

Jacek Kukulski
Wydział Transportu
Politechnika Warszawska

OBLICZENIA SYMULACYJNE DLA RÓŻNYCH OBCIĄŻEŃ STATYCZNYCH WZMOCNIONEJ NAWIERZCHNI KOLEJOWEJ

Streszczenie: W artykule przedstawiono analizę rozkładów naprężeń i odkształceń dla przeprowadzonych symulacji obciążeń kolejowej nawierzchni wzmocnionej za pomocą geosiatki i sklejonej żywicą poliuretanową. Obliczenia symulacyjne miały na celu przybliżenie własności wytrzymałościowych proponowanego wzmocnienia nawierzchni kolejowej przy różnych obciążeniach.

Słowa kluczowe: nawierzchnia kolejowa, metoda elementów skończonych, naprężenia

1. WSTĘP

W perspektywie budowy Kolei Dużych Prędkości [4] jak i postępującej w naszym kraju modernizacji istniejącej infrastruktury do $V_{\max}=160-200$ km/h należy zastanowić się, jakie rozwiązanie nawierzchni kolejowej wybrać, aby spełniała właściwie swoje zadanie.

W krajach europejskich gdzie od kilkadziesiąt lat są eksploatowane linie kolejowe na duże prędkości można zauważyć, dwie tendencje, jedna wykorzystująca nawierzchnię klasyczną, druga zaś nawierzchnie bezpodsytkowe. Koleje francuskie kontynuują budowę linii dużych prędkości z nawierzchnią klasyczną, niesie to za sobą znaczne nakłady inwestycyjne na jej utrzymanie. Z kolei np. koleje niemieckie jak i holenderskie wybierają rozwiązania bezpodsytkowe. Przykładem jest linia Dużych Prędkości Ingolstadt –Norymberga w Niemczech dla $V=300$ km/h (rys. 1).

Klasyczna konstrukcja nawierzchni, pracując w zakresie elastoplastycznym, kumuluje odkształcenia trwale podsytki, co prowadzi w trakcie eksploatacji do zróżnicowania jej cech sprężystych i tłumienia. Wiąże się to z częstą regulacją położenia toru i niezbędnymi naprawami części składowych nawierzchni. Potrzeba ograniczenia kosztów utrzymania (np. regulacji położenia geometrycznego toru) jest jedną z głównych przyczyn poszukiwania rozwiązań konstrukcji pracującej pod obciążeniem w zakresie odkształceń sprężystych.

Z wielu publikacji naukowych wynika, że koszt wykonania toru na tuczniu stanowi ok. 30% kosztu budowy toru na podbudowie betonowej. Wpływ na to ma między innymi koszt zbrojenia nawierzchni płytowej. Jednakże do dalszych analiz kosztowych należy również uwzględnić koszty eksploatacyjne. Nakłady na utrzymanie nawierzchni bezpodсыpkowych są znacznie mniejsze i szacowane są na około 15% nakładów przeznaczonych na utrzymanie nawierzchni tłuczniowej.

2. KOLEJOWE NAWIERZCHNIE BEZPODSYPKOWE

W praktyce proponowane dotychczas rozwiązania konstrukcji nawierzchni bezpodсыpkowych to wielowarstwowe ustroje o różnych modułach odkształceń charakteryzujących poszczególne warstwy.

W nawierzchniach tych podłoże toru wykonane jest z materiałów o wytrzymałości umożliwiającej pracę konstrukcji w zakresie odkształceń sprężystych w warunkach zmiennych cykli obciążeń. Wcześniejsze rozwiązania nawierzchni bezpodсыpkowych ograniczane były do obiektów inżynierskich, tuneli (tunel średnicowy w Warszawie), odcinków przejściowych od toru na podtorzu ziemnym oraz stacji i przystanków w obszarze aglomeracji. Innym przykładem nawierzchni niekonwencjonalnej w Polsce oprócz tunelu średnicowego jest nawierzchnia na Dworcu Centralnym w Warszawie. Wykonana została jako ustrój wielowarstwowy o łącznej grubości 1000 mm.



Rys.1. Nawierzchnia bezpodсыpkowa na linii dużych prędkości Ingolstadt –Norymberga w Niemczech [8]

Do najbardziej znanych nawierzchni można zaliczyć nawierzchnię typu Rheda układana w torach w węźle berlińskim oraz na liniach dużych prędkości.

Innym rozwiązaniem nawierzchni bezpodсыpkowych jest nawierzchnia z systemem podpór blokowych w otulinie Corkelast firmy Edilon, konstrukcja zapewnia sprężyste przenoszenie obciążeń od pojazdów szynowych i tłumienie drgań wywołanych ich przejazdem. Specjalna dwuskładnikowa żywiczna masa podlewową Edilon Corkelast, stanowiąca główny element systemów nawierzchni torowych firmy Edilon (ERS, EBS)

zapewniająca trwałe, sprężyste posadowienie i mocowanie poszczególnych bloków do podbudowy betonowej. Więcej informacji nt nawierzchni bezpodsypkowych przedstawiono w pracach [5], [6].

3. WZMOCNIONA NAWIERZCHNIA Z KOMPOZYTEM TŁUCZNIOWYM BGT

Nawierzchnia z kompozytem tłuczniowym BGT jest rozwiązaniem wzmocnienia klasycznej nawierzchni kolejowej opracowanym przez naukowców z Zakładu Infrastruktury Transportu. Politechniki Warszawskiej (T. Basiewicz, K. Towpik, A. Gołaszewski) [2].

Proponowany kompozyt tłuczniowy stanowią warstwy tłucznia uzbrojone geosiatkami i dodatkowo stabilizowane chemicznie żywicą poliuretanową.

Nawierzchnia kolejowa z kompozytem tłuczniowym typu BGT charakteryzuje się tym, że wprowadza się tutaj mechaniczne i chemiczne wzmocnienie warstwy podsypki. Mechaniczne uodpornienie polega na uzbrojeniu podsypki, dwoma geosiatkami.

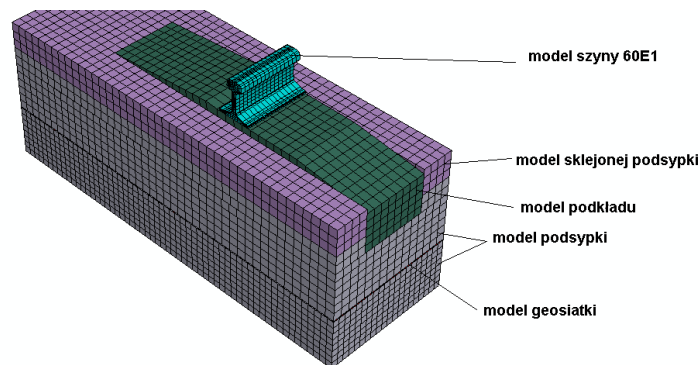
Pierwsza geosiatka ułożona jest na styku podsypki z górną warstwą podtorza. Po ułożeniu i zgęszczeniu powierzchniowym pierwszej warstwy tłucznia, układana jest druga geosiatka. Po uzupełnieniu drugą warstwą tłucznia w celu uzyskania właściwej grubości warstwy podsypki pod podkładem, określonej standardem oraz zagęszczaniu i uzupełnianiu do standardowego kształtu pryzmy tłuczniowe. W końcowym stadium wraz z powierzchniową stabilizacją dynamiczną dokonuje się drogą iniekcji stabilizacji chemicznej specjalnymi żywicami poliuretanowymi [2].

4. OBLICZENIA SYMULACYJNE WZMOCNIONEJ NAWIERZCHNI KOLEJOWEJ

4.1. Geometria modelu – siatka elementów skończonych

Geometria modelu numerycznego została zdefiniowana w postaci siatki węzłów określających położenie i wielkość elementów skończonych. Wybrano elementy trójwymiarowe, bryłowe. Ze względu na skomplikowany kształt modelowanych obiektów oprócz elementów prostopadłościennych zawierających sześć ścian wprowadzone zostały dodatkowo elementy trójwymiarowe, bryłowe o podstawie trójkątnej (zawierające pięć ścian).

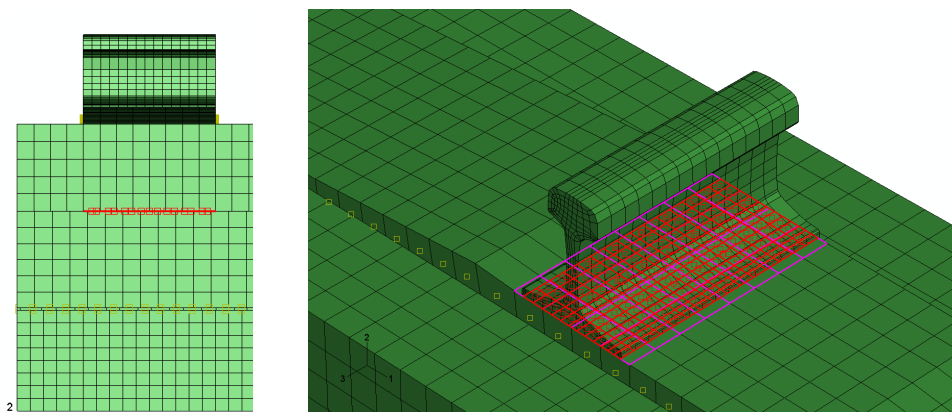
Na rys. 2 przedstawiony zostały model MES nawierzchni wzmocnionej geosiatką i żywicą poliuretanową.



Rys.2. Model MES nawierzchni wzmocnionej geosiatką i podsypką skleionej żywicą

Aby właściwie wykonać obliczenia symulacyjne określono miejsca kontaktu pomiędzy poszczególnymi elementami wzmocnionej nawierzchni kolejowej.

Zbudowanie siatki całego modelu z tym samym stopniem szczegółu nie jest możliwe do wykonania, dlatego też siatka w poszczególnych elementach nawierzchni ma różną wielkość. Stosując takie rozwiązanie 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 właściwie rozprowadzenie nacisków na obie siatki żeby utrzymać homogeniczność modelu 3D (rys.3).



Rys.3 Interfejsy pomiędzy podkładem i podsypką, a stopką szyny i podkładem (więzy jednostronne)

4.2. Model materiału

Dla potrzeb obliczeń numerycznych określone zostały przybliżone krzywe zależności naprężenia σ od odkształcenia ε dla szyny. Do obliczeń przyjęto moduł Younga $E=210\ 000$ MPa oraz współczynnik Poissona $\nu=0,3$. Moduł Younga dla podkładów

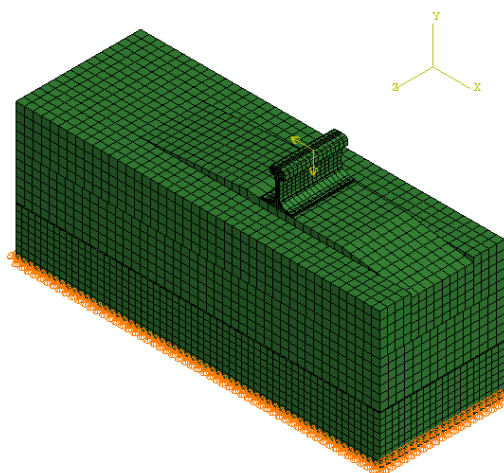
strunobetonowych przyjęto 54 GPa. Materiał na podsypkę przyjęto o grubości 350 mm, moduł Younga 130 MPa i współczynnik Poissona 0,2.

4.3. Obciążenie i warunki podparcia modelu nawierzchni

Sposób podparcia w trakcie eksperymentu, został w modelu numerycznym zastąpiony przez wyidealizowane warunki brzegowe. Ponieważ materiały są nieliniowe proces obliczeniowy został podzielony na dwa kroki: obciążenie i odciążenie.

W każdym z kroków procesu obciążenie jest przykładane stopniowo (przyrostowo) i na każdym kroku następuje rozwiązanie układu równań w celu wyznaczenia przyrostu naprężeń, odkształceń i przemieszczeń. Po tym następuje dalszy przyrost obciążenia, aż do wykonania całego programu obciążenia.

Warunki podparcia (rys. 4) są w modelu określone przez odebranie odpowiednich stopni swobody uniemożliwiających modelowi przemieszczanie w kierunku poziomym i poprzecznym.

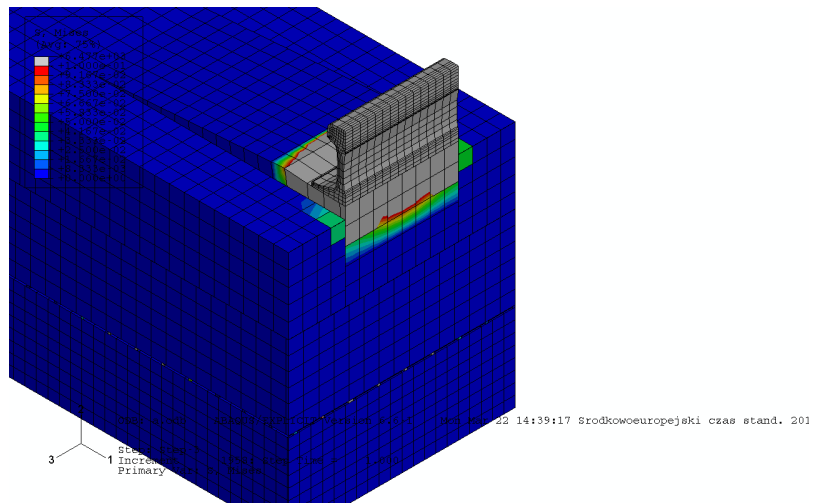


Rys.4. Warunki podparcia oraz obciążenia modelu nawierzchni wzmocnionej

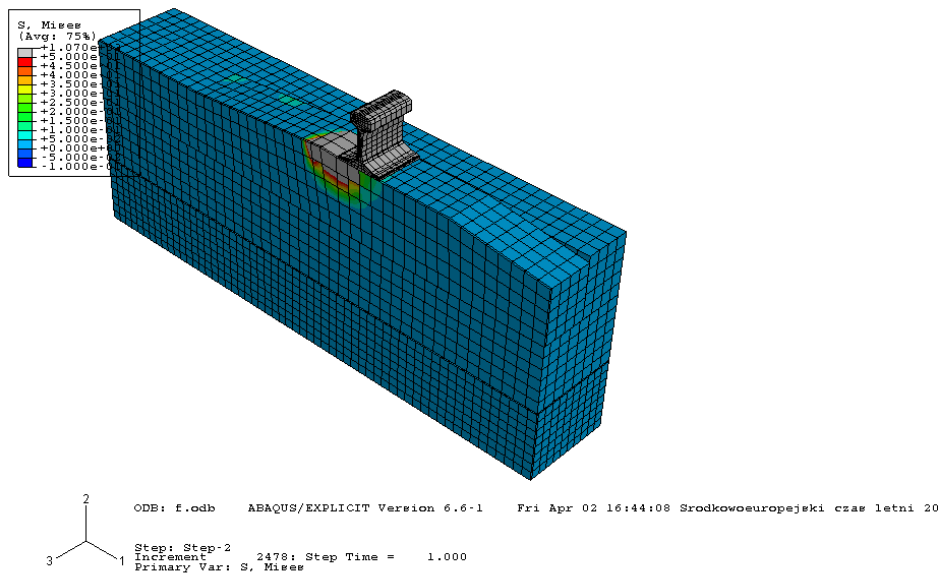
Wymienione warunki brzegowe, symulujące podparcie, pozostają niezmiennic w całym procesie obliczeniowym

4.4. Wyniki obliczeń symulacyjnych

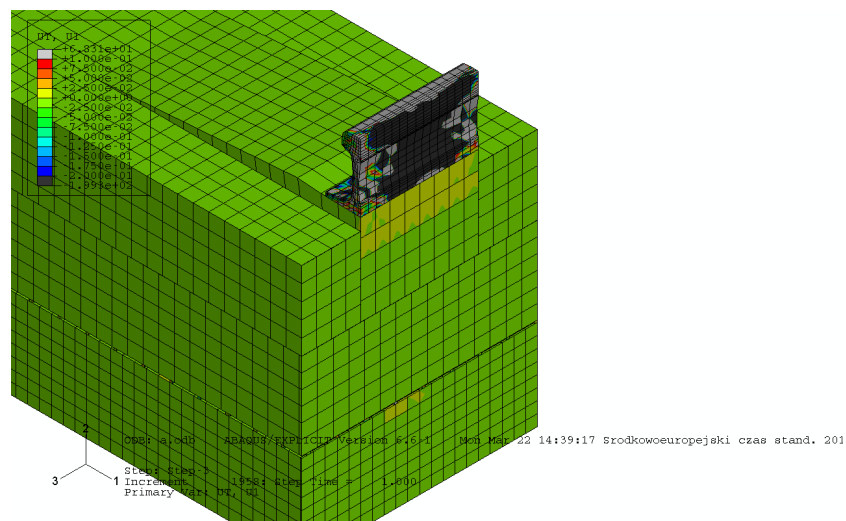
Wyniki obliczeń numerycznych otrzymane przy wykorzystaniu modeli 3D nawierzchni wzmocnionej w różnej konfiguracji przedstawione są na wykresach obrazujących kontury naprężenia zastępczego Hubera – Misessa jak też odkształcenia. Wyniki obliczeń numerycznych przedstawione są na rys. 5÷7.



Rys.5. Rozkład naprężenia zastępczego σ^{HM} na końcu obciążania uzyskane dla modelu nawierzchni wzmocnionej geosiatką



Rys.6. Rozkład naprężenia zastępczego σ^{HM} na końcu obciążania uzyskane dla modelu nawierzchni wzmocnionej geosiatką i sklejoną żywicą poliuretanową



Rys.7. Rozkład odkształceń na końcu obciążania uzyskane dla połowy modelu nawierzchni wzmocnionej geosiatką i sklejoną żywicą poliuretanową.

W tablicy nr 1 zestawiono porównanie wyników symulacji dla różnych obciążeń statycznych nawierzchni wzmocnionej geosiatką i skleionej żywicą. Miejscem pomiaru jest przekrój przyłożenia siły.

Tablica 1

Przykładowe wyniki symulacji dla dwóch obciążeń statycznych nawierzchni wzmocnionej geosiatką i skleionej żywicą

Miejsce odczytu pomiaru	Obciążenie 0.42 Tg				Obciążenie 0.64 Tg			
	Nawierzchnia wzmocniona geosiatką		Nawierzchnia wzmocniona sklejoną żywicą i wzmocniona geosiatką		Nawierzchnia wzmocniona geosiatką		Nawierzchnia wzmocniona sklejoną żywicą i wzmocniona geosiatką	
	σ [MPa]	ϵ	σ [MPa]	ϵ	σ [MPa]	ϵ	σ [MPa]	ϵ
Spód stopki szyny.	> 357	0-12	> 267	-0.9-14	> 356	-0.001÷9	> 313	-0.01÷10
Obszar sklejenia - środek	-	-	< 0.006	< 0.0025	-	-	< 0.024	< 0.003
Styk podkładu ze stopką szyny	1.4÷147	-0.01÷0.7	8÷66	< 0.003	15÷75	<0.01	14÷59	<0.005
Styk podkładu z podsypką	0.02÷0.5	<0.017	<0.02	<0.0175	<0.02	<0.08	<0.04	<0.003
Styk podsypki z geosiatką	< 0.001	<0.017	<0.006	<0.0025	<0.01	<0.08	<0.04	<0.003

5. PODSUMOWANIE

Obliczenia symulacyjne wzmocnionej nawierzchni BGT obejmowały wzmocnienie żywicą poliuretanową i geosiatką. Zadane obciążenia miały charakter statyczny, będą również prowadzone w późniejszym terminie obliczenia symulacyjne dla obciążeń dynamicznych.

Prowadzone dodatkowo badania na odcinku doświadczalnym powinny dać istotne informacje na temat odkształceń i ugięć proponowanej nawierzchni z kompozytem tłuczniowym BGT. Otrzymane wyniki pomiarów będzie można skonfrontować z obliczeniami numerycznymi celem weryfikacji i modyfikacji modelu numerycznego, a także modyfikacji warunków brzegowych.

Obliczenia numeryczne dostarczyły szereg interesujących informacji m.in. otrzymane zostały dane o wielkości i rozkładzie naprężeń, stanie odkształcenia. Na podstawie tych wyników można określić miejsca występowania ekstremalnych wartości naprężeń na obwodzie i wewnątrz analizowanego obiektu.

Kolejne obliczenia dla coraz większych obciążeń statycznych pozwolą na określenie własności i zachowanie się konstrukcji po różnych obciążeniach, a także jej przydatność w warunkach polskich kolei.

Bibliografia

1. ABAQUS – Standard User's Manual, Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc., Version 6.6
2. Basiewicz T., Gołaszewski A., Towpik K., Kukulski J. Opracowanie szczegółowej koncepcji konstrukcji nawierzchni kolejowej ze wzmocnioną podsypką. Warszawa – Kraków 2008r.
3. Esveld C. Modern Railway Track. Delft, 2001. 653 s. ISBN 90-800324-3-3.
4. Master Plan dla transportu kolejowego w Polsce do 2030 roku. Ministerstwo Infrastruktury. Warszawa, sierpień 2008.
5. Towpik K. Infrastruktura drogi kolejowej – Obciążenia i trwałość nawierzchni. Radom 2006.
6. Towpik K Kolejowe nawierzchnie bezpodsypkowe. Problemy Kolejnictwa z. 129. Warszawa 1999.
7. Gisterek I., Krużyński M. Stabilizacja chemiczna podsypki na liniach kolejowych. Przegląd Komunikacyjny nr 9-10/2009.
8. www.wikipedia.pl

*Praca naukowa współfinansowana ze środków na naukę w latach 2009-2011
jako projekt badawczy Nr N N509 403136”*

A FINITE ELEMENT ANALYSIS A SELECT STATIC LOADING FOR STRENGTHENING TRACK STRUCTURE

Abstract: The paper presents a simulation of the process static loading strengthening track structure geogrid and glued with special resin, the final effect is stresses and strains. The numerical calculation keep to specify mechanical properties proposed strengthening railway track structure for static loading.

Keywords: track structure, finite-element method, stress