

## ANALIZA WPLYWU WYBRANYCH IMPERFEKCJI PODŁOŻA SZYNOWEGO NA UGIĘCIA SZYNY BEZSTYKOWEGO TORU KOLEJOWEGO<sup>1</sup>

Włodzimierz Andrzej BEDNAREK

Politechnika Poznańska, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska

W pracy poddano statycznej analizie wybrane imperfekcje podłoża szynowego powodujące dodatkowe ugięcia szyny bezstykowego toru kolejowego. Do takich imperfekcji zaliczono następujące czynniki:

- brak kontaktu toru kolejowego z podłożem,
- nacisk koła na lokalnej nierówności podłoża,
- przejazd koła taboru w obrębie styku szyn,
- zmiana sztywności podparcia mająca wpływ na ugięcia szyny bezstykowego toru kolejowego.

Zwrócono również uwagę, że źródłem niekorzystnych, dodatkowych ugięć są inne czynniki, np. praca bezstykowego toru kolejowego spoczywającego na lokalnych nierównościach podłoża czy charakter współpracy koła z szyną. Przeprowadzona analiza wskazała na znaczenie niekorzystnego wpływu wybranych czynników na pracę bezstykowego toru kolejowego (np. zwiększenie długości braku kontaktu toru z podłożem czy powstające dodatkowe ugięcia szyny toru kolejowego). W pracy zwrócono uwagę, że takie imperfekcje, oprócz obliczonych dodatkowych ugięć, powodują m. in. zaburzenia ruchu postępowego taboru kolejowego.

W pracy szczególny nacisk położono na unaocznienie wpływu poszczególnych czynników na pracę szyny bezstykowego toru kolejowego, poprzez zamieszczenie w artykule odpowiednie zdjęcia, rysunki i wykresy otrzymane z przeprowadzonych obliczeń. W pracy podano odwołania do odpowiednich publikacji, w których w sposób wyczerpujący zawarto tok teoretycznej analizy rozważanych zagadnień.

Słowa kluczowe: tor bezstykowy, imperfekcje w torze, niejednorodność podłoża szynowego, dodatkowe ugięcia szyny.

### 1. WPROWADZENIE

Stan, ukształtowanie i położenie toru kolejowego, opisywane za pomocą parametrów geometrycznych, ulega stopniowej zmianie podczas eksploatacji, co pokazano na rysunku 1 [1,4,7,8,9,11,16]. Powstające w nim imperfekcje, najczęściej rozumiane jako niedoskonałości, nierówności czy niejednorodności, można podzielić na następujące obszary zagadnień [2,3,4,9,10,12]:

---

<sup>1</sup> DOI 10.21008/j.1897-4007.2017.25.02

- nierówności w torze kolejowym i podtorzu,
- obszary braku kontaktu toru z podłożem,
- zróżnicowania charakterystyk podparcia toru wskutek nierównomiernego osiadanania podsypki w czasie eksploatacji,
- zużycia poszczególnych elementów toru kolejowego,
- błędy projektowania, napraw czy wykonania przez człowieka,
- odkształcenia zwłaszcza w strefie tzw. *slabego podtorza* czy występowania w podtorzu gruntów wysadzinowych.



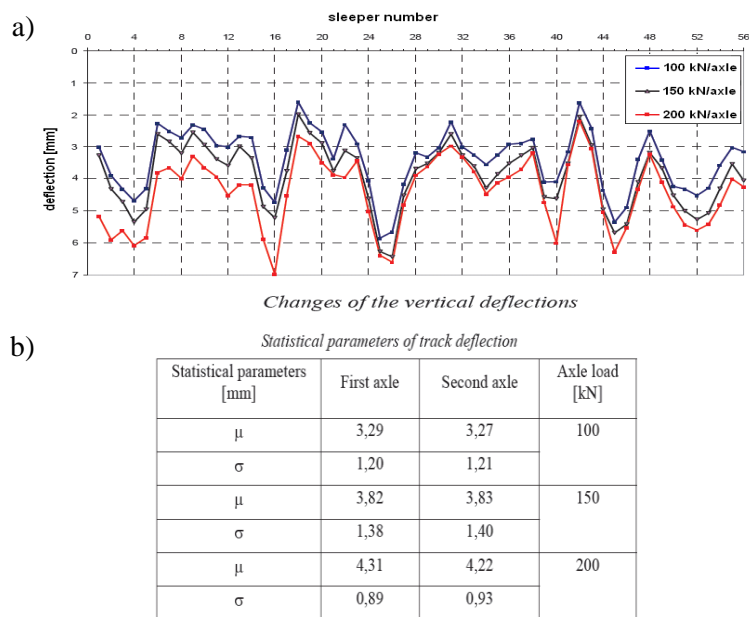
Rys. 1. Przykładowe deformacje nawierzchni kolejowej i jej elementów

Postępująca degradacja nawierzchni kolejowej podczas jej eksploatacji opisywana jest m.in. poprzez pomiary, obrazujące rezultaty pionowych ugięć (np. podczas przejazdu wagonów po torze w złym stanie utrzymania). W rzeczywistym torze kolejowym wskutek jego eksploatacji dochodzi do zmian ugięć toru (odniesionych nawet do sąsiednich podkładów). W pracy [11] wykonano pomiary wartości ugięć pionowych toru (podczas wielokrotnych przejazdów składu kolejowego). Osie wagonów wywierały sukcesywne naciski o wartościach: 100, 150 i 200 kN, w zależności od stopnia wypełnienia testowych wagonów. Ugięcia toru mierzono na długości 66,6 m, na której występowało 111 podkładów (z czego 56 poddano ocenie). Wyniki pomiarów przedstawiono na rysunku 2 [11].

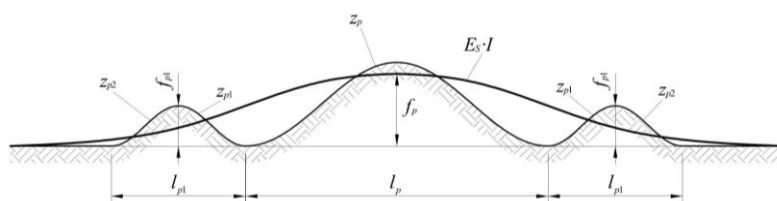
Na rysunku 2 wyraźnie widać, że wartości ugięć na długości badanego odcinka są bardzo zróżnicowane – od 2 do aż 7 mm (ze względu na: zły stan toru, brak odpowiedniego podparcia niektórych podkładów – luki pod podkładami). Uzyskane wyniki obrazują znaczący wpływ postępującej degradacji nawierzchni kolejowej, prowadzącej do zwiększonych ugięć czy naprężeń we współpracujących ze sobą elementach nawierzchni kolejowej.

Otrzymane wartości pomierzonych ugięć w płaszczyźnie pionowej (rys. 2a), obrazują powstawanie różnej postaci kontaktu podkładu z warstwą podsypki. Sztywność toru w stanie nieobciążonym (bez nacisków od pojazdów) powoduje, że podkłady w różnym stopniu opierają się zatem na podsypce. W najbardziej niekorzystnym przypadku może wystąpić zupełny brak kontaktu podkładu z podsypką

(co pokazano schematycznie na rysunku 3). Takie obszary braku kontaktu toru z podłożem podsypkowym są szczególnie niebezpieczne, np. dla stateczności toru bezстыkowego w okresie letnim [1,4,5,6,17].



Rys. 2. Ugięcia toru pod wpływem sukcesywnej zmiany obciążenia [11] a) wyniki ugięć podkładów po długości toru; b) wartości statystyczne uzyskanych pomiarów ugięć



Rys. 3. Schemat obliczeniowy dla trzech nierówności podłoża [4] a) schemat trzech nierówności podłoża; gdzie:  $f_p$  – strzałka nierówności podłoża;  $l_{pi}$  – długość nierówności podłoża;  $z_{pi}$  – postać nierówności podłoża;  $E_s I$  – sztywność toru

Jak widać z rysunku 3 powstające podczas eksploatacji nierówności podłoża powodują zmianę podparcia toru. W pracy [4] wskazano, że przy zwiększeniu liczby nierówności podłoża następuje sukcesywne zwiększenie braku kontaktu toru z podłożem (powstaje w ten sposób podparcie, które można nazwać *jako podparcie punktowe toru* oraz efekt „wiszącego podkładu”). W przypadku kilku nierówności podłoża [4] następuje znaczące zwiększenie długości braku kontaktu toru z podłożem, co szczególnie niekorzystnie wpływa na jego pracę w płaszczyźnie poziomej w okre-

się wysokich temperatur. W toku dalszych rozważań przedstawiono analizę nacisku koła na takiej lokalnej nierówności podłoża.

## 2. ANALIZA STATYCZNA BEZSTYKOWEGO TORU KOLEJOWEGO WSKUTEK LOKALNYCH NIERÓWNOŚCI PODŁOŻA

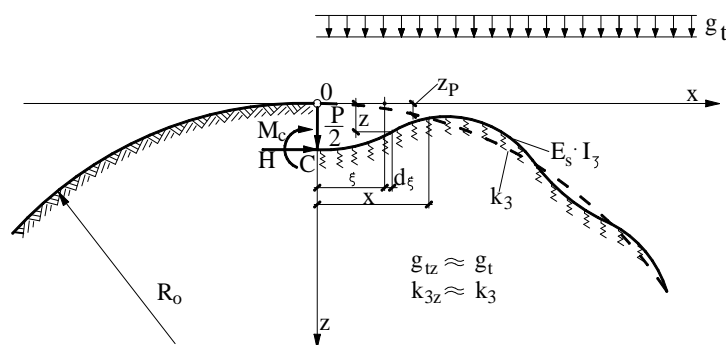
W torze nieobciążonym trudno ocenić skutki miejscowych nierówności podłoża dla pracy toru kolejowego w płaszczyźnie pionowej. Zmieniający się sposób podparcia toru można opisać dopiero w torze obciążonym (rys. 2a), po przyłożeniu nacisku pochodzącego np. od osi lokomotywy. Powstające imperfekcje podłoża szynowego są źródłem dodatkowych ugięć i naprężeń szyny pod obciążeniem użytkowym [4,9,10,18]. Takie imperfekcje mają charakter losowy i niezamierzony.

### 2.1. Nacisk koła na lokalnej nierówności

Do czynników zaburzających prawidłowy kontakt toru z podłożem można zaliczyć:

- wpływy drgań i wstrząsów wywoływanych przez przejeżdżający tabor,
- lokalne podniesienie toru od nacisku osi pojazdu na odcinku niezerównoważenia sprężystej reakcji podłoża przez jednostkową siłę masową toru,
- mimośrodowe działanie poziomej reakcji podłoża na toki szynowe, powodujące miejscowe ugięcie i podniesienie toru w górę [18].

Szczegółnej analizie poddane zostanie zagadnienie nacisku koła na lokalnej nierówności. Rozpatrując układ przedstawiony na rysunku 4, w którym tor jako ważki pręt o jednostkowej sile masowej ( $g_t \neq 0$ ) i sztywności na zginanie w płaszczyźnie pionowej  $E_s I_\xi$ , spoczywający na wygiętym do krzywizny  $1/R_0$  sprężystym podłożu, obciążony jest przez oś pojazdu siłą  $P$ , oraz ściskającą podłużną siłą  $H$  od zmian temperatury (pomija się wpływ oddziaływań poziomej reakcji podłoża) [3,17]. Podłoże sprężyste 1-parametrowe (typu *Winklera*) ma współczynnik sztywności  $k_3$  (po kierunku osi  $z$ ).



Rys. 4. Nacisk koła na lokalnej nierówności (przyjęty schemat obliczeniowy)

Szczegółowy tok wyprowadzenia i końcową postać wzorów zawarto w pracach [3,17]. Odształconą toru opisuje funkcja:

$$z(x) = \frac{P}{4 \cdot E_S \cdot I_\zeta} \cdot e^{-\varphi_1 \cdot x} \cdot \left( \frac{\sin(\varphi_2 \cdot x)}{\varphi_2^3 + \varphi_1^2 \cdot \varphi_2} + \frac{\cos(\varphi_2 \cdot x)}{\varphi_1^3 + \varphi_1 \cdot \varphi_2^2} \right) + \frac{x^2}{2 \cdot R_0} + \frac{g_t}{k_3} \cdot (1 - \rho), \quad (1)$$

przy czym:

$$\varphi_1 = \varphi \cdot \sqrt{1 - \frac{H}{H_K}}, \quad \varphi_2 = \varphi \cdot \sqrt{1 + \frac{H}{H_K}}, \quad (2a)$$

$$\varphi = \sqrt[4]{\frac{k_3}{4 \cdot E_S \cdot I_\zeta}}, \quad H_K = 2 \cdot \sqrt{k_3 \cdot E_S \cdot I_\zeta}, \quad \text{oraz} \quad \rho = \frac{H}{R_0 \cdot g_t}. \quad (2b)$$

Reakcja podłoża sprężystego dla odciętej  $x$  wynosi:

$$\begin{aligned} p(x) &= k_3 \cdot (z - z_p) = \\ &= \frac{P \cdot k_3}{4 \cdot E_S \cdot I_\zeta} \cdot e^{-\varphi_1 \cdot x} \cdot \left( \frac{\sin(\varphi_2 \cdot x)}{\varphi_2^3 + \varphi_1^2 \cdot \varphi_2} + \frac{\cos(\varphi_2 \cdot x)}{\varphi_1^3 + \varphi_1 \cdot \varphi_2^2} \right) + g_t \cdot (1 - \rho). \end{aligned} \quad (3)$$

Krzywizna szyny osiąga w punkcie o odciętej  $x = \frac{\pi}{\varphi_2}$  drugie ekstremum:

$$\frac{d^2 z}{dx^2} = \frac{P}{4 \cdot E_S \cdot I_\zeta \cdot \varphi_1} \cdot e^{-\frac{\varphi_1}{\varphi_2} \cdot \pi} + \frac{1}{R_0}. \quad (4)$$

Krzywizna ta osiąga w rzeczywistości większą wartość, ponieważ tor na skutek małej wartości siły masowej  $g_t$  może w okolicy tego punktu utracić kontakt z podłożem.

### 2.1.1. Przykład obliczeniowy.

Obliczenia wykonano dla jednego toku szynowego toru (szyny 60E1, podkłady drewniane, podsypka tłuczniowa).

Dla:  $g_t = 0,0013 MN/m$ ,  $P_{st} = 0,5 \cdot 0,22 MN = 0,11 MN$  (nacisk koła),  
 $\nu = 1,5376$  (współczynnik dynamiczny dla  $V = 160 km/h$ ),  $E_S \cdot A_S = 1614 MN$ ,  
 $E_S \cdot I_{\zeta S} = 6,4155 MNm^2$ ,  $k_3 = 21,67 MPa$  ( $C = 50 MN/m^3$ ),  $R_0 = 1000 m$ ,  $\Delta t = 53 K$ ,  
 $m = 1,15$ ,  $\alpha_t = 1,15 \cdot 10^{-5} 1/K$ ,  $H = m \cdot \alpha_t \cdot E_S \cdot A_S = 1,13 MN$ , otrzymano:

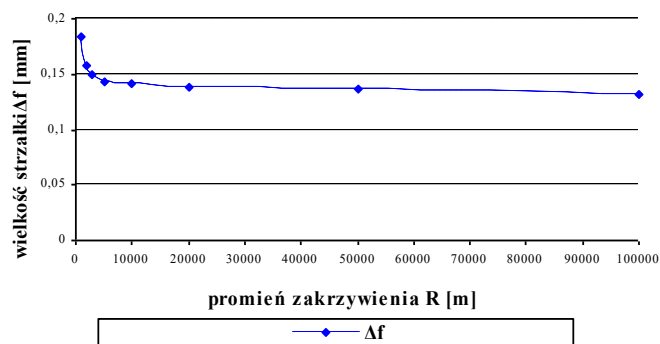
$x = \frac{\pi}{\varphi_2} = 3,20 m$ , strzałka podniesienia toru:  $f_{max} = -1,9205 \cdot 10^{-4} m$  oraz

$\Delta f = -1,9205 \cdot 10^{-4} + 7,845 \cdot 10^{-6} = -1,842 \cdot 10^{-4} m$  (utrata kontaktu). W tabeli 1 oraz

na rysunku 5, zawarto (dla przyjętych parametrów jak wyżej) wartości strzałki  $\Delta f$  dla różnych promieni zakrzywienia  $R$ .

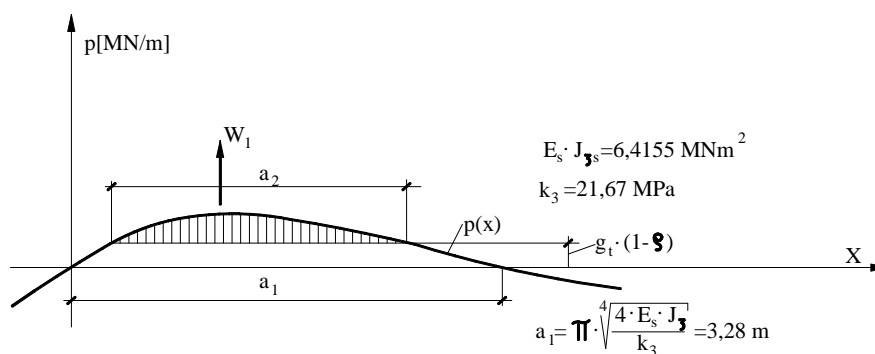
Tabl. 1. Wielkość strzałki  $\Delta f$  od  $R$  [m]

L.p.	$R$	$\Delta f$ [mm]
1	1000	-0,18409
2	2000	-0.15802
3	3000	-0.14933
4	5000	-0.14238
5	$\infty$	<b>-0.13195</b>



Rys. 5. Wartości strzałki analizowanej szyny  $\Delta f$  w zależności od promienia zakrzywienia podłoża  $R$

Zwiększenie lokalnej krzywizny toru można w przybliżeniu ocenić działając na tor siłą odciażającą  $W_1$ , będącą wypadkową oddziaływań na długości utraty kontaktu toru z podłożem (rys. 6):

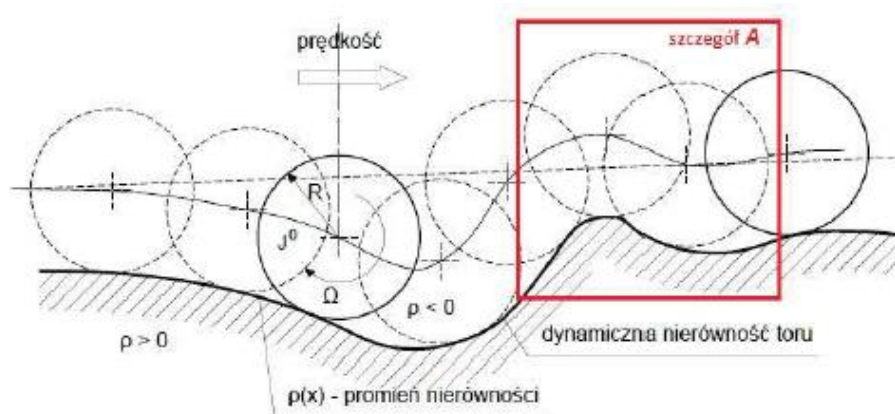


Rys. 6. Utrata kontaktu toru z podłożem na odcinku o długości  $a_2$  (dla przykładu obl. z p. 2.1.1)

Zjawisku utraty kontaktu toru z podłożem sprzyjają w tym przypadku wpływy dynamicznego oddziaływania taboru na tor. Wyróżnia się przy tym sytuacje charakterystyczne dla pracy toru przed i za pociągiem oraz między kolejnymi osiami pojazdów. Dochodzi w takich przypadkach do różnych kombinacji wpływów: podniesienia i drgań toru, dodatkowego działania sił ściskających od rozpędu i hamowania taboru, oddziaływań sił bocznych wywieranych przez pojazdy. Opisane wyżej zjawisko zakłóca równowagę ściskanego toru bezстыkowego w obrębie lokalnej nierówności podłoża. W warunkach dodatkowego zmniejszenia się oporu poprzecznego i podłużnego podsypki od drgań i wstrząsów spowodowanych ruchem taboru stwarza to okoliczności sprzyjające wyboczeniu toru (szczególnie w okresie letnim).

## 2.2. Zaburzenia ruchu postępowego taboru kolejowego wskutek powstających nierówności

Skutkiem deformującego się podłoża podsypkowego i toru kolejowego są np. zaburzenia ruchu postępowego taboru kolejowego wskutek powstających nierówności (co pokazano na rysunku 7) [13]. Podczas przejazdu koła przez obszar pionowej nierówności geometrycznej zaburzony zostaje ruch obrotowy koła, w rezultacie zmniejszający *trakcyjną efektywność koła* oraz wpływa na wydłużenie drogi środka koła [13]. Pojęcie *trakcyjnej efektywności koła* definiowane jest jako praktyczny stopień wykorzystania przyczepności, wynikającej z nacisków statycznych podczas eksploatacji [13]. Ruch pociągu po nierównościach występujących w torze może znacznie zmniejszać efektywność napędu i hamowania. Zaburzenia obrotowego ruchu koła podczas jazdy po nierównościach toru przy ustalonej prędkości ruchu środka koła wzdłuż toru prostego pokazano na rysunku 7 (szczegół A).



Rys. 7. Geometryczne wymuszenia zaburzenia obrotowego ruchu koła podczas jazdy po nierównościach toru przy ustalonej prędkości ruchu środka koła wzdłuż toru prostego [13]

Dla przypadku ruchu koła po torze nierównym sinusoidalnie (rys. 8) przyjęto [13]:

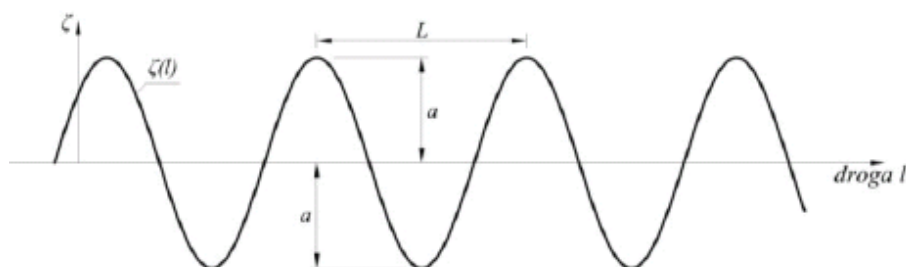
$$\zeta(l) = a \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{L} \cdot l + \vartheta\right), \quad (5)$$

gdzie:

$\vartheta$  – początkowy kąt obserwacji zjawiska [13], przyjęto  $\vartheta = 0$ ,

$a$  – amplituda nierówności

$L$  – długość fali nierówności.



Rys. 8. Tor nierówny sinusoidalnie

Prędkość zaburzeń ruchu obrotowego koła poruszającego się po nierówności harmoniczej wynosi [13]:

$$\Omega^* = -4 \cdot \frac{\pi^3}{L^3} \cdot \frac{v^2 \cdot a^2}{R_k} \cdot \sin\left(\frac{4 \cdot \pi}{L} \cdot l\right), \quad (6)$$

gdzie:

$a, l, L$  – jak na rysunku 8,

$v, R_k$  – odpowiednio prędkość i promień koła pojazdu.

Amplituda momentu harmonicznego przyspieszeń zaburzenia ruchu koła, o momencie masowym bezwładności  $J_k$  wynosi [13]:

$$|A_M^*| = J_k \cdot 4 \cdot \frac{\pi^3}{L^3} \cdot \frac{v^2 \cdot a^2}{R_k}$$

Moment przyczepności koła do szyny to:

$$M_\Psi = \Psi(t) \cdot Q \cdot R_k$$

W wyniku obliczeń porównawczych otrzymano:

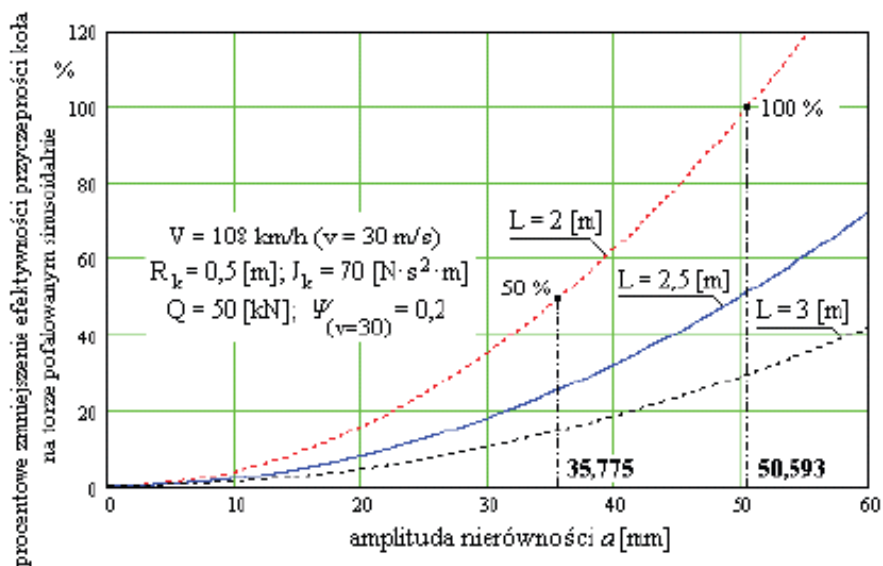
$$|A_M^*| = c \cdot M_\Psi,$$

gdzie:

$c$  – zmniejszenie efektywnego wykorzystania przyczepności koła na odkształconym torze [%].



Odształcenie toru opisane sinusoidą, powodujące zmniejszenie przyczepności koła z szyną, pokazano na rysunku 9:



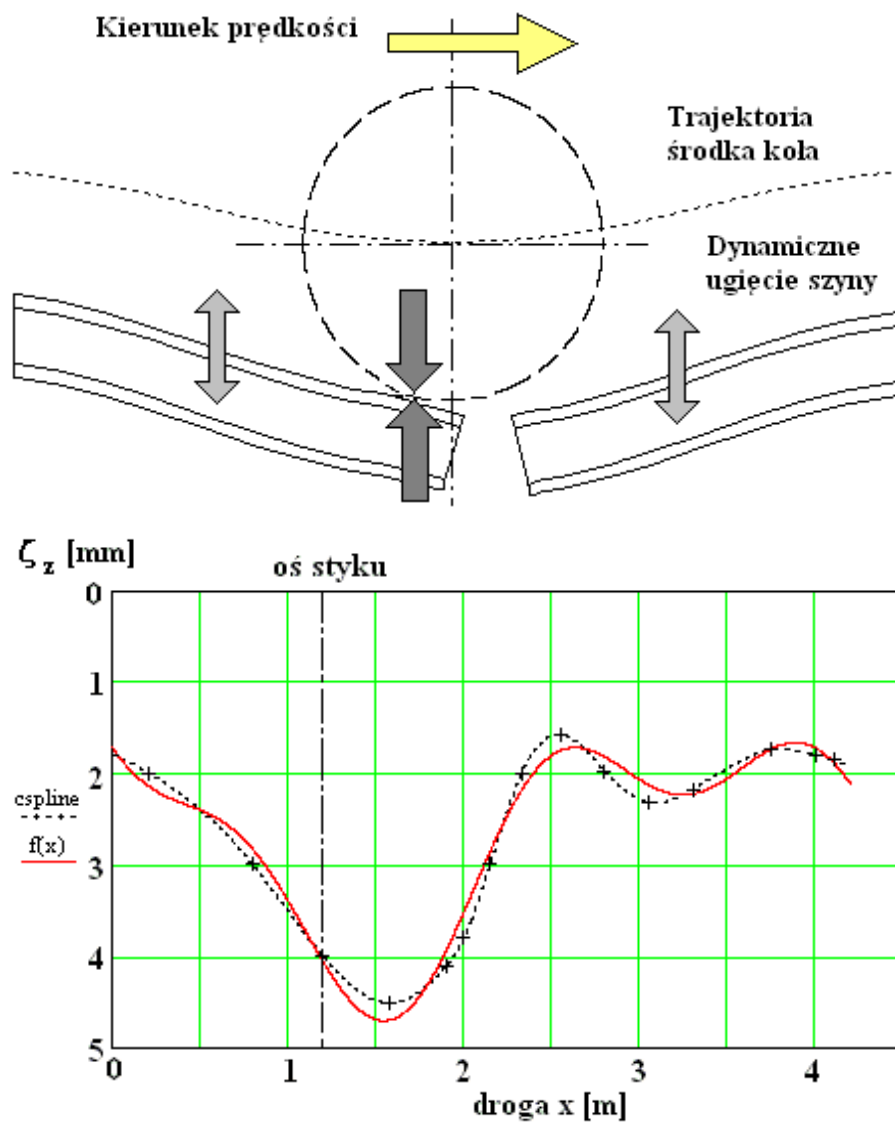
Rys. 9. Zmniejszenie efektywności przyczepności koła na nierównym torze [4]

Jak widać z rysunku 9, znaczne zmniejszenie efektywności przyczepności koła poruszającego się po torze nierównym sinusoidalnie następuje przy małej wartości długości fali nierówności (np.  $L=2 \text{ m}$ ) oraz towarzyszącej jej dużej wartości amplitudy nierówności ( $a$ ).

Analizowane zjawisko jest szczególnie ważne, ponieważ ruch koła po nierówności toru obniża efektywność trakcyjną jego rozruchu czy hamowania.

### 2.3. Zaburzenia ruchu koła w obrębie styku szyn

Kolejną imperfekcją spotykaną w eksploatowanym torze kolejowym jest powstający charakter zaburzenia ruchu koła w obrębie styku szyn (rys. 10) [13]. Powstające nierówności toru wydłużają drogę środka koła oraz zakłócają jego prędkość obrotową;  $\zeta_z(x)$  – współrzędna trajektorii środka koła (rys. 10).



Rys. 10. Charakter zaburzeń ruchu koła w obrębie styku szyn, powodujący zmianę ugięć szyny [13], gdzie:  $\zeta_z$  - współrzędna trajektorii środka koła

Wykorzystując wykres rzeczywistych współrzędnych trajektorii środka koła (linia przerywana na rysunku 10), można ją opisać wzorem (linia ciągła na rysunku 10):

$$\zeta_z(x) = 2,373663 + 0,097818 \cdot x - 1,274546 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot 0,227473 \cdot x) + 0,623465 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot 0,617415 \cdot x) + 1,572085 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot 0,267057 \cdot x) \quad (7)$$

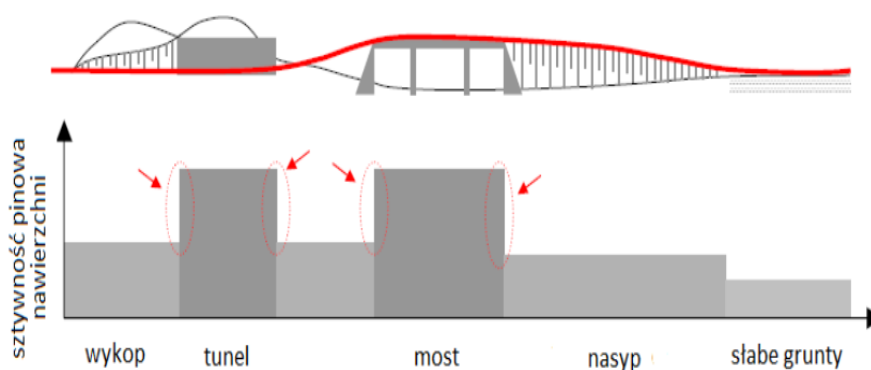
Wyniki obliczeń zwiększenia ugięć wskutek ruchu koła w obrębie styku szyn przedstawiono w tabeli 2 (wartość maksymalną zacięniowano).

Tabl. 2. Współrzędne trajektorii środka koła  $\zeta_z(x)$  od drogi  $x$

$x$ [m]	$\zeta_z(x)$ [mm]	$x$ [m]	$\zeta_z(x)$ [mm]
1	2	3	4
0,00	1,723	2,00	3,518
0,20	2,133	2,20	2,650
0,40	2,331	2,40	1,994
0,60	2,499	2,60	1,729
0,80	2,832	2,80	1,824
1,00	3,393	3,00	2,074
1,20	4,059	3,20	2,234
1,40	4,572	3,40	2,166
<b>1,54</b>	<b>4,701</b>	3,60	1,920
1,60	4,682	3,80	1,698
1,80	4,291	4,00	1,730

### 3. ANALIZA BRAKU KONTAKTU TORU Z PODŁOŻEM PODSYPKOWYM NA JEGO DŁUGOŚCI

Droga kolejowa jest budowlą, na którą składają się rzeczywiste odcinki linii kolejowej o zróżnicowanych rozwiązaniach konstrukcyjnych nawierzchni oraz podtorza, a także specjalne budynki, obiekty inżynieryjne i urządzenia przeznaczone do prowadzenia ruchu kolejowego [4,19]. Skutkiem tak zmieniającej się konstrukcji nawierzchni kolejowej na jej długości jest zaburzenie jednorodności podłoża, powodujące zmianę sposobu współpracy toru bezstykowego z podłożem Schemat niejednorodności konstrukcji drogi kolejowej przedstawiono na rysunku 11.



Rys. 11. Zróżnicowanie konstrukcji drogi kolejowej (zmiana podparcia) [19]

W rzeczywistym torze kolejowym dochodzi do powstawania różnej postaci jego kontaktu z podłożem (np. efekt *wiszącego podkładu* pokazany na rysunku 12). Dodatkowo analiza braku kontaktu toru z podłożem podsypkowym na jego długości jest prowadzona z uwzględnieniem następujących czynników:

- tor jako belka przedziałami spoczywająca na podłożu [4,14],
- zmienna wartość ściskającej siły osiowej w torze kolejowym [4],
- zmienna sztywność elementu toru kolejowego na jego długości (np. podkładu) [4],
- zmienne wartości parametrów podłoża [4,15] (rys. 12).

Obliczenia wpływu lokalnej zmiany sztywności podparcia toru w bezpośrednim otoczeniu strefy braku kontaktu na ugięcia szyny wykonano dla szyny 60E1. Do obliczeń metodą elementów skończonych [19] przyjęto 5 schematów obliczeniowych (pokazanych na rysunku 12), w których brak kontaktu pomiędzy torem a podsypką następuje na przyjętej długości  $d = 60$  cm. W obliczeniach przyjęto dwa przypadki lokalnej zmiany sztywności podparcia toru:

- zwiększenie podatności podłoża  $C$  ze  $100 \text{ MN/m}^3$  do  $120 \text{ MN/m}^3$ ,
- zmniejszenie podatności podłoża  $C$  ze  $100 \text{ MN/m}^3$  do  $C=80 \text{ MN/m}^3$ .

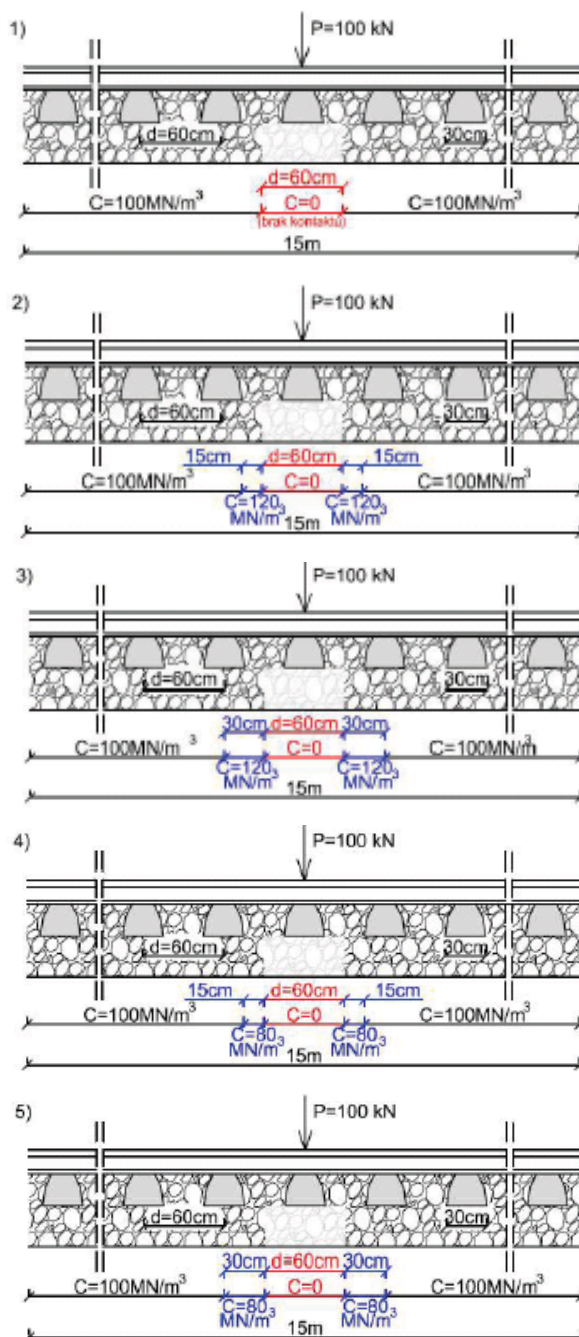
Przyjęto lokalną zmianę podatności podłoża zachodzącą na odcinku 15 cm oraz 30 cm. Schematy obliczeniowe przedstawiono na rysunku 12. Wyniki przeprowadzonych obliczeń zestawiono w tabeli 3.

Tab. 3. Wartości maksymalnych ugięć szyny (60E1) w zależności od sztywności podparcia na odcinku sąsiadującym do strefy braku kontaktu

Nr schematu	Długość strefy braku kontaktu [cm]	Podatność podłoża na odc. sąsiadującym [ $\text{MN/m}^3$ ]	Długość odc. zmiany podatności podłoża [cm]	Ugięcia szyny [mm]
0	0	100	0	<b>1,987</b>
1	60	100	0	2,773
2	60	120	15	2,684
3	60	120	30	2,615
4	60	80	15	2,869
5	60	80	30	<b>2,954</b>

Przeprowadzona analiza obliczeniowa lokalnej zmiany sztywności podparcia szyny na odcinku sąsiadującym do strefy braku kontaktu (rys. 11) pozwala stwierdzić, że:

- wykonane obliczenia pozwalają ocenić skalę zmiany ugięć wskutek zmiany podparcia toru kolejowego,
- zwiększenie sztywności podparcia na krótkim odcinku (15 cm) pozwala tylko na 3,2% redukcję ugięć szyny,
- zwiększenie sztywności podparcia na długości 30 cm zmniejsza otrzymane ugięcia o 5,7%,
- zmniejszenie sztywności na długości 15 cm powoduje wzrost ugięć o 3,5%, podczas gdy zmniejszenie sztywności podparcia na 30 cm powoduje 6,5% wzrost ugięć szyny.



Rys. 12. Schematy obliczeniowe lokalnej zmiany sztywności na odcinku sąsiadującym ze strefą braku kontaktu [19]

#### 4. WNIOSKI KOŃCOWE

Na podstawie przeprowadzonej analizy w pracy można stwierdzić, że:

- Przedstawione wybrane imperfekcje podłoża szynowego, powstające w czasie eksploatacji bezстыkowego toru kolejowego, wpływają na znaczną zmianę wartości ugięć szyny.
- Rozpatrywane lokalne nierówności w torze powodują zmianę warunków podparcia toru (rys. 3). Skutkiem takich deformacji w torze kolejowym jest zwiększenie długości braku kontaktu toru z podłożem. Ponadto deformujące się podłoże podsypkowe i tor kolejowy powoduje np. zaburzenia ruchu postępowego taboru kolejowego wskutek powstających nierówności (rys. 7).
- Wskutek nacisku koła na lokalnej nierówności następuje wzrost lokalnej krzywizny toru (rys. 6), powodując działanie na tor siły odciążającej (będącej wypadkową oddziaływań na długości utraty kontaktu toru z podłożem).
- Analiza obliczeniowa lokalnej zmiany sztywności podparcia szyny na odcinku sąsiadującym do strefy braku kontaktu (rys. 12) pozwala stwierdzić, że zwiększenie sztywności na odcinkach sąsiadujących do długości braku kontaktu nie stanowi wyraźnego źródła poprawy pracy toru kolejowego (powoduje tylko niewielkie zmniejszenie ugięcia szyny, rzędu kilku procent). Ponadto zmniejszenie sztywności odcinków bezpośrednio otaczających strefę braku kontaktu występujące w rzeczywistym torze kolejowym wpływa dodatkowo na zwiększenie ugięć szyny.

#### LITERATURA

- [1] Bednarek Wł.: Local unevenness of lengthwise profile influence on stability conditions of continuous welded rail track. Foundations of Civil and Environmental Engineering (FCEE), Poznań University of Technology, No. 10, 2007.
- [2] Bednarek Wł.: The analysis of the influence of variable roadbed stiffness and support of railway sleeper on its work. Foundations of Civil and Environmental Engineering (FCEE), Poznań University of Technology, No. 13, 2010.
- [3] Bednarek Wł.: Analiza stateczności eksploatowanego toru bezстыkowego w warunkach utraty jego kontaktu z podłożem. Rozprawa doktorska, Poznań 2001.
- [4] Bednarek Wł.: Wpływ pionowych odkształceń nawierzchni i podtorza na pracę toru bezстыkowego. Seria Rozprawy Nr 506, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2013, ISSN 0551-6528.
- [5] Bednarek Wł.: Wybrane zagadnienia współpracy nawierzchni z podłożem podczas eksploatacji bezстыkowego toru kolejowego, Przegląd Komunikacyjny nr 10/2014.
- [6] Bednarek Wł.: Determination of foundation coefficients for a 2-parameter model on the basis of railway sleeper deflection. International Conference of Continuous Media with Microstructure II, Łągów, 2015.
- [7] Bednarek Wł.: Zagadnienia powstających pionowych nierówności w eksploatowanym torze kolejowym, Przegląd Komunikacyjny 2/2016, rocznik LXXI.

- [8] Bednarek Wł.: Statyczna analiza wybranych imperfekcji podłoża szynowego na dodatkowe ugięcia szyny bezстыkowego toru kolejowego. Przegląd Komunikacyjny 11/2016, rocznik LXXI.
- [9] Czyczuła Wł.: Wpływ niejednorodności podłoża szynowego na dodatkowe ugięcia szyny pod obciążeniem użytkowym, Drogi Kolejowe nr 5/1991.
- [10] Czyczuła Wł.: Eksploatacyjna stabilność drogi kolejowej. Monografie Politechniki Krakowskiej, nr 126, Kraków 1992.
- [11] Drozdziel J., Sowiński B., Szulczyk A.: Equivalent track stiffness determination. International Virtual Journal for Science, Techniques and Innovations for Industry, 2011.
- [12] Kaewunruen S., Remennikov A. M.: Relationships between wheel/rail interface impact and railseat flexural moment of railway prestressed concrete sleepers. University of Wollongong, Australia, Research Online, 2007.
- [13] Madej J.: Teoria ruchu pojazdów szynowych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2004.
- [14] Mączka J., Szefer G.: Belka Timoshenki przedziałami spoczywająca na podłożu typu Wieghardta. Archiwum Inżynierii Lądowej, tom XVII, z. 1/1971.
- [15] Siewczyński Ł.: Zagadnienia współpracy nawierzchni kolejowej z podtorzem gruntowym. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, seria Rozprawy nr 66, Poznań, 1974.
- [16] Skrzyński E.: Wpływ dużego obciążenia ruchem oraz zwiększonych szybkości pociągów na pracę podtorza. Problemy Kolejnictwa, nr 67, Warszawa 1975.
- [17] Szumierz W.: Analiza utraty kontaktu prostego toru bezстыkowego z podłożem. Archiwum Inżynierii Lądowej, tom XIX, z. 2, 1973.
- [18] Szumierz W.: Wpływ odkształceń podłoża górniczego na pracę podkładu betonowego. Drogi Kolejowe nr 4/91.
- [19] Zydorek M.: Analiza wybranych zagadnień współpracy bezстыkowego toru kolejowego podczas znacznej zmiany jego kontaktu i podparcia z podłożem podsypkowym. Praca magisterska (pod kierunkiem Wł. Bednarka), Poznań 2016 (maszynopis).

## **THE ANALYSIS OF CHOSEN IMPERFECTIONS OF RAIL SUBGRADE ON RAIL DEFLECTION OF CWR TRACK**

### **Summary**

In the paper the chosen imperfections of railway subgrade causing on additional rail deflections in jointless tracks were analyzed. For such imperfections the following problems were selected:

- contact loss between track and roadbed,
- wheel load on local subgrade unevenness,
- wheel motion in the neighborhood of rail joint,
- change of support stiffness on rail deflection of CWR track.

Also an attention was paid on sources of additional unfavorable deflections are others factors, e.g. a work of jointless track resting on local roadbed unevenness or a character of interaction between wheel and rail.

The presented static analysis has shown the meaning of unfavorable influence of selected factors on CWR track work (e.g. length increase of contact loss between track and subgrade or the arising additional deflections of rail). In the paper a special attention was

paid that such imperfections, apart from obtained additional deflections, cause among other things a disturbance of translational motion of rolling stock due to arising imperfections.

In the paper a special accent was laid on visualization the influence of selected factors on work of CWR track rail, giving in many places in the paper the proper photos, figures and diagrams from obtained calculations.

In the paper were given the proper publications, in which in the comprehensive way the complete procedures of theoretical analysis of considered problems are shown.

Keywords: jointless track, imperfections in track, non-homogeneity of rail subgrade, additional rail deflections.

Dane autora:

Dr hab. inż. Włodzimierz Andrzej Bednarek

Politechnika Poznańska, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska

Instytut Inżynierii Lądowej, Zakład Budowy Mostów i Dróg Kolejowych

e-mail: wlodzimierz.bednarek@put.poznan.pl

telefon: +48 61 665 2638