

Włodzimierz CZYŻUŁA

Politechnika Krakowska

WPŁYW OPISU WŁASNOŚCI PODTORZA NA ANALIZĘ PRACY DROGI KOLEJOWEJ

Streszczenie. Praca przedstawia wybrane metody opisu własności podtorza w aspekcie analizy pracy drogi kolejowej pod obciążeniem eksploatacyjnym. Celem opracowania jest jakościowa analiza tych metod. Pokazano, że dopuszczenie określonego poziomu deformacji trwałych podtorza nie powoduje obniżenia zdolności eksploatacyjnej drogi kolejowej, dając ponadto bardziej realistyczny opis pracy konstrukcji pod obciążeniem użytkowym.

1. WPROWADZENIE

Zagadnienie niezawodności eksploatacyjnej drogi kolejowej rozpatruje się zazwyczaj w dwóch aspektach [1] :

- nośności (wytrzymałości) poszczególnych jej elementów, co związane jest z bezpieczeństwem jazdy taboru;
- dopuszczalnych imperfekcji toru, co związane jest głównie ze spokojnością biegu pociągów, a także z bezpieczeństwem jazdy.

Podtorze zazwyczaj analizowane jest w aspekcie nośności. Prowadzi to - w klasycznym ujęciu problemu [1] - do analizy pracy podtorza w stadium sprężystym (por. także [6]). Jego wymiarowanie przeprowadza się metodą naprężeń dopuszczalnych. Nie sprężysta praca podtorza w przedziale (q_{kr} , q_{gr}), gdzie q_{kr} , q_{gr} to naprężenia krytyczne i graniczne, nie jest na ogół analizowana.

Nieliczne wyjątki w tym zakresie stanowią np. prace [2, 7], w których droga kolejowa traktowana jest jako niejednorodna struktura wielowarstwowa, złożona z ośrodków sprężysto-lepkoplastycznych. Ogólne ujęcie problemu nie sprężystej pracy podtorza przedstawia praca [5].

Przyjęcie koncepcji ośrodka rozdrobnionego [8] prowadzi jedynie do dokładniejszego - w stosunku do teorii sprężystości - rozkładu naprężeń w warstwach sybkich podłoża szynowego; ujęcie tego nie udało się dotychczas zastosować do analizy nie sprężystej pracy drogi kolejowej.

Rozważanie pracy podtorza w aspekcie jego nośności ma istotne implikacje praktyczne, bowiem problem jego naprawy sprowadza się do poprawy własności wytrzymałościowych (wzmocnienia, por. np. [9]).

Najnowsze doświadczenia eksploatacyjne, jak również analizy teoretyczne [3] pokazują, że - przy zachowaniu odpowiednich standardów konstrukcji nawierzchni, taboru oraz stanu ich utrzymania - wzrost oddziaływań dynamicznych pojazdów wraz ze wzrostem szybkości praktycznie nie występuje. Wynika stąd, że stosowanie w analizach teoretycznych współczynnika dynamicznego $k_v = 2$ [11] jest - w tym przypadku - nieuzasadnione. Z drugiej zaś strony, dla linii kolejowych, po których kursują ciężkie pociągi z naciskami osi powyżej 200 kN, przy intensywnych odkształceniach trwałych podsypanki, dopuszczenie określonego poziomu deformacji plastycznych podtorza wydaje się być w pełni uzasadnione.

Z nakreślonego rozumowania nasuwa się wniosek, że podtorze kolejowe może w opisanych wyżej przypadkach mieć istotną "rezervę" obciążenia w stosunku do ujęć klasycznych.

Celem opracowania jest przedstawienie wybranych metod modelowania pracy drogi kolejowej z uwzględnieniem cech niesprężystych podtorza.

2. TEORIA PLASTYCZNEGO PRZYSTOSOWANIA SIĘ MATERIAŁU DO OBCIĄŻEN ZMIENNYCH

Stan graniczny materiału można sformułować jako:

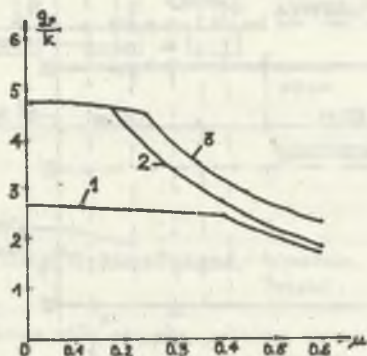
- stan sprężystej nośności,
- plastycznego przystosowania (shakedown).

Ujęcie teoretyczne problemu shakedown zawiera praca [10], a w odniesieniu do szyny kolejowej - także praca [2].

Praktyka eksploatacyjna pokazuje, że przy powszechnie stosowanych parametrach materiałowych i obciążeniach drogi kolejowej podsypanki, a także szyny i podtorze, pracują w stadium pozasprężystym. Wynika stąd, że klasyczne sformułowania stanu granicznego, jako nieprzekroczenia stadium sprężystego, staje się praktycznie nieprzydatne.

Wymownie różnicę w sformułowaniu stanu sprężystej nośności i plastycznego przystosowania dla bliskiego drodze kolejowej zagadnienia kontaktowego przedstawiono na rys. 1 [10]. Na rysunku tym pokazano zależność maksymalnej wartości naprężenia kontaktowego q_0 do wartości granicy plastyczności przy czystym ścinaniu k , od współczynnika tarcia ślizgowego dla kulki toczącej się po płaskiej powierzchni. Zaznaczone wykresy pokazują graniczne obciążenia względne (q_0/k) dla stanu sprężystego (krzywa 1) oraz dla stanów plastycznego przystosowania (dla materiału idealnie sprężysto-plastycznego - krzywa 2, dla materiału ze wzmocnieniem - krzywa 3). W przypadku obciążenia szyny kołem taboru, jak również w przypadku wilgotnego gruntu podtorza - ze względu na mały współczynnik tarcia - graniczne obciążenie, przy którym nastąpi plastyczne przystosowanie, jest około 1,5-krotnie wyższe od granicznego obciążenia sprężystego. Pomijając tutaj problem granicznych nierówności powierzchni przy plastycznym przystosowa-

niu (problem ten będzie dalej przedstawiony) oraz konieczność uwzględnienia wielu istotnych dla drogi kolejowej czynników, widać, że sformułowanie plastycznego przystosowania zawiera istotne "rezerwy" obciążenia w stosunku do sformułowania sprężystej nośności materiału.



Rys. 1. Graniczne obciążenia dla stanu:
1 - sprężystego; 2 - plastycznego przystosowania

Fig. 1. Limit loading for state:
1 - elastic; 2 -akedown

3. PODTORZE JAKO NIESPRĘŻYSTY ELEMENT WIELOWARSTWOWEJ STRUKTURY DROGI KOLEJOWEJ

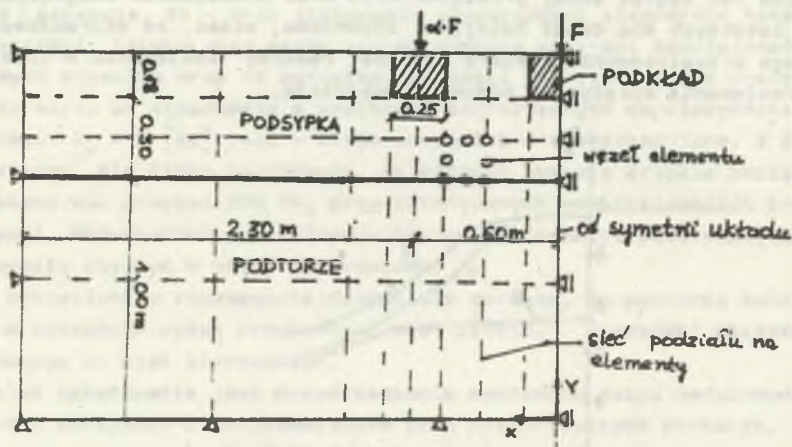
W pracach [2, 3] opisano szczegółowo założenia oraz algorytm rozwiązania dwuwymiarowego modelu drogi kolejowej w ujęciu MES. W modelu tym każdy materiał można opisać równaniami ośrodka sprężysto-lepkoplastycznego, a strukturę można dowolnie obciążyć statycznie lub dynamicznie. W wymienionych pracach szczególną uwagę poświęcono niesprężystej pracy podszypki.

Przedstawimy obecnie efekty łącznego uplastycznienia podszypki i podtorza. Dla tego celu przyjmijmy symetryczny układ złożony z trzech podkładów, warstwy podszypki i podtorza, pokazany na rys. 2. Obciążenie przykładane jest pionowo w osi podkładów, przy czym współczynnik $\alpha \in [0, 1]$.

Na rys. 3 pokazano efekt łącznego uplastycznienia podszypki i podtorza przy przyjęciu hipotezy wyłączeniowej Treski, $\alpha = 1$ oraz następujących parametrów mechanicznych podszypki i podtorza:

a) podszypka:

- moduł Younga - $E_b = 150$ MPa;
- liczba Poiseona - $\nu_b = 0,33$;
- wytrzymałość na ściskanie - $\sigma_{p1} = 200$ kPa;



Rys. 2. Schemat ogólny dwuwymiarowej struktury drogi kolejowej (płaski stan odkształceń)

Fig. 2. Track structure as a two-dimensional system (plain strain)

b) podtorze:

- $E_s = 25 \text{ i } 100 \text{ MPa}$;
- $\nu_s = 0,40$;
- $\sigma_{pl} = 100 \text{ kPa}$.

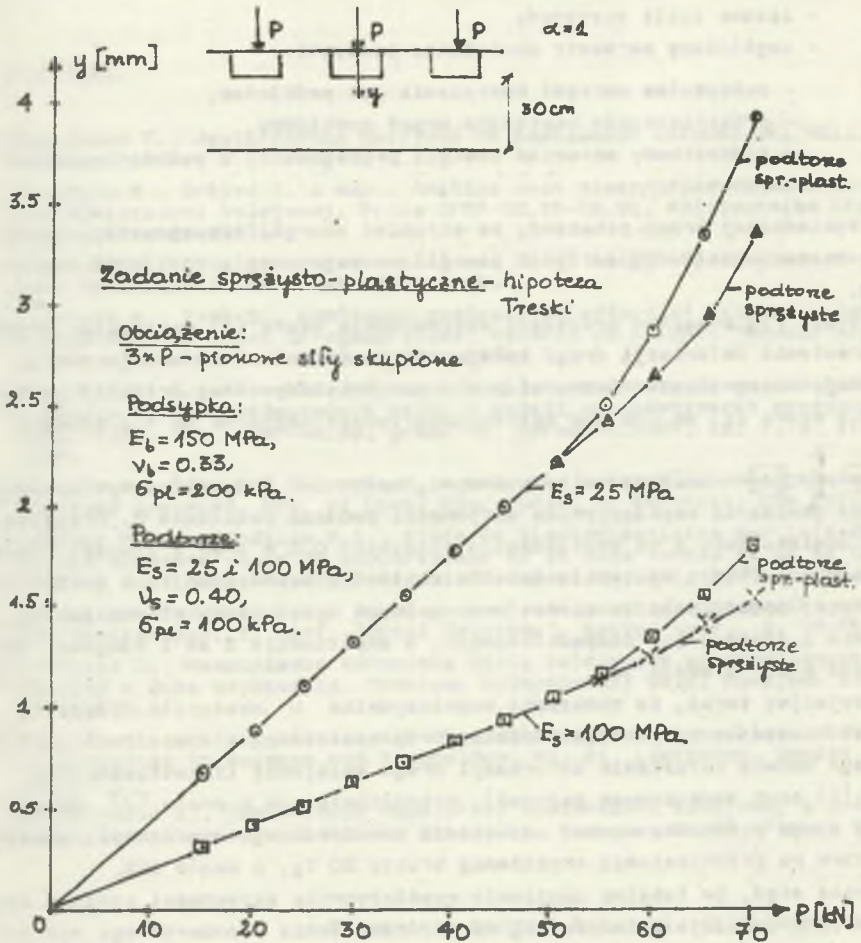
Uplastycznienie podtorze daje - dla badanego zakresu parametrów - za ledwie 10% wzrost przesunięć podkładu. Przykład ten pokazuje, że można dopuścić plastyczne odkształcenia podtorze bez znaczącego spadku zdolności eksploatacyjnej drogi kolejowej.

4. MODELE NARASTANIA DEFORMACJI WARSTW SYPKICH PODŁOŻA SZYNOWEGO

Osiedlenia podsypki (warstw sypkich podłoża szynowego) można przedstawić w postaci:^x

$$h(n,P) = \alpha(n) \times P^{\beta(n)} \quad (1)$$

^xCzyczuła W., Analiza wpływu drgań nawierzchni kolejowej na deformacje podsypki. Praca doktorska, Kraków 1985.



Rys. 3. Wpływ łącznego uplastycznienia podsyпки i podtorza na przemieszczenia podkładu

Fig. 3. Effect of plasticization of ballast and subgrade on sleeper displacement

gdzie:

- α, β - stała materiałowa, charakterystyki układu "podkłady-podeypka-podtorze";
- n - liczba cykli obciążeń;
- P - uogólniony parametr obciążenia podeypki:
 - maksymalna wartość naprężenia pod podkładem,
 - przyapięzenie skuteczne drgań podkładów,
 - jednostkowy strumień energii propagowanej z podkładów w podeypkę.

W wymienionej pracy pokazano, że strumień energii propagowanej w podtorze stanowi około 20% wartości energii propagowanej z podkładów w podeypkę.

W pracy [3] pokazano przykłady zastosowania wzoru (1) do analizy procesu narastania deformacji drogi kolejowej. W równaniu (1) funkcje α i β określają niesprężyste własności podtorza. Pokażemy teraz przykład zastosowania wzoru (1) do analizy wpływu imperfekcji podtorza na nierówności toru.

W pracy [4] rozważano, między innymi, wpływ luk podpodkładowych i lokalnego obniżenia współczynnika sztywności podłoża podkładów U. Przyjęto, że na odcinku toru z 91 podkładami o rozstawie 0,6 m oraz z szynami UIC-60, na środkowej części wystąpiło lokalne obniżenie współczynnika U z 4000 do 2000 N/cm. Spowodowało to wzrost maksymalnych ugięć szyny nieobciążonej (łącznie z efektem luk podpodkładowych, o amplitudzie 2 mm i długości fali około 6 m) o około 30%.

Przyjmijmy teraz, że obniżenie współczynnika U nastąpiło wyłącznie wskutek obniżenia sztywności podłoża. Przy zastosowaniu dynamiczno-reologicznego modelu narastania deformacji drogi kolejowej (z zastosowaniem wzoru (1) oraz dodatkowych założeń), przedstawionego w pracy [4], otrzymujemy w tym przypadku wzrost odchylenia standardowego nierówności pionowych toru po przeniesieniu obciążenia brutto 20 Tg, o około 25%.

Wynika stąd, że lokalne obniżenie współczynnika sztywności podłoża szyny U o 100% powoduje zaledwie 25% wzrost odchylenia standardowego nierówności profilu, jako jednej z podstawowych charakterystyk jakości drogi kolejowej.

5. PODSUMOWANIE

Przedstawione sposoby analizy niesprężystej pracy podtorza oraz wpływu jego imperfekcji na rozwój odkształceń toru kolejowego nie pretendują do kompleksowego ujęcia tego niezwykle istotnego i jednocześnie trudnego problemu naukowo-technicznego. Wskazują one, że dopuszczenie niesprężystej pracy podtorza oraz jego lokalnych imperfekcji nie obniża w znaczący

sposób zdatności eksploatacyjnej drogi kolejowej, a uwzględnienia tych efektów w analizach teoretycznych daje bardziej realistyczny - w stosunku do modeli sprężystych - opis pracy konstrukcji pod obciążeniami użytkowymi.

LITERATURA

- [1] Basiewicz T., Nawierzchnia kolejowa na podkładach betonowych. WKiŁ, Warszawa 1969.
- [2] Czyczuła W., Orkisz J. i wsp., Analiza cech niesprężystych materiałów nawierzchni kolejowej. Praca CPBP-02.19-06.21, Politechnika Krakowska, Kraków 1987.
- [3] Czyczuła W., Eksploatacyjna stabilność drogi kolejowej. Zeszyty Naukowe Politechniki Krakowskiej (w druku).
- [4] Czyczuła W., Zych G., Nonlinear analysis of effect of rail base non-homogeneity on track irregularities. Referat na X Konf. "Metody Komputerowe w Mechanice", Świnoujście 1991.
- [5] Gryczmański M., Kłosek K., Wybrane problemy matematycznego modelowania podtorza wobec współczesnych metod i modeli obliczeniowych geomechaniki. Zesz. Ser. CPBP-02.19, grupa 06, Warszawa 1987, cz. I, s. 113-128.
- [6] Huang Y.H., Rose J.G., Kentrack. A computer program for design of railroad trackbed. Dep. of Civil Eng., Univ. of Kentucky, USA 1987.
- [7] Humbert P., Profindilis V.A., Etude en elastoplasticite par la methode des elements finis du comportement de la voie ferree et de sa fondation. Bull. Liaison Lab. Ponts et Chaussées, No. 141, 1986, p. 13-19.
- [8] Kłosek K., Podłoża rusztu torowego w ujęciu rozwiązań mechaniki ośrodków dyskretnych. II Konf. "Drogi Kolejowe", księga konf., s. 89-96.
- [9] Makowski J., Wzmacnianie torowiska linii kolejowych przeznaczonych do jeżdż z dużą szybkością. Problemy Kolejnictwa, WKiŁ, Warszawa 1977, s. 69-138.
- [10] Rydholm G., On inequalities and shakedown in contact problem. Linköping Studies in Science and Technology, No. 61, Linköping, Sweden 1981.
- [11] Siewczyński Ł., Zagadnienia współpracy nawierzchni kolejowej z podtorzem gruntowym. Politechnika Poznańska, Rozprawy nr 66, Poznań 1974.

Recenzent: Doc. dr hab. inż. Kazimierz Kłosek

wpłynęło do Redakcji 5.05.1991 r.

EFFECT OF SUBGRADE PROPERTIES ON ANALYSIS OF TRACK BEHAVIOUR

Summary

The paper describes certain approach to subgrade properties modelling and its influence on track behaviour during loading. The aim of paper is general analysis of presented methods. Application of shakedown theory to track behaviour modelling has been pointed. Two-dimensional model of track system composed of elastic-plastic medium and model of development of track irregularities has been considered. Permanent subgrade deformations - which exist in real construction - does not decrease the operational reliability of track.

АНАЛИЗ РАБОТЫ ПУТИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ МЕХАНИЧЕСКИХ МОДЕЛИ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПОЛОТНА

Резюме

В статье представлены методы анализа работы пути с учетом неупругих свойств железнодорожного полотна. Даны примеры теории шейк-даун и метода конечных элементов для анализа неупругой работы железнодорожного полотна и пути. Показано, что незначительный уровень неупругих деформации полотна не вызывает снижения эксплуатационной способности пути.