

Andrzej Surowiecki<sup>1</sup>  
Wojciech Kozłowski<sup>2</sup>  
Marcin Wasiak<sup>3</sup>  
Lechosław Grabowski<sup>4</sup>

## **ANALIZA STANU NAPRĘŻEŃ W PODKŁADZIE KOLEJOWYM JAKO FUNKCJA PARAMETRÓW PODŁOŻA**

### **Streszczenie**

*Tematem artykułu jest jakość współpracy podstawowych elementów nawierzchni kolejowej na bazie modelowania numerycznego. Opracowaną „mapę” naprężeń stycznych w podkładzie kolejowym, w funkcji zmian warunków posadowienia podkładu, charakteryzowanych wskaźnikiem zagęszczenia podsypki i lokalizacją stref zagęszczenia. Artykuł relacjonuje kontynuację badań, które jako pierwszy etap projektu dotyczyły jedynie analizy stanu naprężeń normalnych.*

**Słowa kluczowe:** *nawierzchnia kolejowa, naprężenia styczne, modelowanie numeryczne*

### **1. Zakres tematyczny**

Podejmowany jest problem jakości współpracy podstawowych elementów nawierzchni kolejowej: podkładu i podsypki, w której podkład jest pogrążony. Właściwe funkcjonowanie poszczególnych elementów konstrukcji drogi szynowej i ich współdziałanie, którego efektem jest przekazywanie obciążenia eksploatacyjnego na podłoże w zakresie sprężystym naprężeń, nabiera szczególnego zna-

---

<sup>1</sup> dr hab. inż., prof. UPW, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Instytut Budownictwa, Wyższa Szkoła Oficerska Wojsk Lądowych we Wrocławiu, email: andrzej.surowiecki@up.wroc.pl, andrzej.surowiecki3@wp.pl

<sup>2</sup> dr inż., Politechnika Opolska, Katedra Dróg i Mostów, email: w.kozlowski@po.opole.pl, tel. (+48) 606 672 130

<sup>3</sup> mgr inż., Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Instytut Budownictwa

<sup>4</sup> dr hab. inż., prof. PO, Politechnika Opolska, Katedra Dróg i Mostów

czenia wobec konieczności powiększenia prędkości jazdy pociągów i poprawy komfortu podróży [1, 2, 3, 4]. Główną uwagę skupiono na opracowaniu tzw. mapy naprężeń stycznych w podkładzie, w funkcji zmian wskaźnika zagęszczenia i zmian lokalizacji stref zagęszczenia podłoża podkładu.

Ocenę stanu „wytężenia” podkładu przeprowadzono na bazie modelowania numerycznego. Opracowane modele teoretyczne podkładu stanowią prostopadłościenną belkę zamodelowaną elementem tarczowym, podpartą w sposób ciągły (na długości) w ośrodku ziarnistym typu podsypka tłuczniowa. Rozpatrywane są dwa rodzaje podkładów, skrajnie różniące się cechami mechanicznymi i charakterem reakcji wobec zmian strukturalnych w podłożu.

Ocena funkcjonowania modeli podkładów w zmiennych warunkach podparcia została wykonana w oparciu o sporządzone wykresy rozkładu wartości naprężeń stycznych w profilu podłużnym podkładu. Obciążenie modeli zrealizowano na zasadzie symulacji nacisków eksploatacyjnych, przyłożonych jako siły statyczne pionowe w strefach przytwierdzenia szyn. Narzędziem symulacji oraz analizy wyszczególnionych powyżej wielkości był program numeryczny Autodesk Robot Structural Analysis 2010. Tego typu aplikacja umożliwiła wygenerowanie modelu obliczeniowego konstrukcji o parametrach znacznie zbliżonych do rzeczywistych.

W szczególności przedstawiono:

- modele badawcze,
- wykresy wartości naprężeń stycznych w modelach podkładów dla poszczególnych schematów zagęszczenia podłoża,
- wartości amplitud maksymalnych naprężeń stycznych dla schematów zagęszczenia podłoża,
- „mapy” naprężeń stycznych w modelach podkładów dla poszczególnych schematów zagęszczenia podłoża.

Treść niniejszego artykułu zawiera syntezę wyników badań teoretycznych, będącą rezultatami drugiego etapu badań stanu naprężenia podkładów w zmiennych warunkach podparcia. Jest to kontynuacja projektu badawczego, którego etap pierwszy dotyczył stanu naprężeń normalnych i był prezentowany na forum konferencji „Drogi Kolejowe 2011” w Gdyni (5-7.10.2011 r.).

## 2. Modele i metoda badawcza

Jak wspomniano, w rzeczywistych warunkach naciski osi pojazdów przejmowane są przez ruszt torowy w strefie tzw. aktywnej (przemieszczającej się wraz z poruszającym się pojazdem), o zasięgu kilku lub kilkunastu podkładów. W omawianych badaniach posłużono się uproszczeniem zakładając, że oś pojazdu jest nieruchoma i nacisk przejmowany jest przez pojedynczy podkład. Kolejne założenie dotyczy prostego odcinka toru. Celem założenia było wyeliminowanie problemu przechyłki występującej w łuku poziomym.

Kształt podkładów strunobetonowych uproszczono, traktując je jak belki o niezmiennym na długości przekroju poprzecznym. Analizie poddano następujące typy podkładów: strunobetonowe PS-94 i PS-83, drewniane IB typu C40 (z drewna sosnowego) i IB typu D70 (dębowe).

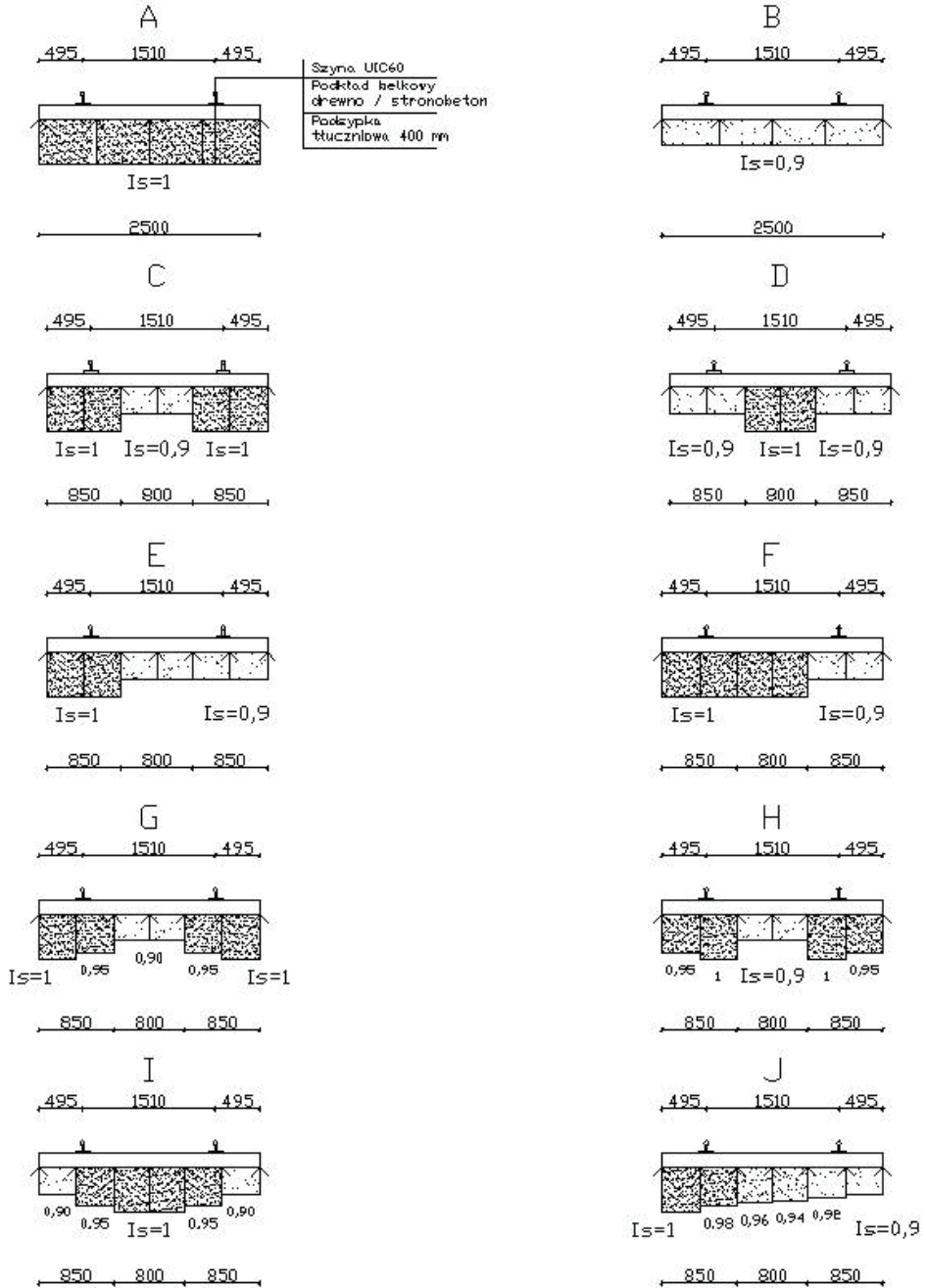
Modele badawcze, złożone z dwóch elementów: podkładu i podłoża (ośrodek ziarnisty) przedstawiono na rys. 1 [5].

Podłożem podkładu jest warstwa ośrodka ziarnistego (podsypka tłuczniowa 31,5/63 mm) o grubości warstwy 0,4 m. Lokalizacja stref zagęszczenia wynika z rys. 1. Natomiast wartości wskaźnika zagęszczenia przyjęto w zakresie 0,9-1,0. Zaprojektowanym wskaźnikiem zagęszczenia  $I_s$  odpowiadają następujące wartości sztywności podłoża  $K$ :

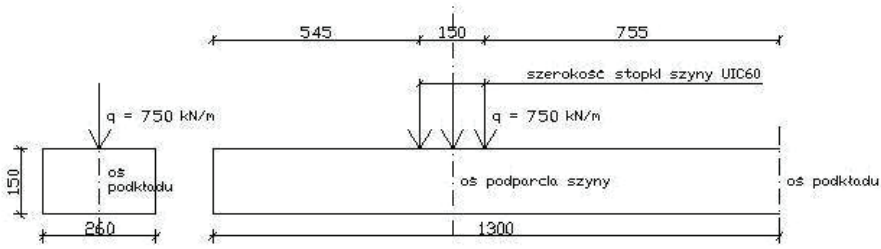
$I_s = 0,9 \rightarrow K = 134,47 \text{ MPa}$ ;  $I_s = 0,90 \rightarrow K = 134,47 \text{ MPa}$ ;  
 $I_s = 0,92 \rightarrow K = 135,76 \text{ MPa}$ ;  $I_s = 0,94 \rightarrow K = 137,05 \text{ MPa}$ ;  $I_s = 0,95 \rightarrow K = 137,68 \text{ MPa}$ ;  
 $I_s = 0,96 \rightarrow K = 138,31 \text{ MPa}$ ;  $I_s = 0,98 \rightarrow K = 139,56 \text{ MPa}$ ;  
 $I_s = 1,00 \rightarrow K = 140,79 \text{ MPa}$ .

Na rysunkach 2 i 3 pokazano sposób przyłożenia obciążenia eksploatacyjnego (nacisk osi pojazdu  $Q = 225 \text{ kN}$ ), które przetransformowano na równomiernie rozłożone o intensywności  $q = 750 \text{ kN/m}$  i przyłożono na długości równej wymiarowi szerokości podkładki podszynowej.

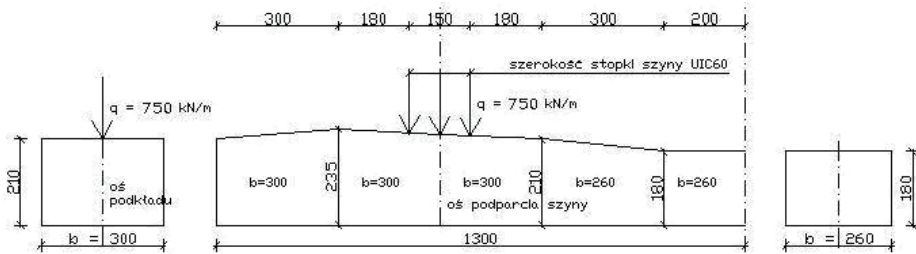
Oszacowanie wartości naprężeń dokonano w punktach charakterystycznych podkładu, których rozmieszczenie ilustruje rysunek 4 [Wasiak].



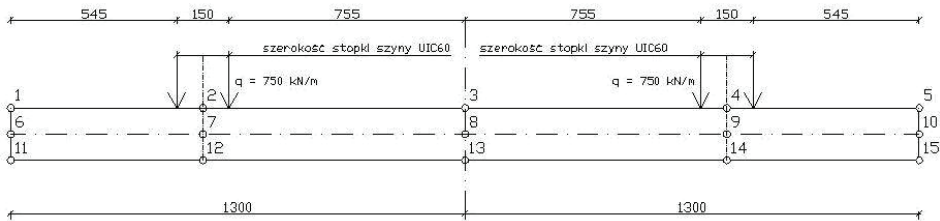
**Rys. 1. Modele badawcze, złożone z dwóch elementów: podkład i podłoże [5]**



**Rys. 2. Schemat modelowanego sposobu eksploatacyjnego obciążenia podkładu drewnianego IB [5]**

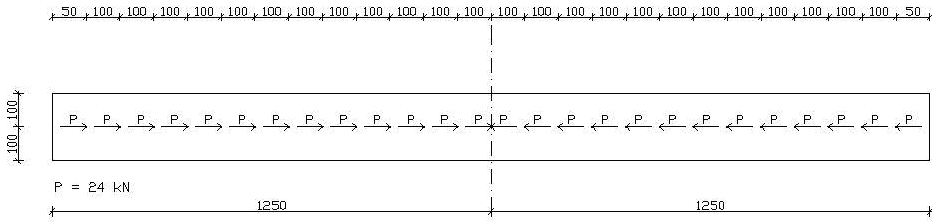


**Rys. 3. Schemat modelowanego sposobu eksploatacyjnego obciążenia podkładu strunobetonowego PS-94 [5]**



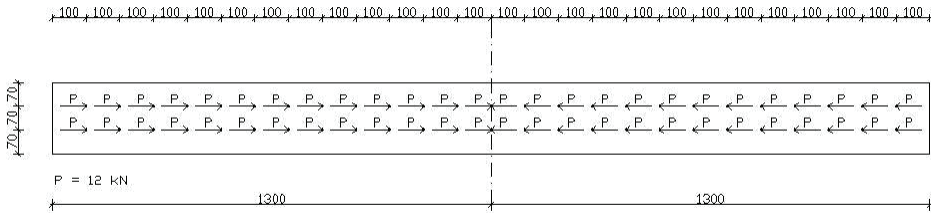
**Rys. 4. Rozmieszczenie punktów pomiaru naprężeń stycznych w modelu podkładu [5]**

W przypadku podkładów strunobetonowych istotne jest wstępne sprężenie. Problem ten rozwiązano wprowadzając siły ściskające w strefę osi podłużnej podkładu. Z informacji otrzymanych od producenta (Wytwórnia Podkładów Strunobetonowych w Goczałkowie) wynika, że siła sprężająca podkład typu PS-83 i PS-94 wynosi kolejno (po uwzględnieniu strat): 300 kN i 310 kN. Model wstępnego sprężenia podkładu PS-83 pokazano na rysunku 5. Sprężenie jest realizowane w osi podłużnej podkładu przy zastosowaniu trzynastu elementarnych sił ściskających o wartości  $Q_i = 24 \text{ kN}$ , zlokalizowanych w jednej linii poziomej, obustronnie względem poprzecznej osi symetrii podkładu.



**Rys. 5. Modelowanie wstępnego sprężenia podkładu strunobetonowego PS-83 [5]**

Sprężenie podkładu PS-94 zamodelowano trzynastoma siłami elementarnymi o wartości  $Q_i = 12$  kN, jednak zlokalizowanymi w dwóch trajektoriach poziomych, tworzonych przez osie środków ciężkości zbrojenia górnego i dolnego (rys. 6).

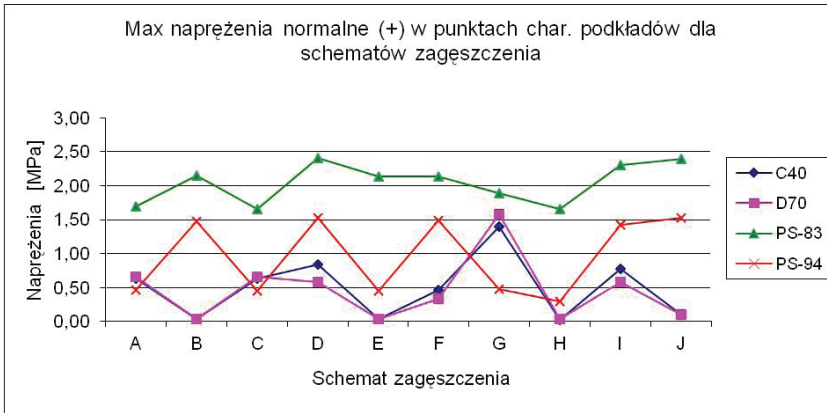


**Rys. 6. Modelowanie wstępnego sprężenia podkładu strunobetonowego PS-94 [5]**

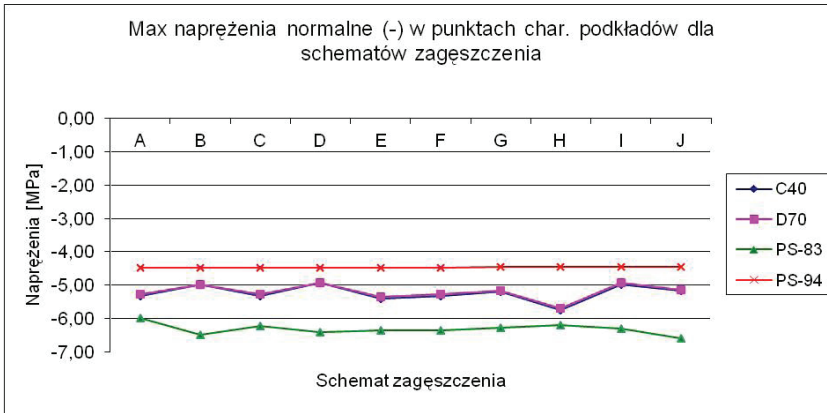
### 3. Rezultaty analizy numerycznej rozkładu naprężeń stycznych w modelach podkładu

Wyniki badań przedstawione są w postaci wykresów na rysunkach:

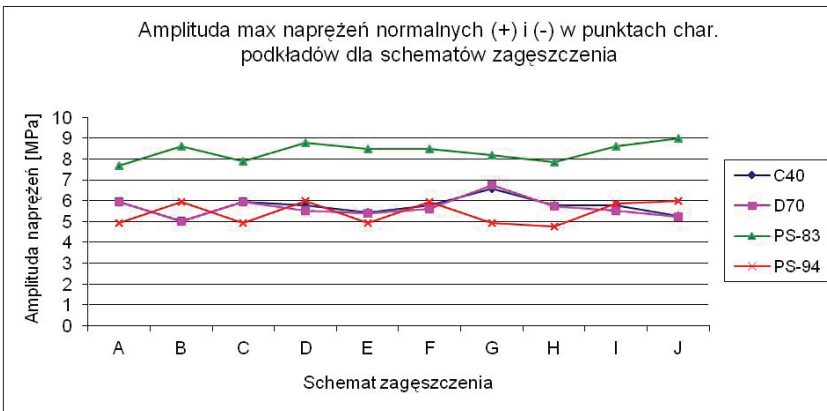
- rys. 7: maksymalne naprężenia styczne (+) w modelach podkładów w zależności od schematu zagęszczenia podsypki;
- rys. 8: maksymalne naprężenia styczne (-) w modelach podkładów w zależności od schematu zagęszczenia podsypki;
- rys. 9: amplituda max naprężeń stycznych (+) i (-) w modelach podkładów, zależnie od schematu zagęszczenia podsypki.



**Rys. 7. Maksymalne naprężenia styczne (+) w modelach podkładów w zależności od schematu zagęszczenia podsypki [5]**



**Rys. 8. Maksymalne naprężenia styczne (-) w modelach podkładów w zależności od schematu zagęszczenia podsypki [5]**



**Rys. 9. Amplituda max naprężeń stycznych (+) i (-) w modelach podkładów, zależnie od schematu zagęszczenia podsypki [5]**

Wartości liczbowe największych i najmniejszych naprężeń stycznych oraz amplitudy naprężeń podano poniżej w formie syntetycznej.

- największe wartości naprężeń stycznych (+) zanotowano dla schematów:
  - 1) G: 1,40 MPa (C40); 1,58 MPa (D70);
  - 2) D: 0,83 MPa (C40); 0,58 MPa (D70);
  - 3) I: 0,78 MPa (C40); 0,58 MPa (D70);
  - 4) D: 2,41 MPa (PS-83); 1,53 MPa (PS-94);
  - 5) J: 2,39 MPa (PS-83); 1,53 MPa (PS-94);
  - 6) I: 2,31 MPa (PS-83); 1,42 MPa (PS-94);
- największe wartości naprężeń stycznych (-) zanotowano dla schematów:
  - 1) H: 5,73 MPa (C40); 5,70 MPa (D70);
  - 2) E: 5,40 MPa (C40); 5,35 MPa (D70);
  - 3) C,F: 5,32 MPa (C40); 5,27 MPa (D70);
  - 4) J: 6,58 MPa (PS-83); 4,45 MPa (PS-94);
  - 5) B: 6,48 MPa (PS-83); 4,46 MPa (PS-94);
  - 6) D: 6,39 MPa (PS-83); 4,46 MPa (PS-94);
- największą amplitudę naprężeń stycznych (+) i (-) zanotowano dla schematów:
  - 1) G: 6,58 MPa (C40); 6,73 MPa (D70);
  - 2) C: 5,95 MPa (C40); 5,94 MPa (D70);
  - 3) A: 5,94 MPa (C40); 5,93 MPa (D70);
  - 4) J: 8,97 MPa (PS-83); 5,23 MPa (PS-94);
  - 5) D: 8,80 MPa (PS-83); 5,51 MPa (PS-94);
  - 6) B: 8,63 MPa (PS-83); 5,94 MPa (PS-94);
- wartości najmniejszych naprężeń stycznych (+) zanotowano dla schematów:
  - 1) H: 0,03 MPa (C40); 0,04 MPa (D70);
  - 2) E: 0,04 MPa (C40); 0,04 MPa (D70);
  - 3) B: 0,04 MPa (C40); 0,04 MPa (D70);
  - 4) H: 1,65 MPa (PS-83); 0,30 MPa (PS-94);
  - 5) C: 1,65 MPa (PS-83); 0,45 MPa (PS-94);
  - 6) A: 1,69 MPa (PS-83); 0,46 MPa (PS-94);
- wartości najmniejszych naprężeń stycznych (-) zanotowano dla schematów:
  - 1) D: 4,93 MPa (C40); 4,93 MPa (D70);
  - 2) B: 4,97 MPa (C40); 4,97 MPa (D70);



- 3) I: 4,98 MPa (C40); 4,93 MPa (D70);
- 4) A: 5,98 MPa (PS-83); 4,46 MPa (PS-94);
- 5) H: 6,18 MPa (PS-83); 4,44 MPa (PS-94);
- 6) C: 6,23 MPa (PS-83); 4,46 MPa (PS-94);
- najmniejszą amplitudę naprężeń stycznych (+) i (-) zanotowano dla schematów:
  - 1) B: 5,01 MPa (C40); 5,00 MPa (D70);
  - 2) J: 5,26 MPa (C40); 5,23 MPa (D70);
  - 3) E: 5,43 MPa (C40); 5,39 MPa (D70);
  - 4) A: 7,67 MPa (PS-83); 4,93 MPa (PS-94);
  - 5) H: 7,83 MPa (PS-83); 4,74 MPa (PS-94);
  - 6) C: 7,88 MPa (PS-83); 4,91 MPa (PS-94).

#### 4. Wnioski i podsumowanie

- 1) Biorąc pod uwagę stan naprężeń stycznych (+), oba badane rodzaje podkładów (drewniane i strunobetonowe) dość dynamicznie reagują na zmiany podparcia w podłożu (rozemieszczenie stref zagęszczenia i wartość wskaźnika zagęszczenia. Wartości naprężeń w podkładach drewnianych kształtują się na poziomie najniższym, co jest niewątpliwie zaletą. Oba typy podkładów drewnianych (miękkie i twarde drewno) zachowują się podobnie – wartości tych naprężeń są zbliżone dla poszczególnych schematów posadowienia w podsypce. Prawidłowość taka nie występuje w przypadku podkładów strunobetonowych: największe wartości naprężeń wykazuje podkład PS-83. Pomimo zaobserwowanego największego stanu wyężenia (rys. 7) podkład PS-83 okazał się najbardziej stabilny wobec zmian warunków podparcia.
- 2) Rozpatrując wykresy naprężeń stycznych (-) przedstawione na rysunku 8, najbardziej stabilnym okazał się podkład strunobetonowy PS-94 (najmniejsze wartości naprężeń stycznych i brak jakiegokolwiek zmiany stanu naprężeń wobec zmian warunków posadowienia). Największe wartości analizowanych naprężeń wystąpiły ponownie w podkładzie PS-83. Natomiast wartości pośrednie naprężeń i stricte jednakowe odnotowano w modelach z podkładami drewnianymi.

Z wykresów amplitud maksymalnych naprężeń (+) i (-) wywnioskowano (rys. 9):

- najkorzystniej zachowuje się podkład PS-94 (najmniejsze wartości amplitud i umiarkowane wahania wartości amplitud),
  - wartości amplitud naprężeń w obu typach podkładów drewnianych (różniących się zasadniczo twardością komponentu) są praktycznie jednakowe,
  - największe wartości amplitud naprężeń wykazuje podkład PS-83, jednak ich wahania w zależności od zmian stanu zagęszczenia ośrodka ziarnistego w podłożu są nieznaczne.
- 3) Największe wartości naprężeń stycznych (+) i (-) oraz amplitudę wartości tych naprężeń dla podkładów strunobetonowych stwierdzono w przypadku schematów (modeli) zagęszczenia podsypki takich, które charakteryzują się stosunkowo niskim wskaźnikiem zagęszczenia pod przyłożonym obciążeniem (czyli w strefach podszytowych) oraz niesymetrycznym rozkładem stref zagęszczenia w podłożu podkładu.
  - 4) Najmniejsze wartości naprężeń stycznych (+) i (-) oraz ich amplitudę w podkładach strunobetonowych zanotowano dla korzystnych schematów zagęszczenia podsypki, a więc takich, w których maksymalne zagęszczenie podłoża zastosowano w strefach podszytowych.
  - 5) Podkład strunobetonowy PS-94 wykazuje wyjątkową stabilność pracy w nawierzchni (rys. 8), niezależnie od konfiguracji stref zagęszczenia w podsypce (symetria lub asymetria). Wydaje się być wysoce niezawodnym elementem drogi kolejowej, odpowiednim dla szlaków na których planowana jest jazda pociągów ze znaczną prędkością i o dużej masie brutto.
  - 6) Z wykresów na rysunkach 7, 8, 9 wynika, że podkłady strunobetonowe PS-83, należące do starszej generacji rodziny tych elementów (krótsze, wytwarzane z niższej klasy betonu i inaczej sprężane niż podkłady PS-94) funkcjonują najgorzej. Z powyższych rozważań wynika następująca konkluzja: ewolucja sprężonych elementów nawierzchni kolejowej postępuje we właściwym kierunku i przyczynia się do bardziej efektywnego użytkowania tego typu konstrukcji.

## Bibliografia

- [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] Surowiecki A.: *Prędkość jazdy jako parametr w technice transportu szynowego*. Projekt badawczy PWr., Politechnika Wrocławska, Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn, Zakład Logistyki Transportu, Wrocław 2010.
- [5] Wasiak M.: *Analiza współpracy podkładu kolejowego z podłożem*. Pr. magisterska. Promotor: Surowiecki A., Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Instytut Budownictwa, Wrocław 2011.

## STRESS ANALYSIS IN THE RAIL UNDERCOAT AS A FUNCTION OF GROUND PARAMETERS

### Summary

*The theme of the paper was the quality of the basic elements of railway surface cooperation based on numerical modeling. There were developed a shear stresses "map" in the rail undercoat, as a function of changes in the conditions of foundation substructure, characterized by the indicator of ballast compaction density and location of zones. The continuation of research that the first stage of the project concerned the analysis of only the normal stress has been reported in the paper.*

**Keywords:** *railway surface, shearing stresses, numerical modeling*