcia szyny $y_r(t)$ jako wymuszenia kinematycznego drgań podkładu $y_p(t)$. Więc (k_r, c_r) określa sprężyste i tłumiące właściwości przytwierdzenia, a więc (k_p, c_p) opisuje sprężyste i tłumiące właściwości podłoża podkładów. Masa m_p przedstawia odpowiednią masę podkładu oraz masę stowarzyszoną podsypki (przypadającą na jedną szynę), która aktywnie uczestniczy w drganiach podkładu. Jest to masa skupiona, w przeciwieństwie do jednostkowej masy m , występującej w równaniu ugięcia szyny. Równanie ruchu ma postać:

$$m_p \frac{d^2 y_p}{dt^2} + c_p \frac{dy_p}{dt} + k_p y_p = c_r \left(\frac{dy_r}{dt} - \frac{dy_p}{dt} \right) + k_r (y_r - y_p) \quad (10)$$

Równanie to można napisać także w innej formie:

$$m_p \frac{d^2 y_p}{dt^2} + (c_r + c_p) \frac{dy_p}{dt} + (k_r + k_p) y_p = c_r \frac{dy_r}{dt} + k_r y_r \quad (11)$$

Jeśli wymuszenie drgań podkładu ma postać:

$$y_r(t) = \sum_{i=1}^n (a_i \cdot \cos \omega_i \cdot t + b_i \cdot \sin \omega_i \cdot t) \quad (12)$$

to odpowiedź podkładu można przedstawić w formie:

$$y_p(t) = \sum_{i=1}^n (H1_i \cdot \cos \omega_i \cdot t + H2_i \cdot \sin \omega_i \cdot t) \quad (13)$$

gdzie:

$$H1_i = \frac{(a_i k_r + b_i c_r \omega_i) \cdot (k_r + k_p - m_p \omega_i^2) - (b_i k_r - a_i c_r \omega_i) \cdot (c_r + c_p) \cdot \omega_i}{(k_r + k_p - m_p \omega_i^2)^2 + \omega_i^2 \cdot (c_r + c_p)^2} \quad (14a)$$

$$H2_i = \frac{(b_i k_r - a_i c_r \omega_i) + H1_i \cdot (c_r + c_p) \cdot \omega_i}{k_r + k_p - m_p \omega_i^2} \quad (14b)$$

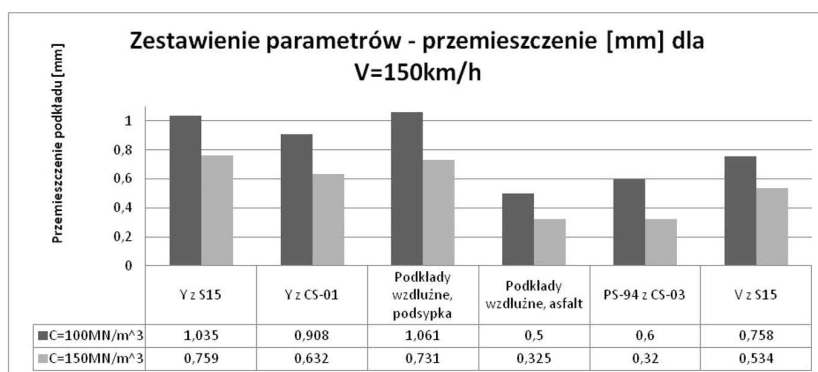
a stała w rozwinięciu drgań szyny przenosi się następująco:

$$y_{p0} = y_{r0} \frac{k_r}{k_r + k_p} \quad (15)$$

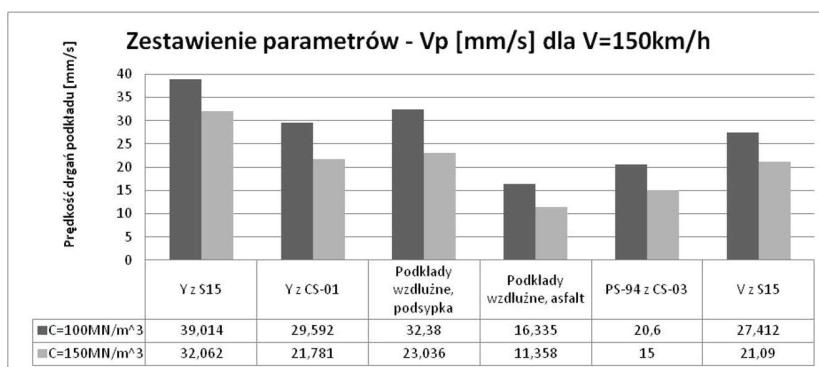
4. Wyznaczenie drgań podkładów

Dla każdego z typów nawierzchni, w zależności od przyjętej sztywności podsypki i prędkości pociągu, wyznaczono przemieszczenia, prędkości i przyspieszenia podkładów. Na wykresach 1-6 pokazano maksymalne wartości wymienionych parametrów drgań podkładów, uzyskane dla pociągu poruszającego się z prędkością $V = 150 \text{ km/h}$ w kierunku pionowym i poprzecznym. Na wykresach 7-9 pokazano maksymalną różnicę przemieszczeń szyny i podkładu przy obciążeniu pociągiem ciężkim kolei DB, ciężkim PKP oraz lekkim PKP w kierunku wzdłużnym.

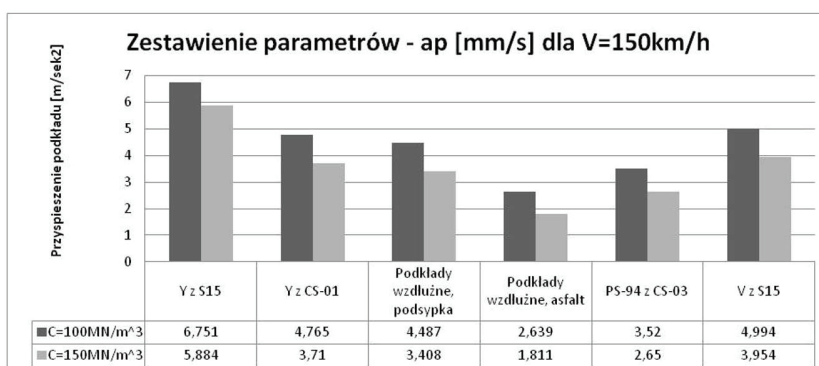
4.1. Kierunek pionowy



Wykres 1. Prędkość przemieszczeń podkładów w kierunku pionowym różnych typów nawierzchni dla prędkości 150 km/h

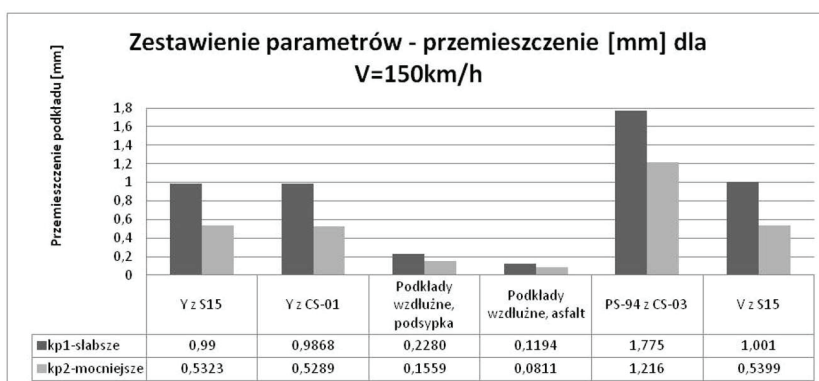


Wykres 2. Prędkość drgań podkładów w kierunku pionowym różnych typów nawierzchni dla prędkości 150 km/h

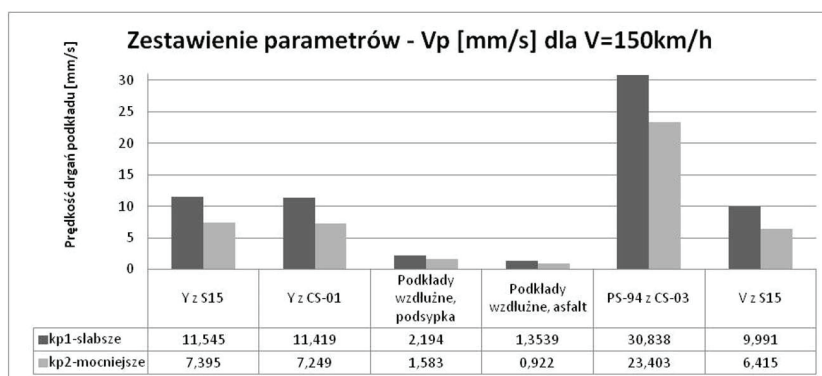


Wykres 3. Wartości przyspieszenia podkładów w kierunku pionowym różnych typów nawierzchni dla prędkości 150 km/h

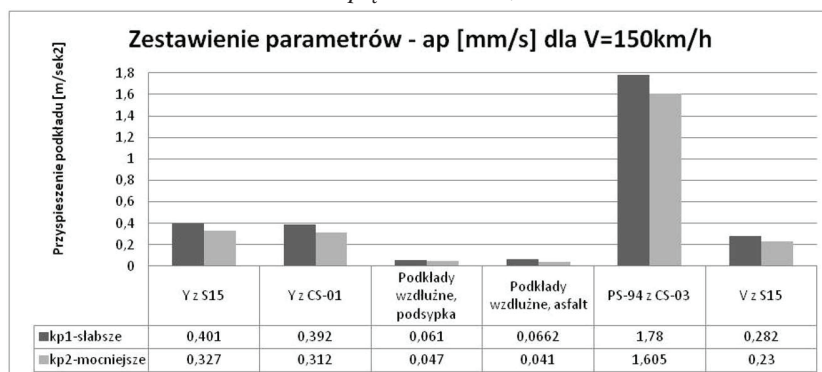
4.2. Kierunek poprzeczny



Wykres 4. Prędkość przemieszczeń podkładów w kierunku poprzecznym różnych typów nawierzchni dla prędkości 150 km/h

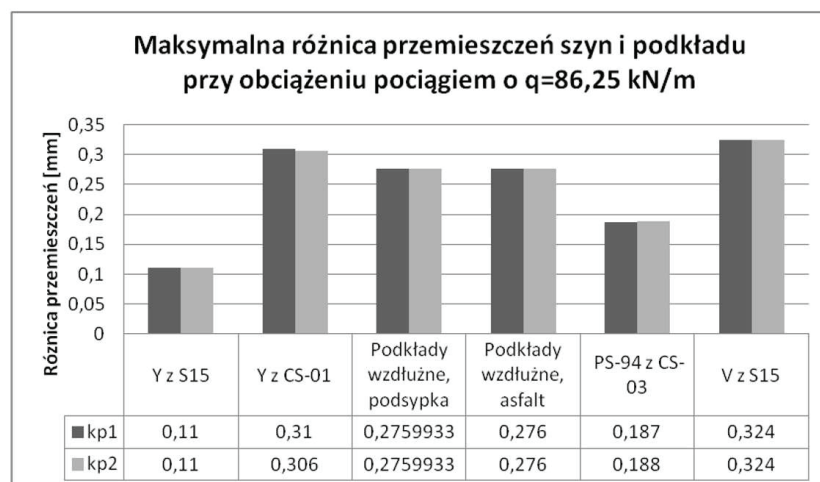


Wykres 5. Prędkość drgań podkładów w kierunku poprzecznym różnych typów nawierzchni dla prędkości 150 km/h

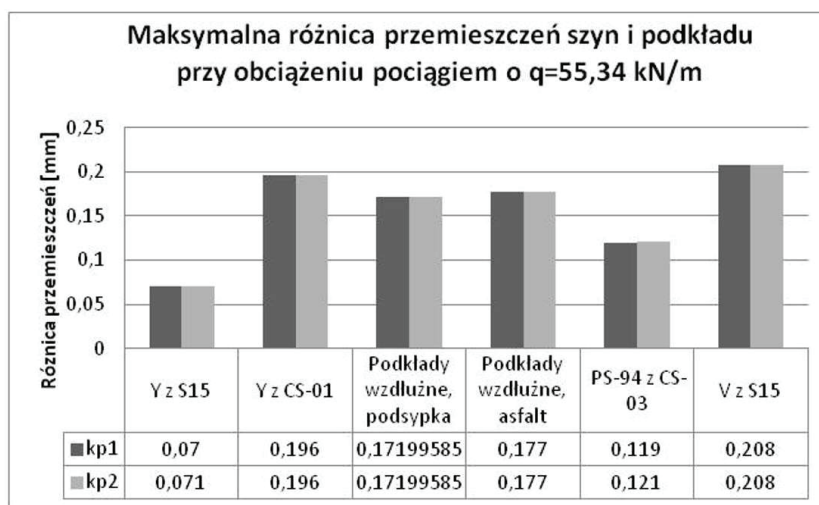


Wykres 6. Wartości przyspieszenia podkładów w kierunku poprzecznym różnych typów nawierzchni dla prędkości 150 km/h

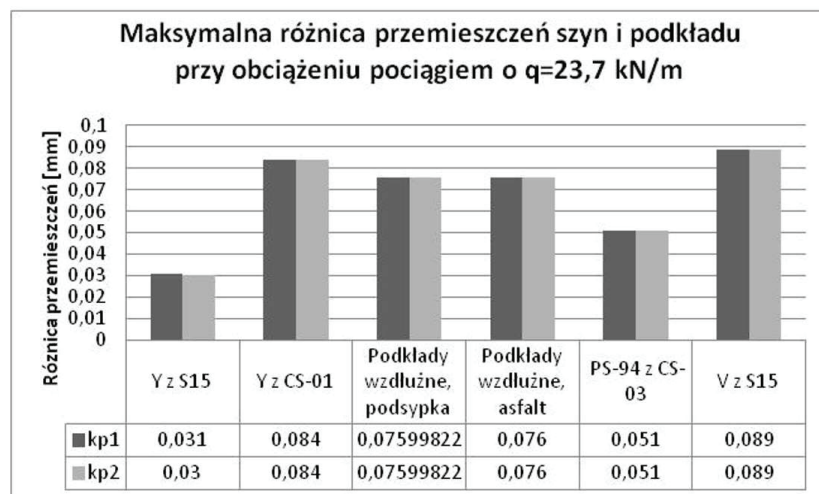
4.3. Kierunek wzdłużny



Wykres 7. Maksymalna różnica przemieszczeń szyny i podkładu przy obciążeniu pociągiem ciężkim kolei DB



Wykres 8. Maksymalna różnica przemieszczeń szyny i podkładu przy obciążeniu pociągiem ciężkim kolei PKP



Wykres 9. Maksymalna różnica przemieszczeń szyny i podkładu przy obciążeniu pociągiem lekkim kolei PKP

5. Analiza wyników i podsumowanie

Jeśli przyjąć następujące kryteria oceny możliwości zastosowania nawierzchni dla danego typu pociągu i jego prędkości (por.[5]):

- 1) przemieszczenie pionowe i poziome podkładów nie powinny przekraczać wartości około 1 mm;
- 2) prędkość drgań podkładów nie powinna przekraczać wartości około 50 mm/s;

- 3) przyspieszenie podkładów nie powinny przekraczać wartości około 10 m/s^2 ;
- 4) różnica przemieszczeń szyny i podkładu przy obciążeniach wzdłużnych nie powinna przekraczać granicznej wartości, mogącej spowodować trwałe przemieszczenie szyny względem podkładu,

to – w odniesieniu do lokomotywy EP-09 i prędkości 150 km/h oraz możliwości ruchu ciężkich pociągów – można sformułować następujące spostrzeżenia:

1. Z uwagi na przemieszczenia pionowe pokładów, przy możliwym osłabieniu sztywności pionowej podłoża, nawierzchnia z podkładami typu Y i przytwierdzeniami S-15 (a więc typowa nawierzchnia na podkładach stalowych typu Y) oraz nawierzchnia z podkładami wzdłużnymi WZA w podsypce nie spełniają postawionego kryterium. Należy tu jednak zwrócić uwagę, iż sposób oceny nawierzchni wykonany został w sposób ogólny i wymaga dalszego doskonalenia.
2. Z uwagi na przemieszczenia poziome i możliwe osłabienie sztywności podłoża nawierzchnia na podkładach typu PS-94 z przytwierdzeniami CS-03 (modyfikacja przytwierdzenia SB) nie powinna być zastosowana przy prędkości 150 km/h, chyba, że oddziaływania poziome będą istotnie niższe od obliczeniowych.
3. Z uwagi na pozostałe parametry drgań, tzn. prędkości drgań podkładów oraz ich przyspieszenia, wszystkie badane typy konstrukcji nawierzchni mogą być zastosowane przy ruchu pociągów z prędkościami do 150 km/h i naciskami osi, porównywalnymi z naciskami lokomotywy EP-09. Dotyczy to również możliwości wystąpienia trwałych przemieszczeń szyn względem podkładów przy hamowaniu ciężkich pociągów.

Z pełnego zakresu obliczeń wynika, że nawierzchnia niekonwencjonalna LONGASF z podkładami wzdłużnymi typu WZA i przytwierdzeniami typu ICOSTRUN-02 (a nie jak przyjęto w obliczeniach podstawowych ICOSTRUN-03) jest szczególnie przydatna na liniach kolejowych przy ruchu pociągów 250-300 km/h, a także w przypadku hamowania ciężkich pociągów. Te same spostrzeżenia można odnieść do nawierzchni z podkładami typu PS-08 i przytwierdzeniem ICOSTRUN-02. Natomiast typowa nawierzchnia na podkładach PS-94 lub PS-93 z przytwierdzeniem typu SB, w odniesieniu do dużych prędkości pociągów, wymaga doskonalenia. Rozważane nawierzchnie na podkładach stalowych typu Y i V mają zastosowanie na liniach o prędkościach poniżej 150 km/h, gdzie mogą być z powodzeniem zastosowane, także w łukach o małych promieniach i dużych pochyleniach niwelety (por. Czyżuła W., Tor bezстыkowy, 2002). Podkłady te charakteryzują się bardzo dobrymi parametrami w kierunku poprzecznym (przemieszczenie, prędkość drgań oraz przyspieszenie podkładu) oraz wzdłużnym – najmniejsza różnica przemieszczeń szyny i podkładu przy obciążeniu poszczególnymi pociągami.

Dalsze prace w zakresie modelowania nawierzchni powinny być ukierunkowane na:

- wdrożenie nowych i innowacyjnych konstrukcji nawierzchni,

- badania eksploatacyjne przy ruchu pociągów dużej prędkości, doskonalenie modeli obliczeniowych, w tym zastosowania modeli inercyjnych,
- doskonalenie konstrukcji nawierzchni, zwłaszcza w odniesieniu do systemów przytwierdzeń i konstrukcji podkładów,
- doskonalenie kryterium oceny przydatności danego typu nawierzchni do danej prędkości pociągów, co rozważano także w pracy [5].

Literatura

- [1] Basiewicz T., Bałuch H. i wsp., Przystosowanie kolei do zwiększonych prędkości i dużych przewozów. WKiŁ, Warszawa 1969.
- [2] Czyżuła W., Analiza wpływu drgań nawierzchni kolejowej na deformacje podsypki. Praca doktorska, Politechnika Krakowska, Kraków 1985.
- [3] Bajer Cz., Bogacz R., Tokaj P., Dynamika toru z podkładami tradycyjnymi oraz typu „Y” – symulacja i badania. Materiały konferencji „Symulacja w badaniach i rozwoju”, Kraków 2007, księga konf. str. 11-20.
- [4] Czyżuła W., Stawowiak J., Szczepaniak – Krupowski G., Badania porównawcze nawierzchni kolejowej na odcinkach testowych linii CMK. Technika Transportu Szybnego, 2009, nr 7-8.
- [5] Nawierzchnia kolejowa o podwyższonym standardzie i zmniejszonym oddziaływaniu na środowisko. Praca zbiorowa. Sprawozdanie merytoryczne z realizacji projektu rozwojowego, Kraków 2013.

Publikacja powstała w ramach projektu rozwojowego “Nawierzchnia kolejowa o podwyższonym standardzie i zmniejszonym oddziaływaniu na środowisko” (projekt NR10-0004-10/2010), finansowanym przez NCBiR.

Obliczenia numeryczne przy użyciu programów i procedur obliczeniowych wykonał mgr inż. Dariusz Kudła