

Andrzej SUROWIECKI

Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Instytut Budownictwa,
pl. Grunwaldzki 24, 50-363 Wrocław
E-mail: andrzej.surowiecki@up.wroc.pl

Wojciech KOZŁOWSKI

Politechnika Opolska, Katedra Dróg i Mostów, ul. Ozimska 75A, 45-368 Opole
E-mail: w.kozlowski@po.opole.pl

Marcin WASIAK

Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Instytut Budownictwa,
pl. Grunwaldzki 24, 50-363 Wrocław

Symulacja numeryczna współdziałania elementów nawierzchni kolejowej

1 Uwagi wprowadzające

Podkład posadowiony na odpowiednio zagęszczonej warstwie podsypki tłuczniowej stanowi zespół o zasadniczym znaczeniu dla jakości funkcjonowania toru kolejowego. Podstawowym zadaniem zespołu podkład-podsypka jest przejmowanie i w sposób bezpieczny przekazywanie obciążeń eksploatacyjnych na podłoże. Właściwy dobór parametrów geometrycznych i wytrzymałościowych podkładu oraz cech materiałowych podsypki i charakter ich współdziałania warunkuje bezpieczne i komfortowe użytkowanie szlaku, w tym także stosowanie dopuszczalnej prędkości jazdy bez lokalnych ograniczeń. Analizowane w referacie zagadnienie modelowania współpracy podkład kolejowy-podsypka jest szczególnie istotne w świetle ostatniej edycji Warunków Technicznych Utrzymania Podtorza Id-3 [1] oraz Standardów Technicznych [2].

Warunki Techniczne [1] dotyczą podtorza na kolejach normalnotorowych użytku publicznego, zarządzanych przez PKP Polskie Linie Kolejowe S.A., na których eksploatowana jest nawierzchnia konwencjonalna przy założeniu:

- prędkości pociągów pasażerskich $v \leq 250$ km/h i pociągów towarowych $v \leq 120$ km/h,
- nacisków osi pojazdów $Q \leq 221$ kN, dopuszczając do 5% przewozów z naciskami $Q \leq 245$ kN.

Natomiast przyjęte do stosowania w pracach projektowych i wykonawczych realizowanych przez PKP PLK S.A. Standardy Techniczne [2] obowiązują dla taboru konwencjonalnego, zakładając prędkość $v_{max} \leq 200$ km/h oraz dla taboru z wychylnym nadwoziem przy założeniu $v_{max} \leq 250$ km/h. Standardy [2] są szczegółowymi warunkami technicznymi dla modernizacji lub budowy linii kolejowych, obowiązującymi od dnia 14.06.2010 r.

2 Modele i zakres ich stosowania

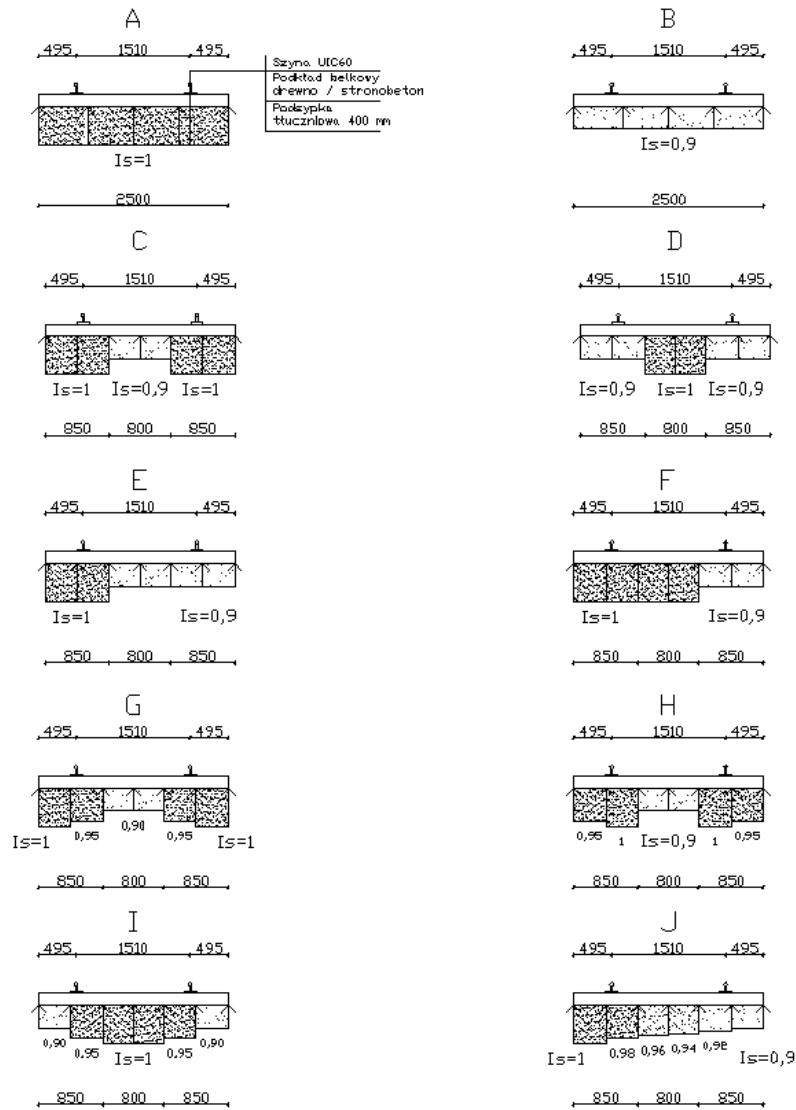
Analizowanym obiektem jest model numeryczny podkładu kolejowego, pogrążonego w warstwie podsypki tłuczniowej o ustalonej grubości i niezmiennych cechach wytrzymałościowych [4].

Celem badań jest określenie wartości i rozkładu naprężeń normalnych w podkładzie, przy założeniu zmiennych parametrów dotyczących:

- materiału, z którego jest wykonany podkład (analizowane są dwa rodzaje podkładów drewnianych i dwa strunobetonowych),
- podłoża tworzonego przez podsypkę tłuczniową (stopień zagęszczenia i rozkład stref zagęszczenia, moduł sprężystości kruszywa).

Zasadniczym (analitycznym) elementem badań jest ocena stanu naprężeń normalnych (rozkład wartości naprężeń w profilu podłużnym podkładu), sporządzona na podstawie symulacji eksploatacyjnego obciążenia podkładów posadowionych na podsypce. Symulację wykonano w programie numerycznym Autodesk Robot Structural Analysis 2010 [4]. Wspomniana aplikacja umożliwia wygenerowanie modelu obliczeniowego konstrukcji o parametrach identycznych lub zbliżonych do rzeczywistych [3].

Modelem badawczym jest zespół podkład-podsypka, obciążony statycznym naciskiem osiowym $Q = 221$ kN (pojazd nieruchomy) [3, 4]. Przyjęto założenie o prostym odcinku toru, znajdującym się na szlaku. Podkład potraktowano jako belkę prostopadłościenną, którą następnie zamodelowano elementem tarczowym. Wysokość i długość podkładu odwzorowano w sposób rzeczywisty. Analizie poddano następujące rodzaje i typy podkładów: drewniany belkowy IB wykonany z drewna sosnowego C40, drewniany belkowy IB z drewna dębowego D70, strunobetonowy PS-83 i PS-94.



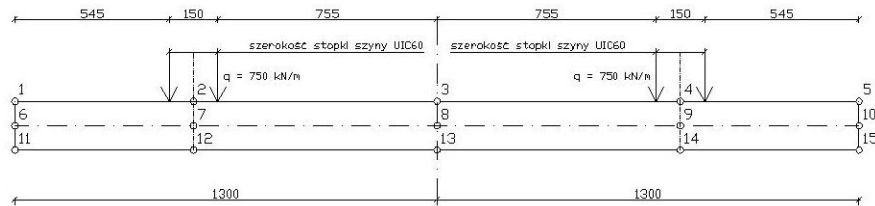
Rys. 1. Modele badawcze - schematy posadowienia podkładu na podsypce [4]

Fig. 1. Research models - schemes of foundation sleeper on ballasted [4]

Modele badawcze, różniące się sposobem podparcia podkładu na podsypce pokazano na rysunku 1 [4]. Założono w modelu podsypkę wykonaną z tłucznia granitowego frakcji 31,5/63 mm, o grubości warstwy $h_t = 0,4$ m. Sposób podparcia scharakteryzowano parametrami: konfiguracja stref zagęszczenia, wartość stopnia zagęszczenia w zakresie I_s

= 0,9-1,00. Podkład jest obciążony dwoma pionowymi naciskami skupionymi o wartości $0,5 \cdot Q = 0,5 \cdot 221 \text{ kN}$, które przetransformowano na obciążenie równomiernie rozłożone o intensywności $q = 750 \text{ kN/m}$, działające na szerokości stopek szyn typu 60E1.

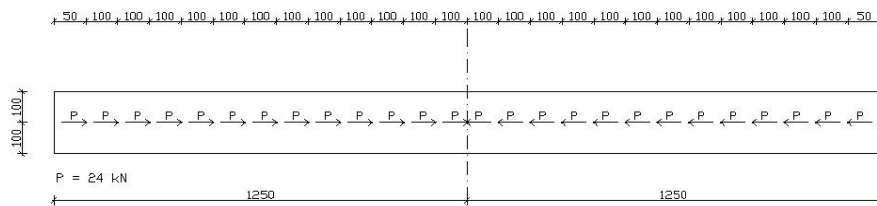
Oszacowanie wartości naprężeń normalnych w podkładach wykonano w charakterystycznych punktach przekroju podłużnego, założonych: w osi poziomej, na krawędzi górnej i dolnej podkładu, w pionowej osi symetrii podkładu, w pionowych przekrojach podkładu pod osiami symetrii szyn, na skrajnych krawędziach podkładu. Schemat rozmieszczenia punktów pomiarowych w przekroju podłużnym podkładu znajduje się na rysunku 2 [4].



Rys. 2. Rozmieszczenie punktów pomiarowych w przekroju podłużnym podkładu [4]

Fig. 2. Distribution of measurement points in the longitudinal sleeper [4]

Problem modelowania wstępnego sprężenia podkładów strunobetonowych rozwiązano, wykonując uproszczenie, polegające na wprowadzeniu siły sprężającej (jako obciążenie skupione) w sposób centryczny, w linii wyznaczającej środek ciężkości strun sprężających element. W podkładzie typu PS-83 sprężającą siłę dobrano na podstawie dokumentacji technicznej dostarczonej przez producenta. Wartość tej siły po uwzględnieniu strat wynosi 300 kN. Konstruując model, wartość tę podzielono na trzynaście elementów cząstkowych i następnie zaokrąglono otrzymując $P = 24 \text{ kN}$ i rozlokowano w odstępach co $\Delta x = 100 \text{ mm}$ na długości osi stanowiącej środek ciężkości strun obustronnie, po każdej stronie pionowej poprzecznej osi symetrii podkładu (rys. 3).

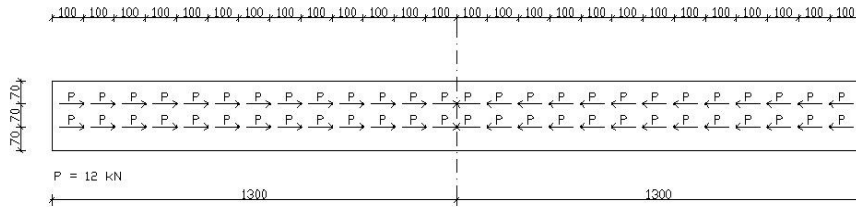


Rys. 3. Schemat modelowania wstępnego sprężenia podkładu strunobetonowego PS-83 [4]

Fig. 3. Schema modeling of the initial compression string-concrete sleeper PS-83 [4]

W przypadku podkładu PS-94 wartość sprężającej siły jest większa i po uwzględnieniu strat wynosi 310 kN (wg informacji otrzymanej od producenta). Z uwagi na specyfikę kształtu tego podkładu i technologię sprężania, trajektorie lokalizacji strun sprężających nie sprawdzono do jednej osi lecz do dwóch, usytuowanych symetrycznie względem osi podłużnej podkładu (rys. 4). Na każdą oś przypada wartość siły sprężającej 155 kN. Tę

siłę podzielono (analogicznie jak poprzednio) na 13 elementów cząstkowych o wartościach $P = 12 \text{ kN}$ i przyłożono w odstępach $\Delta x = 100 \text{ mm}$ na długości dwóch osi tworzących „obwiednię” środka ciężkości strun, po każdej stronie pionowej poprzecznej osi symetrii podkładu.



Rys. 4. Schemat modelowania wstępnego sprężenia podkładu strunobetonowego PS-94 [4]

Fig. 4. Schema modeling of the initial compression string-concrete sleeper PS-94 [4]

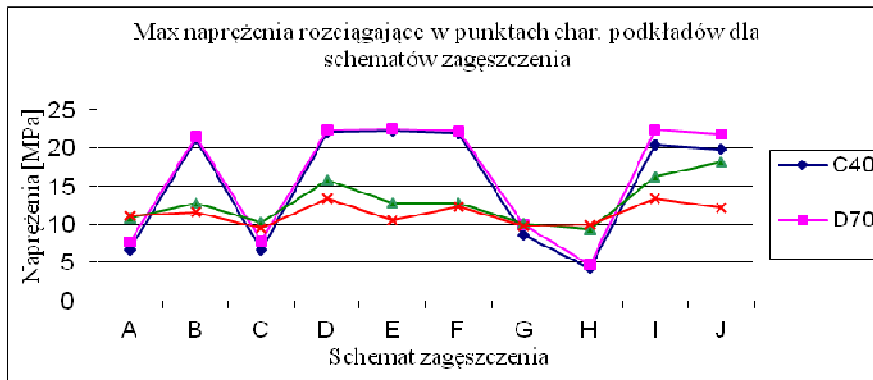
3 Analiza stanu naprężenia w poszczególnych modelach

W tabelicy 1 przedstawiono maksymalne naprężenia normalne rozciągające ($\sigma_r > 0$) [MPa] oszacowane w poszczególnych rodzajach podkładów, wchodzących w skład modeli badawczych A-J [4]. Natomiast rysunek 5 ilustruje wartości maksymalnych naprężeń normalnych rozciągających ($\sigma_r > 0$) w funkcji rodzaju podkładu i sposobu podparcia podkładu na podsypce [4]. Analogicznie w tabelicy 2 podano maksymalne wartości naprężeń ściskających ($\sigma_c < 0$) oraz na rysunku 6 kształtowanie się wartości maksymalnych naprężeń ściskających ($\sigma_c < 0$), zależnie od rodzaju podkładu i sposobu podparcia podkładu na podsypce [4]. Tablica 3 i rysunek 7 dotyczą wartości amplitud maksymalnych naprężeń normalnych (+) i (-) w poszczególnych modelach badawczych A-J, zależnie od rodzaju podkładu.

Tab. 1. Zestawienie max naprężeń normalnych ($\sigma_r > 0$) [MPa] w poszczególnych rodzajach podkładów, wchodzących w skład modeli badawczych A-J [4]

Tab. 1. Summary of maximum normal stresses ($\sigma_r > 0$) [MPa] in different types of sleepers, which were part of the research models A-J [4]

Podkład	Schemat										Max	Min
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J		
C40	6,58	21,20	6,66	22,04	22,19	21,93	8,56	4,19	20,46	19,87	22,19	4,19
D70	7,70	21,40	7,82	22,35	22,50	22,26	9,87	4,70	22,34	21,79	22,50	4,70
PS-83	10,80	12,83	10,17	15,79	12,74	12,74	10,05	9,29	16,23	18,16	18,16	9,29
PS-94	11,13	11,19	10,91	11,40	11,40	11,27	10,94	11,12	11,42	11,18	11,42	10,91
Max	11,13	21,40	10,91	22,35	22,50	22,26	10,94	11,12	22,34	21,79		
Min	6,58	11,19	6,66	11,40	11,40	11,27	8,56	4,19	11,42	11,18		



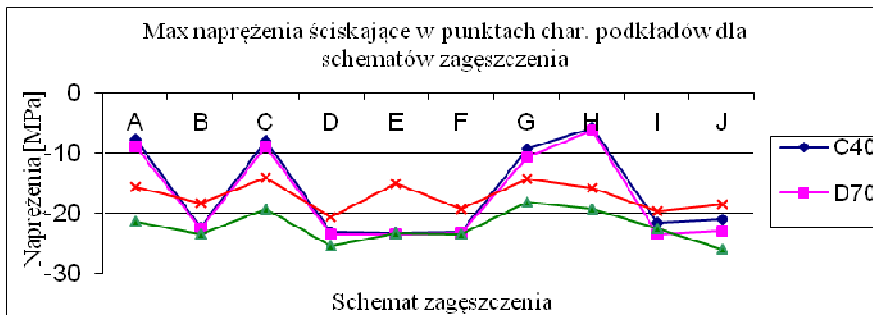
Rys. 5. Wartości maksymalnych naprężeń normalnych rozciągających ($\sigma_t > 0$) w funkcji rodzaju podkładu i sposobu podparcia podkładu na podsypce [4]

Fig. 5. The values of maximum normal tensile stress ($\sigma_t > 0$) as a function of the type of sleeper and how to support sleeper on ballasted [4]

Tab. 2. Maksymalne wartości naprężeń ściskających ($\sigma_c < 0$) w poszczególnych rodzajach podkładów, wchodzących w skład modeli badawczych A-J [4]

Tab. 2. Summary of maximum compressive stresses ($\sigma_c < 0$) [MPa] in different types of sleepers, which were part of the research models A-J [4]

Schemat		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	Max	Min
Podkład	C40	-7,84	-22,37	-7,93	-23,21	-23,36	-23,10	-9,45	-5,90	-21,66	-21,07	-5,90	-23,36
	D70	-8,95	-22,57	-9,06	-23,52	-23,67	-23,43	-10,76	-6,38	-23,51	-22,96	-6,38	-23,67
	PS-83	-21,39	-23,67	-19,40	-25,59	-23,48	-23,49	-18,24	-19,30	-22,68	-26,02	-18,24	-26,02
	PS-94	-15,64	-17,95	-15,45	-18,24	-18,07	-18,05	-15,47	-17,69	-18,23	-17,90	-15,45	-18,24
	Max	-7,84	-17,95	-7,93	-18,24	-18,07	-18,05	-9,45	-5,90	-18,23	-17,90		
	Min	-21,39	-23,67	-19,40	-25,59	-23,67	-23,49	-18,24	-19,30	-23,51	-26,02		



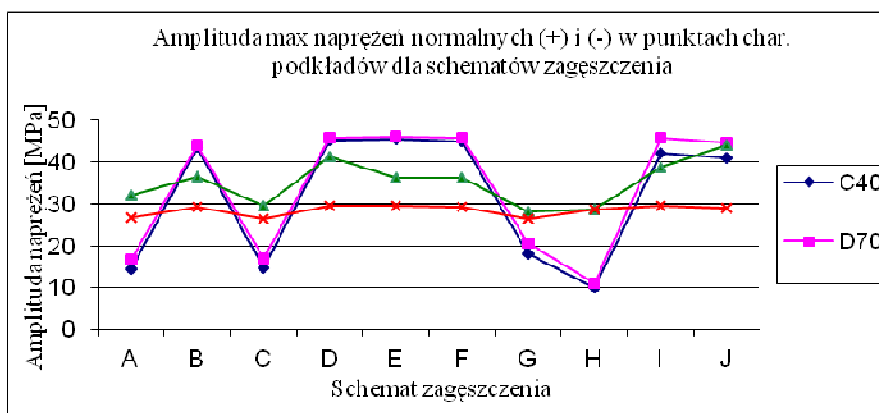
Rys. 6. Wartości maksymalnych naprężeń normalnych ściskających ($\sigma_c < 0$) w funkcji rodzaju podkładu i sposobu podparcia podkładu na podsypce [4]

Fig. 6. The values of maximum normal compressive stress ($\sigma_c < 0$) as a function of the type of sleeper and how to support sleeper on ballasted [4]

Tab. 3. Amplituda maksymalnych naprężeń normalnych (+) i (-) w poszczególnych modelach badawczych A-J, zależnie od rodzaju podkładu [4]

Tab. 3. The amplitude of the maximum normal stress (+) and (-) in various research models AJ, depending on the sleeper [4]

Podkład	Schemat										Max	Min
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J		
C40	14,42	43,57	14,59	45,25	45,55	45,03	18,01	10,08	42,12	40,94	45,55	10,08
D70	16,65	43,97	16,88	45,87	46,17	45,69	20,63	11,07	45,84	44,76	46,17	11,07
PS-83	32,19	36,50	29,57	41,38	36,22	36,23	28,29	28,59	38,91	44,18	44,18	28,29
PS-94	26,77	29,14	26,36	29,64	29,47	29,31	26,41	28,81	29,65	29,08	29,65	26,36
Max	32,19	43,97	29,57	45,87	46,17	45,69	28,29	28,81	45,84	44,76		
Min	14,42	29,14	14,59	29,64	29,47	29,31	18,01	10,08	29,65	29,08		



Rys. 7. Amplituda maksymalnych naprężeń normalnych (+) i (-) w poszczególnych modelach badawczych A-J, zależnie od rodzaju podkładu [4]

Fig. 7. The amplitude of the maximum normal stress (+) and (-) in various research models AJ, depending on the sleeper [4]

Jako rezultat działań numerycznych otrzymano zbiór wartości: największych naprężeń normalnych $\sigma_{max}^{(+)}$, największych naprężeń normalnych $\sigma_{max}^{(-)}$, największych amplitud naprężeń normalnych (+) i (-), najmniejszych naprężeń normalnych $\sigma_{min}^{(+)}$, najmniejszych naprężeń normalnych $\sigma_{min}^{(-)}$, najmniejszych amplitud naprężeń normalnych (+) i (-).

W oparciu o powyższe rezultaty badań sformułowano wnioski:

1) Najbardziej korzystnymi modelami podkładu posadowionego na podsypce (z uwagi na wartości naprężeń normalnych i ich amplitudy) są te, w których maksymalne zagęszczenie podsypki występuje w strefie pod szynami, czyli w obszarze przyłożenia obciążenia eksploatacyjnego (modele H, A, C). W tych modelach max naprężenia (+) i (-) wykazują wartości najniższe w podkładach drewnianych.

2) Najbardziej niekorzystnymi modelami (ze względu na wartości naprężeń normalnych i ich amplitudy) są modele E, D, F, B, I, J, w których stopień zagęszczenia podsypki pod strefą obciążenia jest niezadawalający lub struktura zagęszczenia podsypki jest

asymetryczna. W tych modelach max naprężenia (+) i (-) osiągają wartości najniższe w podkładach strunobetonowych.

3) Najniższe amplitudy naprężeń normalnych stwierdzono dla wszystkich typów podkładów w modelach *H*, *A*, *C*, należących do najbardziej korzystnych (symetryczny rozkład zagęszczenia podsypki i maksymalne zagęszczenie w strefach pod szynami).

4) Podkład strunobetonowy typu PS-94 nie wykazuje najniższych wartości naprężeń normalnych, jednak jego charakter pracy jest najbardziej stabilny, ponieważ zmiany wartości maksymalnych naprężeń i amplitud w zależności od zmian struktury zagęszczenia podsypki pod podkładem są niewielkie.

4 Podsumowanie

Analiza modeli podkładów w zmiennych warunkach podparcia na podsypce wykazała między innymi pozytywną cechę zachowania się podkładów strunobetonowych typu PS-94 w odniesieniu do podkładów strunobetonowych starszego typu (PS-83). Tą cechą jest stabilność, czyli utrzymanie „reżimu” niewielkich zmian stanu naprężeń normalnych i amplitud wobec zmian struktury zagęszczenia podsypki, będących wynikiem zaniedbań w utrzymaniu toru albo wystąpienia nagłej lokalnej destrukcji podłoża, wygenerowanej sytuacją kryzysową (np. wysoki poziom wody gruntowej i jej filtracja).

Badania wykonano posługując się niewielką liczbą modeli i stosując znaczne uproszczenia. Analiza ma dość ograniczony zakres. Rezultaty analizy potwierdzają rozwojowy charakter tematu badawczego i celowość kontynuacji badań na podstawie modeli zmodyfikowanych, na przykład w zakresie obciążenia, uwzględniając superpozycję sił pionowych i poziomych działających na szynę.

Literatura

1. Id-3 Warunki Techniczne Utrzymania Podtorza Kolejowego. PKP Polskie Linie Kolejowe S.A., Warszawa 2009.
2. Standardy Techniczne-Szczegółowe warunki techniczne dla modernizacji lub budowy linii kolejowych do prędkości $v \leq 200$ km/h dla taboru konwencjonalnego i $v \leq 250$ km/h dla taboru z wychylnym nadwoziem. Centrum Naukowo Techniczne Kolejnictwa, Warszawa 2009.
3. Surowiecki A.: *Podstawy teorii nawierzchni dróg szynowych*. Wykład dla studiów doktoranckich. Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Instytut Budownictwa, Wrocław 2011.
4. Wasiak M.: *Analiza współpracy podkładu kolejowego z podłożem*. Pr. magisterska. Promotor: Surowiecki A., Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Instytut Budownictwa, Wrocław 2011.

Streszczenie

Przedmiotem referatu jest model numeryczny zespołu dwóch elementów nawierzchni kolejowej: podkładu kolejowego, pogrążonego w warstwie podsypki tłuczniowej o ustalonej grubości i niezmiennych cechach wytrzymałościowych. Model służy do oceny wartości i rozkładu naprężeń normalnych w podkładzie, przy założeniu zmiennych parametrów dotyczących: materiału, z którego jest wykonany podkład oraz podłoża tworzonego przez podsypkę tłuczniową. Symulację eksploatacyjnego obciążenia

podkładów posadowionych na podsypce wykonano w programie Autodesk Robot Structural Analysis 2010.

Numerical simulation of cooperation between surface components of railway

Summary

The subject of the paper was the numerical model assembly of two elements railway surface: sleeper railway mired in the ballast broken stone layer fixed thickness and unchanging features of endurance. The model was used to assess the value and the normal stress distribution in the sleeper, assuming the variable parameters: the material it is made of a sleeper and a base formed by the broken stone ballast. Operational load simulation situated on ballasted sleepers were made in Autodesk Robot Structural Analysis 2010.