

SPRAWDZENIE ZGODNOŚCI Z WYMAGANIAMI TSI INFRASTRUKTURA KONSTRUKCJI NAWIERZCHNI KOLEJOWEJ - MODEL I PRZYKŁAD OBLICZENIOWY¹

Włodzimierz Czyczuła

Prof. dr hab. inż., Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, Wydział Inżynierii Lądowej, Instytut Inżynierii Drogowej i Kolejowej, Katedra Infrastruktury Transportu Szynowego i Lotniczego, tel.: 12 628 2358, e-mail: czyczula@pk.edu.pl

Łukasz Chudyba

dr inż., Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Lądowej, Instytut Inżynierii Drogowej i Kolejowej, Katedra Infrastruktury Transportu Szynowego i Lotniczego, tel.: 12 628 2358, e-mail: lchudyba@poczta.onet.pl

***Streszczenie.** Postanowienia TSI Infrastruktura oraz powołane tam normy nie precyzują metody badania zgodności z tym dokumentem w zakresie odporności (wytrzymałości) całej konstrukcji nawierzchni na oddziaływania użytkowe w kierunku pionowym i poziomym. W opracowaniu zaproponowano model obliczeniowy nawierzchni i obciążenia oraz kryteria zgodności z TSI konstrukcji nawierzchni. Analizę teoretyczną zilustrowano na przykładzie obliczeniowym wybranego typu konstrukcji nawierzchni i obciążenia.*

***Słowa kluczowe:** wytrzymałość (odporność) nawierzchni, obciążenia pionowe i poziome, TSI Infrastruktura, propozycja modelu obliczeniowego*

1. Wprowadzenie

Sprawdzenie zgodności elementów nawierzchni kolejowej z postanowieniami TSI Infrastruktura dotyczy zazwyczaj składników interoperacyjności. W odniesieniu do całej konstrukcji toru (nawierzchni) sformułowania TSI są ogólne i dotyczą wytrzymałości (odporności) konstrukcji na oddziaływania pionowe i poziome: poprzeczne i wzdłużne względem osi toru. Nie ma żadnych wskazań co do modeli obliczeniowych ani szczegółów, dotyczących obciążeń. Te wskazania, w odniesieniu do obciążeń, znajdują się w normie [4], dotyczącej badań pojazdów szynowych.

W znanych autorom opracowaniach tego problemu [7] przyjmuje się modele statyczne (quasi-statyczne) nawierzchni, a kryteria zgodności z TSI Infrastruktura są nieprecyzyjne. W artykule, na podstawie badań doświadczalnych [5,5a,6] oraz rozważań teoretycznych [1,2], zaproponowano model nawierzchni we wszystkich trzech kierunkach, obciążenie (użytkowe i termiczne), w tym konfigurację pociągu i kryteria oceny zgodności z TSI Infrastruktura [3]. Oprócz modeli quasi-statycznych (stałe obciążenie ruchome) rozważany jest także model przy zmiennych obciążeniach ruchomych.

¹ Wkład autorów w publikację: Czyczuła W. 50%, Chudyba Ł. 50%

2. Założenia podstawowe

1. Sprawdzenie zgodności dotyczy wytrzymałości (oporu – resistance) toru (nawierzchni) przy obciążeniach w płaszczyźnie pionowej oraz poziomej: w kierunku poprzecznym do osi toru oraz w kierunku wzdłużnym. W dokumencie podstawowym, tzn. TSI INFRASTRUKTURA 1299/2014 [3], podane są jedynie ogólne wymagania w kierunku wzdłużnym (określona jest maksymalna wartość opóźnienia pociągu, tzn. $2,5 \text{ m/s}^2$), natomiast w odniesieniu do kierunku pionowego i poprzecznego następuje odwołanie do normy [4]. W normie podane są obciążenia quasi-statyczne (kierunek poprzeczny do osi toru i obciążenie pionowe), a w odniesieniu do obciążeń pionowych podana jest maksymalna wartość siły dynamicznej w zależności od maksymalnej prędkości pociągu. Norma nie podaje żadnych szczegółowych postanowień w odniesieniu do modelu obliczeniowego ani konfiguracji pociągu, który należy przyjąć do obliczeń. Dlatego też, w toku dalszych rozważań, zostaną przyjęte szczegółowo modele obciążenia i nawierzchni oraz parametry liczbowe tych modeli dla wybranej konstrukcji nawierzchni i obciążenia (pociągu).
2. Do analizy przyjmijmy pociąg złożony z węglarek typu Falns 441 Va z wózkami Y25. Będziemy rozważać obciążenie quasi-statyczne i dynamiczne, wynikające z oddziaływania płaskich starć kół. Przyjmijmy równomierny rozkład statycznych nacisków osi $Q_{os} = 250 \text{ kN}$ (125 kN/koło – jest to współczynnik bezpieczeństwa, gdyż wagony te są dostosowane do maksymalnego nacisku osi 225 kN). Obciążenia te będą podstawą wyznaczenia ugięć szyny, jako belki Eulera-Bernoulliego, spoczywającej na sprężysto-lepkim podłożu, co zostanie dalej szczegółowo opisane. Taki sam model nawierzchni będzie analizowany przy obciążeniu siłami zmiennymi, wynikającymi z płaskich starć kół. Przyjmijmy, że amplituda tych sił wynosi $\Delta Q = 75 \text{ kN/koło}$. Tak więc maksymalna siła dynamiczna wyniesie 200 kN/koło , co jest zgodne z postanowieniami normy [4], w odniesieniu do pociągów, poruszających się z prędkościami do 160 km/h . Przyjmijmy, że pociąg porusza się z prędkością 120 km/h (co jest dodatkowym czynnikiem bezpieczeństwa z uwagi na fakt, że jedynie próżne węglarki mogą poruszać się z tą prędkością). Znając prędkość pociągu oraz średnicę koła wyznaczmy częstotliwość zmian siły, posiadającej założoną amplitudę $\Delta Q = 75 \text{ kN/koło}$. Mając daną linię ugięcia szyny – w dalszym etapie - wyznaczmy ugięcia podkładu oraz naprężenia w poszczególnych elementach nawierzchni i podtorza. Wartości te odniesiemy do wartości dopuszczalnych. Model nawierzchni i obciążenia, opisany w pracy [2], zostanie dalej przedstawiony.
3. W odniesieniu do kierunku wzdłużnego przyjmijmy model nawierzchni, opisany w pracy [1]. Przyjmijmy, że pociąg ma długość 1050 m , naciski statyczne na oś jak w kierunku pionowym (tzn. 250 kN), a intensywność hamowania, określona jako stosunek siły wzdłużnej do obciążenia pionowego, wynosi $0,25$, co odpowiada opóźnieniu hamowania $2,5 \text{ m/s}^2$ (por. [3]). Kry-

terium odporności nawierzchni na obciążenia wzdłużne będzie nieprzekroczenie wartości granicznej względnego przemieszczenia szyny i podkładu, tzn. warunku niewywołania trwałych przesunięć szyny w przytwierdzeniu.

4. W odniesieniu do oddziaływań poprzecznych przyjmiemy – zgodnie z postanowieniami normy [4] – siłę quasi-statyczną Y o wartości 60 kN przy nacisku koła na szynę 112,5 kN, ale – przy nacisku statycznym osi $Q = 250$ kN – przyjmiemy $Y = 75$ kN. Jako model nawierzchni przyjmemy belkę na sprężysto-lepkim podłożu, podobnie jak w przypadku analizy pracy toru w płaszczyźnie pionowej. Ponadto przyjmiemy hipotezę wpływu obciążenia pionowego na opór poprzeczny toru w odniesieniu do wartości granicznej dla modelu bi-liniowego (por. [1]). Kryterium odporności toru na oddziaływania poprzeczne będzie nieprzekroczenie wartości granicznej oporu. Założenie wartości siły quasi-statycznej w postaci 75 kN, jest w istocie, spełnieniem kryterium Prud'homme'a $(0,85 \cdot (10 + 250/3)) = 79$ kN, czyli ok. 75 kN). Tym niemniej – przyjęta procedura – stanowi dodatkowe uzasadnienie tego kryterium w odniesieniu do analizowanego typu konstrukcji nawierzchni.

3. Analiza pracy nawierzchni w płaszczyźnie pionowej

3.1. Model nawierzchni kolejowej i obciążenia

Za [2] przytoczymy podstawowe informacje, dotyczące modelu dynamicznego nawierzchni i obciążenia, przyjmując model jednowarstwowy, opisany następującym równaniem:

$$EI \frac{\partial^4 y_r}{\partial x^4} + N_r \frac{\partial^2 y_r}{\partial x^2} + m_r \frac{\partial^2 y_r}{\partial t^2} + c_t \frac{\partial y_r}{\partial t} + U y_r = q(x, t) \quad (1)$$

gdzie:

EI – sztywność zginania szyny w płaszczyźnie pionowej [Nm^2];

N_r – siła osiowa w szynie (+ oznacza siłę ściskającą) [N];

m_r – masa jednostkowa szyny [kg/m];

c_t – współczynnik wiskotycznego tłumienia podłoża szynowego (przytwierdzeń i podsypki) [Ns/m^2];

U – współczynnik sztywności podparcia szyny (przytwierdzeń i podłoża podkładów) [N/m^2];

y_r – przemieszczenie pionowe szyny [m];

$q(x, t)$ – jednostkowe obciążenie pionowe szyny [N/m].

W układzie, związanym z obciążeniem, poruszającym się ze stałą prędkością v ($\eta = y$, $\xi = x - vt$), równanie (1) przyjmie postać:

$$EI \frac{\partial^4 y_r}{\partial \xi^4} + N_t \frac{\partial^2 y_r}{\partial \xi^2} + m_r \left(\frac{\partial^2 y_r}{\partial t^2} - 2v \frac{\partial^2 y_r}{\partial t \partial \xi} + v^2 \frac{\partial^2 y_r}{\partial \xi^2} \right) + c_t \left(\frac{\partial y_r}{\partial t} - v \frac{\partial y_r}{\partial \xi} \right) + U y_r = q(\xi, t) \quad (2)$$

Jeśli obciążenie szyny przedstawimy w postaci układu sił, oscylujących ze stałą częstotliwością kołową ω , tzn.

$$q(\xi, t) = q_c(\xi) \cdot \cos \omega t + q_s(\xi) \cdot \sin \omega t \quad (3)$$

a rozwiązanie równania (2) będziemy poszukiwać w postaci stacjonarnej (ustalona postać rozwiązania w układzie ruchomym),

$$y_r(\xi, t) = Y_c(\xi) \cdot \cos \omega t + Y_s(\xi) \cdot \sin \omega t \quad (4)$$

to uzyskamy układ równań zwyczajnych dla poszukiwanych funkcji Y_c oraz Y_s :

$$\begin{aligned} EI \frac{d^4 Y_c}{d\xi^4} - m_r \omega^2 Y_c - 2m_r v \omega Y_s + (N_t + m_r v^2) \frac{d^2 Y_c}{d\xi^2} + c_t \omega Y_s - c_t v \frac{dY_c}{d\xi} - U Y_c &= q_c(\xi) \\ EI \frac{d^4 Y_s}{d\xi^4} - m_r \omega^2 Y_s + 2m_r v \omega Y_c + (N_t + m_r v^2) \frac{d^2 Y_s}{d\xi^2} - c_t \omega Y_c - c_t v \frac{dY_s}{d\xi} + U Y_s &= q_s(\xi) \end{aligned} \quad (5)$$

Prawa strona układu (5) oznacza cosinusowe i sinusowe składowe obciążenia, które zakładamy w postaci rozkładu prostokątnego lub rozkładu według funkcji Gaussa, przyjmując, że wartości niezerowe występują na obszarach, odpowiadających kontaktowi koła z szyną.

Dalej rozwiązanie uzyskuje się przy zastosowaniu szeregow Fouriera – prawe strony układu są rozwijane w szereg, a rozwiązanie przewidujemy również w postaci szeregu Fouriera. Zagadnienie zbieżności rozwiązania oraz jego dokładności jest przedstawione w pracy [2].

Rozwiązanie problemu będzie sumą dwóch funkcji ugięcia:

1. Pierwsza funkcja ugięcia jest rozwiązaniem równania ruchu szyny przy obciążeniu niezmiennym w czasie, tzn. stałych nacisków koła na szynę, określonych w punkcie 2 niniejszego opracowania, tzn. 125 kN/koło z uwzględnieniem konfiguracji osi węglarek Falns Va; układ tych sił porusza się ze stałą prędkością 120 km/h;
2. Druga funkcja ugięcia wynika ze zmiennych sił, których amplituda wynosi 75 kN/koło, a częstotliwość zmian wynika z płaskich starć i jest określona na podstawie prędkości ruchu pociągu, tzn. 120 km/h i średnicy koła taboru – konfiguracja osi jest taka sama jak w przypadku pierwszej funkcji ugięcia.

Po wyznaczeniu linii ugięcia szyny będzie analizowane ugięcie podkładu oraz stan naprężeń w poszczególnych elementach nawierzchni. Linia ugięcia podkładu będzie wyznaczona przy quasi-statycznym obciążeniu podkładu, siłami Q_p , rozłożonymi na szerokości stopki szyny. Wartość siły Q_p zostanie

określona na podstawie maksymalnego ugięcia szyny i sztywności podłoża. Naprężenia w elementach nawierzchni będą wyznaczone z klasycznych formuł, np. naprężenie zginające w stopce szyny będzie wyznaczone z dynamicznej linii ugięcia szyny.

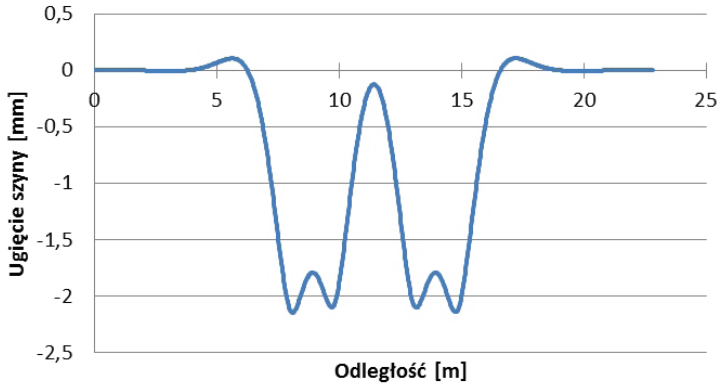
3.2. Parametry modelu nawierzchni

Do obliczeń przyjmujemy następujące wartości parametrów modelu:

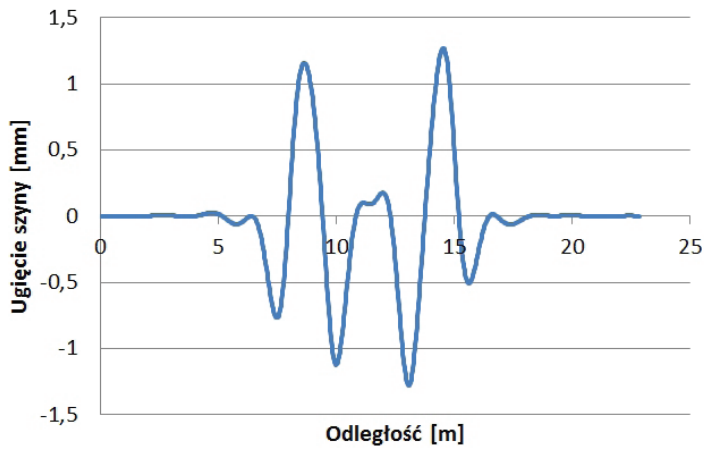
1. Szyna: 49E1 (moment bezwładności $I = 1815 \text{ cm}^4$, siła osiowa w szynie: $N_i = 759,9 \text{ kN}$ (odpowiednik przyrostu temperatury szyny o 50°C), masa jednostkowa: $m_r = 49 \text{ kg/m}$;
2. Przytwierdzenie typu SB: sztywność pionowa: $k_r = 85,1 \text{ MN/m}$, $c_r = 2230 \text{ Ns/m}$ (wartości określone na podstawie badań laboratoryjnych, przeprowadzonych przez Politechnikę Krakowską [5,5a]);
3. Podkład: strunobetonowy typu PS-93; długość $2,6 \text{ m}$, moment bezwładności w strefie podszynowej $I_{sz} = 18\,232 \text{ cm}^4$, w strefie środkowej $I_m = 8883,7 \text{ cm}^4$, wskaźnik wytrzymałości w strefie podszynowej $W_{szg} = 1905,12 \text{ cm}^3$, $W_{szd} = 2\,162,75 \text{ cm}^3$, w strefie środkowej $W_{mg} = 775,19 \text{ cm}^3$, $W_{md} = 894,63 \text{ cm}^3$, moduł Younga: $E_p = 37000 \text{ MPa}$, masa: 305 kg ;
4. Podsypka i podtorze: sztywność jednostkowa: $F_b = 115 \text{ MN/m}^3$, tłumienie: $c_b = 42000 \text{ Ns/m}^2$ (wartość wyznaczona w pracy Politechniki Krakowskiej [5]);
5. Obciążenie: cztery osie węglarki (2 wózki sąsiednich wagonów) o konfiguracji: $1,8 \text{ m}$; $3,24 \text{ m}$; $1,8 \text{ m}$; obciążenie stałe: 125 kN/koło ; obciążenie zmienne: amplituda 75 kN , częstość kołowa przy $v = 33,33 \text{ m/s}$, $\omega = 72,46 \text{ rad/s}$ ($\omega = 2\pi v / 2\pi r_k$ [rad/s]; gdzie v [m/s] – prędkość pociągu, $r_k = 0,46 \text{ m}$ – promień koła pojazdu);
6. Parametry sterujące: rozkład obciążenia w przedziale $[0; 22,4] \text{ m}$, liczba współczynników szeregu Fouriera: $n = 3000$.

3.3. Linie ugięcia szyny

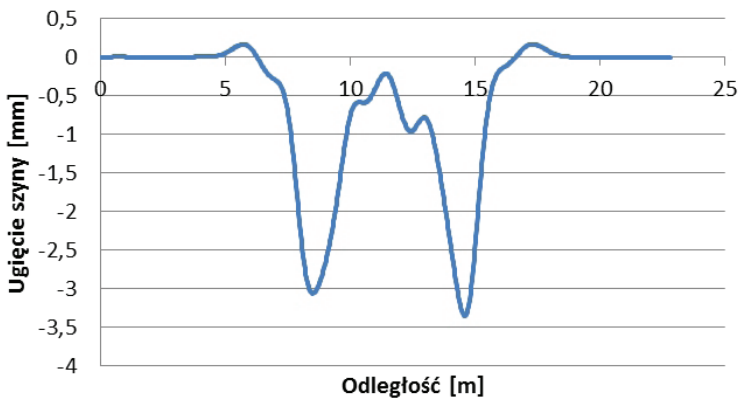
Na rysunku 1 przedstawiono linię ugięcia przy obciążeniu siłami niezmiennymi w czasie, a na rys. 2 linię ugięcia przy obciążeniu zmiennym (odpowiadającym oddziaływaniu płaskich starć kół – wszystkie koła są w tej samej fazie, tzn. oddziałują jednocześnie). Na rys. 3. pokazano dynamiczną (sumaryczną) linię ugięcia.



Rys. 1. Linia ugięcia szyny 49E1 pod obciążeniem siłami niezmiennymi w czasie



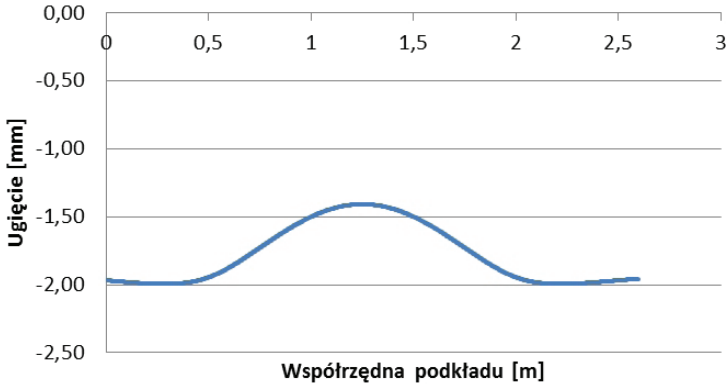
Rys. 2. Linia ugięcia szyny 49E1 przy oddziaływaniu wagonu z płaskimi starciami kół



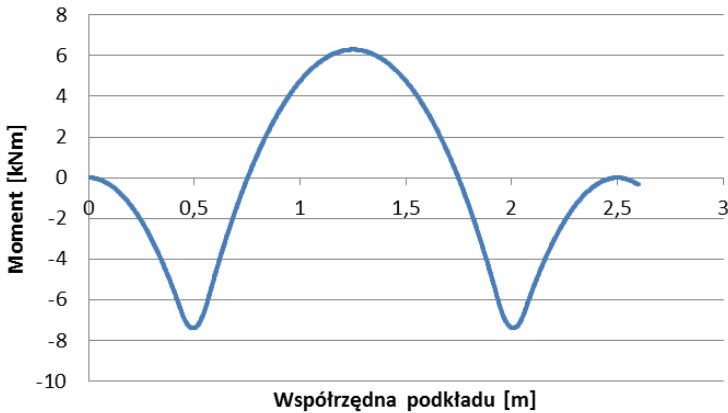
Rys. 3. Dynamiczna linia ugięcia dla szyny 49E1

3.4. Ugięcie podkładu, momenty zginające i naprężenia w poszczególnych elementach nawierzchni

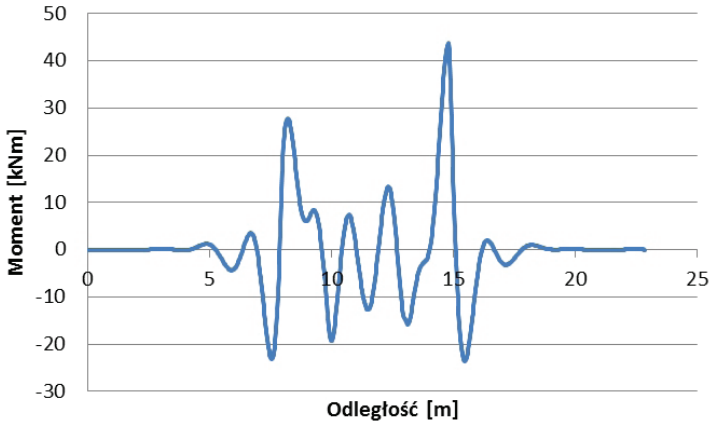
Linie ugięcia podkładu pod maksymalną wartością siły pokazano na rys. 4, przebieg momentów zginających w podkładzie na rys. 5, a linię momentów zginających szyną na rys. 6. W odniesieniu do podkładu obliczenia przeprowadzono dla przekroju środkowego (najłabszego – jest tutaj dodatkowy współczynnik bezpieczeństwa).



Rys. 4. Linia ugięcia podkładu PS-93 z szyną 49E1



Rys. 5. Linia momentu zginającego w podkładzie PS-93 z szyną 49E1



Rys. 6. Moment zginający w szynie 49E1

Na podstawie dynamicznej linii ugięcia szyny, ugięcia podkładu oraz linii momentów zginających szynę i podkład w płaszczyźnie pionowej możemy wyznaczyć maksymalne wartości naprężeń w elementach nawierzchni i podtorza:

- a) maksymalne naprężenie ściskające w szynie (suma naprężenia termicznego i zginającego w główce szyny) – $\sigma_{rs} = 120,5 \text{ MPa} + 176,7 \text{ MPa} = 297,2 \text{ MPa}$;
- b) maksymalne naprężenie rozciągające w stopce szyny – $\sigma_{rr} = 176,7 \text{ MPa}$;
- c) maksymalne naprężenie pod przekładką podszynową: $\sigma_{pz} = 79,3 \text{ kN} / (0,125\text{m} \cdot 0,16\text{m})$ – powierzchnia dolna przekładki podszynowej dla szyny 49E1, $\sigma_{pz} = 3,97 \text{ MPa}$;
- d) maksymalne naprężenie zginające w podkładzie (górne oszacowanie, przy przyjęciu stałego przekroju poprzecznego, odpowiadającego najszlubszeemu przekrojowi środkowemu $I_m = 8883,7 \text{ cm}^4$): $\sigma_{sg} = 10,04 \text{ MPa}$ – obliczona wartość jest istotnie zawyżona i ma charakter orientacyjny, podkład został zaprojektowany z uwzględnieniem wszystkich możliwych obciążeń eksploatacyjnych;
- e) maksymalne naprężenie w podsypce (pod podkładem): $\sigma_b = 0,269 \text{ MPa}$;
- f) maksymalne naprężenie przekazywane na podtorze (pod podsypką, przy założeniu rozkładu naprężeń pod podkładem pod kątem 30°): $\sigma_f = 0,115 \text{ MPa}$.

Wszystkie wartości naprężeń – jako maksymalne, krótkotrwałe, przy wprowadzonych współczynnikach bezpieczeństwa – należy uznać za dopuszczalne. W szczególności dotyczy to naprężeń w podsypce i podtorzu. Jeśli wziąć pod uwagę także oddziaływania wzdłużne i poprzeczne do osi toru, to nastąpi wzrost naprężeń maksymalnych, głównie w szynach. Łatwo pokazać, że maksymalne wartości tych naprężeń w szynach nie przekroczą 400 MPa , co należy uznać za wartości dopuszczalne.

4. Praca nawierzchni w kierunku wzdłużnym

4.1. Model nawierzchni kolejowej i obciążenia

Za [1] przytoczymy podstawowe informacje, dotyczące modelu dynamicznego nawierzchni i obciążenia, przyjmując jednowarstwowy model. Zakładając symetrię właściwości obciążenia i podłoża względem punktu $x = 0$, podstawowy model liniowy przemieszczeń wzdłużnych szyn $u(x)$ opisuje równanie:

$$EA \cdot \frac{d^2 u}{dx^2} - k_o u = -\theta \quad \text{gdy } x \leq l_t \quad (6a)$$

$$EA \cdot \frac{d^2 u}{dx^2} - k_o u = 0 \quad \text{gdy } x > l_t \quad (6b)$$

gdzie:

- szywność wzdłużna szyn: EA [N], gdzie E – moduł Younga stali szynowej [MN/m²], A – pole powierzchni dwóch szyn [m²];
- podłoże szyny: sprężyste, jednostkowa szywność wzdłużna k_o [kN/m²];
- obciążenie: jednostkowa siła hamowania θ [kN/m] na długości $2l_t$ (obliczane jako $\theta = q\mu$, gdzie q – obciążenie pionowe [kN/m], μ – współczynnik intensywności hamowania).

Szywność k_o należy wyliczyć na podstawie danych doświadczalnych: k_f [N/m²] = $2ks$, gdzie ks – szywność wzdłużna jednego przytwierdzenia; k_b [N/m²] – szywność przy przesuwaniu podkładu w podsypce wzdłuż osi toru, według wzoru:

$$\frac{1}{k_o} = \frac{1}{k_f} + \frac{1}{k_b} \quad (7)$$

Oznaczając:

$$\beta = \sqrt{\frac{k_o}{EA}} \quad [1/m], \quad (8)$$

rozwiązanie ma postać:

$$u(x) = \frac{\theta}{k_o} \cdot \left(1 - \frac{ch\beta x}{sh\beta l_t + ch\beta l_t} \right) \quad \text{dla } |x| \leq l_t \quad [m] \quad (9a)$$

$$u(x) = \frac{\theta}{k_o} \cdot \frac{sh\beta l_t}{sh\beta l_t + ch\beta l_t} \cdot e^{-\beta(x-l_t)} \quad \text{gdy } x > l_t \quad [m] \quad (9b)$$

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

Uogólnieniem jest dynamiczny model podłoża, w którym występuje dodatkowo masa toru m_t i tłumienie c_t . Wtedy równanie (4.1) przyjmuje postać:

$$EA \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - m_t \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - c_t \cdot \frac{\partial u}{\partial t} - k_o u = -\theta(x, t) \quad (10)$$

Analiza równania (10) pokazuje, że – dla typowych parametrów nawierzchni i obciążenia, w zakresie prędkości pociągów do około 200 km/h - rozwiązanie (9) jest wystarczające dla oszacowania zachowania się konstrukcji w aplikacjach inżynierskich.

Jak już wspomniano w rozdziale 2 opracowania, za spełnienie kryterium odporności (wytrzymałości) badanej konstrukcji nawierzchni na obciążenia wzdłużne przyjmiemy niedopuszczenie do wystąpienia trwałych przemieszczeń szyn względem podkładów. Mając zatem daną linię przemieszczeń wzdłużnych szyny oraz sztywności wzdłużne przytwierdzeń i ruchu podkładu w podsypce, możemy wyznaczyć maksymalną różnicę przemieszczenia szyny względem podkładu:

$$u_r - u_p = u_r \cdot \frac{k_b}{k_f + k_b} \leq u_{lim} \quad (11)$$

gdzie: k_p, k_b – jak we wzorze (7), u_r, u_p – przemieszczenia wzdłużne szyny i podkładu, u_{lim} – graniczna wartość przemieszczenia szyny w przytwierdzeniu, tzn. takie przemieszczenie, które powoduje pokonanie oporu granicznego przytwierdzenia.

Zakładamy – z korzyścią dla oceny bezpieczeństwa pracy konstrukcji - że obciążenie pionowe nie wpływa na sztywność wzdłużną w przytwierdzeniu i podsypce.

Jako model obciążenia przyjmujemy jednostkową siłę wzdłużną θ , która działa na długości pociągu $2l_t$. Siła wzdłużna $\theta = \mu q$, gdzie q – jednostkowy ciężar pociągu na długości $2l_t$, μ – współczynnik intensywności hamowania. Założymy ponadto, że – na odcinku hamowania – występuje pochylenie podłużne o wartości dopuszczalnej dla linii, po których poruszają się ciężkie pociągi towarowe.

4.2. Parametry modelu

Do przeprowadzenia obliczeń przyjmujemy następujące wartości parametrów:

1. Nawierzchnia: szyny 49E1 (pole powierzchni przekroju poprzecznego dwóch szyn 125,84 cm²), rozstaw podkładów $l_s = 0,6$ m, przytwierdzenie typu SB: sztywność wzdłużna $k_s = 4200$ kN/m (sztywność dla jednego przytwierdzenia, określona w warunkach laboratoryjnych [5a]); graniczne przemieszczenie: $u_{lim} = 3,5$ mm [5a], sztywność przy przemieszczaniu wzdłużnym podkładu w podsypce: $k_b = 6000$ kN/m² (por.[1]). Zakładamy, że na odcinku hamowania występuje pochylenie niwelety 1,25%
2. Obciążenie: pociąg, złożony z węglarek typu Falns 441Va – przy nacisku osi $Q = 250$ kN, na długości $2l_t = 1050$ m, uzyskamy: $q = 74,96$ kN/m, co – przy intensywności hamowania na poziomie $\mu = 0,25$ – daje jednost-

kową siłę wzdłużną $\theta = 18,74 \text{ kN/m}$. Z uwagi na występujące pochylenie podłużne siłę tę należy zwiększyć o 1,25% ciężaru jednostkowego pociągu, czyli o wartość $0,937 \text{ kN/m}$.

4.3. Wyznaczenie maksymalnych przemieszczeń szyny i podkładu

Sztywność wzdłużna przytwierdzeń na 1 metr bieżący toru wynosi:

$$k_f = 2 \cdot (4200 \text{ kN/m}) / 0,6 \text{ m} = 14000 \text{ kN/m}^2.$$

Wyznaczając ze związku (7) sztywność zastępczą toru, z równania (9) wyznaczamy maksymalne przemieszczenie szyny $u_r = 4,69 \text{ mm}$. Ze związku (11) uzyskamy:

$$u_r - u_p = 4,69 \text{ mm} \cdot \frac{6000 \text{ kN/m}^2}{(14000 + 6000) \text{ kN/m}^2} = 1,41 \text{ mm} \leq u_{\text{lim}} = 3,5 \text{ mm}$$

a więc kryterium (11) także w tym przypadku jest spełnione.

5. Analiza oddziaływań w kierunku poprzecznym do osi toru

5.1. Model nawierzchni kolejowej i obciążenia

W odniesieniu do obciążeń użytkowych przyjmujemy ten sam model dynamiczny co w przypadku analizy obciążeń pionowych, z tym, że:

1. Obciążenie przyłożone jest tylko do jednej szyny;
2. W analizie przyjmujemy belkę zastępczą o sztywności zginania równej sumie sztywności dwóch szyn. Opory obrotu szyny w przytwierdzeniu są uwzględnione w sposób, wynikający z analizy rusztu torowego jako ramy o podatnych węzłach (por. [1]), tzn. poprzez redukcję siły osiowej w szynie;
3. W obliczeniach wykorzystamy dynamiczną linię ugięcia, uzyskaną na podstawie analizy obciążeń pionowych; statyczny opór poprzeczny podsypki będzie zwiększony o wartość, wynikającą z nacisku szyny na podkład, pomnożonego przez współczynnik tarcia podkładu o podsypkę przy ruchu podkładu w kierunku poprzecznym do osi toru [1].

5.2. Parametry modelu

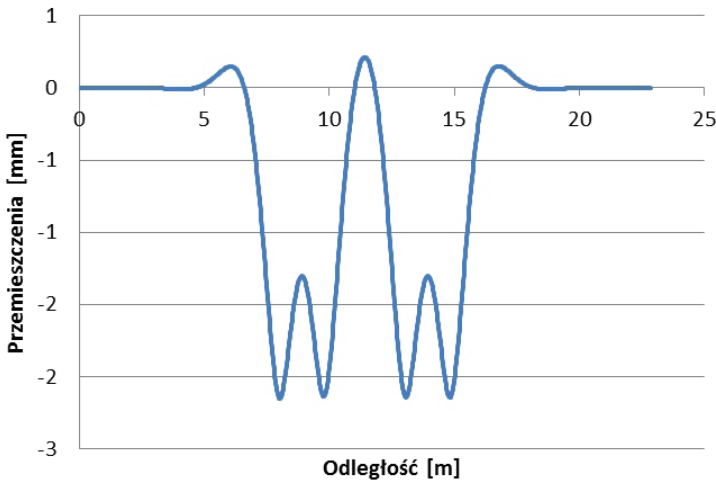
Do obliczeń przyjmujemy następujące wartości parametrów:

1. Szyna: 49E1- pole powierzchni przekroju poprzecznego podano w rozdziale 3.2 opracowania, a moment bezwładności w kierunku poprzecznym $I_v = 320 \text{ cm}^4$;
2. Parametry przytwierdzenia w kierunku poprzecznym do osi toru – pominięto sztywność poprzeczną (przyjęto, że jest ona istotnie wyższa niż opór poprzeczny podsypki);

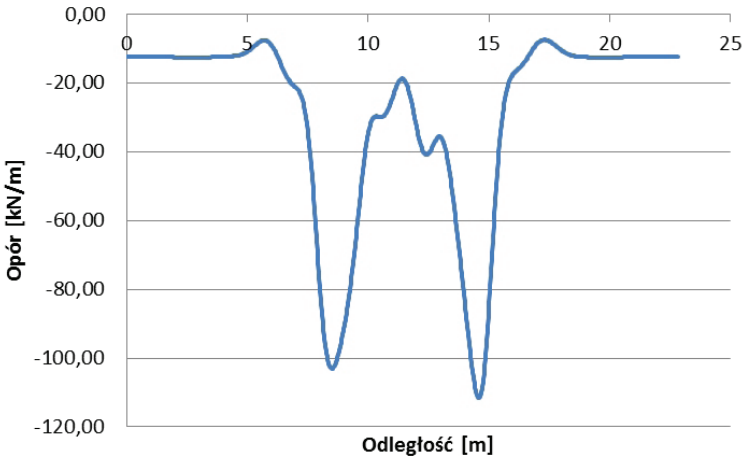
3. Parametr oporu obrotu w przytwierdzeniu typu: $\rho = 114,5$ kN/rad dla jednego przytwierdzenia [5a];
4. Parametry oporu ruchu w kierunku poprzecznym do osi toru: sztywność przy obciążeniu poziomym $k_b = 26670$ kN/m², współczynnik tarcia $f = 0,78$, statyczny opór graniczny $r_o = 12,4$ kN/m (por. [1,5,6]) – graniczne przemieszczenie poprzeczne $v_{lim} = (r_o + qf)/k_b$, q – jednostkowe obciążenie pionowe kN/m;
5. Obciążenie: cztery siły nieoscyłujące w czasie, o wartości $Y = 75$ kN, konfiguracja osi - jak w analizie obciążeń pionowych.

5.3. Linie przemieszczeń szyny przy obciążeniu mechanicznym i wyznaczenie oporu granicznego podsypki

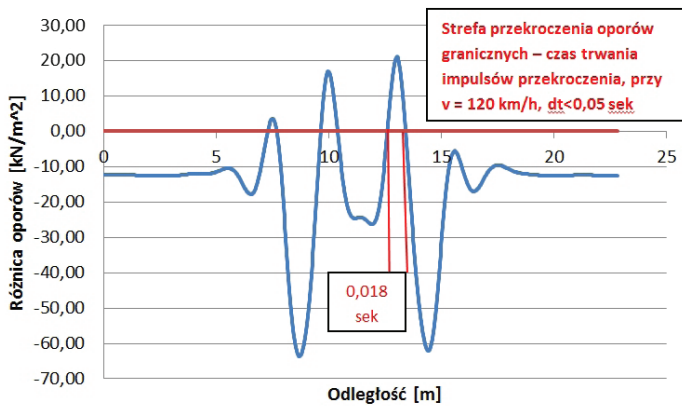
Linie przemieszczeń poziomych szyny przedstawiono na rys. 7. Na rys. 8 pokazane są opory graniczne podsypki, z uwzględnieniem oporu statycznego oraz tarcia, wynikającego z obciążenia pionowego. Porównanie oporów granicznych z oporami, wynikającymi z oddziaływań pionowych, przedstawiono na rys. 9. Impulsy, obrazujące przekroczenie granicznych oporów przez opory, wynikające z oddziaływań poziomych, należy odnieść – dla danej prędkości – do czasu trwania tych impulsów. Jeśli czasy te są mniejsze od około 0,05 sek., to przemieszczenie trwałe ramy torowej nie wystąpi. Jak widać w przypadku obu szyn warunek ten jest spełniony, co oznacza, że tor jest odporny na oddziaływania poprzeczne.



Rys. 7. Linia przemieszczeń poziomych dla szyny 49E1



Rys. 8. Graniczny opór poprzeczny podsypki dla szyny 49E1



Rys. 9. Porównanie oporu granicznego z oporem wynikającym z przemieszczeń poziomych dla szyny 49E1

6. Podsumowanie

Przeprowadzona w opracowaniu analiza wskazuje, że tor z szynami 49E1 na podkładach betonowych typu PS-93 z przytwierdzeniami typu SB, spełnia wymagania TSI w zakresie wytrzymałości (odporności) na oddziaływania pionowe i poziome: wzdłużne i poprzeczne do osi toru. Model ten wymaga doskonalenia, a w szczególności niezbędne jest zbadanie odporności toru na oddziaływania przy przejeździe pociągów dużych prędkości, co jest obecnie badane przez autorów opracowania.

Bibliografia

- [1] Czyczuła W., Tor bezstykowy. Książka akademicka, wyd. Politechniki Krakowskiej, Kraków 2002 r.
- [2] Czyczuła W., Koziol P., Kudła D, Lisowski S., Analytical evaluation of track response in vertical direction due to moving load. *Journal of Vibration and Control* (w druku).
- [3] Rozporządzenie Komisji UE nr 1299/2014 z dnia 18 listopada 2014 r. dotyczące technicznych specyfikacji interoperacyjności podsystemu „Infrastruktura” systemu kolei w Unii Europejskiej;
- [4] PN-EN 14363: Kolejnictwo – Badania właściwości dynamicznych pojazdów szynowych przed dopuszczeniem do ruchu. Badanie właściwości biegowych i próby stacjonarne. PKN, Warszawa 2007 r.
- [5] Nawierzchnia kolejowa o podwyższonym standardzie i zmniejszonym oddziaływaniu na środowisko. Praca zbiorowa pod redakcją W. Czyczuły. Projekt rozwojowy nr 10-0004-10/2010, sprawozdanie merytoryczne z realizacji projektu, Politechnika Krakowska, Kraków 2013 r.
- [5a] Badanie węzłów przytwierdzenia szyny do podkładu strunobetonowego (węzłów mocujących) SB zgodnie z normą PN-EN 13146-2:2012. Politechnika Krakowska, Laboratorium Materiałów i Konstrukcji Budowlanych, Kraków 2015 r.
- [6] Lateral Resistance Tests, ERRI D 202/DT 360, Utrecht, October 1997 r.
- [7] Korespondencja email i prace niepublikowane (J. Sołkowski, TU-Mun-chen i inne, 2012-2016).