

Zagadnienia powstających pionowych nierówności w eksploatowanym torze kolejowym

The problems of arising vertical irregularities in operating railway track



**Włodzimierz Andrzej
Bednarek**

dr hab. inż.

*Politechnika Poznańska, Wydział
Budownictwa i Inżynierii Środowiska,
Zakład Budowy Mostów i Dróg
Kolejowych*

wlodzimierz.bednarek@put.poznan.pl

Streszczenie: Nierówności geometryczne toru w płaszczyźnie pionowej, powstające podczas eksploatacji nawierzchni kolejowej, są źródłem dodatkowych oddziaływań pojazdów na tor. W pracy rozpatrywane są dwa typy nierówności, wyodrębnione przez autora – niezamierzone i zamierzone. Pierwszy typ nierówności w torze ma charakter niezamierzony (powstający losowo podczas eksploatacji toru kolejowego, np. nierówności w torze, zmiany parametrów geometrycznych toru czy niejednorodność podparcia toru). Drugi typ imperfekcji ma charakter zamierzony (powstający np. przy wykorzystaniu rusztu torowego jako przeciwwagi dla siłownika płyty pomiarowej VSS). Nierówność niezamierzona powoduje m.in. dodatkowy wzrost ugięć i naprężeń w poszczególnych elementach nawierzchni kolejowej, której następstwem są uszkodzenia i zużycie elementów nawierzchni. Formująca się w torze taka nierówność podłużna w płaszczyźnie pionowej jest powodem powstawania różnej postaci kontaktu podkładu z warstwą podsypki. Sztywność toru w stanie nieobciążonym (bez nacisków od pojazdów) powoduje, że podkłady w różnym stopniu opierają się na podsypce. Analiza przekazywania nacisku z koła poprzez szynę na podkład kolejowy pozwala uświadomić skutki takiej nierówności dla toru kolejowego. Ponadto kształt powstającej nierówności powoduje obniżenie efektywności trakcyjnej koła pojazdu rozumianej jako stopień wykorzystania jego przyczepności wynikającej z nacisków statycznych. W pracy zamieszczono analizę doświadczalną powstającej nierówności w eksploatowanym bezстыkowym torze kolejowym.

Słowa kluczowe: *Bezстыkowy tor kolejowy; Pionowe nierówności w torze*

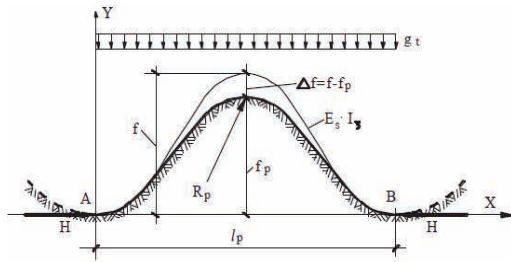
Abstract: Arising during railway track structure operating the geometrical irregularities of track in vertical plane are the additional sources of interaction between the trains and track. These irregularities have got an unintentional character (arising in random way during track operating, e.g. irregularities in track, change of track geometrical parameters or inhomogeneity of track support) and intentional character (arising e.g. during railway track lifting by VSS plate). The unintentional irregularity causes among other things an additional increase of deflections and stresses in track structure elements, which lead to failures and wear of track elements. Such arising the longitudinal irregularity in track is the reason for various forms of contact between sleeper and ballast. Track stiffness in unloaded state (without forces from trains) causes that the sleepers in various ways rest on the ballast. The analysis of load transfer from wheel by rail to the railway sleeper allows for visualizing the effects of such irregularity for railway track. Furthermore a shape of arising irregularity causes the decrease of train wheel traction efficiency understanding as the degree of its tractive adhesion utilization resulting from static loads. In paper an experimental analysis of arising irregularity in CWR track during its operating is enclosed.

Keywords: *CWR Track; Vertical Irregularities In Track*

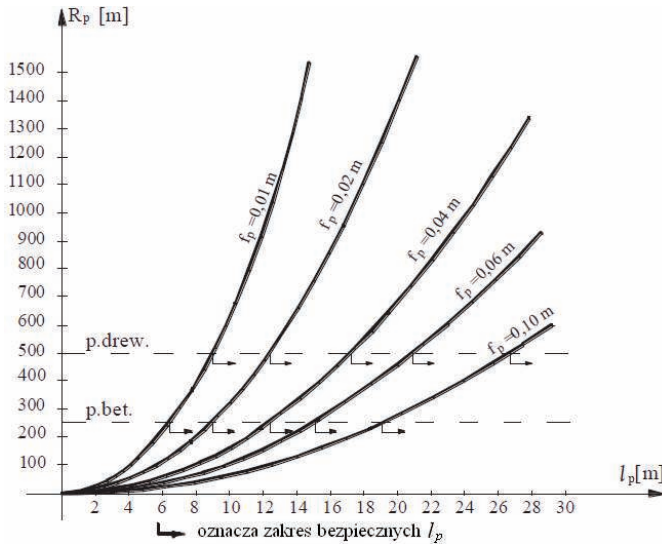
Stan toru kolejowego oraz jego ukształtowanie i położenie, opisywane za pomocą parametrów geometrycznych, ulega stopniowej zmianie podczas eksploatacji. Zmiany geometrycznego położenia toru następują głównie wskutek obciążeń od pojazdów, zmian jego podparcia oraz robót wykonywanych w torze (podbijanie toru, oczyszczanie podsypki). Powstające nierówności w eksploatowanym torze powodują znaczną zmianę warunków

pracy współpracujących ze sobą obciążonych elementów toru (szyna, podkład, podsypka). Przyczyną deformacji toru jest zróżnicowanie charakterystyk podparcia toru w różnych jego przekrojach, powstające wskutek nierównomiernego osiadania podsypki w czasie eksploatacji [8], zwiększonych odkształceń, zwłaszcza tzw. słabego podtorza, czy występowania w podtorzu gruntów wysadzinowych. Wskutek formującej się nierówności powstaje różna po-

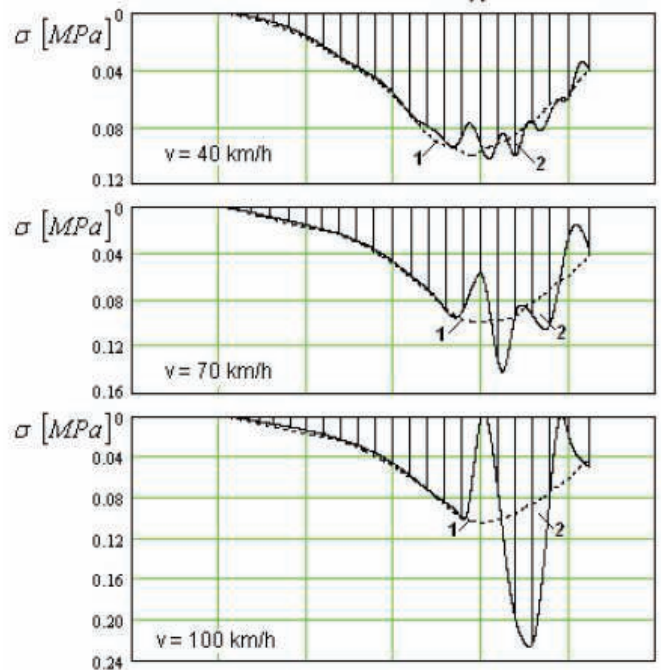
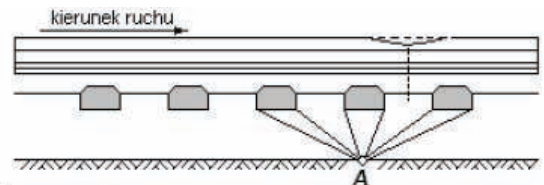
stać kontaktu podkładu z warstwą podsypki. Sztywność toru w stanie nieobciążonym (bez nacisków od pojazdów) powoduje, że podkłady w różnym stopniu opierają się na podsypce. W najbardziej niekorzystnym przypadku może wystąpić zupełny brak kontaktu podkładu z podsypką. Takie obszary braku kontaktu toru z podłożem podsypkowym są szczególnie niebezpieczne dla stateczności toru bezстыkowego np. latem w okresie występowania podłużnych



1. Pionowe odkształcenie toru opisane sinusoidą [16]



2. Teoretyczne zakresy bezpiecznych długości fal l_p przy danej strzałce nierówności f_p [16] dla toru poddanego działaniu siły termicznej, ściskającej: $H_t = 1,67$ [MN] (szyny 60E1 przy $\Delta t = 45$ [°C]), $m = 1,1$ (wpływ sił hamowania taboru)



3. Naprężenia pod podsypką [15], 1 – szyna bez nierówności, 2 – szyna z nierównościami o średnim pochyleniu 10‰

sił ściskających. Ponadto z punktu widzenia warunków pracy toru kolejowego zużycie lub odkształcenie jednego elementu znacząco pogarsza warunki pracy pozostałych, czego następstwem jest niestety proces destrukcji całej nawierzchni.

Głównym celem niniejszej pracy jest zagadnienie związane z wpływem generowanego odkształcenia na statyczną pracę obciążonego bezстыkowego toru kolejowego w płaszczyźnie pionowej (w postaci ugięcia szyny). Wskazano na znaczącą zmianę warunków pracy eksploatowanego toru wskutek przede wszystkim powstających w nim nierówności. Poddano analizie teoretyczno-doświadczalnej niezamierzoną nierówność w bezстыkowym torze kolejowym powstającą podczas jego eksploatacji. Przeprowadzono badanie terenowe w rzeczywistym torze kolejowym, w którym wywoływano lokalną imperfekcję symulującą krótkie nierówności powstające w eksploatowanym torze kolejowym.

Nierówności w bezстыkowym torze kolejowym - powstające w torze

W rzeczywistym torze kolejowym dochodzi do lokalnej utraty kontaktu toru z odkształconym lokalnie podłożem, a tym samym do powstawania na długości pewnych odcinków luk między podkładami a podsypką [2,3,4,5,16,17]. Liczba tych luk i ich zasięg rosną wraz z czasem eksploatacji toru. Obciążenie taboru przywraca utracony kontakt toru z podłożem, ale zjawisku temu towarzyszy wzrost oddziaływań dynamicznych taboru na tor w zależności od wielkości pustek i prędkości jazdy pojazdu szynowego. Powstawanie luk w torze stwarza również niekorzystne warunki podparcia rusztu torowego, co ujemnie wpływa na stateczność eksploatowanego toru bezстыkowego. Nierówne lokalnie podłoże sprężyste, na którym spoczywa bezстыkowy tor kolejowy, wskutek działania sił ściskających może powodować powstawanie dodatkowego ugięcia

szyny. W przypadku wypukłych fal ściskanych toków szynowych może dochodzić lokalnie do utraty kontaktu toru z podłożem (rys. 1) [16,17]. Kształt lokalnej nierówności opisuje równanie w postaci:

$$y_p = \frac{f_p}{2} \cdot \left(1 - \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot x}{l_p}\right) \right) \quad (1)$$

gdzie:

f_p – strzałka fali odkształcenia pionowego,
 l_p – długość fali odkształcenia pionowego.

Pomierzone wartości f_p i l_p pozwalają sprawdzić warunek bezpieczeństwa pracy toru z wykorzystaniem wykresów na rys. 2.

Wzory stosowane na rys. 2:

$$R_p = \frac{l_p^2}{2 \cdot \pi^2 \cdot f_p} \quad (2)$$

gdzie:

R_p – promień nierówności pionowej podłoża,

f_p – strzałka fali odkształcenia pionowego,

l_p – długość fali odkształcenia,

$$R_d = 0,5 \cdot \frac{m \cdot n \cdot H_t}{g_t} \quad (3)$$

gdzie:

R_d – dopuszczalny promień nierówności pionowej podłoża zależny od typu podkładu,

g_t – ciężar toru,

n – współczynnik bezpieczeństwa,

m – jak wyżej,

Uzyskano odpowiednio: $R_d = 459$ [m], przyjęto (ze względu na bezpieczeństwo pracy toru): $R_d = 500$ [m] (podkłady drewniane) oraz $R_d = 239$ [m], przyjęto ze względu na bezpieczeństwo pracy toru): $R_d = 250$ [m] (podkłady betonowe).

Pomiar odkształcenia pionowego jest bardzo trudny do określenia w rzeczywistym torze kolejowym. Najczęściej obserwujemy już postać odkształcenia toru kolejowego w płaszczyźnie pionowej, którego bezpieczeństwo można ocenić na podstawie rozważań teoretycznych. Analiza takiego przypadku (zawarta w pracy [16]) pozwala na tym wykresie wskazać zakresy bezpiecznych długości fal l_p przy danej strzałce nierówności f_p (zapewniony pełny kontakt toru z podłożem), sporządzonych dla toru typu 60E1 z podkładami drewnianymi i betonowymi. Wykresami tymi można posłużyć się również w przypadku toru typu 49E1 [16].

Miejscowe odkształcenia powierzchni szyny i koła

Główną przyczyną powodującą uszkodzenia powierzchni tocnych kół i szyn kolejowych są warunki eksploatacyjne (np. intensywne hamowanie) [6,7]. W czasie hamowania powierzchnia tocna kół nagrzewa się do wysokich temperatur. Powoduje to w warstwie przypowierzchniowej chwilowe obniżenie granicy plastyczności, a znaczne naciski w strefie kontaktu koło-szyna skutkują miejscowymi odkształceniami plastycznymi materiału. Przy szybkim jego oziębianiu tworzy się kruchy martenzyt. Po ostygnięciu koła w warstwie powierzchniowej powstają duże rozciągające naprężenia własne prowadzące do drobnych pęknięć powierzchniowych.

Na wielkość oddziaływań dynamicznych bardzo istotny wpływ mają nierówności toru (przede wszystkim krótkie nierówności pionowe) będące powodem zwiększania naprężeń w podtorzu nawet 2,6 raza w stosunku do obciążeń statycznych. W przypadku miejscowego odkształcenia powierzchni tocnej główki szyny, punkt torowiska, gdzie oddziaływania są największe, znajduje się zawsze przed środkiem nierówności w kierunku ruchu pojazdu (rys. 3).

W przypadku średniego pochylenia nierówności toru mniejszego od 1‰ przy długości nierówności co najmniej 2 [m], dodatkowe obciążenia nie występują [15]. Nierówność powierzchni tocnej główki szyny i przejazd koła przez taką nierówność rozważano w pracy [18]. Płaskie wytarcia obręczy w zestawach koło-

wych mają bezpośredni wpływ na naprężenia powstające w nawierzchni, a zwłaszcza w szynach. Takie wytarcia są jedną z głównych przyczyn pęknięcia szyn, szczególnie w porze zimowej przy niskich temperaturach [11]. Przy splocie niekorzystnych czynników (niska temperatura, zły stan uresorowania wagonu, duży nacisk koła na szynę) mogą powodować masowe uszkodzenia szyn. Naprężenia w szynie wywołane płaskim wytarciem obręczy kół zależą od wielu czynników, z których najważniejsze to [13,19]:

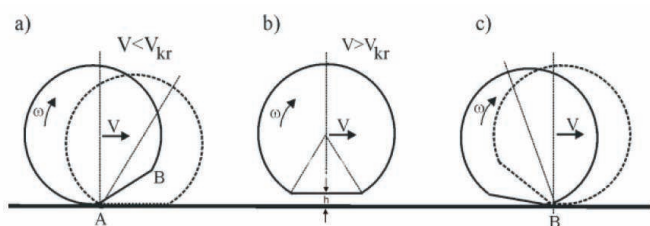
- głębokość wytarcia,
- nacisk osi,
- stan usprężynowania wagonu,
- sprężystość podłoża toru,
- prędkość jazdy.

W czasie przejazdu koła z płaskim miejscem można wyróżnić trzy charakterystyczne fazy jego kontaktu z szyną:

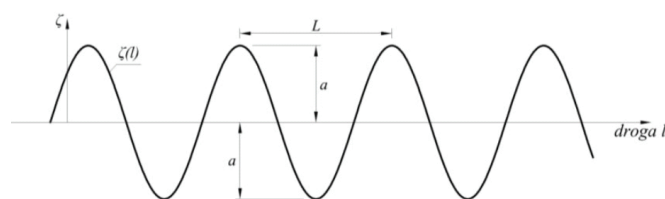
- 1) podczas przejazdu koła w obrębie płaskiego miejsca nacisk na szynę zmniejsza się (rys. 4a),
- 2) przy tzw. prędkości krytycznej około 30 km/h występuje zjawisko utraty kontaktu koła z szyną (rys. 4b),
- 3) w ostatniej fazie obrotu koła następuje uderzenie krawędzi płaskiego miejsca w szynę (rys. 4c).

Zmniejszenie efektywności przyczepności koła na odkształconym torze

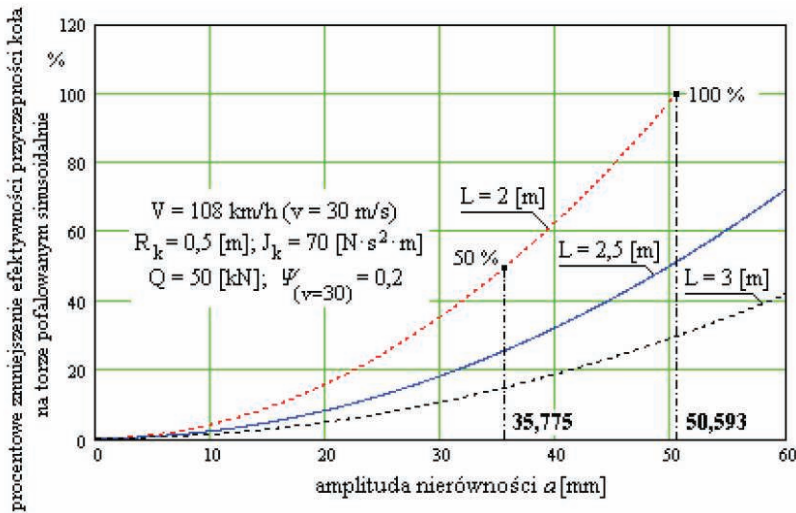
Powstające nierówności toru powodują zaburzenia ruchu obrotowego koła. Wpływa to na trakcyjną efek-



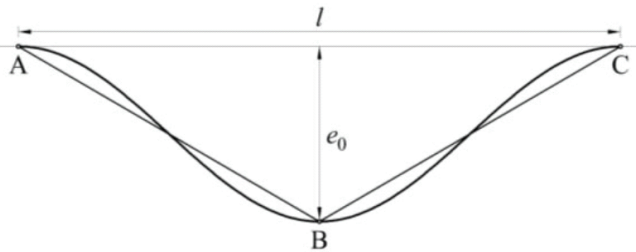
4. Fazy ruchu koła z płaskim miejscem na kole [10], a) brak utraty kontaktu (krawędź A), b) utrata kontaktu, c) uderzenie w szynę krawędzi B



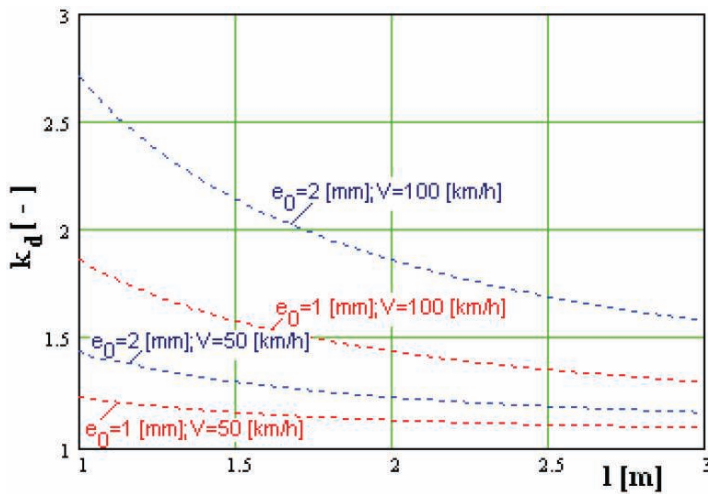
5. Nierówność toru opisana sinusoidą [12]



6. Zmniejszenie efektywności przyczepności koła na odkształconym torze gdzie: R_k – promień koła; J_k – moment masowy bezwładności koła [12].



7. Kształt pionowej nierówności toru szynowego [14] e_0 – głębokość nierówności, l – długość nierówności



8. Zależność współczynnika dynamicznego k_d (wzór 4), od długości nierówności l dla wybranych głębokości nierówności e_0 i prędkości jazdy V

tywność koła rozumianą jako stopień wykorzystania jego przyczepności wynikającej z nacisków statycznych podczas eksploatacji [12]. Dla przypadku ruchu koła po torze nierównym sinusoidalnie (rys. 5) mamy:

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

gdzie

ϑ – początkowy kąt obserwacji zja-

wiska [12]; przyjęto $\vartheta = 0$.

Taka nierówność toru opisana sinusoidą, powoduje zmniejszenie przyczepności koła z szyną [12], pokazane na rys. 6:

Przy nacisku koła na szynę $Q = 50$ kN na długości 2 [m] oraz wartości współczynnika przyczepności:

$\Psi_{(v=30)} = 0,2$, otrzymujemy znaczące obniżenie efektywności przyczepności przy amplitudzie większej

od 5 [mm], a teoretyczny 50-procentowy brak przyczepności przy $a_{gr} = 35,775$ [mm], gdzie: a_{gr} – graniczna amplituda odkształconego toru [12]. Zwiększenie nacisku koła powoduje zmniejszenie tego niekorzystnego zjawiska. Szczegółowy opis zjawienia zawarto w pracy [12].

Wzrost oddziaływań taboru na tor wskutek lokalnej nierówności toru szynowego

Poruszający się po nierównym torze tabor przywraca utracony kontakt toru z podłożem, ale zjawisku temu towarzyszy wzrost oddziaływań dynamicznych taboru na tor. Wielkość tego wzrostu zależy przede wszystkim od kształtu powstałej nierówności i prędkości jazdy pojazdu szynowego, natomiast w znacznie mniejszym stopniu od konstrukcji zawieszenia pojazdu szynowego i odkształcenia kół pojazdów [9,14]. Odkształcenia pionowe toru mają kształt cosinusoidalny (rys. 7) [14], najczęściej zastępowane liniami prostymi AB i BC.

W obliczeniach nawierzchni przyjmuje się współczynniki dynamiczne k_d z uwzględnieniem wpływu oddziaływania miejscowych nierówności toru np. w postaci wzoru [5]:

$$k_d = 1 + 0,000085 \cdot \frac{e_0}{l} \cdot V^2 \quad (4)$$

gdzie:

e_0 – głębokość nierówności [mm],

l – długość nierówności [m],

V – prędkość jazdy [km/h].

Na rys. 8 pokazano zależność współczynnika dynamicznego k_d od długości nierówności l dla wybranych głębokości nierówności e_0 i prędkości jazdy V .

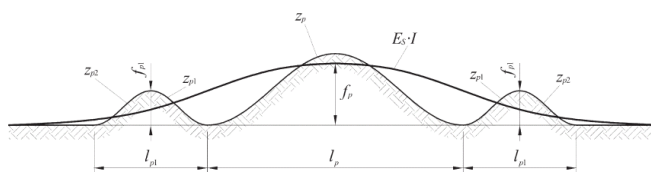
Jak widać na rys. 8 szczególnie wzrost oddziaływań przejeżdżającego taboru na tor, następuje przy „krótkich” nierównościach l o „dużej” głębokości e_0 (podobnie jak przy zużyciu falistym szyn). Szczegółne-

go znaczenia nabiera zatem jakość wykonywanych robót w torze [1], opisana np. syntetycznym wskaźnikiem jakości toru J (w pracy [1] zawarto przykład niewielkiego wzrostu wartości J do ok. 0,6 [mm] podczas 4 letniej eksploatacji toru, przy początkowej jego wartości rzędu 0,5 [mm]).

Wpływ lokalnej nierówności podłoża na pracę toru

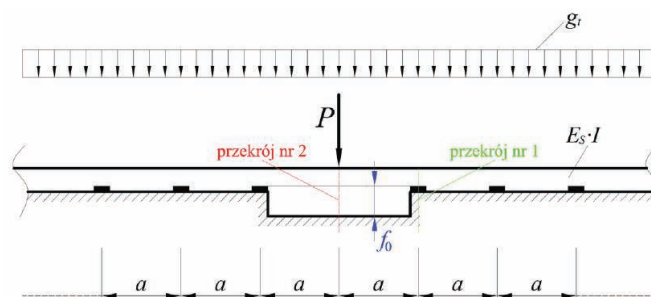
W niniejszym punkcie pracy przedstawiono analizę pracy toru w zasięgu miejscowego odkształcenia. Określono zależności pomiędzy powstającymi w torze odkształceniami a zmianami wartości ugięć w szynie, które można ocenić dopiero pod wpływem przyłożonego obciążenia od lokomotywy. Opisano wykonane badania doświadczalne w torze kolejowym obejmujące pomiar ugięć szyny w warunkach symulowanych niejednorodności w podłożu podkładów. Podano metodę generowania odkształcenia w torze, sposób pomiaru oraz zmiany poszczególnych parametrów niezbędnych do opisu pracy toru kolejowego. Metoda ta, na podstawie pomiarów w obciążonym torze, umożliwi opisywanie skutków zmiany warunków podparcia toru, wykazując swoją przydatność do analizowania wzrostu ugięć dla założonego kształtu imperfekcji symulujących krótkie nierówności powstające w eksploatowanym torze kolejowym.

Lokalna nierówność pionowa powstająca w torze ma zazwyczaj charakter losowy, niepożądany i *niezamierzony* (rys. 9). Nierówność taka powoduje powstawanie obszarów braku kontaktu podkładów z górną warstwą podsypki toru, co jest szczególnie niebezpieczne dla jego pracy w okresie występowania np. dużych sił ściskających. Konsekwencją procesu dostosowywania się toru do zmieniających się warunków jego podparcia jest zmiana wartości ugięć i naprężeń we współpracujących ze



9. Przykładowe trzy nierówności podłoża i sposób kontaktu ramy toru z podłożem podsypkowym

gdzie: z_{p1}, z_{p2}, z_{p3} – postać nierówności podłoża (wzór 1),
 f_p – strzałka przyjętej fali odkształcenia pionowego,
 l_{p1}, l_p, l_{p2} – długość przyjętej fali odkształcenia pionowego,
 $E_s \cdot I$ – sztywność toru (pary szyn) w płaszczyźnie pionowej [MNm²].



10. Schemat wywołanej nierówności w torze kolejowym

f_0 – nierówność wywołana w torze kolejowym [mm], P – przyłożona siła [MN], $E_s \cdot I$ – sztywność toru (pary szyn) w płaszczyźnie pionowej [MNm²], E_s – moduł Young'a stali szynowej; g – ciężar toru [MN/m], a – rozstaw podkładów [m]



11. Stanowisko pomiarowe do zapisu uzyskiwanych pomiarów na stacji Poznań-Franowo

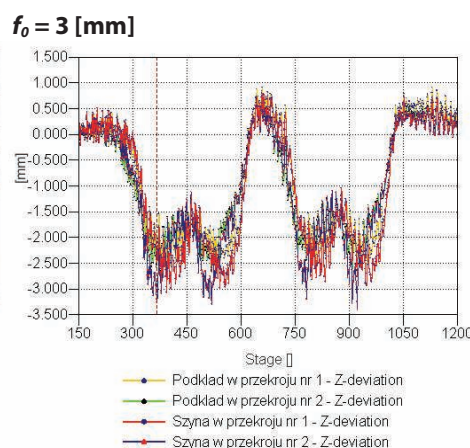
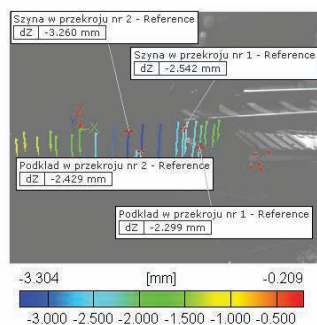
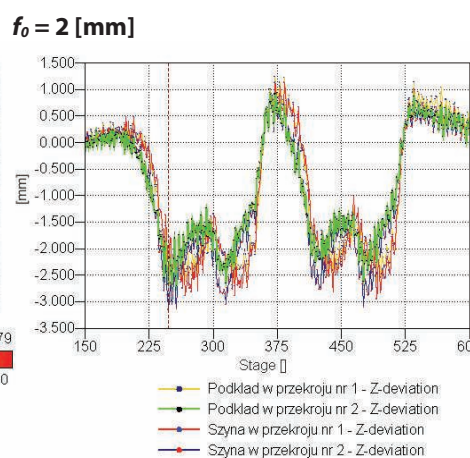
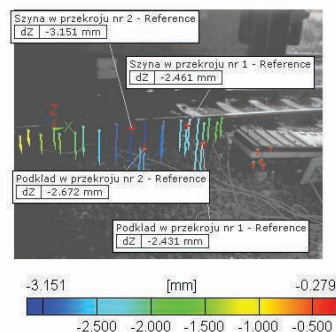
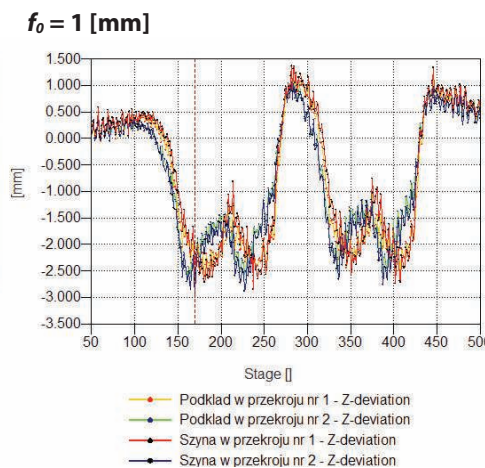
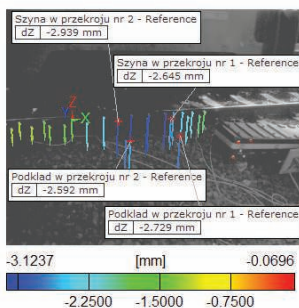
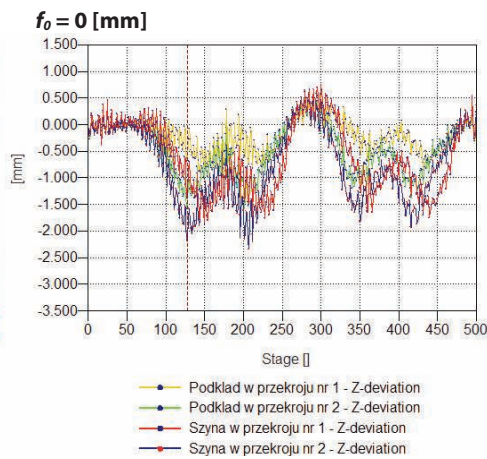
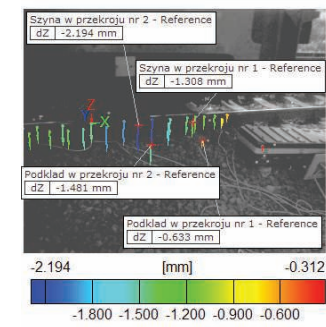
sobą elementach ramy torowej.

Opis zaproponowanej metody generowania niezamierzonego odkształcenia w torze

W celu przeprowadzenia analizy pracy obciążonych elementów toru na lokalnej nierówności wykonano badania terenowe na stacji kolejowej Poznań-Franowo. Celem badań było przeanalizowanie *niezamierzonej* nierówności w torze kolejowym poprzez symulowanie nierówności w postaci zmiany warunków podparcia szyny w badanym przekroju poprzecznym

toru kolejowego (przyjęto schemat pomiarowy przedstawiony na rys. 10) [5].

W torze wywołano lokalną nierówność poprzez obniżenie toru o określoną wartość (parametr f_0 na rys. 10). Nierówność toru uzyskano przez odkręcenie przytwierdzeń, podniesienie toru podnośnikiem (bez naruszania stateczności toru bezстыkowego w płaszczyźnie poziomej, zgodnie z obowiązującymi przepisami). Dodatkowo w celu zapewnienia stateczności toru, podniesienie toru realizowano sukcesywnie na krótkich odcinkach toru kolejowego



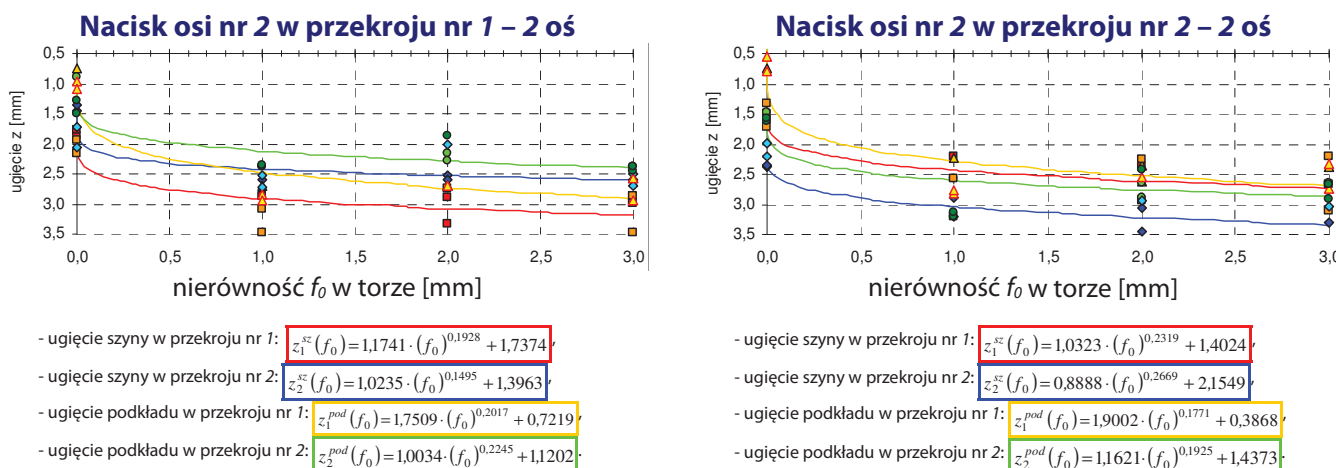
12. Ugięcie szyny i podkładu wskutek wywołanej nierówności w torze kolejowym podczas zmiany warunków podparcia szyny w przekroju poprzecznym nr 2 osi rzędnych – ugięcie szyny i podkładu; osi odciętych – kolejne pomiary co 0,005 [s]

wego (co pojedynczy lub podwójny rozstaw podkładów). Następnie wykonano umieszczenie metalowych płytek pomiędzy szyną a podkładką, opuszczenie szyny na podkładkę oraz ponowne przytwierdzenie szyn do podkładów. Wartość f_0 zwiększono od $f_0 = 0$ mm (stan początkowy toru) kolejno do 1, 2 i 3 mm. W trakcie pomiarów wykonano 12 quasi-stycznych z niewielką prędkością przejazdów lokomotywą SM-42-448 (72 [t] n a 4 osie — czyli 180 kN/oś). Umożliwiło to analizę pracy toru (a w szczególności szyny i podkładu) poprzez pomiar ugięć zarówno samej szyny, jak i podkładu kolejowego. Ze względu na udostępniony odcinek toru do badań, montaż aparatury (rys. 11) wykonano na szynie i podkładzie betonowym. Do analizy przemieszczeń wykorzystano optyczny system pomiarowy firmy GOM mbH (Gesellschaft für Optische Messtechnik, Technischen Universität, Braunschweig), który ma zastosowanie w digitalizacji 3D (np. w pomiarach współrzędnościowych). System PONTOS służy do dynamicznej analizy przemieszczeń 3D, zapewniając precyzyjne (z dokładnością do 0,001 mm), bezkontaktowe pomiary pozycji, ruchu i deformacji przy krótkim czasie pomiaru (np. 0,005 s). Skorzystano z programów *PONTOS Viewer version v6.3.0-5* by GOM mbH oraz *catmanEasy version 2.1* by HBM GmbH.

Wyniki ugięć uzyskane podczas badań terenowych

Podczas przejazdów lokomotywy po generowanym przez autora odkształceniu w torze kolejowym wykonano pomiary ugięć szyny i podkładu, dla kolejno następujących po sobie 4 osi lokomotywy SM-42. Ze względu na krótką odległość pomiędzy przekrojami nr 1 i 2 (równą rozstawowi podkładów), założono, że analizowany odcinek toru przed badaniami posiada prostoliniową postać (bez wstępnych nierówności).

Zmiana warunków podparcia szyny w przekroju poprzecznego nr 2 (schemat z rys. 10)



Zastosowano na nich następujące oznaczenia:

- | | | | |
|------------------------------|------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| ■ Szyna przekrój 1 z kier. A | ◆ Szyna przekrój 2 z kier. A | ▲ Podkład przekrój 1 z kier. A | ● Podkład przekrój 2 z kier. A |
| ■ Szyna przekrój 1 z kier. B | ◆ Szyna przekrój 2 z kier. B | ▲ Podkład przekrój 1 z kier. B | ● Podkład przekrój 2 z kier. B |
| — Szyna w przekroju 1 | — Szyna w przekroju 2 | — Podkład w przekroju nr 1 | — Podkład w przekroju 2 |

13. Przykładowe wartości ugięć szyny i podkładu wskutek wywołanej nierówności w torze kolejowym (nacisk osi nr 2 lokomotywy)

Na rys 12 i 13 przedstawiono ugięcia szyny i podkładu dla symulowanych nierówności w torze kolejowym na stacji Poznań-Franowo dla nacisków od kolejnych 4 osi lokomotywy [5]. Rysunki umożliwiają ocenę skali zmian zarówno w przekroju nr 1 jak i nr 2 (z rys. 10).

Dyskusja wyników przeprowadzonego badania i uzyskane parametry do opisu pracy toru kolejowego

Na zamieszczonych rysunkach (12 i 13) symulowane strzałki nierówności f_0 wywołane w torze zmieniają w znaczący sposób pracę obciążonych elementów nawierzchni kolejowej. Zwłaszcza w rozpatrywanym przekroju nr 2 można zaobserwować duży wpływ tych nierówności na pracę toru kolejowego. I tak: dla schematu z rys. 10, przy braku odkształcenia w torze ($f_0 = 0$ mm), ugięcia szyny wynoszą około 2 mm (np. pod 2 osią lokomotywy obciążeniowej otrzymano wartość 1,996 mm). Przy $f_0 = 3$ mm ugięcie szyny wzrasta do wartości 3,5371 mm, czyli o 77,2%, a ugięcie podkładu zwiększa się z 1,4373 do 2,8731 mm, czyli aż o 99,89%. Zwiększenie ugięcia szyny i

podkładu wyraźnie widać na rys. 13.

Na rys. 14 i w tabl. 1 przedstawiono wartości doświadczalne i teoretyczne (dla podłoża 1-parametrowego) osiadań szyny i współczynników empirycznych i teoretycznych dla obliczania ugięć szyny (K_i i U) w przekroju nr 2 pod działaniem siły pochodzącej od osi nr 2 lokomotywy.

Do przeprowadzenia obliczeń wykorzystano utworzony model MES, traktując tor jako ważką belkę Bernoulli-Eulera na sprężystym podłożu 1-parametrowym, szczegółowo opisany w pracy [5]. Wykorzystując ten model obliczeniowy wyznaczono wartość:

$$U_{zast}^{teor} = 26,605 \text{ [MPa]}$$

(uzyskaną z próbnego przejazdu lokomotywy dla $f_0 = 0$ [mm]). Kolejne wartości U_{zast}^{teor} dla następnych nierówności w torze: $f_0 = 1, 2$ i 3 [mm] wyznaczono tym modelem, wykorzystując otrzymane wartości z_{pom} dla przekroju 2 z rys. 10. Obliczony w ten sposób parametr U_{zast}^{teor} opisuje „słabe” podparcie toru, czyli „zastępuje” sukcesywnie wzrastający początkowy brak kontaktu toru z podłożem w przekroju nr 2. Podobnie korzystając z tego modelu numerycznego

wyznaczono teoretyczną wartość części siły przekazywanej z koła na szynę powodującą kontakt toru z podłożem ($P_{k=0}$) oraz pozostałą część siły przekazywanej z koła na szynę powodującą ugięcia po kontakcie toru z podłożem dla przypadku „słabego” podparcia toru ($P_{k \neq 0}$).

Wnioski końcowe

Na podstawie przeprowadzonej analizy można stwierdzić, że:

1. Pełny kontakt toru ze sprężystym podłożem, w przypadku powstawania nierówności w torze, jest zapewniony dla zakresu bezpiecznych długości fali l_p przy określonej strzałce nierówności f_p (rys. 2).
2. Deformujący się sinusoidalnie tor powoduje zaburzenia ruchu obrotowego koła, wpływające na jego trakcyjną efektywność wykorzystania przyczepności (skalę zmian można ocenić na podstawie rys. 6).
3. W przypadku nierówności w torze w postaci niejednorodności w podłożu podkładów autor badań wywołaną niezamierzoną

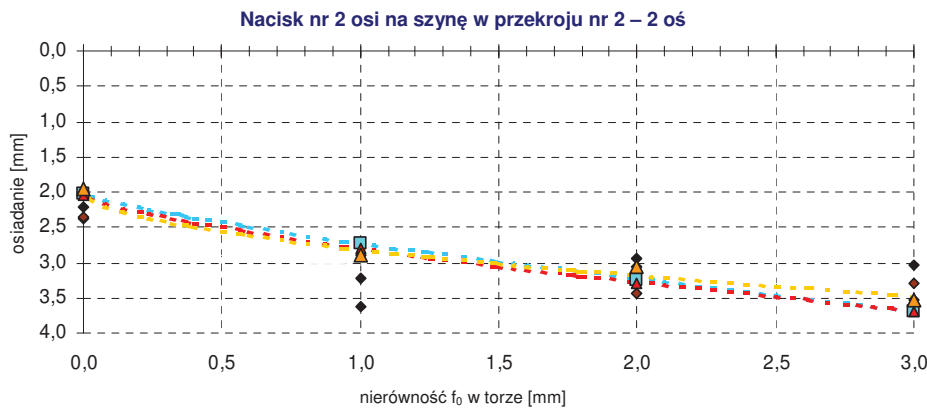
Tab. 1. Ugięcie szyny w przekroju nr 2 wskutek nierówności w torze f_0 – nacisk osi nr 2

podłoże 1-parametrowe $k_3^{sz} = 26,605 \text{ [MPa]}$

Nierówność w torze f_0	Z_{pom}	Z_{teor}	$Z_{k \neq 0}$ ($Z_{teor} - f_0$)	Z_{teor}	U_{zost}^{teor}	K_{pom}	K_{teor}	$P_{k=0}$	$P_{k \neq 0}$
[mm]	[mm]	[mm], MES	[mm]	[mm], sbval	[MPa]	[kN/mm]	[kN/mm]	[kN]	[kN]
0	1,9961	2,0312	-	2,0355	26,605*	45,0879	44,3088	-	90
1	2,8872	2,7217	1,7217	2,7962	17,526	31,1721	33,0676	16,68	73,32
2	3,0541	3,2371	1,2371	3,2855	14,181	29,4686	27,8027	34,51	55,49
3	3,5371	3,6899	0,6899	3,6849	12,099	25,4446	24,3909	54,19	35,81

*) wartość uzyskana z próbnego przejazdu lokomotywy dla $f_0=0$ [mm]

- gdzie:
- $Z_{pom}; Z_{teor}$ – ugięcie szyny (doświadczalne i teoretyczne) wskutek generowanej nierówności w torze,
 - $Z_{k \neq 0}$ – ugięcie szyny po kontakcie z podłożem podsypkowym,
 - U_{zost}^{teor} – zastępcze i teoretyczne podparcie szyny dla przypadku „słabego” jej podparcia (rys. 10),
 - $K_{pom}; K_{teor}$ – współczynniki empiryczne i teoretyczne dla obliczania ugięć szyny dla schematu nierówności z rys. 10,
 - $P_{k=0}; P_{k \neq 0}$ – odpowiednio: część siły przekazywanej z koła na szynę powodująca kontakt toru z podłożem oraz pozostała część siły przekazywanej z koła na szynę powodująca ugięcia i naprężenia po kontakcie toru z podłożem dla przypadku „słabego” podparcia toru,
 - k_3^{sz} – współczynnik podłoża 1-parametrowego (uzyskany z próbnego przejazdu lokomotywy dla $f_0=0$ [mm]),
 - Z_{teor}^{sbval} – teoretyczne ugięcie szyny wskutek generowanej nierówności w torze (obliczone jako zagadnienie brzegowe wykorzystujące warunki brzegowe prowadzące do problemu początkowego [5]).



$$z_2^{sz}(f_0) = 0,81585 \cdot (f_0)^{0,53554} + 2,00168; \quad z_2^{sz}(f_0) = 0,69303 \cdot (f_0)^{0,79543} + 2,03087; \quad z_2^{sz}(f_0) = 0,76512 \cdot (f_0)^{0,70117} + 2,03501;$$

Opis oznaczeń:

$z_2^{sz}(f_0)$ – ugięcie szyny w analizowanym przekroju nr 2 (rys. 10),

◆, ◆ – wartości z pomiarów doświadczalnych z użyciem lokomotywy SM42 (Poznań Franowo),

▲ – wartości obliczone ze wzoru opisującego badania terenowe,

▲ – wartości teoretyczne obliczone z wykorzystaniem procedury *sbval* (wykresy wykonane z użyciem polecenia *Bulstoer* programu MathCAD, wykorzystującego metodę Bulirsch-Stoer’a),

■ – wartości teoretyczne (podłoże 1-parametrowe).

14. Teoretyczne i doświadczalne osiadanie szyny wskutek nierówności wywołanej w torze kolejowym (schemat z rys. 10) w przekroju nr 2 dla nacisku osi nr 2 lokomotywy

nierówność o znanych początkowych wartościach długości fali odkształcenia i jego strzałki (rys. 10). Wpływ tej nierówności (uwidaczniający się dopiero po przyłożeniu obciążenia) został doświadczalnie przeanalizowany w pracy. Stwierdzono, że wywołana nierówność o strzałce nierówności f_0 w torze zmienia w znaczący sposób pracę obciążonych elementów nawierzchni kolejowej (wzrost ugięć dochodzący do ok.

78 %). Podobna postać odkształcenia w torze (nierówności pionowe) powstaje podczas jego eksploatacji.

4. Zaproponowana metoda generowania nierówności w torze kolejowym jest metodą nieniszczącą wywoływania imperfekcji w torze. Nienarusza ona pierwotnego kontaktu szyny i podkładu z podłożem. Prezentowana metoda jest szczególnie przydatna w badaniach zmian podparcia

toru i może być właściwym narzędziem służącym do oceny pracy obciążonych elementów toru kolejowego. ◀

Materiały źródłowe

- [1] Bałuch H.: Syntetyczne metody oceny nawierzchni kolejowej. Problemy Kolejnictwa, Zeszyt 166, 2015.
- [2] Bednarek Wł.: Local unevenness of lengthwise profile influence on stability conditions of continuous welded rail track. Foundations of Civil

- and Environmental Engineering, Poznań University of Technology, No. 10, 2007.
- [3] Bednarek W.: Wpływ lokalnych nierówności profilu podłużnego na warunki stateczności bezстыkowego toru kolejowego. Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej 3/2007, XIV Konferencji Naukowo-Technicznej „Drogi Kolejowe 2007”, Poznań–Rosnówko, 2007.
- [4] Bednarek W.: Local subgrade unevenness of lengthwise profile influence on work conditions of CWR track. Foundations of Civil and Environmental Engineering (FCEE), Poznań University of Technology, No. 15, 2012.
- [5] Bednarek Wł.: Wpływ pionowych odkształceń nawierzchni i podtorza na pracę toru bezстыkowego. Rozprawy nr 506, WPP, Poznań 2013.
- [6] Bogacz R., Świdzki Z.: Uszkodzenia eksploatacyjne szyn kolejowych wywołane wzajemnym, dynamicznym oddziaływaniem pojazdów szynowych z torem. Problemy Kolejnictwa, z. 136, 2002.
- [7] Bogacz R., Świdzki Z.: Symulacja warunków eksploatacyjnych powodujących uszkodzenia powierzchni tocznych kół i szyn kolejowych. Symulacja w Badaniach i Rozwoju, Vol. 1, No. 2, 2010.
- [8] Czyczuła W.: Eksploatacyjna stabilność drogi kolejowej. Monografie Politechniki Krakowskiej, nr 126, Kraków 1992.
- [9] Esveld C.: Modern railway track. Second Edition, Delft 2001.
- [10] Lesiak P., Podsiadło R.: Symulacyjne badania dynamicznego oddziaływania koła z płaskim miejscem na szynę w środowisku UNIVERSAL MECHANIZM LOCO. Logistyka, 6, 2011.
- [11] Łoś M.: Wpływ temperatury na pracę toru kolejowego. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1974.
- [12] Madej J.: Teoria ruchu pojazdów szynowych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2004.
- [13] Mazilu T.: A Dynamic Model for the Impact between the Wheel Flat and Rail. U.P.B. Sci. Bull., Series D, Vol. 69, No. 2, 2007.
- [14] Skrzyński E.: Wpływ dużego obciążenia ruchem oraz zwiększonych szybkości pociągów na pracę podtorza. Problemy Kolejnictwa, nr 67, 1975.
- [15] Skrzyński E., Sikora R.: Kolejowe budowle ziemne – tom I. WKiŁ, Warszawa 1990.
- [16] Szumierz W.: Wpływ nierówności profilu na stateczność toru bezстыkowego. Przegląd Kolejowy, nr 5, 1993.
- [17] Szumierz W.: Zagadnienie stateczności eksploatowanego toru bezстыkowego. Przegląd Kolejowy, nr 4, 1997.
- [18] Timoshenko S.: Method of analysis of static and dynamical stresses in rail. Proceeding of the Second International Congress for Applied Mechanics, Zurich, Switzerland 1926.
- [19] Zhu J.J., Ahmed A.K.W., Rakheja S.: An Adaptive Contact Model for Simulation of Wheel-rail Impact Load due to a Wheel Flat. 13th National Conference on Mechanisms and Machines (NaCoMM07), IISc, India 2007.

REKLAMA

DOLKOM spółka z o. o. we Wrocławiu od blisko 60 lat wykonuje modernizacje i naprawy infrastruktury kolejowej z wykorzystaniem maszyn do robót torowych o dużej wydajności oraz wykonuje naprawy maszyn do robót torowych i napraw sieci trakcyjnej. Spółka jest przewoźnikiem kolejowym i posiada wydane przez Urząd Transportu Kolejowego licencje i certyfikaty bezpieczeństwa.



DOLKOM
WROCLAW

Kontakt:

50-502 Wrocław ul. Hubska 6; tel. (71) 717 5630; fax. (71) 717 5164
e-mail: dolkom@dolkom.pl; www.dolkom.pl