

Dr inż. Jacek Kukulski
Centrum Naukowo-Techniczne Kolejnictwa

WYBRANE ASPEKTY MODELOWANIA NAWIERZCHNI KOLEJOWEJ, JEJ CZĘŚCI SKŁADOWYCH ORAZ PODTORZA

SPIS TREŚCI

1. Wprowadzenie
2. Nawierzchnie kolejowe – modelowanie
3. Nawierzchnie kolejowe dla dużych prędkości
4. Zastosowanie MES w nawierzchni kolejowej
5. Modele MES nawierzchni klasycznej i wzmocnionej geosiatkami
6. Podsumowanie

STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono przegląd prac wykorzystujących Metodę Elementów Skończonych do oceny stanu naprężeń i odkształceń części składowych nawierzchni kolejowej. Przedstawiono typowe modele matematyczne toru kolejowego. Opisano wybrane rozwiązania nawierzchni niekonwencjonalnych i nowatorskie rozwiązanie polegające na wzmocnieniu klasycznej nawierzchni podsypkowej. W artykule przedstawiono również przykładowe wyniki obliczeń rozkładu naprężeń i odkształceń uzyskane drogą symulacji komputerowej dla nawierzchni kolejowej.

1. WPROWADZENIE

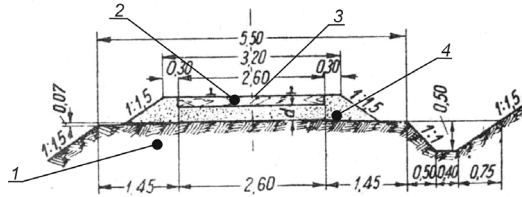
Nawierzchnia kolejowa jest istotnym elementem drogi kolejowej, a w warunkach podwyższania dopuszczalnych prędkości pojazdów szynowych i zwiększania nacisków na tor, wymaga się od niej coraz większej wytrzymałości i bezpieczeństwa. Również w Polsce, w aspekcie „Programu Budowy Kolei Dużych Prędkości” [14], jak i modernizacji istniejącej infrastruktury do $V_{max} = 160\text{--}200$ km/h należy zastanowić się, jakie rozwiązanie nawierzchni kolejowej wybrać, aby właściwie spełniała swoje zadanie.

Na liniach kolejowych do dużych prędkości można wyodrębnić dwie tendencje: jedna wykorzystuje nawierzchnię klasyczną, druga zaś nawierzchnie bezpodsypkowe (niekonwencjonalne). Koleje francuskie kontynuują budowę linii dużych prędkości z nawierzchnią klasyczną, koleje niemieckie oraz holenderskie wybierają rozwiązania niekonwencjonalne. Klasyczna konstrukcja nawierzchni pracuje w zakresie elastoplastycznym, kumuluje odkształcenia trwałe podsypki, co prowadzi w trakcie eksploatacji do zróżnicowania cech sprężystych i tłumienia na długości toru, a w konsekwencji stwarza konieczność regulacji położenia toru i niezbędnych napraw części składowych nawierzchni. Potrzeba ograniczenia kosztów utrzymania jest jedną z głównych przyczyn poszukiwania rozwiązań konstrukcji pracującej pod obciążeniem w zakresie odkształceń sprężystych. Doświadczenia niemieckie wskazują na znaczny wzrost kosztów utrzymania linii z dużymi prędkościami przy stosowaniu klasycznej nawierzchni kolejowej i z tego powodu koleje niemieckie rozpoczynają stosowanie rozwiązań niekonwencjonalnych na skalę eksploatacyjną.

Nakłady inwestycyjne zabudowy nawierzchni tłuczniowej na podkładach strunobetonowych, przystosowanej do prędkości 160 km/h wynoszą 1,850 mln zł/km, nawierzchni bezpodsypkowej zaś 3,8–5,7 mln zł/km. Z przedstawionych informacji wynika, że koszt budowy toru na podsypce tłuczniowej stanowi ok. 30% kosztu budowy toru na podbudowie betonowej. Na tak dużą różnicę w kosztach duży wpływ ma m.in. koszt zbrojenia nawierzchni płytowej. W analizie kosztów należy również uwzględnić koszty eksploatacyjne. Nakłady na utrzymanie nawierzchni bezpodsypkowych są znacznie mniejsze i są szacowane na ok. 15% nakładów przeznaczonych na utrzymanie nawierzchni tłuczniowej. Mając na uwadze znaczne nakłady inwestycyjne jakie trzeba ponieść na nawierzchnię niekonwencjonalną, warto zastanowić się nad wzmocnieniem klasycznej nawierzchni, a ściślej mówiąc warstwy podsypki, bowiem to może zmniejszyć koszty jej utrzymania.

2. NAWIERZCHNIE KOLEJOWE – MODELOWANIE

Tor kolejowy może być zbudowany jako konstrukcja **klasyczna** lub **niekonwencjonalna**. Torem kolejowym nazywamy dwa równoległe toki szynowe stanowiące podstawowy układ nośny nawierzchni. Układ geometryczny toków szynowych umożliwia bezpieczny ruch pojazdów. Nawierzchnia stanowi zespół konstrukcyjny składający się z szyn, podkładów, przytwierdzeń oraz podsypki (rys.1). Ważnym elementem drogi kolejowej jest również podtorze, które jest warstwą ziemną podłoża w postaci nasypu lub przekopu, na którym układana jest nawierzchnia. Głównym zadaniem nawierzchni jest przeniesienie sił od kół pojazdów szynowych na podtorze, stanowiące najczęściej budowlę ziemną. Klasyczne nawierzchnie kolejowe, składające się z rusztu torowego „zanurzonego” w warstwie podsypki leżącej na podtorzu, pracują pod obciążeniem eksploatacyjnym w stadium sprężysto-plastycznym. Źródłem odkształceń trwałych-plastycznych jest podsypka.



Rys. 1. Części składowe nawierzchni kolejowej: 1) podtorze, 2) podkład, 3) szyna, 4) podsypka

Warstwa podsypki jest najbardziej podatną na odkształcenia częścią składową nawierzchni kolejowych. Uważa się, że jej nierównomierne osiadanie w wyniku użytkowania toru (oddziaływanie pojazdów szynowych w trakcie eksploatacji torów), jest główną przyczyną pogarszania się położenia toru w czasie jego eksploatacji. Szybkość zużycia podsypki zależy od cech fizycznych materiału podsypkowego, typu konstrukcji nawierzchni i charakteru ruchu, a także od warunków współpracy podsypki z podłożem.

2.1. Modele matematyczne toru kolejowego

Wiele modeli matematycznych toru kolejowego obszernie opisano m.in. w pracach Szcześniaka [23, 11] i Kisilowskiego [9], którzy w swojej pracy naukowej zajmowali się zarówno problemami modelowania toru kolejowego, jak i oddziaływaniem pojazdu na tor. W zjawiskach dynamicznych występujących w układzie pojazd szynowy – tor, stosowane są modele nominalne toru (szyny) jako belki na sprężystym podłożu, a pojazd traktowany jest jako siła lub oscylator poruszający się po belce, jaką jest tor. Do modelowania zjawisk dynamicznych pojazd – tor – otoczenie są stosowane następujące modele ciągłe toru [9]:

- model toru w postaci belki Bernoulliego-Eulera na podłożu lepko-sprężystym,
- model toru w postaci belki Bernoulliego-Eulera na podłożu dwuwarstwowym lepko-sprężystym,
- model toru w postaci belki Bernoulliego-Eulera na podłożu Winklera,
- model toru jako belki Timoshenki na podłożu liniowo-sprężystym.

2.1.1. Modele ciągłe jednowarstwowe toru kolejowego

Model ciągły toru na podłożu Winklera

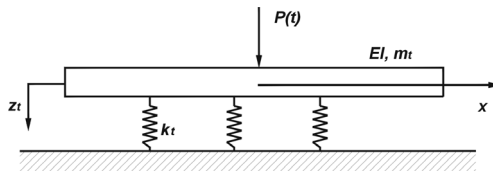
W tym modelu zakłada się, że podłoże stanowi układ niepołączonych ze sobą sprężyn na nieodkształcalnej bazie. Ugięcie podłoża występuje w miejscu przekazywania obciążeń na podłoże. W modelu toru na podłożu Winklera (rys. 2) szyna przedstawiona jest za pomocą belki Bernoulliego-Eulera. Podłoże wraz z elementami sprężystymi nawierzchni (podkłady, podsypka, przytwierdzenia) traktowane jest jako rozłożone elementy sprężyste k_t (winklerowskie). Pojazd szynowy potraktowany jest jako siła skupiona.

Model matematyczny takiego układu można opisać za pomocą równania różniczkowego cząstkowego czwartego stopnia [9]:

$$EI \frac{\partial^4 z_t}{\partial x^4} + m_t \frac{\partial^2 z_t}{\partial t^2} + k_t z_t = P(t) \delta(x), \quad (1)$$

gdzie:

- EI – sztywność giętej belki,
- m_t – rozłożona masa,
- k_t – stała sprężystości toru,
- $P(t)$ – siła skupiona oddziałująca na belkę,
- $\delta(x)$ – funkcja Diraca (funkcja impulsowa).



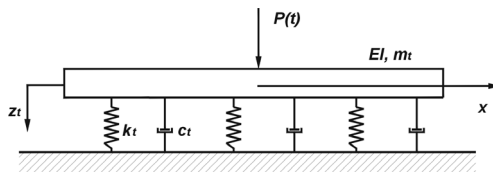
Rys. 2. Model toru na podłożu Winklera

Model ciągły toru na podłożu Winklera z tłumieniem

W modelu toru z ciągłym tłumieniem na podłożu Winklera szynę reprezentuje belka, a podkładki szynowe, podkłady, podsypkę i podłoże warstwa sprężysto-tłumiąca. Można to opisać równaniem różniczkowym postaci [9, 2]:

$$EI \frac{\partial^4 z_t}{\partial x^4} + m_t \frac{\partial^2 z_t}{\partial t^2} + c_t \frac{\partial z_t}{\partial t} + k_t z_t = P(t) \delta(x). \quad (2)$$

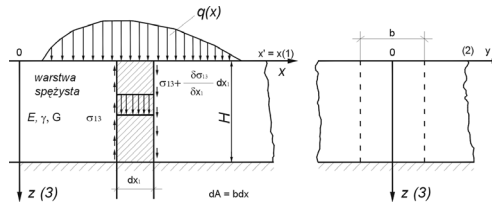
Model toru na podłożu Winklera z tłumieniem (rys. 3) może być zastosowany do badania właściwości toru klasycznego w zakresie częstotliwości do około 100 Hz.



Rys. 3. Model toru na podłożu Winklera z tłumieniem

Model ciągły toru na podłożu Własowa

Model na podłożu Własowa składa się z warstwy sprężystej o grubości H spoczywającej na nieodkształcalnej bazie. Uwzględnia on bezwładność podłoża (rys. 4).



Rys. 4. Model podłoża Własowa [28]

W modelu uwzględnia się bezwładnościowe i sprężysto-tłumiące właściwości podłoża. Podłoże jest opisane dwoma parametrami: modułem sprężystości oraz współczynnikiem Poissona. Model (rys. 5) można opisać następującym równaniem różniczkowym [9]:

$$EI \frac{\partial^4 z}{\partial x^4} + m_z \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} - 2c_0 \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + k_0 z = P(t)\delta(x), \quad (3)$$

gdzie sztywności podłoża na ściskanie k_0 i ścinanie c_0 wynoszą [9]:

$$k_0 = \frac{E_0 h}{1 - \nu_0^2} \int_0^H [\psi'(z)]^2 dz, \quad (4)$$

$$c_0 = \frac{E_0 h}{4(1 + \nu_0)} \int_0^H \psi^2(z) dz, \quad (5)$$

gdzie:

E_0 i ν_0 – moduły Younga i Poissona gruntu,

G – moduł Kirhoffa,

h – szerokość belki,

$\psi(z) = \exp(-\varepsilon z)$ – funkcja rozkładu pionowych przemieszczeń gruntu wzdłuż jego głębokości,

H – głębokość gruntu, przy której drgania zanikają,

m_z – masa zredukowana szyny.

Masę zredukowaną szyny można określić z następującego wzoru:

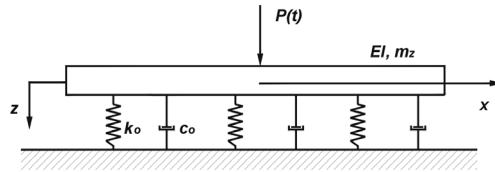
$$m_z = m_b + m_0, \quad (6)$$

w którym:

$$m_0 = \frac{\gamma_0 \delta}{g} \int_0^H \psi^2(z) dz, \quad (7)$$

gdzie:

- m_b – masa szyny,
- m_0 – masa podłoża,
- g – przyspieszenie ziemskie,
- δ – ciężar właściwy belki.



Rys. 5. Model toru na podłożu Własowa

2.1.2. Model ciągły dwuwarstwowy toru kolejowego

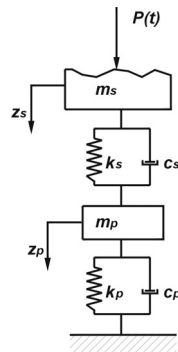
W modelach ciągłych dwuwarstwowych dokładniej uwzględnia się wewnętrzną strukturę toru, wyróżniając w nich szyny, oddzielone od nich elastycznymi przekładkami oraz podkłady ułożone na podsypce [9].

Model toru kolejowego jako belki Bernoulliego-Eulera

Na rysunku 6 przedstawiono model ciągły dwuwarstwowy toru, w którym szyna traktowana jako belka Bernoulliego-Eulera z ciągłym rozłożeniem elementów masowo-sprężysto-tłumiących (podkładki podszynowe, podkłady oraz podsypka). Ruch układu można zapisać następującym równaniem różniczkowym [9]:

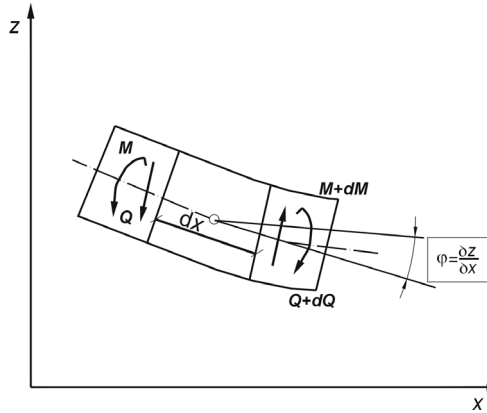
$$EI \frac{\partial^4 z_s}{\partial x^4} + m_p \frac{\partial^2 z_s}{\partial t^2} + c_s \frac{\partial z_s}{\partial t} + k_s z_s - k_s z_p - c_s \frac{\partial z_p}{\partial t} = P(t) \delta(x), \quad (8)$$

$$m_p \ddot{z}_p + c_p \frac{\partial z_p}{\partial t} + k_p z_p = k_s (z_s - z_p) + c_s \left(\frac{\partial z_p}{\partial t} - \dot{z}_p \right). \quad (9)$$



Rys. 6. Model dwuwarstwowy ciągły toru

W belce Bernoulliego-Eulera (rys. 7) przyjmuje się założenie nieodkształcalności płaszczyzny przekroju po ugięciu. W wypadku istnienia siły ścinającej (praktycznie występującej w układach technicznych), utrzymanie założenia płaskości przekroju powoduje przyjęcie nieskończonej sztywności na ścinanie.



Rys. 7. Schemat obciążeń elementarnego odcinka toru dla belki B-E [9]

Model toru kolejowego jako belki Timoshenki

Model Timoshenki (rys. 8) różni się od elementarnego modelu B-E uwzględnieniem energii obrotowej przekrojów oraz odkształcenia postaciowego elementów. Stosowany jest do modelowania belek obciążonych harmonicznie przy dużych częstotliwościach drgań, rzędu tysięcy herców oraz obciążonych udarowo. Równowagę sił i momentów dla belki Timoshenki można przedstawić następującymi wzorami [9]:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} - \rho A \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = 0, \quad (10)$$

$$\frac{\partial M}{\partial x} - Q + \rho I \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} = 0, \quad (11)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial x} + \frac{M}{EI} = 0, \quad (12)$$

$$\frac{\partial z}{\partial x} - \psi - \frac{Q}{kAG} = 0, \quad (13)$$

gdzie:

E – moduł Younga,

G – moduł Kirchhoffa,

I – powierzchniowy moment bezwładności przekroju poprzecznego belki,

ψ – kąt wywołany działaniem momentu zginającego,

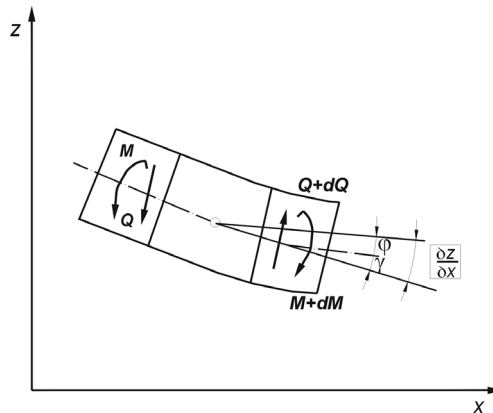
γ – kąt wynikający z działania siły ścinającej Q ,
 M – moment zginający,
 ρ – masa na jednostkę długości,
 Q – siła poprzeczna,
 A – pole przekroju poprzecznego belki,
 k – współczynnik ścinania Timoshenki.

Eliminując z równań 10÷13 M i Q , otrzymujemy równanie ruchu belki Timoshenki:

$$\frac{\partial^4 z}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} - \rho A \left(\frac{EI}{kAG} + r^2 \right) \frac{\partial^4 z}{\partial x^2 \partial t^2} + r^2 \frac{\rho^2 A}{kG} \frac{\partial^4 z}{\partial x^4} = 0, \quad (14)$$

gdzie:

$$r^2 = \frac{I}{A}.$$



Rys. 8. Schemat obciążeń elementarnego odcinka toru dla belki Timoshenki [9]

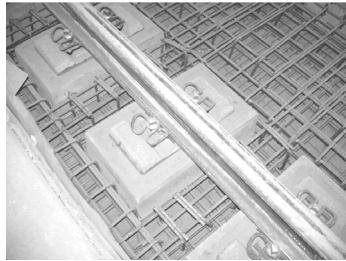
Przedstawione zagadnienia nie wyczerpują tematu. Wskazują jedynie na pewne metody rozwiązywania zagadnień w modelowaniu układów ciągłych, ze szczególnym uwzględnieniem sposobów modelowania toru kolejowego. W opracowaniu nie rozwinięto, a także nie przedstawiono metod matematycznych w modelowaniu dwuwymiarowych układów ciągłych.

3. NAWIERZCHNIE KOLEJOWE DLA DUŻYCH PRĘDKOŚCI

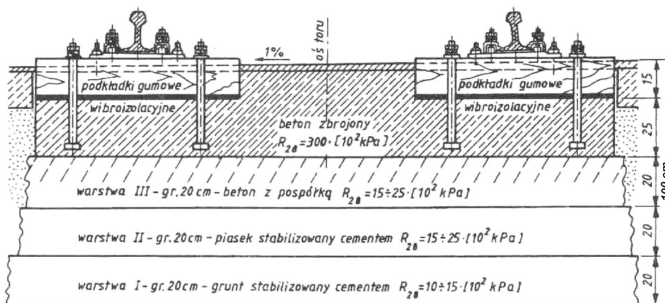
W nawierzchni bezpodsypkowej wyeliminowano najbardziej odkształcalny element klasycznej nawierzchni, jakim jest warstwa podsypki tłuczniowej. Ponadto podkłady zastąpiono płytami, belkami, ramami, podsypkę zaś elementem masowym (masy

asfaltowo-bitumiczne, gumy itp.). Proponowane dotychczas konstrukcje nawierzchni bezpodsypekowych są wielowarstwowymi ustrojami o różnych modułach odkształceń poszczególnych warstw. Wraz ze wzrostem głębokości układu się warstwy o coraz mniejszym module sprężystości. Zależnie od rodzaju i układu warstw, nawierzchnie mają grubość w granicach 760÷1020 mm. W tych nawierzchniach podłoże toru powinno być wykonane z materiałów o wytrzymałości umożliwiającej pracę konstrukcji w zakresie odkształceń sprężystych w warunkach zmiennych cykli obciążeń.

Wcześniejsze zastosowania nawierzchni niekonwencjonalnych ograniczały się do tuneli (tunel średnicowy w Warszawie, rys. 9), obiektów inżynierskich, odcinków przejściowych od toru na podtorzu gruntowym oraz na stacjach i przystankach w obszarze aglomeracji. Innym przykładem nawierzchni niekonwencjonalnej jest nawierzchnia na Dworcu Centralnym w Warszawie (rys. 10). Nawierzchnia została wykonana jako ustrój wielowarstwowy o łącznej grubości 1000 mm. Trzydziestopięcioletnia eksploatacja wykazała, że zaprojektowana konstrukcja pracuje pod obciążeniem eksploatacyjnym w stadium sprężystym. Nie stwierdzono żadnych trwałych, plastycznych odkształceń. Należy zaznaczyć szczególnie korzystne warunki pracy i dobrze funkcjonujące odwodnienie.



Rys. 9. Szyny mocowane sprężysto do bloków betonowych [15]



Rys. 10. Niekonwencjonalna nawierzchnia kolejowa na Dworcu Centralnym w Warszawie (projekt: T. Basiewicz) [3, 8]

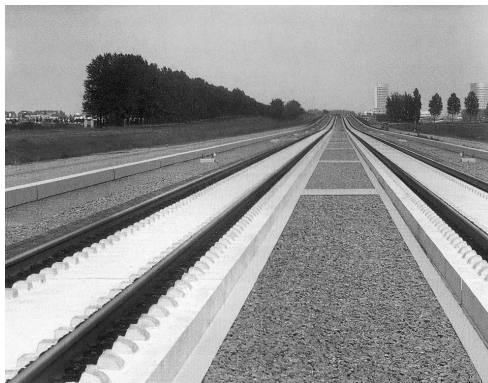
Upowszechnienie nawierzchni bezpodsypekowych wiąże się zarówno ze zmianą warunków eksploatacji linii kolejowych, jak również wynika z zainteresowania przemy-

słu prefabrykacją elementów tych nawierzchni oraz korzystnych warunków finansowania budowy nowych linii. Liczne opracowania dotyczące bezpodsytkowej nawierzchni kolejowej można znaleźć w pracach [25, 10, 27]. Pierwsze nawierzchnie bezpodsytkowe pojawiły się w Japonii na linii Shinkansen, koleje włoskie opracowały własną nawierzchnię typu IPA zbliżoną do rozwiązań japońskich, w Holandii zaś opracowano nawierzchnię typu ERS i EBS. Do najbardziej znanej konstrukcji można zaliczyć nawierzchnię typu Rheda układaną w torach w węźle berlińskim oraz na liniach dużych prędkości.

3.1. System Rheda 2000

System Rheda 2000 powstał na podstawie konstrukcji, która w 1972 roku pierwszy raz została zastosowana na odcinku Bielefeld – Hamm, na dworcu Rheda. Po okresie prób przeprowadzonych na terenie Niemiec system ten zyskał znaczenie.

System Rheda 2000 (rys. 11) jest optymalnym rozwiązaniem systemowym pod względem technicznym i ekonomicznym. Podłoże z tłucznia sprawia wiele kłopotów przy prędkościach ponad 250 km/h, natomiast system Rheda 2000, dzięki stabilności położenia torów, jest o wiele mniej wymagający pod względem konserwacji, może przenosić większe obciążenia, a także zapewnia wyższy komfort jazdy. Wybierając ten system można liczyć na zmniejszenie kosztów przy projektowaniu i budowie toru.



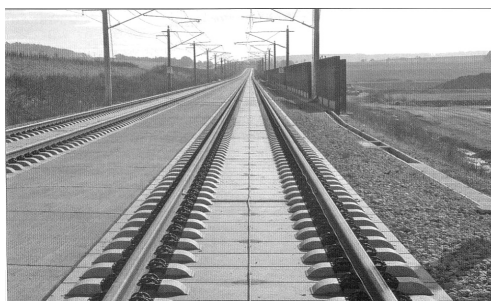
Rys. 11. Odcinek linii z nawierzchnią Rheda 2000 [17]

3.2. System podpór blokowych w otulinie EBS Edilon Corkelast

System podpór blokowych w otulinie Corkelast firmy Edilon jest bezpodsytkowym systemem konstrukcji nawierzchni zapewniającym sprężyste przenoszenie obciążeń od pojazdów szynowych i tłumienie drgań wywołanych ich przejazdem. Specjalna dwuskładnikowa żywiczna masa podlewowa Edilon Corkelast, stanowiąca główny element systemów nawierzchni torowych firmy Edilon (ERS, EBS), zapewnia trwałe, sprężyste posadowienie i mocowanie poszczególnych bloków do podbudowy betonowej.

Trwałość, prosty montaż oraz minimalizacja kosztów utrzymania nawierzchni sprawiły, że żywica Edilon Corkelast [15] jest materiałem stosowanym od dziesięcioleci i sprawdzonym w eksploatacji.

System nawierzchni bezpodsypkowej FF Bögl (rys. 12) [16] składa się z płyt prefabrykowanych połączonych ze sobą za pomocą ściągów w kierunku wzdłużnym, ułożonych na związanej hydraulicznie warstwie (HGT). Obecna konstrukcja powstała w wyniku pozytywnych badań eksploatacyjnych na odcinku doświadczalnym o długości 460 m, zbudowanym w 1977 roku pod Karsfeld. Pomimo dużych obciążeń eksploatacyjnych, wynoszących obecnie około 30 Tg/rok oraz prędkości jazdy 160 km/h, położenie toru nie uległo odkształceniom, nie wystąpiły również żadne widoczne uszkodzenia nawierzchni betonowej. Nawierzchnia bezpodsypkowa typu FF Bögl gwarantuje dużą żywotność również przy prędkościach jazdy przekraczających 300 km/h.



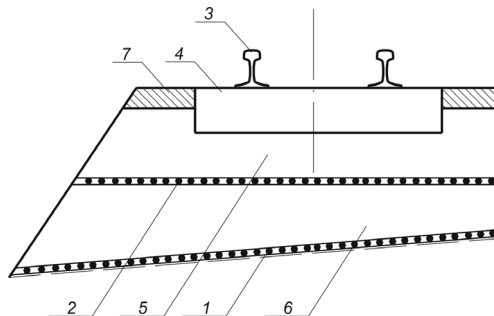
Rys. 12. Nawierzchnia bezpodsypkowa typu FF Bögl na linii dużych prędkości Norymberga – Ingolstadt (2006) [16]

3.3. Nawierzchnia z kompozytem tłuczniovym BGT

Nawierzchnia z kompozytem tłuczniovym BGT jest innowacyjnym rozwiązaniem wzmocnienia klasycznej nawierzchni kolejowej, opracowanym przez naukowców z Zakładu Infrastruktury Transportu Politechniki Warszawskiej [4]. Proponowany kompozyt tłuczniovym stanowią warstwy tłucznia uzbrojone geosiatkami, dodatkowo stabilizowane chemicznie żywicą poliuretanową (rys. 13). Nawierzchnia kolejowa z kompozytem tłuczniovym typu BGT charakteryzuje się tym, że wprowadza się kompleksowe, mechaniczne i chemiczne uodpornienie warstwy podsypki na zjawisko dekonsolidacji. Mechaniczne uodpornienie polega na uzbrojeniu podsypki najmniej dwiema geosiatkami.

Pierwsza geosiatka jest ułożona na styku podsypki z górną warstwą podtorza (rys. 14). Po ułożeniu i zagęszczeniu powierzchniowym pierwszej warstwy tłucznia układana jest druga geosiatka. Po uzupełnieniu drugą warstwą tłucznia, w celu uzyskania określonej standardem, właściwej grubości warstwy podsypki pod podkładem, zagęszcza się i uzupełnia warstwę podsypki do standardowego kształtu. W końcowym stadium

wykonuje się powierzchniową stabilizację dynamiczną oraz stabilizację chemiczną specjalnymi żywicami poliuretanowymi, wykonaną za pomocą iniekcji. Ziarna tłucznia – po jego zagęszczeniu – wnikają w oczka siatki zapewniając mechaniczne zakotwienie kruszywa, siatki zaś czynią strukturę bardziej jednorodną i zwiększają kąt α rozkładu naprężeń. Utrzymanie wymaganej dokładności geometrycznej nawierzchni tłuczniowej toru na liniach dużych prędkości wymaga częstych regulacji automatyczną podbijarką torową, co z kolei zwiększa ścieranie ziarn tłucznia, które tracą stopniowo właściwości klinowania się i zapewnienie dobrego podparcia podkładów.



Rys. 13. Przekrój warstwy podsypki zbrojonej geosiatkami [4]: 1) geosiatka na górnej powierzchni podtorza, 2) siatka na warstwie tłucznia o grubości 150 mm, 3) szyna, 4) podkład, 5) górna warstwa tłucznia, 6) dolna warstwa tłucznia między geosiatkami, 7) stabilizacja żywicą poliuretanową



Rys. 14. Warstwa podsypki stabilizowanej chemicznie żywicą poliuretanową [fot. J. Kukulski]

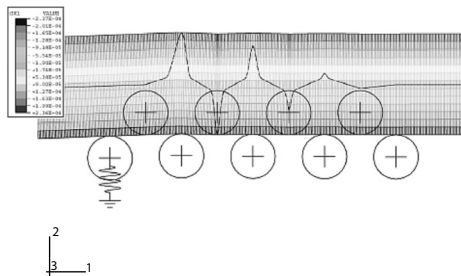
W październiku 2008 r. został zbudowany odcinek doświadczalny na Centralnej Magistrali Kolejowej, na którym będą prowadzone badania nad nową konstrukcją nawierzchni z kompozytu tłuczniowego BGT.

4. ZASTOSOWANIE MES W NAWIERZCHNI KOLEJOWEJ

Stosowanie nowych rozwiązań nawierzchni dla dużych prędkości zarówno klasycznej, jak i bezpodsypankowej, wymaga przeprowadzenia licznych badań doświadczalnych, a w początkowej fazie modelowania i obliczeń symulacyjnych. Obecnie metoda elementów skończonych jest jedną z najszerszej stosowanych metod rozwiązywania różnych problemów inżynierskich. Jej uniwersalność polega na łatwości schematyzacji różnych obszarów o skomplikowanej geometrii.

Metody numeryczne były wykorzystywane od kilkunastu lat w badaniach części składowych nawierzchni kolejowej. Intensywne prace prowadzono na Politechnice Warszawskiej, Politechnice Krakowskiej oraz w innych ośrodkach naukowo-badawczych za granicą [5, 12, 26, 24, 29]. Prace te obejmują analizę naprężeń własnych w stalowych częściach rozjazdów, tj. szynach i kształtownikach iglicowych. Głównym celem obliczeń numerycznych było wyznaczenie naprężeń własnych, pozostających w szynie po odciążeniu (zakończeniu zginania) oraz określenie wpływu różnych parametrów na wielkość tych naprężeń i ich rozkładu w materiale. Otrzymane wyniki obliczeń numerycznych porównywano z wynikami pomiarów naprężeń wykonanych techniką ultradźwiękową.

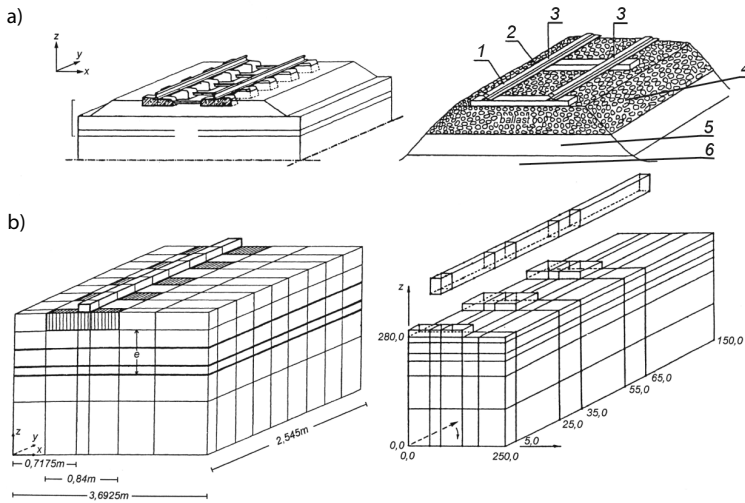
Prace zagranicznych naukowców są związane m.in. z modelowaniem zjawisk powstających w wyniku walcowania szyn na prostownicach rolkowych. W pracach [5, 6] oraz na rysunku 15 przedstawiono rozkład naprężeń własnych po symulacji prostowania oraz określono wpływ procesu walcowania na wielkość i rozkład naprężeń.



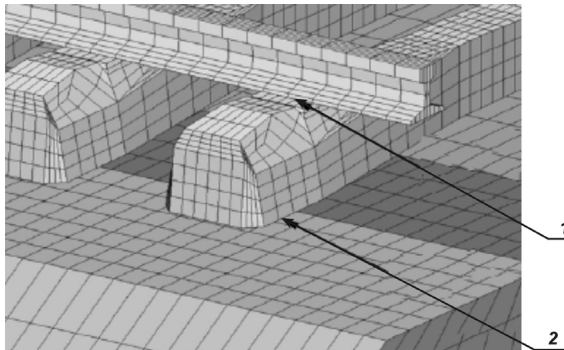
Rys.15. Przykład modelu walcowania, nadawania prostości szynie [6]

Metoda elementów skończonych, jako podstawowe narzędzie obliczeniowe we współczesnej mechanice, znalazła również zastosowanie w rozważanym zagadnieniu modelowania toru, nawierzchni BGT i podtorza kolejowego. W pracy nr [23] Desai przedstawił numeryczny model układu nawierzchni i podtorza (rys. 16).

W pracy [7] przedstawiono analizę uszkodzeń kolejowych podkładów betonowych ułożonych na liniach kolejowych mocno obciążonych. Przyjmując model we-

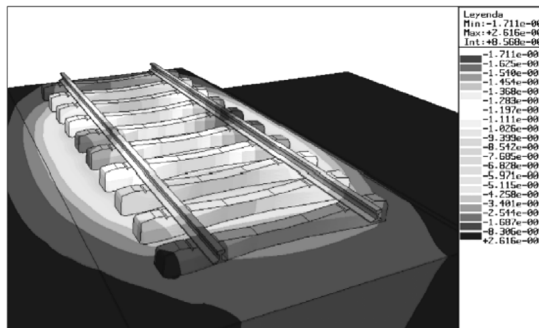


Rys. 16. Numeryczny model układu nawierzchni i podtorza [23]: 1) szyna, 2) podkład, 3) nacisk koła, 4) tłuczeń, 5) warstwa filtracyjna, 6) podtorze



Rys. 17. Części składowe nawierzchni kolejowej z zaznaczonymi miejscami kontaktu [7]:

1) kontakt szyna – podkład, 2) kontakt podkład – podsypka



Rys. 18. Pionowe przemieszczenia rusztu torowego [7]

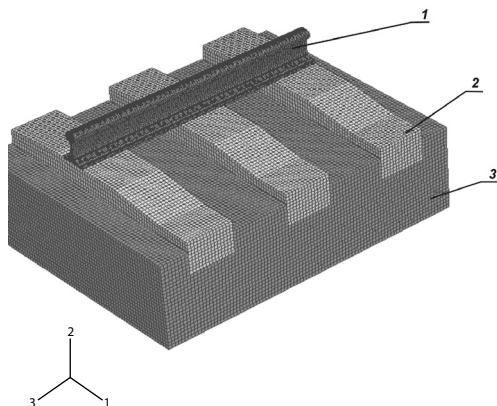
dług rysunku 17, autorzy przedstawili wyniki obliczeń numerycznych (rys. 18) oraz wyniki pomiarów przeprowadzonych na odcinku doświadczalnym.

Zastosowanie metody elementów skończonych opisują również prace [19, 22, 20, 21, 13]. Prowadzone są badania symulacyjne i doświadczalne podkładów z betonu sprężonego. Podkłady są poddawane obciążeniu eksploatacyjnemu w trakcie prób ruchowych na odcinku doświadczalnym oraz stanowiskowym badaniom symulacyjnym w laboratorium, gdzie zadawano m.in. obciążenia uderzeniowe.

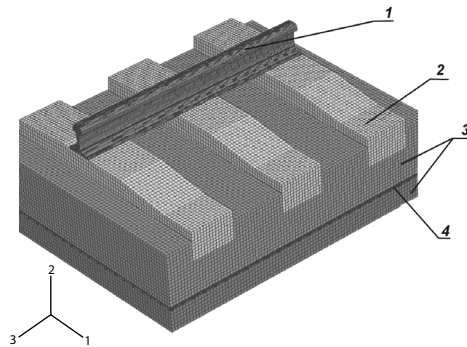
5. MODELE MES NAWIERZCHNI KLASYCZNEJ I WZMOCNIONEJ GEOSIATKAMI

5.1. Geometria – siatka elementów skończonych

Układ geometryczny modelu numerycznego jest zdefiniowany w postaci siatki węzłów określających położenie i wielkość elementów skończonych. Na podstawie analizy wymiarów obiektów są wybierane bryłowe elementy trójwymiarowe. Ze względu na skomplikowany kształt modelowanych obiektów, oprócz elementów prostopadłościennych zawierających sześć ścian, wprowadzono dodatkowo trójwymiarowe elementy bryłowe o podstawie trójkątnej (zawierające pięć ścian). Uznaje się, że elementy kwadratowe są bardziej odpowiednie do opisu zagadnień, w których dominuje zginanie. Lepiej opisują koncentracje naprężeń oraz umożliwiają lepszą aproksymację zakrzywionych kształtów przy mniejszej liczbie elementów. Na rysunkach 19 i 20 przedstawiono modele MES nawierzchni klasycznej i wzmocnionej geosiatkami.

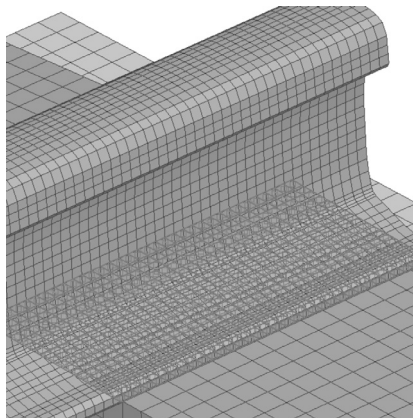


Rys. 19. Model MES połowy nawierzchni klasycznej: 1) model szyny 60E1, 2) model podkładu, 3) model podsypki



Rys. 20. Model MES połowy nawierzchni wzmocnionej geosiatkami: 1) model szyny 60E1, 2) model podkładu, 3) model podsypki, 4) model geosiatki

Do obliczeń symulacyjnych określono miejsca kontaktu pomiędzy poszczególnymi elementami siatek w nawierzchni kolejowej klasycznej i wzmocnionej. Zbudowanie siatki całego modelu z tym samym stopniem szczegółowości nie jest możliwe do wykonania, dlatego siatka w poszczególnych elementach nawierzchni ma różną wielkość. Przy takim rozwiązaniu należy zastosować geometryczne interfejsy pomiędzy sąsiednimi elementami. Zdefiniowano je korzystając z elementów kontaktowych. Z geometrycznego punktu widzenia, interfejs (kontakt) jest powierzchnią, która łączy dwa sąsiednie segmenty siatek z odmiennymi gęstościami siatki w celu utrzymania ciągłości modelu. Umożliwia to właściwe rozprowadzenie nacisków na obie siatki, aby utrzymać homogeniczność modelu 3D (rys. 21).

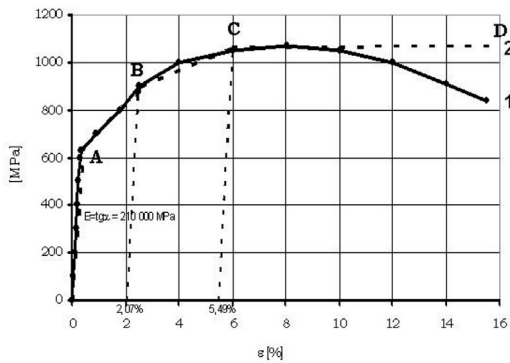


Rys. 21. Interfejs pomiędzy stopką szyny a podkładem (więzy jednostronne)

5.2. Modele materiału

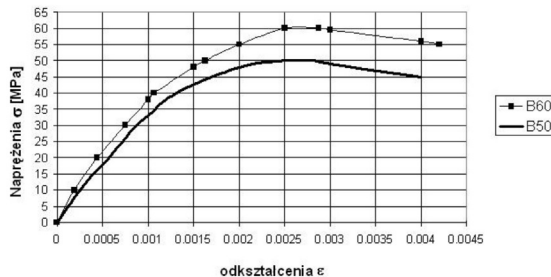
Dla szyny do obliczeń numerycznych określono przybliżone krzywe zależności naprężenia σ od odkształcenia ϵ . Przyjęto moduł Younga $E=210\,000$ MPa oraz współczyn-

nik Poissona $\nu=0,3$. Moduł Younga dla podkładów strunobetonowych przyjęto 54 GPa. Przyjęto podsypkę o grubości 350 mm, z materiału o module Younga 130 MPa i współczynnika Poissona 0,2. Na rysunku 22 przedstawiono otrzymaną doświadczalnie krzywą zależności naprężenia σ od odkształcenia ε dla jednoosiowej próby rozciągania stali (linia ciągła). Punkt A na wykresie jest zdefiniowany jako umowna granica plastyczności $R_{02}=629,7$ MPa. Na krzywej aproksymacyjnej (linia przerywana) punkt A rozgranicza stan sprężysty od stanu sprężysto-plastycznego ze wzmocnieniem. Następnym punktem B jest obrany na krzywoliniowym odcinku wzmocnienia dla naprężenia $\sigma_B=900,0$ MPa. Punkt C jest wyznaczony przez maksymalne naprężenie osiągnięte w czasie próby, czyli wytrzymałość doraźną $R_m=1069,0$ MPa.



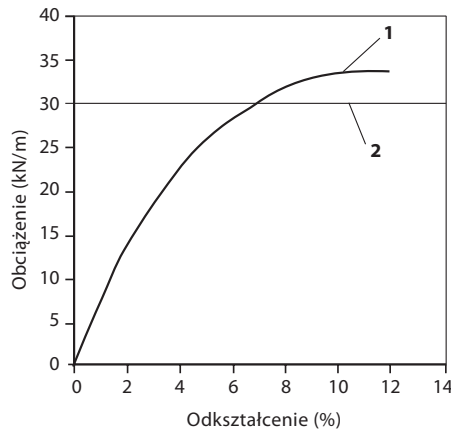
Rys. 22. Doświadczalna i teoretyczna krzywa zależności $\sigma - \varepsilon$ dla osiowego rozciągania stali:
1) dane doświadczalne, 2) aproksymacja

Na rysunku 23 przedstawiono teoretyczną krzywą zależności $\sigma - \varepsilon$ dla osiowego ściskania betonu klasy B50 i B60.



Rys. 23. Teoretyczna krzywa zależności $\sigma - \varepsilon$ dla osiowego ściskania betonu B50 i B60

Na rysunku 24 przedstawiono wynik laboratoryjnej próby rozciągania geosiatki Tensar SS30.



Rys. 24. Wynik rozciągania geosiatki Tensor SS30 metodą ISO 10319 [18]:

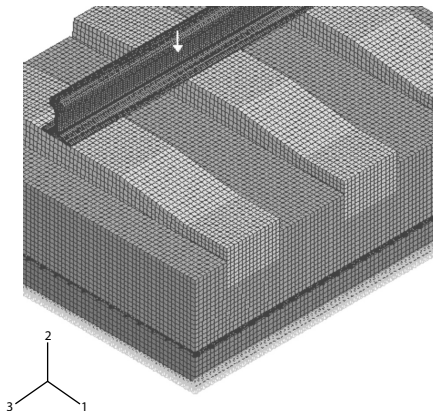
1) wynik badań, 2) wartość progowa wg K.J.

5.3. Obciążenie i warunki podparcia

Sposób podparcia w trakcie eksperymentu w modelu numerycznym został zastąpiony przez wyidealizowane warunki brzegowe (rys. 25). Ponieważ materiał jest nieliniowy, proces obliczeniowy podzielono na dwa kroki:

- pierwszy krok odpowiada zadaniu obciążenia,
- drugi odpowiada odciążeniu.

W każdym z kroków procesu, obciążenie jest przykładane stopniowo (przyrostowo) i w każdym z kroków następuje rozwiązanie układu równań w celu wyznaczenia przyrostu naprężeń, odkształceń i przemieszczeń, po czym następuje dalszy przyrost obciążenia, aż do wykonania całego programu obciążenia (krzywej obciążenia), której częścią jest odciążenie. Warunki podparcia są w modelu określone przez likwidację odpowiednich stopni swobody uniemożliwiających modelowi przemieszczanie w kierunkach poziomym i pionowym.

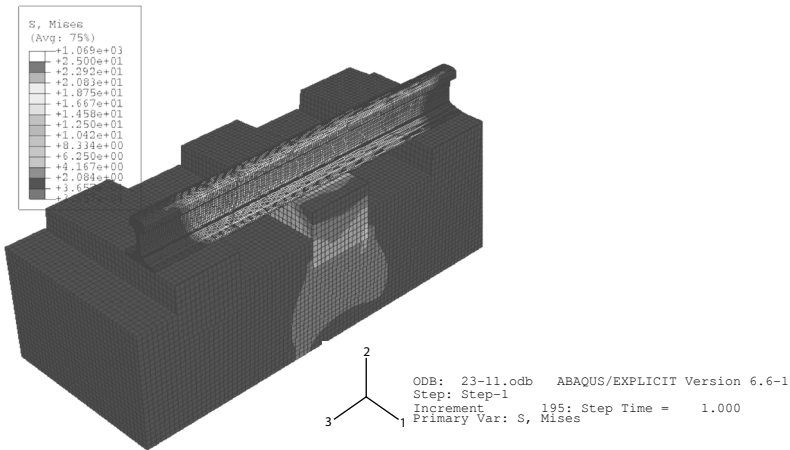


Rys. 25. Warunki podparcia oraz obciążenia modelu połowy nawierzchni wzmocnionej

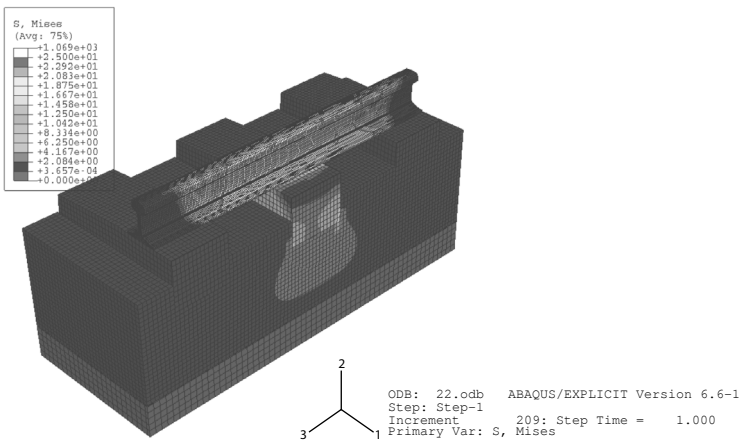
Wymienione warunki brzegowe, symulujące podparcie, pozostają niezmienione w całym procesie obliczeniowym, czyli w obydwu krokach obciążenia i odciążenia.

5.4. Wyniki obliczeń numerycznych

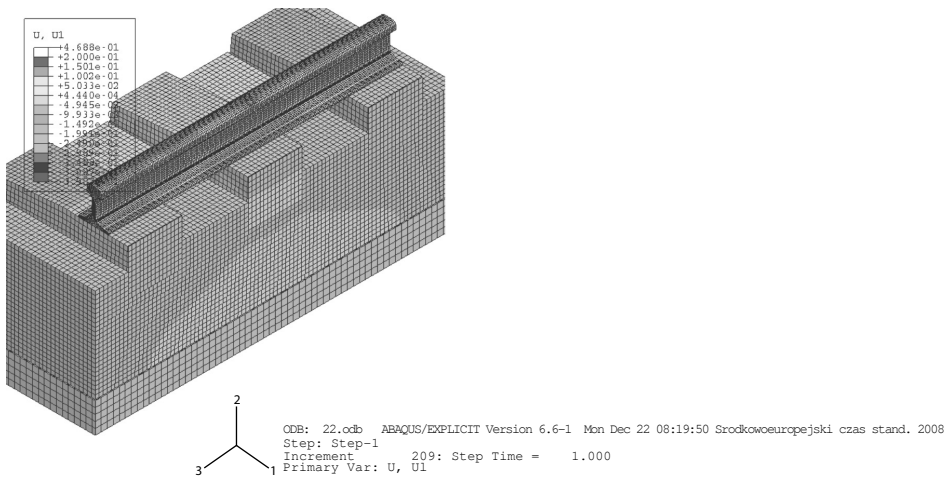
Wyniki obliczeń numerycznych otrzymane przy wykorzystaniu modeli nawierzchni klasycznej i wzmocnionej, są przedstawione na wykresach obrazujących kontury naprężenia zastępczego Hubera-Misesa oraz odkształcenia. Wyniki obliczeń numerycznych są przedstawione na rysunkach 26–28.



Rys. 26. Rozkład naprężenia zastępczego σ^{HM} na końcu obciążania uzyskany dla połowy modelu nawierzchni klasycznej



Rys. 27. Rozkład naprężenia zastępczego σ^{HM} na końcu obciążania uzyskany dla połowy modelu nawierzchni wzmocnionej



Rys. 28. Rozkład odkształceń na końcu obciążania uzyskany dla połowy modelu nawierzchni wzmocnionej

6. PODSUMOWANIE

Przedstawiony w artykule przegląd wybranych prac dotyczących modelowania matematycznego i modelowania MES nawierzchni kolejowej, nie wyczerpuje tematyki związanej z wymienionym zagadnieniem. Tematyką nawierzchni kolejowej polscy i zagraniczni naukowcy zajmowali się już w XIX i XX wieku i ze względu na dużą liczbę prac nie można przedstawić tego zagadnienia w jednym artykule. Omówione modele MES są alternatywą dla matematycznych modeli toru kolejowego, ponieważ MES jest również modelem matematycznym wariacyjnym (wyprowadza się go z zasady wariacyjnej). Ponadto obliczenia numeryczne mogą dotyczyć również modeli różniczkowych. Przedstawione modele MES nawierzchni klasycznej i wzmocnionej kompozytem BGT oraz wyniki symulacji prezentowane w rozdziale 5 są opracowane przez autora publikacji. Prezentowane wyniki symulacji są obliczeniami wstępnymi i niepełnymi, ponieważ obejmują jedynie wzmocnienie geosiatkami (nie obejmują wzmocnienia żywicą poliuretanową). Należy zaznaczyć, że zadane obciążenie dla stworzonych modeli nawierzchni mają charakter statyczny. W przyszłości będą również prowadzone obliczenia symulacyjne dla obciążeń dynamicznych. Modele te wymagają jeszcze dopracowania i uszczegółowienia, m.in.: zdefiniowania warstwy sklejojonej żywicą poliuretanową. Prowadzone równolegle badania na odcinku doświadczalnym powinny dać bliższe rzeczywistości informacje na temat odkształceń i ugięć proponowanej nawierzchni z kompozytem tłuczniowym BGT.

Uzyskane wyniki pomiarów będzie można skonfrontować z obliczeniami numerycznymi celem weryfikacji i modyfikacji modelu numerycznego, a także modyfikacji warunków brzegowych. Wstępne badania symulacyjne dla różnych obciążeń będą

weryfikowane z badaniami przeprowadzonymi w warunkach eksploatacyjnych na odcinku doświadczalnym. Umożliwi to określenie w sposób wiarygodny a nie hipotetyczny, przydatności wzmocnionej nawierzchni na liniach dużych prędkości w warunkach polskich kolei. Przeprowadzone badania doświadczalne i symulacyjne pozwolą określić właściwości dynamiczne poszczególnych rodzajów nawierzchni oraz resurs eksploatacyjny podsypki. Obliczenia numeryczne dostarczyły interesujących informacji, m.in. o wielkości i rozkładzie naprężeń oraz stanie odkształcenia. Na podstawie tych wyników można określić miejsca występowania ekstremalnych wartości naprężeń na obwodzie i wewnątrz analizowanego obiektu.

Przeprowadzone obliczenia numeryczne pokazują, że przy wykorzystaniu metody elementów skończonych, możliwe jest na drodze analizy numerycznej otrzymanie dużej liczby informacji dotyczącej rozkładu naprężeń i odkształceń zarówno na powierzchni, jak i wewnątrz rozpatrywanych elementów. Łatwa zmiana warunków zadania umożliwia analizę parametryczną, która doprowadza do wniosków optymalizacyjnych. Porównanie obliczeń numerycznych opartych na metodzie elementów skończonych z badaniami eksperymentalnymi, może stanowić najbardziej efektywną metodę analizy rozpatrywanego zagadnienia.

BIBLIOGRAFIA

1. ABAQUS – Standard User's Manual, Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc., Version 6.6.
2. Auersch L.: *Dynamic interaction of various beams with the underlying soil – finite and infinite, half-space and Winkler models*. European Journal of Mechanics A/Solids 27 (2008), s. 933-958.
3. Basiewicz T., Gołaszewski A., Rudziński L.: *Infrastruktura transportu*, WPW, Warszawa, 2002.
4. Basiewicz T., Gołaszewski A., Towpik K., Kukulski J.: *Opracowanie szczegółowej koncepcji konstrukcji nawierzchni kolejowej ze wzmocnioną podsypką*, Warszawa – Kraków, 2008.
5. Bogdański S., Olzak M., Stupnicki J.: *Numerical stress analysis of rail rolling contact fatigue cracks*. Optics and Lasers in Engineering 27, 1997, s. 89-100.
6. C. Betegón Biempica a, J.J. del Coz Díáz a, , P.J. Garcíá Nieto b, I. Peñuelas Sánchez a. *Nonlinear analysis of residual stresses in a rail manufacturing process by FEM*. Applied Mathematical Modelling, 2007.
7. C. González-Nicieza a, M.I. A., Álvarez-Fernández a, A. Menéndez-Díazb, A.E. A Ívarez-Vigil c, F.: *Ariznavarreta-Fernández a Failure analysis of concrete sleepers in heavy haul railway tracks*. Engineering Failure Analysis 15 (2008), s. 90-117.
8. *Drogi kolejowe*. Praca zbiorowa pod red. J. Sysaka, PWN, Warszawa, 1979.
9. *Dynamika układu mechanicznego pojazd szynowy – tor*, Praca zbiorowa pod red. J. Kisilowskiego, PWN, Warszawa, 1991.
10. Esveld C.: *Modern Railway Track*, MRT-Productions, Utrecht, 2001.

11. Jemielita G., Szcześniak W.: *Sposoby modelowania podłoża*. Prace naukowe Budownictwo, z. 120, Warszawa, 1993.
12. Kukulski J.: *Ocena stanu naprężeń własnych w elementach nawierzchni kolejowej. Materiały konferencyjne „Pojazdy Szynowe”*, Kazimierz Dolny nad Wisłą, 2006.
13. Mahmood M. Shokrieh, Meysam Rahmat: *On the reinforcement of concrete sleepers by composite materials*. Composite Structures, 76 (2006), s. 326–337.
14. *Master Plan dla transportu kolejowego w Polsce do 2030 roku*, Ministerstwo Infrastruktury, Warszawa, 2008.
15. Materiały informacyjne firmy Edilon Sedra, www.edilonsedra.com.
16. Materiały informacyjne firmy Max Bögl [dostęp 3.04.2009 r.], Dostępny w World Wide Web: www.max-boegl.de/boegldip/web/content.jsp?nodeId=1109.
17. Materiały informacyjne firmy Rail. One GmbH Pflaiderer track system, broszury informacyjne [dostęp 3.04.2009 r.], Dostępny w World Wide Web: www.railone.com.
18. Materiały informacyjne firmy Tensar <http://www.tensar.pl>.
19. Sakdirat Kaewunruen, Alex M. Remennikov: *Dynamic flexural influence on a railway concrete sleeper in track system due to a single wheel impact*, Engineering Failure Analysis, 2008.
20. Sakdirat Kaewunruen, Alex M. Remennikov: *Field trials for dynamic characteristics of railway track and its components using impact excitation technique*. NDT&E International, 40 (2007), s. 510-519.
21. Sakdirat Kaewunruen, Alex M. Remennikov: *Impact Capacity of Railway Prestressed Concrete Sleepers*, Engineering Failure Analysis, 2008.
22. Sakdirat Kaewunruen, Alex M. Remennikov: *Nonlinear Finite Element Modelling Of Railway Prestressed Concrete Sleeper. The tenth East Asia – Pacific Conference on Structural Engineering and Construction*, 2005, Bangkok, Thailand.
23. Szcześniak W.: *Wybrane zagadnienia kolejowe – Wzajemne oddziaływania w układzie pojazd – tor kolejowy – podtorze – podłoże gruntowe*, Prace „Naukowe Budownictwo” z. 129, Warszawa, 1995r.
24. Towpik K., Kwaśniewski L., Kowalczyk P.: *Experimental and numerical analysis of residual stress in switch blades*. Archives of Civil Engineering, L. 2, Wydawnictwo PAN, 2004.
25. Towpik K.: *Infrastruktura drogi kolejowej. Obciążenia i trwałość nawierzchni*, Wydawnictwo Instytutu Technologii i Eksploatacji, Radom, 2006.
26. Towpik K.: *Investigations of residual stress in switch blades. 3rd International Conference „Railway Engineering”*, London, 2000.
27. Towpik K.: *Kolejowe nawierzchnie bezpodsytkowe*, „Problemy Kolejnictwa”, Warszawa, 1999 z. 129.
28. Vlasov V., Leontev N.: *Balki, płyty i obłocki na uprugom osnovanii*, Moskwa Fizmelgi, 1960.
29. X.X. Yua, W.S. Lau.: *A finite-element analysis of residual stress in stretch grinding*, „Journal of Materials Processing Technology”, 94 (1999), s. 13-22.