

## **BADANIA SYMULACYJNE W OCENIE JAKOŚCI I TRWAŁOŚCI NAWIERZCHNI KOLEJOWEJ I JEJ STALOWYCH ELEMENTÓW<sup>1</sup>**

Jacek KUKULSKI

Politechnika Warszawska, Wydział Transportu

W pracy przedstawiono narzędzia symulacyjne, które mogą być wykorzystywane w ocenie jakości i trwałości wybranych elementów nawierzchni kolejowej. W artykule zaprezentowano wybrane wyniki badań symulacyjnych naprężeń własnych w procesie produkcji elementów stalowych rozjazdów kolejowych, jak też uproszczonego modelu nawierzchni kolejowej. Badania obejmowały różne warianty konstrukcji jak i jej obciążenia eksploatacyjne. Prezentowane wyniki badań symulacyjnych stanowiły m.in. uzupełnienie badań doświadczalnych.

Słowa kluczowe: infrastruktura kolejowa, badania symulacyjne, MES.

### **1. WSTĘP**

Prace naukowe i badawcze dotyczące infrastruktury kolejowej były i są prowadzone przez liczne ośrodki naukowo-badawcze w kraju i za granicą. W tym okresie powstała znaczna ilość pozycji książkowych i publikacji zarówno krajowych i zagranicznych, których przedmiotem była diagnostyka, utrzymanie, oceny zużycia i uszkodzeń i odkształceń nawierzchni oraz jej elementów. Infrastruktura kolejowa i jej elementy w trakcie eksploatacji poddawana jest złożonym oddziaływaniom dynamicznym, których charakter zmienia się wraz ze wzrostem obciążenia i prędkości. W celu przenoszenia coraz większych obciążeń i nacisków pojazdów dochodzących do 25 – 30 t/oś konstrukcja nawierzchni kolejowej musi spełniać bardzo rygorystyczne wymagania wytrzymałościowe i eksploatacyjne (rys. 1). Dlatego też prowadzone są prace optymalizujące konstrukcję infrastruktury kolejowej, m.in. poprzez stosowanie rozwiązań wzmacniających podsypkę tłuczniową, konstrukcję ramy toru, czy też wzmacnianie podtorza. Istotną rolę odgrywa również proces diagnostyki elementów konstrukcji toru na etapie wytwarzania w procesie produkcyjnym, czy też pomiary diagnostyczne wykonywane w trakcie eksploatacji [4, 7, 9]. Badania diagnostyczne wykonywane na etapie produkcji czy w później-

---

<sup>1</sup> DOI 10.21008/j.1897-4007.2017.25.18

szej eksploatacji podejmowane są w celu zwiększenie bezpieczeństwa ruchu pociągów, a także ograniczenia kosztów utrzymania nawierzchni kolejowej.



Rys. 1. Specjalistyczny wagon do przewozu ciekłego żużla [Fot. P. Winciorek]

Jedną z metod wykorzystywanych przy ocenie rozwiązań konstrukcyjnych jak i optymalizacji procesu technologicznego np. rozjazdów kolejowych jest Metoda Elementów Skończonych (MES). W chwili obecnej MES jest jedną z tych najszerzej stosowanych w rozwiązywaniu różnorodnych problemów inżynierskich. Jej uniwersalność polega na stosunkowej łatwości tworzenia opisu różnych obszarów i kształtów o skomplikowanej geometrii. Metody numeryczne wykorzystywane były i są w badaniach elementów nawierzchni kolejowej już od kilkudziesięciu lat. Intensywne prace prowadzone były w różnych ośrodkach naukowo badawczych w kraju i za granicą [3, 5, 9].

Celem badań było wyznaczenie wartości i rozkładu naprężeń własnych powstających w procesie produkcyjnym, a także powstawanie odkształceń w badanych elementach nawierzchni kolejowej przy zadawanym obciążeniu. Zakres badań obejmował budowę obiektów trójwymiarowych, a następnie zdefiniowanie warunków brzegowych, zdefiniowanie modeli materiałowych, wykonanie obliczeń i analizę uzyskanych wyników.

## 2. OBIEKTY BADAŃ

Obiektem badań była nawierzchnia kolejowa i jej składowe elementy obejmujące szyny, kształtowniki iglicowe, przytwierdzenie, podkłady i podsypkę.

W pracy pominięto wpływ podtorza i jego właściwości ze względu na przyjęte uproszczenia. Szczegółowo zjawiska i parametry podtorza przedstawiono m.in. w pracach [6, 8]. W pracy przedstawiono badania symulacyjne powstawania naprężeń i odkształceń wykonane na autorskich modelach symulacyjnych wykonanych w programie ABAQUS [1]. Obiektami badań były kształtowniki szynowe, iglicowe, a także modele nawierzchni kolejowej. Badania te realizowane były przez autora niniejszej pracy w ostatnich latach swojej działalności naukowo-badawczej.

### 3. BADANIA SYMULACYJNE

Badania symulacyjne przeprowadzono na autorskich modelach symulacyjnych poszczególnych elementów toru kolejowego, elementów rozjazdów kolejowych z wykorzystaniem oprogramowania ABAQUS 6.11.2 licencja Politechniki Warszawskiej [1].

Opracowano modele numeryczne odcinków szyn 60E1, i 49E1 oraz kształtowników iglicowych wcześniej badanych doświadczalnie. Budowa modelu bryłowego wykorzystywanego w dalszych symulacjach obejmowała zdefiniowanie modelu (modeli) w postaci siatki węzłów, a następnie wybór rodzaju i typu elementów. Istotnym elementem był tu wybór modelu materiałowego i definicja warunków brzegowych oraz obciążeń, mający istotny wpływ na wyniki obliczeń.

Geometria modelu numerycznego zdefiniowana została w postaci siatki węzłów określających położenie i wielkość elementów skończonych. Wybierane były elementy trójwymiarowe, bryłowe. Modele numeryczne (MES) zbudowane przez autora obejmowały różne konfiguracje konstrukcji nawierzchni klasycznej, i elementów stalowych nawierzchni uwzględniającej różne warianty obciążeń.

Obliczenia miały na celu wyznaczenie wartości i rozkładu naprężeń własnych, odkształceń w badanych elementach nawierzchni kolejowej.

#### 3.1. Modele materiałowe

W trakcie badań stosowano dostępne w programie ABAQUS [1] modele materiałowe dla metali, betonu, podsypki i geosiatek uwzględniające właściwości sprężyste i plastyczne. W przypadku kształtowników szynowych i iglicowych wykorzystywano wyniki badań doświadczalnych jednoosiowych prób rozciągania próbek wykonanych ze stali zastosowanej do produkcji badanych elementów. W tabeli 1 przedstawiono zależności naprężenia  $\sigma$  od odkształcenia  $\varepsilon$  dla jednoosiowej próby rozciągania stali.

Tab. 1 Zależności  $\sigma - \varepsilon$ , dla osiowego rozciągania stali szynowej

Naprężenia $\sigma$ [MPa]	Odkształcenie plastyczne $\varepsilon$ [%]
0,0	0,0
629,7	0,4
900,0	2,6
1066,0	6,0
1069,0	16,0

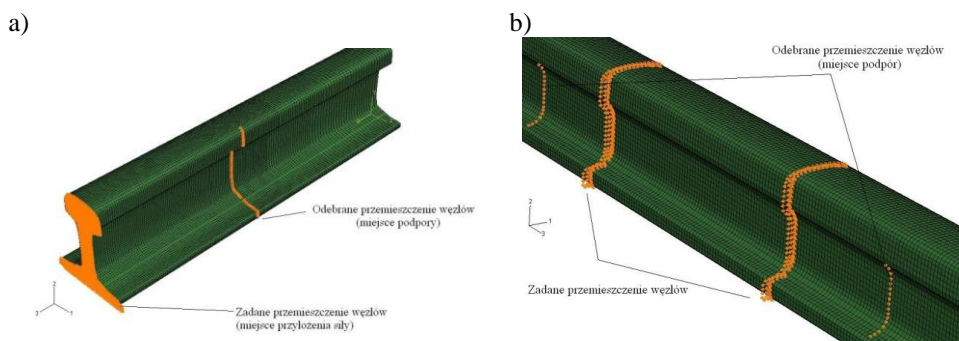
W badaniach symulacyjnych zbudowanych modeli nawierzchni kolejowej niezbędne było przyjęcie wartości parametrów sztywności i tłumienia elementów wchodzących w skład konstrukcji toru. Zostały one przyjęte zgodnie z tabelą 2 na podstawie badań doświadczalnych, norm i dostępnej literatury technicznej.

Tab. 2. Parametry sztywności i tłumienia toru kolejowego w badaniach symulacyjnych

Oznaczenie	Parametr	Wartość	Jednostka
$E_r$	Moduł sprężystości szyny 60E1	210 000	MPa
$k_{ps}$	Sztywność przekładki podszynowej	78	kN/m
$c_{ps}$	Tłumienie podkładki podszynowej	50	kNs/m
$\rho_b$	Gęstość podsypki	54	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_r$	Gęstość szyny 60E1	7 850	kg/m <sup>3</sup>
$E_b$	Moduł sprężystości podsypki	150	MPa
$\nu_r$	Wsp. Poissona szyny 60E1	0,30	-
$\nu_b$	Wsp. Poissona podsypki	0,35	-
$\nu_s$	Wsp. Poissona podkładu	0,30	-
$c_p$	Tłumienie podkładu	250	kNs/m
$k_p$	Tłumienie podsypki	110	MN/m
$\rho_s$	Gęstość podkładu	2 400	kg/m <sup>3</sup>
$E_s$	Moduł sprężystości podkładu	70 000	MPa
$E_g$	Moduł sprężystości geosiatki	2 200	MPa
$\nu_g$	Wsp. Poissona geosiatki	0,5	-
$\rho_g$	Gęstość geosiatki	0,00132	kg/m <sup>3</sup>

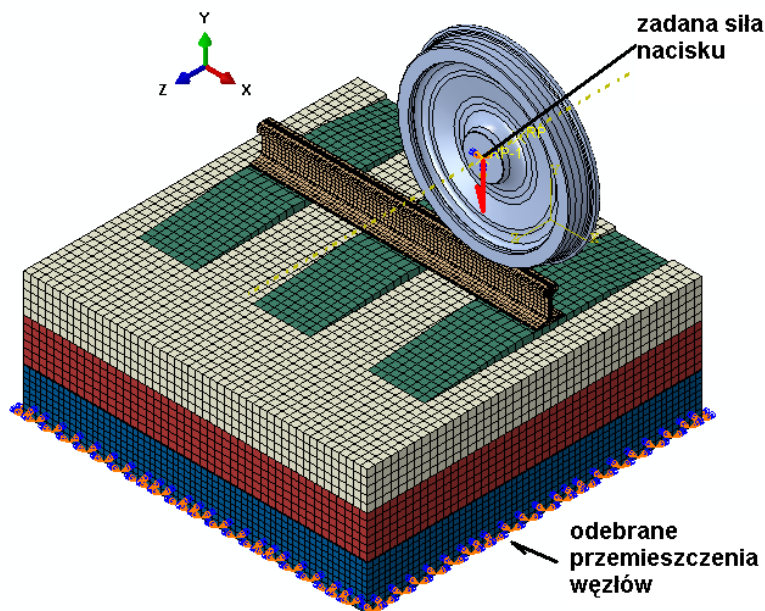
### 3.2. Warunki brzegowe i obciążenia

Warunki brzegowe określono przez odebranie odpowiednich stopni swobody w węzłach najlepiej odpowiadających doświadczeniu, występujących w przekrojach podparcia (rys. 2).



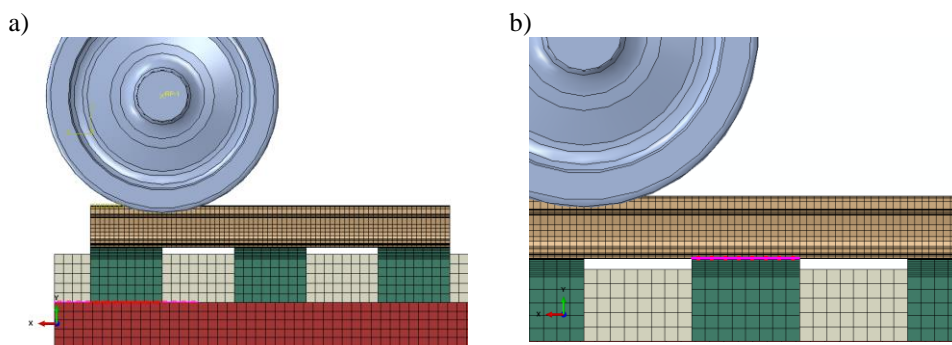
Rys. 2 Warunki brzegowe i obciążenie kształownika [3]: (a) szynowego 60E1 giętego w trzech punktach; (b) iglicowego I60 giętego w czterech punktach

W przypadku całej konstrukcji nawierzchni kolejowej zbudowany został model składający się z poszczególnych warstw (m.in.: z szyn, podkładów, podsypki tłuczniowej, przytwierdzeń, geosiatki). Na rysunku 3 przedstawiony został model MES nawierzchni kolejowej złożonej z wymienionych wyżej elementów. Zaznaczone zostały również warunki brzegowe podparcia i obciążenia.



Rys. 3. Model nawierzchni kolejowej z zaznaczonymi warunkami brzegowymi i obciążeniem

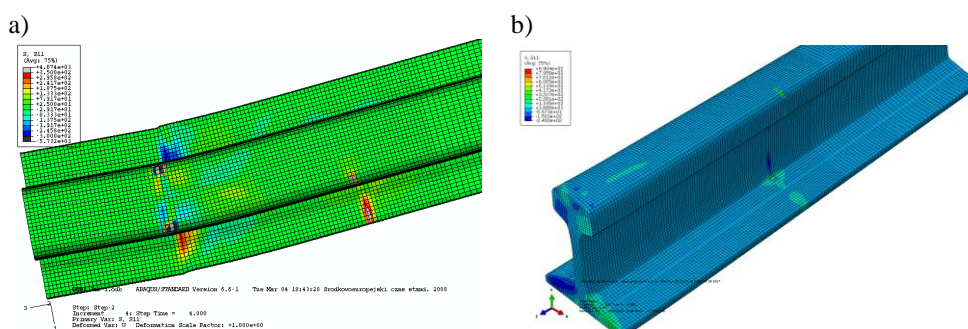
W celu właściwego przeprowadzenia obliczeń symulacyjnych określono miejsca kontaktu pomiędzy poszczególnymi elementami bryłowymi nawierzchni kolejowej. Zastosowano geometryczne interfejsy pomiędzy sąsiednimi elementami siatek (rys. 4). Umożliwia to właściwie rozłożenie nacisków na obie siatki, umożliwiające utrzymanie homogeniczności modelu 3D. Analizowano różne przypadki kontaktu siatek elementów konstrukcji. (kontakt kinematyczny, tarcie).



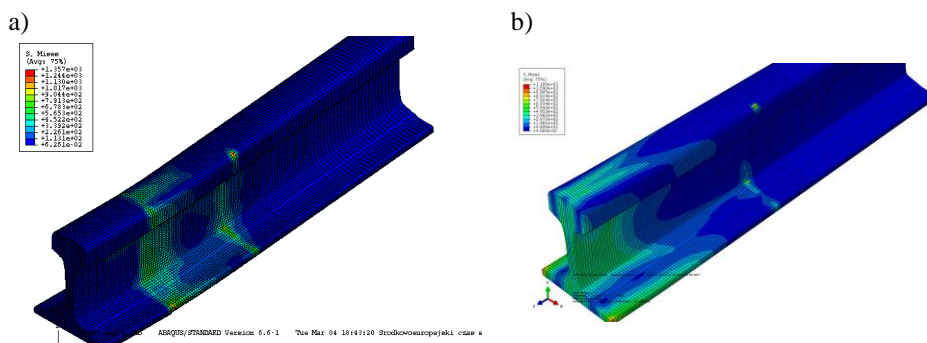
Rys. 4. Interfejsy pomiędzy podkładem i podsypką (a) oraz stopką szyny i podkładem (b) (więzy jednostronne)

#### 4. WYNIKI OBLICZEŃ SYMULACYJNYCH

Wybrane wyniki obliczeń, otrzymane przy wykorzystaniu modeli 3D elementów stalowych nawierzchni kolejowej w różnej konfiguracji, przedstawione są na wykresach obrazujących kontury naprężenia zastępczego Hubera-Misesa, naprężeń własnych jak również odkształcenia. Przykładowe wyniki obliczeń przedstawiono na rysunkach 5 – 10.



Rys. 5. Rozkład naprężenia  $\sigma_{11}$  (naprężenia własne): (a) po gięciu trójpunktowym kształtownika szynowego 60E1; (b) po gięciu czteropunktowym kształtownika szynowego 60E1

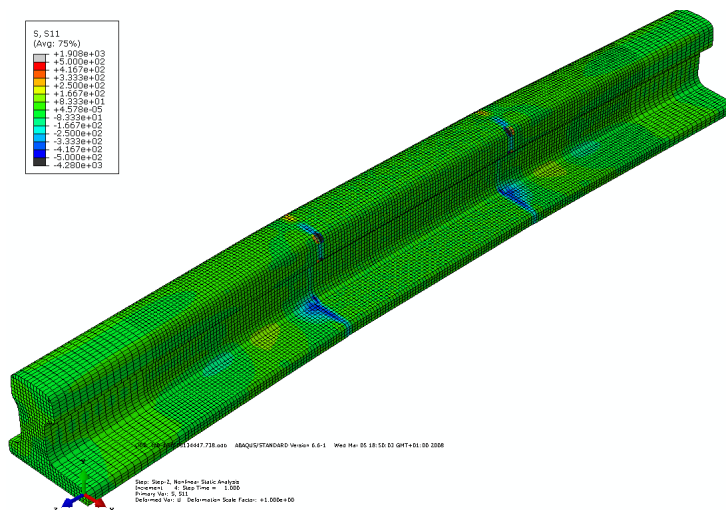


Rys. 6. Rozkład naprężenia zastępczego  $\sigma^{HM}$  na końcu procesu gięcia: (a) po gięciu trójpunktowym kształtownika szynowego 60E1; (b) po gięciu czteropunktowym kształtownika szynowego 60E1

Rozkład i wielkość naprężeń własnych jest korzystniejszy i bardziej równomierny w przypadku gięcia czteropunktowego. W przypadku gięcia czteropunktowego w środkowej części próbek, między punktami przyłożenia obciążenia występuje czyste zginanie, charakteryzujące się jednakowym rozkładem naprężeń wzdłuż osi próbki.

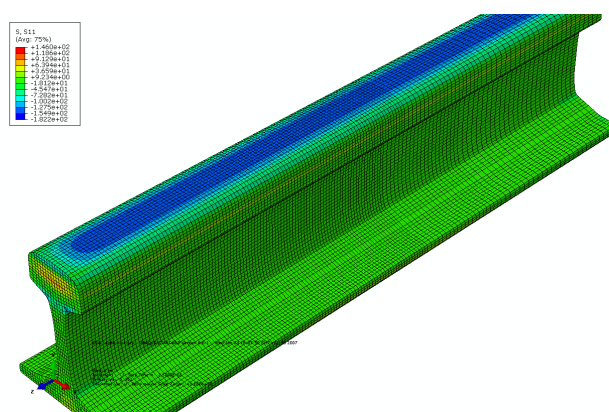
Naprężenia po gięciu czteropunktowym, porównane z gięciem trójpunktowym w tych samych przekrojach i miejscach pomiarowych są w niektórych przypadkach

niższe nawet o 150 MPa w stosunku do gięcia trójpunktowego. Proces gięcia powoduje wzrost naprężeń własnych zarówno ściskających jak i rozciągających. Największe naprężenia pojawiają się w głowce i stopce kształownika, bowiem po ustąpieniu sił gnących pozostaje w głowce największej energii sprężystej.

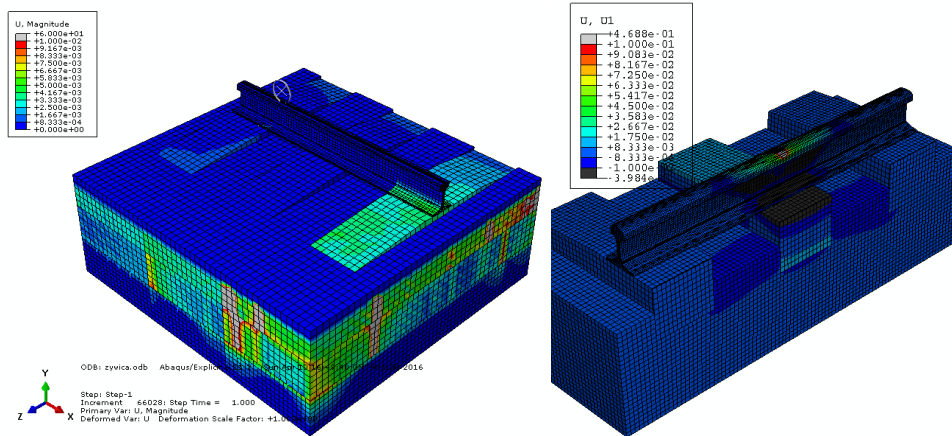


Rys. 7. Rozkład naprężenia  $\sigma_{11}$  (naprężenia własne po gięciu czteropunktowym kształownika iglicowego I60).

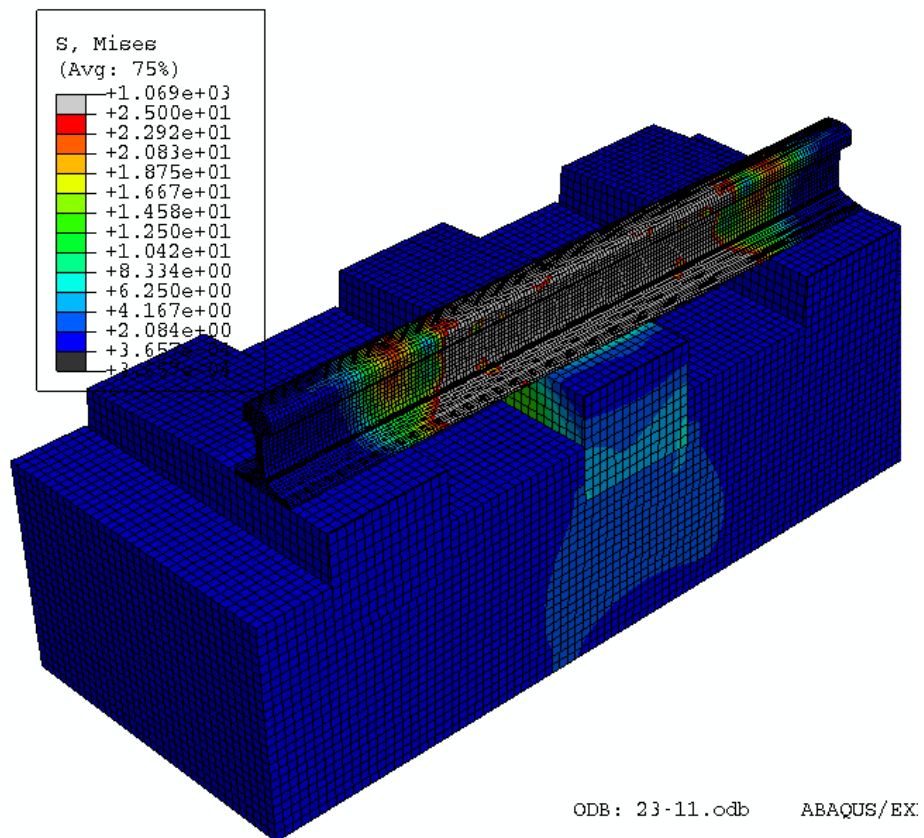
Z kolei wyniki badań symulujących hartowanie powierzchniowe przedstawione na rysunku 8 pokazują, że hartowanie wprowadza do ustroju elementu naprężenia ściskające sięgające nawet – 200 MPa.



Rys. 8. Rozkład naprężenia  $\sigma_{11}$  (naprężenia własne po hartowaniu powierzchniowym kształownika szynowego 60E1).



Rys. 9. Rozkład odkształceń na końcu procesu obciążenia modelu nawierzchni.

Rys. 10. Rozkład naprężenia zastępczego  $\sigma^{HM}$  na końcu procesu obciążenia modelu nawierzchni



Naprężenia ściskające z punktu widzenia eksploatacji są bardzo korzystne, ponieważ zapobiegają powstawaniu mikropęknięciom na powierzchni tocznej elementu. Może to powodować przedłużenie żywotności elementów rozjazdu, ograniczając zużycie i eliminując spływy materiałowe. Należy zaznaczyć, że w obliczeniach nie uwzględniono naprężeń własnych występujących na ogół w szynach w stanie początkowym (przed gięciem). Naprężenia te pojawiają się w wyniku procesów technologicznych, zwłaszcza prostowania szyny w prostownicy rolkowej.

Badnia symulacyjne mogą być prowadzone dla całej konstrukcji nawierzchni kolejowej. Pozwalają na sprawdzenie założeń konstrukcyjnych proponowanego rozwiązania i ewentualną ich weryfikację. Takie badania były prowadzone dla konstrukcji nawierzchni kolejowej z kompozytem tłuczniowym [2]. Sprawdzane były różne warianty i przypadki obciążeń statycznych i dynamicznych. Na rysunkach 9 i 10 przedstawiono wybrane wyniki symulacji odkształceń i naprężeń konstrukcji nawierzchni kolejowej po zadanych obciążeniach.

## 5. PODSUMOWANIE

Zastosowanie technik symulacyjnych pozwala na łatwą zmianę założeń i warunków brzegowych umożliwiających zachowanie się konstrukcji po zadanim obciążeniem eksploatacyjnym, czy na etapie procesu technologicznego. Analizy numeryczne dostarczają cennych informacji, które stanowią uzupełnienie badań doświadczalnych. Na podstawie tych analiz można określić miejsca występowania ekstremalnych wartości naprężeń na obwodzie i wewnątrz analizowanych obiektów. Należy jednak pamiętać, że założenia teoretyczne, modele symulacyjne powinny być weryfikowane doświadczalnie. W przypadku badań naprężeń własnych było to realizowane przez autora poprzez pomiary ultradźwiękowe metodą DeBro opisane m.in. w pracy [5]. Z = kolei badania nawierzchni kolejowej były na zbudowanym odcinku CMK. Jednakże zakres badań był mocno ograniczony i dotyczył jedynie oceny wskaźnika syntetycznego stanu toru jak i nierówności poziomych i pionowych toru [2].

Rozważane w tym artykule zagadnienia dotyczące naprężeń własnych były i są przedmiotem zainteresowania zarówno producentów jak i specjalistów odpowiedzialnych za stan nawierzchni kolejowej. Mogą one wpływać niekorzystnie na stan energetyczny materiału, przemiany fazowe, a nawet korozyjne. Mogą obniżać wytrzymałość zmęczeniową elementu jak również być jedną z przyczyn pojawiania się uszkodzeń i pęknięć szyn kolejowych. Są też jedną z przyczyn przyspieszających rozwój typowych defektów główek szyny. Analizowane w pracy zagadnienia i przeprowadzone symulacje pozwalają sformułować nowe i ciekawe spostrzeżenia, co świadczy o wciąż aktualnej problematyce związanej z naprężeniami własnymi.

**LITERATURA**

- [1] ABAQUS/Standard User's Manual, Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc., Version 6.11.
- [2] Basiewicz T., Gołaszewski A., Kukulski J., Towpik K., Tests on a track structure with crashed stone composite on an experimental section of the CMK (Central Trunk Line). Journal of Civil Engineering and Architecture Research, Ethan Publishing Company, vol. 3, nr 1, 2016, ss. 1220-1227.
- [3] C. Betego'n Biempica a, J.J. del Coz Di'az a\*, P.J. Garcı'a Nieto b, I. Pen'uelas Sa'nchez a. Nonlinear analysis of residual stresses in a rail manufacturing process by FEM. Applied Mathematical Modelling 2007.
- [4] Guericke W., Heller W., Kasprovicz J., Weisse M.: Verbesserte Bruchsicherheit von Schienen durch optymiertes Rollenrichten. Eisenbahntechnische Rundschau nr 9, 2001.
- [5] Kukulski J. Experimental and simulation study of the superstructure and its components, w: Railway research Selected topics on development, safety and technology / Zboiński Krzysztof (red.), 2015, InTech, ISBN 978-953-51-2235-7, ss. 115-143.
- [6] Kwiatkowska E., Lewandowski J. Model numeryczny nawierzchni kolejowej i podtorza – badania wstępne. Przegląd Komunikacyjny 9/2014, s. 16-18.
- [7] Radomski R. „Residual stress measurements at rail surface and inside rail head. Residual Stress in Rails. Kluwer Academic Publishers. Vol 13 1991r.
- [8] Siewczyński Ł., Pawłowski M. Naprężenia w podtorzu od układu powierzchni obciążających. Technika Transportu Szynowego nr 4/2013, s. 55-59.
- [9] Towpik K., Kwaśniewski L., Kowalczyk P.: Experimental and numerical analysis of residual stress in switch blades. Archives of Civil Engineering, vol. 50, nr 2, (2004), p.219-228.

**SIMULATION STUDY IN ASSESSMENT THE QUALITY AND  
DURABILITY OF THE SUPERSTRUCTURE AND ITS STEEL  
COMPONENTS**

**Summary**

The paper presents simulation instruments that can be used to evaluate the quality and durability of selected the superstructure and its components. The article presents selected results of simulation residual stress simulation tests in the steel production process of railway turnouts as well as a simplified model of railway superstructure. The various construction variants and their operating loads have been analysed. Presented results of the simulation studies were among others completion of experimental research.

Keywords: railway infrastructure, simulation study, FEM.

Dane autora:

Dr inż. Jacek Kukulski

Politechnika Warszawska, Wydział Transportu

Zakład Infrastruktury Transportu

e-mail: jkukul@wt.pw.edu.pl

telefon: +48 22 234 7020