

Analiza stanu naprężeń normalnych w podkładzie kolejowym w zmiennych warunkach podparcia

Andrzej Surowiecki, Wojciech Kozłowski, Marcin Wasiak

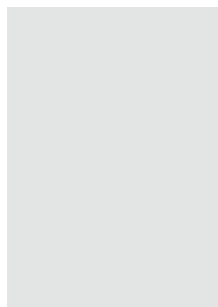
Przedmiotem analizy jest płaski stan naprężeń normalnych w podkładzie kolejowym, pograżonym w warstwie podsypki tłuczniowej o ustalonej grubości i niezmiennych cechach wytrzymałościowych. Określono wartości i rozkład naprężeń, przy założeniu zmiennych parametrów dotyczących: materiału, z którego jest wykonany podkład oraz podłoża tworzonego przez podsypkę tłuczniową. Symulację eksploatacyjnego obciążenia podkładów posadowionych na podsypce wykonano w programie numerycznym.



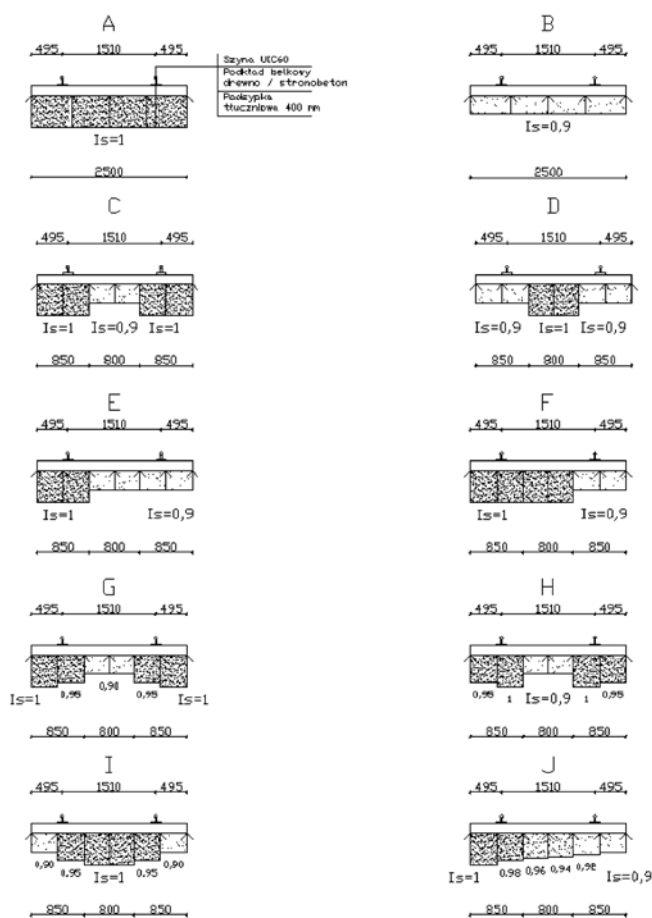
dr hab. inż.
Andrzej Surowiecki, prof.
UP, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu,
Instytut Budownictwa



dr inż.
Wojciech Kozłowski,
Politechnika Opolska,
Katedra Dróg i Mostów



mgr inż. Marcin Wasiak
Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Instytut Budownictwa



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

Podkład posadowiony na odpowiednio zagęszczonej warstwie podsypki tłuczniowej ma zasadnicze znaczenie 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 możliwość stosowania maksymalnej dopuszczalnej prędkości

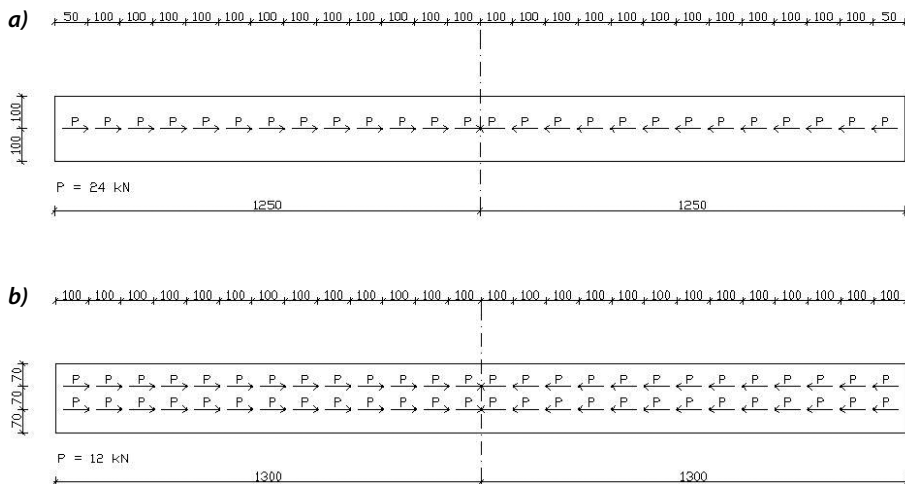
jazdy bez lokalnych ograniczeń. Analizowane w referacie zagadnienie współpracy podkład kolejowy-podsypka jest szczególnie istotne w świetle ostatniej edycji Warunków Technicznych Utrzymania Podtorza Id-3 [1] oraz Standardów Technicznych [2]. Warunki Techniczne [1] dotyczą podtorza na kolejach normalnotorowych 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, dopusz-

czając 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. Rozmieszczenie punktów pomiarowych w przekroju podłużnym podkładu [4]



3. Schemat modeli wstępnego sprężenia podkładów strunobetonowych:

a – PS-83, b – PS-94

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

Pkt	Schemat										Max	min	ampl.
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J			
1	0,05	-0,01	0,05	-0,01	0,05	0,05	0,12	0,00	-0,01	0,12	0,12	-0,01	0,13
2	-7,84	-21,44	-7,93	-22,12	-7,26	-7,91	-9,45	-5,52	-20,60	-10,00	-5,52	-22,12	16,59
3	0,27	11,91	1,11	10,75	6,83	5,61	2,88	1,28	9,57	7,51	11,91	0,27	11,64
4	-7,80	-22,37	-7,89	-23,21	-23,36	-23,10	-9,33	-5,90	-21,66	-21,07	-5,90	-23,36	17,47
5	0,09	-0,07	0,09	-0,09	-0,08	-0,09	0,21	-0,03	-0,09	-0,07	0,21	-0,09	0,30
6	-0,05	0,01	-0,05	0,01	-0,05	-0,05	-0,12	0,00	0,01	-0,12	0,01	-0,12	0,13
7	0,63	0,59	0,63	0,59	0,65	0,63	0,44	0,86	0,60	0,45	0,86	0,44	0,41
8	0,00	0,00	0,00	-0,07	0,00	-0,04	0,00	0,00	-0,06	0,00	0,00	-0,07	0,07
9	0,63	0,59	0,63	0,59	0,59	0,59	0,45	0,85	0,60	0,60	0,85	0,45	0,41
10	0,03	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,07	0,00	0,00	0,00	0,07	0,00	0,07
11	0,05	-0,01	0,05	-0,01	0,05	0,05	0,12	0,00	-0,01	0,12	0,12	-0,01	0,13
12	6,58	20,27	6,66	20,95	5,95	6,64	8,56	3,81	19,39	9,10	20,95	3,81	17,14
13	-0,27	-11,91	-1,11	-10,61	-6,82	-5,53	-2,88	-1,28	-9,44	-7,50	-0,27	-11,91	11,64
14	6,54	21,20	6,62	22,04	22,19	21,93	8,44	4,19	20,46	19,87	22,19	4,19	18,00
15	-0,16	0,07	-0,16	0,09	0,07	0,09	-0,36	0,03	0,08	0,07	0,09	-0,36	0,44
Max	6,58	21,20	6,66	22,04	22,19	21,93	8,56	4,19	20,46	19,87			
Min	-7,84	-22,37	-7,93	-23,21	-23,36	-23,10	-9,45	-5,90	-21,66	-21,07			
ampl.	14,42	43,57	14,59	45,25	45,55	45,03	18,01	10,08	42,12	40,94			

Przedmiot, cel i zakres badań

Badanym obiektem jest model numeryczny podkładu kolejowego, wbudowanego 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].

Aplikacja ta umożliwia wygenerowanie modelu obliczeniowego konstrukcji o parametrach identycznych lub zbliżonych do rzeczywistych [3].

Modele badawcze

Modele badawcze, przedstawione na rysunku 1 skonstruowano z dwóch elementów: podkładu i podsypki tłuczniowej [4]. Modele różnią się sposobem podparcia podkładu na podsypce, wyrażonym stopniem zagęszczenia kruszywa i lokalizacją stref o zmiennym zagęszczeniu. Zastosowano obciążenie statycznym naciskiem osiowym $Q = 221$ kN (pojazd nieruchomy) [3, 4]. Rozpatruje się prosty odcinek toru, zlokalizowany na szlaku. Analizie poddano dwa rodzaje podkładów: drewniane belkowe IB wykonane z drewna sosnowego C40 i dębowego D70 oraz strunobetonowe PS-83 i PS-94. Podkłady przedstawiono w uproszczeniu jako belki prostopadłościowe, które następnie zamodelowano elementem tarczowym. Wysokość i długość podkładów odwzorowano w sposób rzeczywisty.

Przyjęto podsypkę wykonaną z tłuczniwa granitowego frakcji 31,5/63 mm, o grubości warstwy $h_t = 0,4$ m. Sposób podparcia podkładu 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 $0,5 \cdot Q = 0,5 \cdot 221$ kN, które przetransformowano na obciążenie równomiernie rozłożone o intensywności $q = 750$ 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].

Problem modelowania wstępnego sprężenia podkładów strunobetonowych rozwiązano, wykonując uproszczenie, polegające na wprowadzeniu siły sprężającej centrycznie. Schematy modeli wstępnego sprężenia podkładów PS-83 i PS-94 pokazano na rysunku 3 [4]. Całkowita siła sprężająca po uwzględnieniu strat wynosi $P_c = 300$ kN dla podkładu PS-83 oraz $P_c = 310$ kN dla PS-94 (wg informacji otrzymanej od producenta).

Wyniki badań i analiza

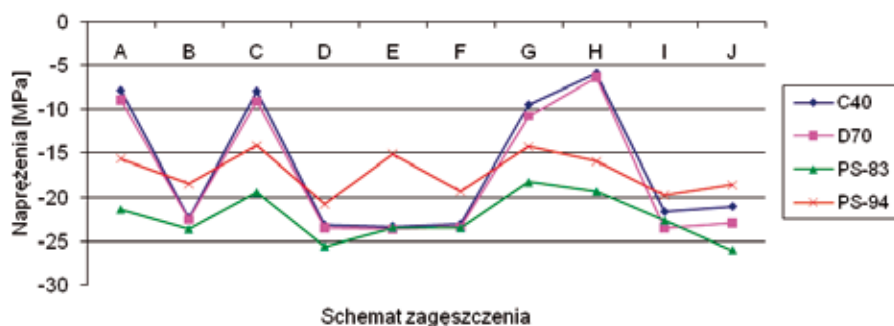
W pierwszym podejściu analiza dotyczyła stanu naprężenia w podkładzie drewnianym typu C40. W tabeli 1 zamieszczono wartości naprężeń normalnych ściskających $\sigma_c < 0$ i rozciągających $\sigma_r > 0$ dla poszczególnych schematów modeli podparcia podkładu [4]. Oznaczenia: Pkt1-15 – punkty pomiarowe, A, B, C,

Max naprężenia rozciągające w punktach char. podkładów dla schematów zagęszczenia



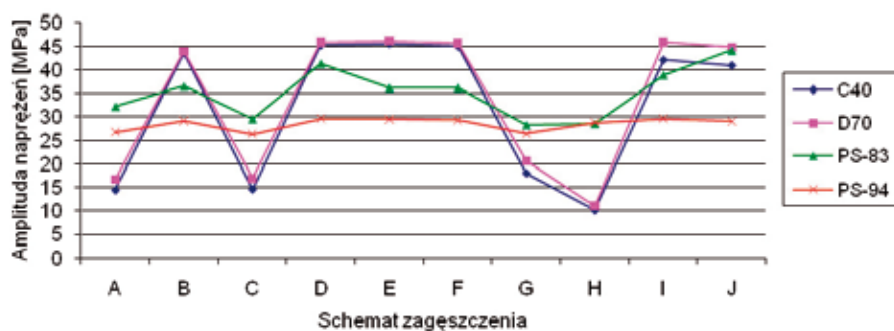
4. Wartości maksymalnych naprężeń normalnych rozciągających ($\sigma_t > 0$) w funkcji rodzaju podkładu i sposobu podparcia podkładu na podsypce [4]

Max naprężenia ściskające w punktach char. podkładów dla schematów zagęszczenia



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

Amplituda max naprężeń normalnych (+) i (-) w punktach char. podkładów dla schematów zagęszczenia



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

Tab.2. Zestawienie max naprężeń normalnych ($\sigma_t > 0$) [MPa] w poszczególnych rodzajach podkładów, wchodzących w skład modeli badawczych A-J [4]

		Schemat										Max	min
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J		
Podkład	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		

D, E, F, G, H, I, J – modele badawcze.

Z powyższego zestawienia tabelarycznego wyprowadzono spostrzeżenia:

- największe naprężenia rozciągające występują w punktach nr 12 (20,95 MPa) i 14 (22,19 MPa), zlokalizowanych na spodzie podkładu, bezpośrednio pod przyłożonym obciążeniem; trzecim w kolejności punktem, charakteryzującym się wysoką wartością naprężeń rozciągających jest punkt nr 3 (11,91 MPa), położony na górnej płaszczyźnie podkładu, w osi jego symetrii;
- największe wartości naprężeń ściskających zlokalizowano w punktach nr 2 (22,12 MPa) i nr 4 (23,36 MPa) znajdujących się na górnej płaszczyźnie podkładu, w miejscu przyłożenia obciążenia eksploatacyjnego; trzecim w kolejności punktem wykazującym znaczące wartości naprężeń ściskających jest nr 13 (11,91 MPa), położony na dolnej płaszczyźnie podkładu, w osi jego symetrii;
- w punktach wyszczególnionych powyżej występuje także największa amplituda naprężeń, zawierająca się w zakresie 11,64-18,0 MPa.

Wobec powyższego, najbardziej wyęczone punkty podkładu drewnianego C40 są zlokalizowane na płaszczyźnie górnej i dolnej podkładu w osiach szyn (miejsca przyłożenia obciążenia) oraz w pionowej osi symetrii podkładu. Wartości naprężeń w pionowej osi symetrii podkładu (punkty nr 3 i nr 13) stanowią około 50 % wartości naprężeń ekstremalnych. Punkty położone w poziomej osi symetrii podkładu (nr 6, 7, 8, 9, 10) oraz na jego krawędziach bocznych (nr 1, 6, 11, 5, 10, 15) wykazują niewielkie wartości naprężeń. W tej grupie punktów wyróżniają się tylko nr 7 i nr 9 (ich wartości naprężeń zawierają się w zakresie 0,5-0,9 MPa), pozostałe wykazują wyężenie nieprzekraczające 0,4 MPa.

Najbardziej korzystny rozkład naprężeń (niskie wartości i znacznie ograniczona amplituda tych wartości) stwierdza się w modelach H, A, C i G. Są to modele, w których pod strefą obciążenia eksploatacyjnego założono największy stopień zagęszczenia podsypki. W tym zbiorze modeli, najniższe wartości naprężeń w podkładzie i minimalną wartość amplitudy notuje się w modelu H: $\sigma_t = +4,19$ MPa; $\sigma_c = -5,90$ MPa; $\Delta\sigma^A = 10,08$ MPa. Model ten uznano za najbardziej korzystny – przedstawione wyniki badań okazały się bardziej pozytywne niż w przypadku modelu A, w którym podsypka jest zagęszczona do maksimum ($I_s = 1,0$) równomiernie, na całej długości podkładu. Wyniki dla modeli A oraz C są porównywalne, można więc wnioskować, że w warunkach właściwego zagęszczenia podsypki w strefach pod szynami ($I_s = 1,0$), wpływ wartości zagęszczenia podsypki w strefie środkowej podkładu na wyężenie tego elementu nie jest znaczący.

Wśród badanych modeli wyodrębniono grupę niekorzystnych schematów podparcia podkładu, charakteryzujących się wysokimi wartościami naprężeń i znaczną amplitudą tych wartości. Do tej grupy należą modele:

- *E, F, J* o niesymetrycznie rozłożonym stopniu zagęszczenia podsypki,
- *D, I* o symetrycznie rozłożonym zagęszczeniu podsypki, jednak w strefach obciążenia eksploatacyjnego stopień zagęszczenia kształtuje się na poziomie $I_s < 1,0$; schemat statyczny podparcia podkładu jest analogią do belki z obustronnymi wspornikami, podpartej w strefie między szynami;
- *B*, w którym wprowadzie podsypka jest równomiernie zagęszczona pod całą długością podkładu, jednak jej stopień zagęszczenia jest niezadawalający (w przedmiotowych badaniach założono $I_s = 0,9$).

Wśród wszystkich badanych modeli, zdecydowanie najmniej pożądanym okazał się model *E* o następujących parametrach porównawczych: $\sigma_r = +22,19$ MPa; $\sigma_c = -23,36$ MPa; $\Delta\sigma^d = 45,55$ MPa. W modelu tym właściwe zagęszczenie podsypki ($I_s = 1,0$) występuje jednostronnie w strefie skrajnej, obejmującej 34% długości całkowitej podkładu. Na pozostałej długości podkładu stopień zagęszczenia podsypki jest poniżej 1,0.

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

W rezultacie badań 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

Tab.3. Maksymalne wartości naprężeń ściskających ($\sigma_c < 0$) w poszczególnych rodzajach podkładów, wchodzących w skład modeli badawczych *A-J* [4]

		Schemat											
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	Max	min
Pod- kład	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		

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.

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, tj. powstawanie 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).

Rezultaty wykonanych obliczeń numerycznych stanowią potwierdzenie obowiązującej w praktyce zasady zagęszczania podsypki w strefie podszynowej. Ponadto, odnośnie podkładów strunobetonowych, istotny jest wpływ lokalizacji strefy intensywnego zagęszczenia podsypki na generowanie uszkodzeń tych podkładów, na przykład pęknięcia górnej

powierzchni podkładu w jego strefie środkowej. Źródłem pochodzenia tych pęknięć jest praca obciążonego eksploatacyjnie podkładu według schematu statycznego belki z obustronnymi wspornikami, podpartej w pionowej osi symetrii.

Badania wykonano posługując się niewielką liczbą modeli i stosując znaczne uproszczenia. Dyskusyjne jest przyjęcie schematów modeli wstępnego sprężenia podkładów strunobetonowych – niezbędne jest bardziej uściśnione spojrzenie na zagadnienie sprężania. Analiza ma dość ograniczony zakres. Jednak rezultaty są dość obiecujące i potwierdzają rozwojowy charakter tematu badawczego oraz celowość kontynuacji badań na bazie modeli zmodyfikowanych, na przykład w zakresie charakteru obciążenia, uwzględniając superpozycję sił pionowych i poziomych (uderzenia boczne pojazdów) działających na szynę. ◀

Materiały źródłowe:

- [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. Wykłady 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 Bu-

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

		Schemat											
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	Max	min
Pod- kład	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		