

Włodzimierz Czyczuła, Jerzy Stawowiak, Grzegorz Szczepaniak-Krupowski

Badania porównawcze nawierzchni kolejowej na odcinkach testowych linii CMK

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 prędkości 250–330 km/h, wykazując, że drgania szyny, podkładu i podsypki zwiększają się wraz z prędkością. Podobne rezultaty otrzymano w pracy [2], gdzie wykazano, że przyspieszenia drgań szyny w zakresie do 190 km/h zwiększają się silniej niż liniowo, podkładu prawie liniowo, a podsypki wolniej niż liniowo.

Celem artykułu jest przedstawienie i analiza wyników badań przyspieszeń w elementach nawierzchni kolejowej na odcinkach testowych linii CMK. Podstawowe badania przeprowadzono dla nawierzchni 60E1 z typowymi podkładami PS-94 i przytwierdzeniami SB-4 oraz z podkładami PS-08 z przytwierdzeniami ICOSTRUN-02. Szczegółowy opis przytwierdzenia ICOSTRUN-02 oraz wyniki jego badań laboratoryjnych przedstawiono w pracy [3], a opis podkładu PS-08 wraz z jego projektem technicznym, znajduje się w pracy [4].

W obu badanych konstrukcjach nawierzchni warstwa podsypki miała miąższość pod podkładem 35 cm. Ponadto przeprowadzono badania na odcinku, gdzie podsypka była zbrojona dwoma geosiatkami, usytuowanymi pod podsypką oraz na wysokości 15 cm pod podkładem.

Podstawowe badania przeprowadzono przy przejeździe pociągu testowego, złożonego z dwóch lokomotyw typu HUSAR i 3 wagonów. Odległość skrajnych osi pociągu wynosiła około 111 m (rys. 1). Pociąg poruszał się z prędkościami od około 160 km/h do około 230 km/h. Ponadto, na odcinku z typową konstrukcją rusztu torowego i podsypką zbrojoną, badania drgań elementów nawierzchni przeprowadzono przy przejeździe pociągu testowego z prędkościami w zakresie 65–113 km/h.

Szczegółowy opis badań znajduje się w sprawozdaniu [5]. Badania przeprowadzono przy okazji testów eksploatacyjnych lokomotywy HUSAR – badania te były przeprowadzone przez CNTK. Autorzy pragną serdecznie podziękować kierownictwu i pracownikom CNTK i kierownictwu PKP PLK S.A. za umożliwienie przeprowadzenia badań, a pracownikom EC Engineering za udział w badaniach i opracowaniu wyników.

Stanowiska pomiarowe

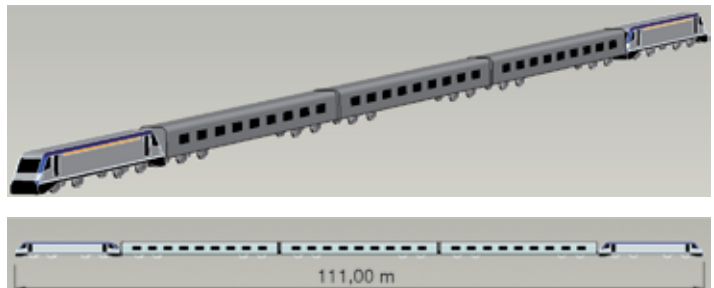
– rozmieszczenie czujników przyspieszeń

Badania przeprowadzono w trzech lokalizacjach, oznaczonych dalej jako P1, P2 i P3. Stanowisko pomiarowe P1 dotyczy nawierzchni 60E1 z podkładem PS-94 i przytwierdzeniem rodziny SB ze zbrojoną podsypką i było usytuowane w torze nr 1 linii

CMK, w km 173,250 (prosta). Stanowisko pomiarowe P2 dotyczy nawierzchni 60E1 z podkładem PS-08 i przytwierdzeniem ICOSTRUN-02, a było ono usytuowane w torze nr 1 linii CMK, w km 180,300 (łuk kołowy o promieniu 4000 m). Stanowisko pomiarowe P3 było usytuowane w km 193,400 toru nr 1 (łuk kołowy o promieniu około 4000 m), gdzie nawierzchnię tworzą szyny 60E1 z typowym podkładem PS-94 i przytwierdzeniem rodziny SB.

Czujniki przyspieszeń usytuowano na stopce szyny, na górnej powierzchni podkładu oraz na betonowym walcu, ułożonym w podsypce. Na każdym stanowisku pomiarowym przyspieszenia drgań mierzono po obu stronach toru (minimum 6 czujników przyspieszeń w każdym punkcie pomiarowym). Zastosowano trzykierunkowe czujniki przyspieszeń, co dało możliwość pomiaru przyspieszeń wzdłużnych (kierunek X, wzdłuż osi toru), poprzecznych (kierunek Y, poprzecznie do osi toru) oraz pionowych (kierunek Z).

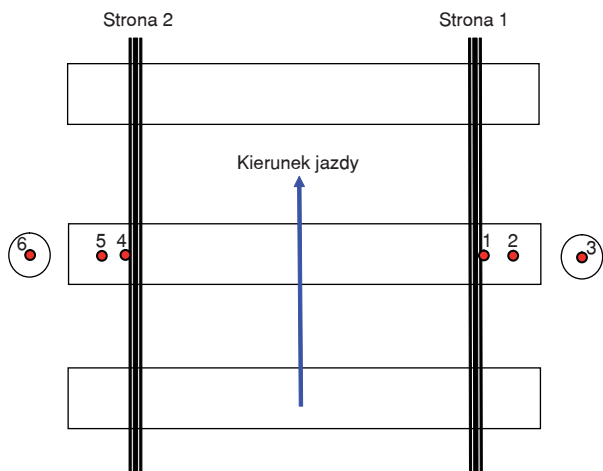
Stanowisko pomiarowe pokazano na rysunku 2, a schemat rozmieszczenia czujników przyspieszeń na rysunku 3.



Rys. 1. Wizualizacja pociągu pomiarowego



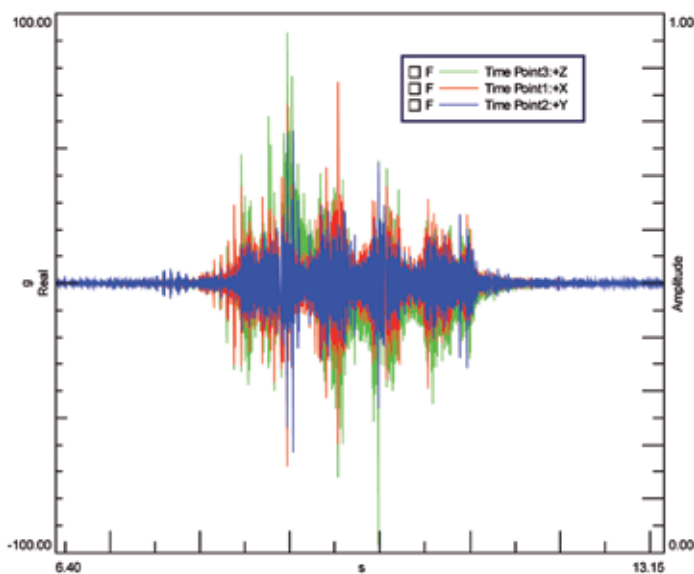
Rys. 2. Stanowisko pomiarowe



Rys. 3. Schemat rozmieszczenia czujników przyspieszeń

Wyniki badań oraz ich analiza

Przykładowy przebieg sygnału przyspieszenia szyny, zarejestrowany podczas badań pokazano na rysunku 4.



Rys. 4. Przebiegi czasowe przyspieszeń – szyna, kierunki X, Y, Z – strona 1, w punkcie pomiarowym P2

Na podstawie mierzonych sygnałów przyspieszeń w poszczególnych „punktach” pomiarowych uzyskano skuteczne wartości przyspieszeń a_{RMS} według wzoru:

$$a_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [a(t)]^2 dt}$$

gdzie:

$a(t)$ – oryginalny sygnał przyspieszeń;

T – czas, w którym drgania danego elementu nawierzchni są istotne (zależy od prędkości pociągu).

Wartość skuteczna określa średnie przyspieszenie drgań danego elementu nawierzchni, nie eksponując chwilowych, bardzo wysokich wartości przyspieszeń.

Dla każdego stanowiska pomiarowego wyznaczono – uśrednione z obu stron toru – wartości skuteczne przyspieszeń drgań poszczególnych elementów nawierzchni w funkcji prędkości po-

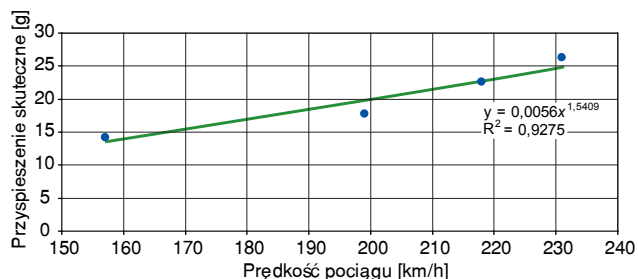
ciągu pomiarowego. Uzyskane zależności aproksymowano jedno-
mianem o wykładniku rzeczywistym, czyli funkcją postaci;

$$y = \alpha \cdot x^\beta$$

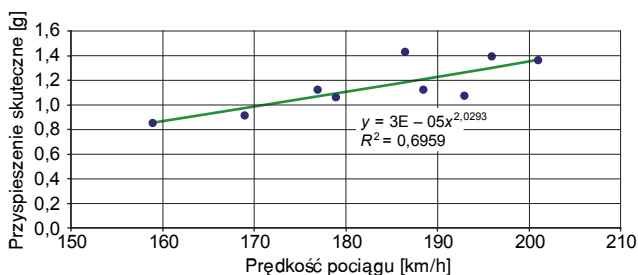
gdzie:

α, β – liczby rzeczywiste.

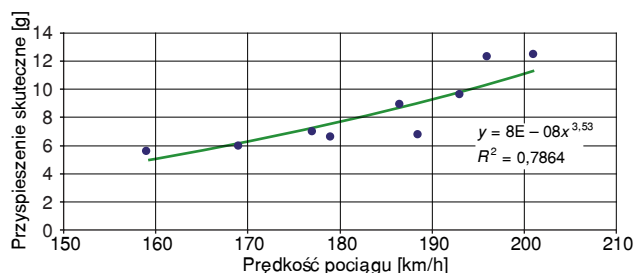
Przykładowe zależności przyspieszeń skutecznych drgań szyny, podkładu i podsiypki pokazano na rysunkach 5–9.



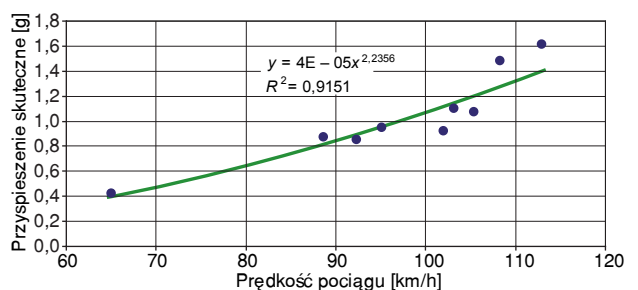
Rys. 5. Wpływ prędkości pociągu na przyspieszenia pionowe szyny (typowa nawierzchnia SB, stanowisko P3, tuki kołowy $R = 4000$ m)



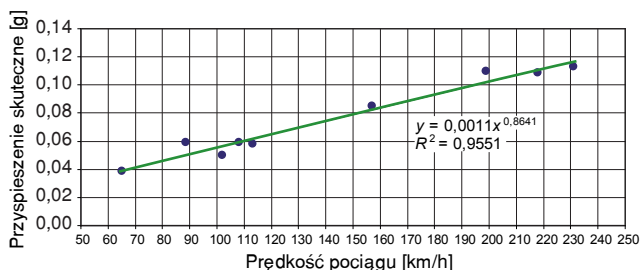
Rys. 6. Wpływ prędkości pociągu na przyspieszenia pionowe podkładu (nawierzchnia ICOSTRUN-02, stanowisko P2, tuki kołowy $R = 4000$ m)



Rys. 7. Wpływ prędkości pociągu na przyspieszenia poprzeczne szyny (nawierzchnia ICOSTRUN-02, tuki kołowy $R = 4000$ m)



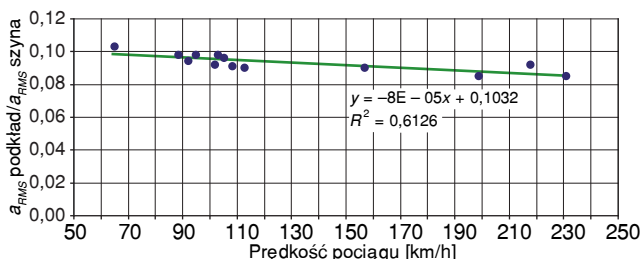
Rys. 8. Wpływ prędkości pociągu na przyspieszenia poprzeczne podkładu (nawierzchnia SB, wzmocniona podsiypka, prosta pozioma)



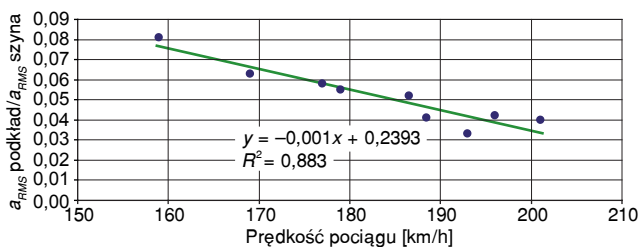
Rys. 9. Wpływ prędkości pociągu na przyspieszenia skuteczne w podsypce w kierunku pionowym (nawierzchnia SB ze wzmocnioną podsypką + typowa SB)

Jak widać uzyskane korelacje są istotne, przy czym kwadrat współczynnika korelacji jest na ogół na poziomie przekraczającym 0,8. Natomiast – w przeciwieństwie do zależności, uzyskanych w pracy [2] dla nawierzchni z podkładami drewnianymi – przyspieszenia podkładu zwiększają się bardziej niż funkcja liniowa, natomiast potwierdza się teza, że drgania w podsypce zwiększają się wraz z prędkością wolniej niż funkcja liniowa (por. rys. 9).

Z punktu widzenia właściwości wibroizolacyjnych przytwierdzenia istotne jest przeniesienie drgań z szyny na podkład, czyli stosunek drgań podkładu do drgań szyny. Na rysunkach 10 i 11 przedstawiono współczynniki przeniesienia drgań skutecznych dla nawierzchni typowej SB (ze wzmocnioną i nie wzmocnioną podsypką, P1 i P3) oraz dla nawierzchni z przytwierdzeniem ICOSTRUN, stanowisko pomiarowe P2). Uzyskane dane aproksymowano funkcją liniową.



Rys. 10. Wpływ prędkości pociągu na przeniesienie drgań pionowych szyna–podkład (nawierzchnia typowa SB) – średni współczynnik: 0,0932

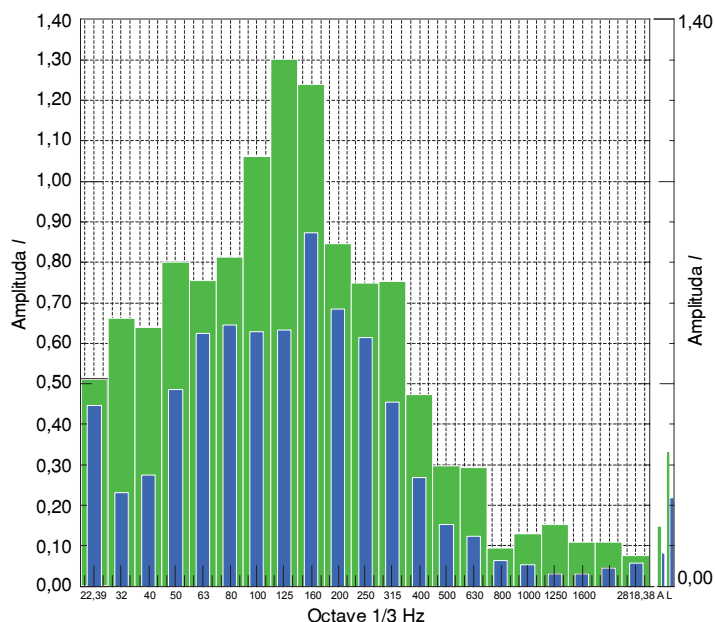


Rys. 11. Wpływ prędkości pociągu na przeniesienie drgań szyna–podkład w kierunku pionowym (nawierzchnia ICOSTRUN-02) – średni współczynnik: 0,051

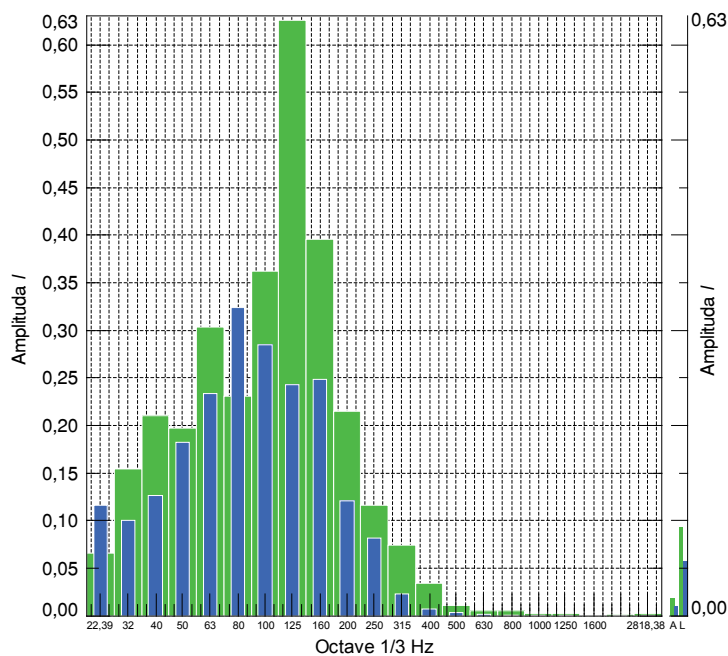
Z danych, pokazanych na rysunkach 10 i 11 wynika, że średni współczynnik przeniesienia drgań z szyny na podkład w nawierzchni SB jest ponad 80% wyższy niż w nawierzchni ICOSTRUN, a współczynnik intensywności zanikania drgań podkładu w stosunku do drgań szyny wraz z prędkością jest – w przypadku nawierzchni z przytwierdzeniem ICOSTRUN – ponad 10-krotnie

większy niż w nawierzchni typowej (0,001 wobec 0,00008, por. rys. 10 i 11). Świadczy to wymownie o tym, że nawierzchnia z podkładem PS-08 i przytwierdzeniem ICOSTRUN-02 jest szczególnie przydatna dla linii dużych prędkości.

Przeniesienie drgań z szyny na podkład i z szyny w podsypkę można również przeanalizować w dziedzinie częstotliwości. Na rysunkach 12 i 13 zestawiono charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowe podkład–szyna i podsypka–szyna, uzyskane dla nawierzchni SB (punkt pomiarowy P3) oraz ICOSTRUN (punkt pomiarowy P2). Charakterystyki te uzyskano z widma, uśredniającego poziomy drgań w pasmach tercjowych.



Rys. 12. Widmo tercjowe przeniesienia drgań podkład–szyna w kierunku pionowym; porównanie dla wszystkich prędkości P2 oraz P3 – kolor zielony: P3, kolor niebieski: P2



Rys. 13. Widmo tercjowe przeniesienia drgań podsypka–szyna w kierunku pionowym; porównanie dla wszystkich prędkości P2 oraz P3 – kolor zielony: P3, kolor niebieski: P2

Jak widać przeniesienie drgań podkład–szyna w przypadku nawierzchni z przytwierdzeniem ICOSTRUN-02 jest mniejsze od nawierzchni SB w całym analizowanym przedziale częstotliwości, a w przypadku charakterystyki podsypka–szyna w prawie całym przedziale częstotliwości. Zatem również w dziedzinie częstotliwości wykazano wyższą efektywność wibroizolacyjną przytwierdzenia ICOSTRUN-02 w stosunku do typowej nawierzchni SB.

Wnioski

Na podstawie przedstawionych w pracy wyników badań przyspieszeń drgań w elementach nawierzchni na odcinkach testowych linii CMK oraz na podstawie innych danych, zamieszczonych w pracy [5], można sformułować następujące spostrzeżenia i wnioski.

1. Analiza przyspieszeń skutecznych drgań szyny, podkładu i podsypki pokazała wzrost poziomu drgań wraz z prędkością pociągu testowego we wszystkich elementach nawierzchni i wszystkich badanych jej typów. Poziom przyspieszeń drgań szyny istotnie zależy od lokalnych jej nierówności; dlatego charakterystyką danego typu nawierzchni są współczynniki przeniesienia drgań z szyny na podkład i z szyny na podsypkę, zarówno w dziedzinie czasu (wartości skuteczne drgań), jak i w dziedzinie częstotliwości (widma przyspieszeń).

2. Analiza współczynników przeniesienia drgań z szyny na podkład i z szyny na podsypkę wykazała, że:

- a) przeniesienie drgań pionowych z szyny na podkład i z szyny na podsypkę w przypadku nawierzchni ICOSTRUN-02 jest prawie dwukrotnie mniejsze niż dla nawierzchni z przytwierdzeniem SB, a średnia intensywność spadku współczynnika przenoszenia wraz z prędkością jest ponad 10-krotnie wyższa;
- b) przeniesienie drgań w kierunku wzdłużnym i poprzecznym w przypadku nawierzchni ICOSTRUN-02 jest średnio około 20% gorsze niż w przypadku typowej nawierzchni SB – przy prędkości około 200 km/h przeniesienie drgań w kierunku

poprzecznym jest w przypadku nawierzchni ICOSTRUN-02 o około 10% niższe niż w przypadku typowej nawierzchni SB;

3. Analiza widmowa pokazała, że przeniesienie drgań „szyna–podkład” i „szyna–podsypka” w całym zakresie istotnych praktycznie częstotliwości jest korzystniejsze w przypadku nawierzchni ICOSTRUN-02.

4. Wyniki analiz przyspieszeń skutecznych drgań oraz analizy widmowe wskazują jednoznacznie, że nawierzchnia ICOSTRUN-02 z podkładem PS-08 szczególnie nadaje się do zastosowania w nawierzchni przeznaczonej dla dużych prędkości. □

Literatura

- [1] Basiewicz T., Batuch H. i wsp.: *Przystosowanie kolei do zwiększonych prędkości i dużych przewozów*. WKiŁ, Warszawa 1969.
- [2] Czyczula W.: *Analiza wpływu drgań nawierzchni kolejowej na deformacje podsypki*. Praca doktorska, Politechnika Krakowska, Kraków 1985.
- [3] Czyczula W., Stawowiak J. i wsp.: *Badania laboratoryjne systemu przytwierdzenia ICOSTRUN – 02*. Prace Politechniki Krakowskiej, Kraków 2008 (na prawach rękopisu).
- [4] Czyczula W., Derkowski W. i wsp.: *Projekt techniczny podkładu PS-08*. Politechnika Krakowska, Kraków 2008 (na prawach rękopisu).
- [5] Praca zbiorowa: *Nawierzchnia kolejowa dla linii dużych prędkości w warunkach polskich*. Sprawozdanie z badań, etap III, Politechnika Krakowska, Kraków 2009 (na prawach rękopisu).

Autorzy

prof. dr hab. inż. Włodzimierz Czyczula
inż. Jerzy Stawowiak
mgr inż. Grzegorz Szczepaniak-Krupowski
Politechnika Krakowska,
czyczula@pk.edu.pl, 012 628 23 58

➤ *Dokończenie ze s. 83*

- [10] Koc W., Wilk A.: *Investigations of methods to measure longitudinal forces in continuous welded rail tracks using the tamping machine*. Proc. IMechE, Part F: J. Rail and Rapid Transit, 223 (F1). (2009).
- [11] Koc W., Wilk A., Grulkowski S., Chrostowski P.: *Poszukiwania metody określania sił podłużnych w szynach toru bezstykowego*. Technika Transportu Szynowego 1-2/2009.
- [12] Krużyński M., Gisterek I.: *Stabilizacja podsypki kolejowej*. II Konferencja Naukowo-Techniczna „INFRAZYN 2009”, Zakopane (2009).
- [13] Lichtberger B.: *The lateral resistance of the track*. European Railway Review, Issue 3 & 4 (2007).
- [14] Meisel J.: *Zasady elektromechanicznego przetwarzania energii*. WNT, Warszawa (1970).
- [15] Miyai T. i wsp.: *Lateral ballast resistance of operating line*. Quarterly Report of RTRI 4/1983.
- [16] Nam-Hyoung Lim, Nam-Hoi Park, Young-Jong Kang: *Stability of continuous welded rail track*. Computers and Structures 81/2003, Issue 22–23.
- [17] *Consolidation of the permanent way*. Rail Engineering International 3/1974.
- [18] Saussine G., Cholet C., Gautier P.E., Dubois F., Bohatier C., Moreau J.J.: *Modelling ballast behaviour under dynamic loading*. Part 1: A 2D

polygonal discrete element method approach. Comput. Methods Appl. Mech. Engrg., Vol. 195 (2006).

- [19] Szumier W.: *Określanie charakterystyki poprzecznej toru bezstykowego metodą wymuszonego kontrolowanego przesunięcia poprzecznego*. Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej, nr 41, seria Budownictwo Lądowe (1995).
- [20] Towpik K.: *Opory boczne podsypki*. Przegląd Kolejowy Drogowy 6/1970.
- [21] Towpik K.: *Utrzymanie nawierzchni kolejowej*. WKiŁ, Warszawa (1990).
- [22] Zarembski A. M.: *Factors that influence resistance to lateral track shift*. Railway Track and Structures, No. 2 (1995).

Autorzy

Władysław Koc,
Andrzej Wilk,
Piotr Chrostowski,
Sławomir Grulkowski
Politechnika Gdańska