

Dr inż. Grzegorz Sławiński,
Dr inż. Wiesław Krasoń,
Prof. dr hab. inż. Tadeusz Niezgoda,
Dr inż. Wiesław Barnat
Wojskowa Akademia Techniczna im. Jarosława Dąbrowskiego, Warszawa

BADANIA NUMERYCZNE MECHANIZMU OBROTU NADWOZIA WAGONU PLATFORMY KOLEJOWEJ DO PRZEWOZU SAMOCHODÓW CIĘŻAROWYCH

SPIS TREŚCI

1. Wprowadzenie
2. Modele geometryczne nadwozia obrotowej platformy kolejowej
3. Modele dyskretne nadwozia platformy kolejowej i analiza numeryczna wybranych rozwiązań konstrukcyjnych
4. Analiza wyników otrzymanych na drodze symulacji numerycznych
5. Podsumowanie

STRESZCZENIE

Transport kombinowany, który coraz częściej zajmuje priorytetowe miejsce w krajach członkowskich Unii Europejskiej, stwarza możliwość zbudowania zrównoważonego systemu komunikacyjnego. W Europie stanowi on 10–15%, w Polsce zaledwie zaś 1,5% ogólnych przewozów kolejowych. Prognoza przewiduje, że w 2013 roku udział transportu kombinowanego w przewozach kolejowych w Polsce wzrośnie do 6%. W artykule przedstawiono analizy numeryczne płaskiej i nisko umieszczonej platformy obrotowej wagonu kolejowego służącego do transportu różnego typu pojazdów, takich jak ciągniki, ciężarówki, przyczepy, naczepy i kontenery. Wagon taki umożliwia szybki i wygodny załadunek i rozładunek pojazdów (bez urządzeń dźwigowych), samozaładunek i rozładunek bez terminali i specjalnego zabezpieczenia logistycznego, wymagany jest tylko utwardzony peron bez dodatkowej infrastruktury; każdy wagon może być załadowany – rozładowany oddzielnie.

1. WPROWADZENIE

W ostatnich latach daje się zauważyć tendencję wzrostową, dotyczącą tranzytowego transportu towarowego, realizowanego z reguły za pomocą drogowych środków komunikacji [4]. Jednak nie należą one do najbardziej ekonomicznych i ekologicznych, gdyż przewiezienie tego samego ładunku koleją pochłonie około 10 razy mniej energii niż przewóz „tirem”. Dodatkowo zanieczyszczenia transportowe stanowią 30%, a w miastach nawet 70% wszystkich zanieczyszczeń. Z tego powodu rozwój nowych form transportu, a w szczególności transportu kombinowanego [1] stwarza szansę zbudowania zrównoważonego systemu komunikacyjnego, który coraz częściej zajmuje priorytetowe miejsce w krajach członkowskich Unii Europejskiej. Obecnie w Europie transport kombinowany stanowi 10–15% ogólnych przewozów kolejowych, w Polsce zaś nadal zaledwie 1,5%. Głównymi powodami tego stanu są niska jakość naszych usług kolejowych oraz brak środków finansowych na nowe inwestycje. Prognoza przewiduje, że w 2013 roku udział transportu kombinowanego w przewozach kolejowych w Polsce wzrośnie do 6% [6]. Do zalet transportu kombinowanego można zaliczyć m.in. realizowanie przewozów w systemie *just in time* oraz *door-to-door*, większą punktualność przewozów, mniejszą wrażliwość na warunki drogowe i atmosferyczne, obniżenie kosztów eksploatacji pojazdów ciężarowych i osobowych, w tym kosztów prowadzenia działalności (zezwolenia, licencje) oraz ochronę środowiska (emisja szkodliwych składników spalin) [1].

W artykule przedstawiono analizę numeryczną mechanizmu obrotu nadwozia wagonu platformy kolejowej, służącej do przewozu naczep samochodów ciężarowych. Przeanalizowano trzy warianty umiejscowienia siłowników hydraulicznych na zewnętrznej powierzchni burt nadwozia. Dzięki wstępnym analizom numerycznym, było możliwe zlokalizowanie miejsc w konstrukcji, gdzie występują koncentracje naprężeń oraz obszarów, które ulegają największym deformacjom. Informacje te umożliwią w następnych badaniach modyfikację konstrukcji w celu jej wzmocnienia w miejscach najbardziej wyłożonych.

2. MODELE GEOMETRYCZNE NADWOZIA OBROTOWEJ PLATFORMY KOLEJOWEJ

Do obrotu platformy będzie zastosowany bardzo popularny i ogólnodostępny standardowy siłownik dwustronnego działania. Geometria i kształt analizowanych wariantów będą spełniały następujące wymagania konstrukcyjne i użytkowe, tj.:

- wymogi skrajni kolejowej oraz minimalną wysokość podwozia od główki szyny, obowiązujące na terenie Polski,
- brak dodatkowych maszyn i urządzeń do załadunku / rozładunku pociągu poza urządzeniami własnymi (tzw. infrastruktura peronu załadunkowo / rozładunkowego),
- przewóz standardowych naczep samochodów,

- załadunek i rozładunek naczep musi przebiegać szybko i sprawnie.

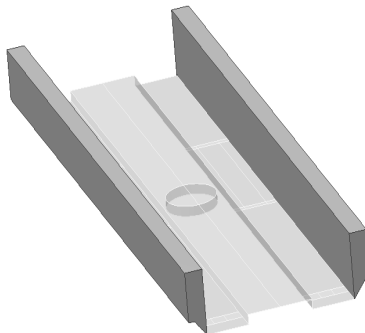
W celu usprawnienia pracy, wykorzystywano kilka aplikacji inżynierskich do wspomagania projektowania. Ich kompatybilność, dzięki opcjom import / export pozwoliła na sprawne i precyzyjne wykonanie modeli platformy. Zakres wykorzystania poszczególnych aplikacji przedstawiono w tabelicy 1.

W początkowym etapie analiz przyjęto uproszczony model geometryczny, aby poglądowo zobrazować zjawiska występujące w modelu. Geometria była modyfikowana w celu zminimalizowania koncentracji naprężeń w newralgicznych miejscach konstrukcji. Przy projektowaniu należało zwrócić uwagę na masę konstrukcji i dążyć do jej zminimalizowania. Założono, że platforma obrotowa jest cienkościenną konstrukcją spawaną z blach. Do analiz numerycznych [2, 7] przyjęto uproszczony model powłokowy, który przedstawiono na rysunku 1.

Tablica 1

Aplikacje użyte w projekcie platformy obrotowej

Lp.	ETAP PRACY	APLIKACJA
1	Model geometryczny	Auto CAD, Inventor
2	Model dyskretny	HYPER MESH, MSC PATRAN
3	Obliczenia numeryczne	MSC NASTRAN
4	Analiza wyników z obliczeń numerycznych	MSC PATRAN

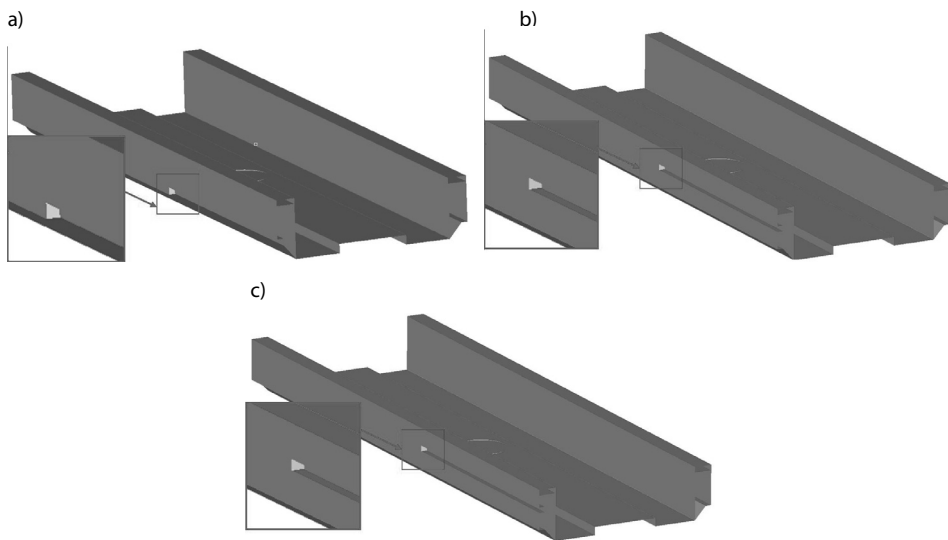


Rys. 1. Pierwotna geometria modelu powłokowego platformy obrotowej

Na podstawie badań literaturowych oraz patentowych, dotyczących stosowanych rozwiązań konstrukcyjnych podobnych układów, zaproponowano nowatorskie rozwiązanie obrotu platformy. Na rysunku 2 przedstawiono trzy warianty geometrii modelu, różniące się miejscem usytuowania siłowników obracających platformę. Rozważając poszczególne warianty, badany model poddano zróżnicowanym wariantom obciążenia. W pierwszych analizach numerycznych model platformy obrotowej obciążono zgodnie z normą PN-EN 12663 [3]. W kolejnym etapie zamodelowano obciążenia wynikające z naczepy oddziałującej na platformę wraz z wymuszeniami (w miejscach

usytuowania siłowników) powodującymi jej obrót. Zestawienie wszystkich analizowanych wariantów obciążeń przedstawiono w tablicy 2. W przeprowadzonych analizach uwzględniono:

- utwierdzenie burt w węzłach usytuowanych na linii obciążenia (rys. 3a) oraz utwierdzenie węzłów w miejscach usytuowania rolek wspornikowych,
- siły rozciągające (rys. 3b) i ściskające (rys. 3c) zgodnie z normą PN-EN 12663,
- masa własna platformy,
- nacisk naczepy w miejscach działania kół i stóp naczepy (rys. 4) oraz siły wymuszające obrót platformy.

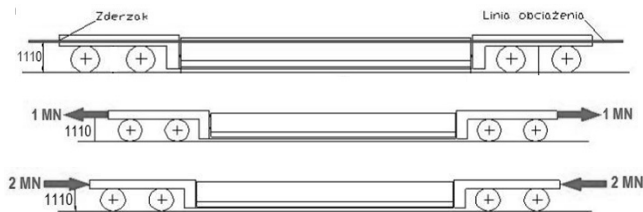


Rys. 2. Geometria modelu platformy: a) wariant W1, b) wariant W2, c) wariant W3

Tablica 2

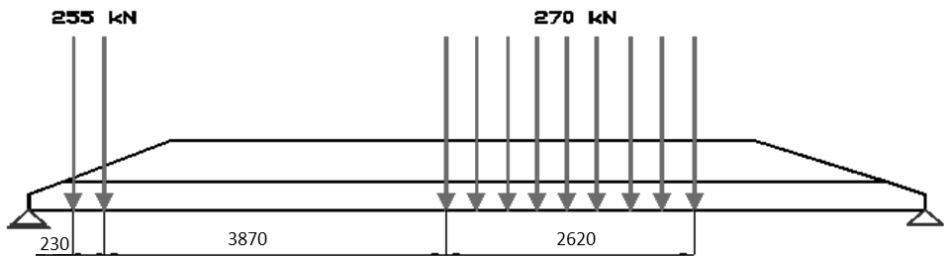
Zestawienie wariantów obciążeń przyjętych w analizach numerycznych

Wariant obciążenia	Wymuszenia
LC1	masa własna platformy bez wymuszeń zewnętrznych
LC2	ściskanie platformy bez naczepy z uwzględnieniem masy własnej (2MN według PN-EN 12663)
LC3	rozciąganie platformy bez naczepy z uwzględnieniem masy własnej (1MN według PN-EN 12663)
LC4	nacisk naczepy ($P_k = 0,26$ MPa, $P_s = 4,82$ MPa) z uwzględnieniem masy własnej platformy
LC5	nacisk naczepy ($P_k = 0,26$ MPa, $P_s = 4,82$ MPa) z uwzględnieniem masy własnej platformy z rolkami podpierającymi
LC6	obrót platformy bez naczepy siłą $F = 170$ kN z uwzględnieniem masy własnej platformy z rolkami podpierającymi
LC7	obrót platformy z naczepą ($P_k = 0,26$ MPa, $P_s = 4,82$ MPa) siłą $F = 170$ kN z uwzględnieniem masy własnej platformy z rolkami podpierającymi



Rys. 3. Schematy obciążeń: a) linia działania obciążenia, b) rozciąganie platformy 1 MN według PN-EN 12663, c) ściskanie platformy 2 MN według PN-EN 12663

Wymuszenie nacisku naczepy zostało przyjęte jako ciśnienie działające na powierzchnię platformy w miejscach usytuowania kół i stóp naczepy. Wartości ciśnień dla kół P_k i stóp P_s wynoszą odpowiednio 0,26 MPa oraz 4,82 MPa.



Rys. 4. Rozkład sił przedstawiający nacisk naczepy na platformę w formie obciążenia ciągłego

3. MODELE DYSKRETNE NADWOZIA PLATFORMY KOLEJOWEJ I ANALIZA NUMERYCZNA WYBRANYCH ROZWIĄZAŃ KONSTRUKCYJNYCH

W metodzie elementów skończonych używa się wielu typów elementów. Różnią się one zakresem stosowalności oraz dokładnością. Stosuje się elementy, będące prostymi figurami geometrycznymi (płaskimi lub przestrzennymi). Wyróżnia się w nich punkty zwane węzłami oraz pewne funkcje interpolacyjne służące do opisu rozkładu analizowanej wielkości w ich wnętrzu i na ich bokach. Funkcje te są nazywane funkcjami kształtu.

Na podstawie pierwotnej geometrii modelu powłokowego (rys. 2) wykonano modele dyskretne dla poszczególnych wariantów rozwiązań konstrukcyjnych, które składały się z następującej liczby elementów powłokowych (QUAD4):

- wariant W1 – 11 222 elementów,
- wariant W2 – 11 096 elementów,
- wariant W3 – 11 285 elementów.

Do analizy został wybrany sprężysty model materiału, ponieważ jeśli konstrukcja ma pracować długo i bezpiecznie, to nie może nastąpić uplastycznienie materiału. Naprężenia w konstrukcji nie mogą przekroczyć wartości granicy sprężystości. Materiałem przyjętym do analizy jest stal S355 powszechnie stosowana w przemyśle taboru kolejowego. Właściwości mechaniczne zastosowanej stali w stanie znormalizowanym oraz spoiny zestawiono w tablicy 3.

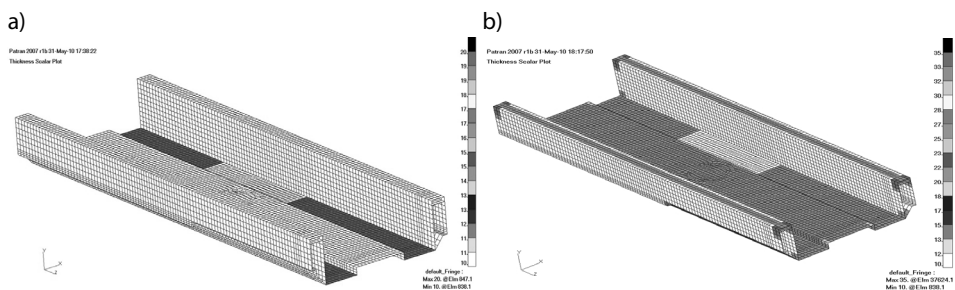
Tablica 3

**Właściwości mechaniczne blachy ze stali S355
w stanie znormalizowanym i spoiny [5]**

Miejsce wycięcia próbki	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{10} [%]	Z [%]
Materiał rodzimy	407	595	21	67
Spoina	460	651	30	62

4. ANALIZA WYNIKÓW OTRZYMANYCH NA DRODZE SYMULACJI NUMERYCZNYCH

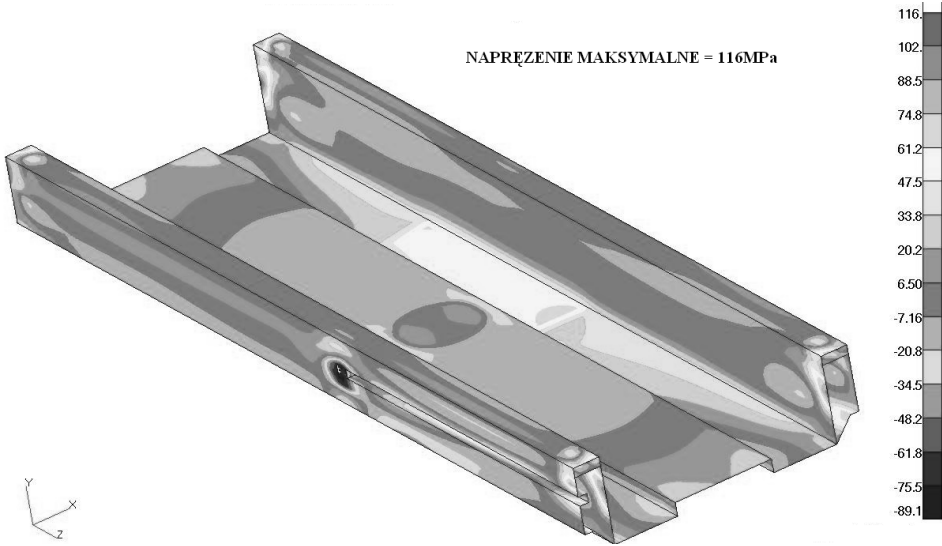
W przeprowadzonych analizach uwzględniono zmianę grubości wybranych elementów konstrukcji platformy obrotowej. Pierwsze analizy numeryczne przeprowadzono dla grubości blach równych 10 mm (głównie burty platformy) oraz 20 mm (jezdnia platformy) – wersja R1 (rys. 5a). Kolejnym krokiem było zastosowanie w miejscach powstawania koncentracji naprężeń dodatkowych wzmocnień w postaci nakładek zwiększających lokalnie grubość blach – wersja R2 (rys. 5b). Wprowadzenie tych zmian nie zmieniało wcześniej przyjętych założeń. Wymagania skrajni kolejowej oraz odległość pomiędzy dnem platformy a główką szyn nie ulegały zmianie.



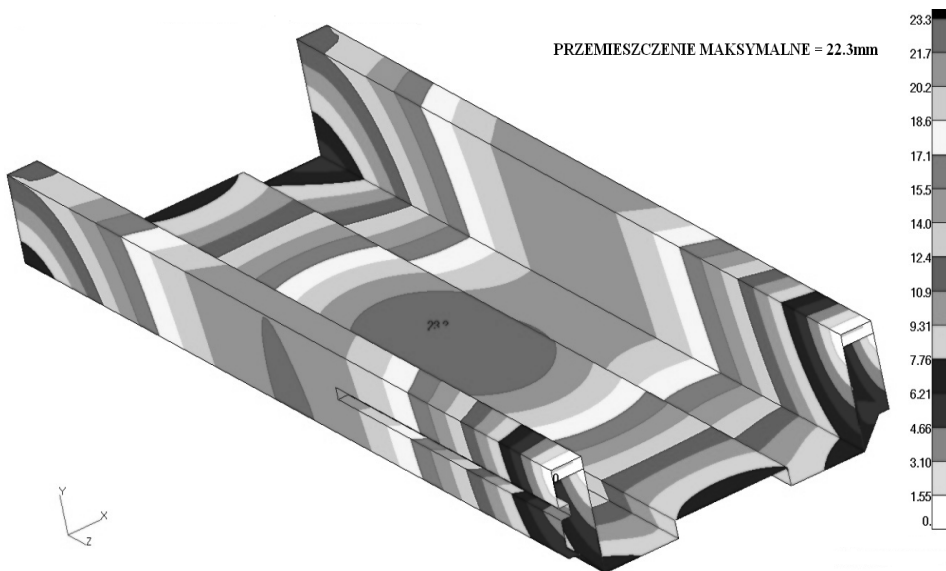
Rys. 5. Rozkład grubości elementów na przykładzie wariantu W1: a) wersja R1, b) wersja R2

W każdym z trzech wariantów konstrukcyjnych modelu wydzielonej platformy obrotowej, uwzględniającej zróżnicowaną konfigurację siłowników i grubość blach, rozpatrzono siedem zestawów obciążeń. Następnie opracowano analizę porównawczą

wyników w zakresie maksymalnych naprężeń zredukowanych i przemieszczeń. Przykładowe wyniki badań numerycznych w postaci rozkładów naprężeń głównych i przemieszczeń nadwozia wagonu, ściskanego przez zamki burtowe normową siłą 2MN z siłownikiem umiejscowionym w położeniu środkowym, przedstawiono na rysunkach 6 i 7.

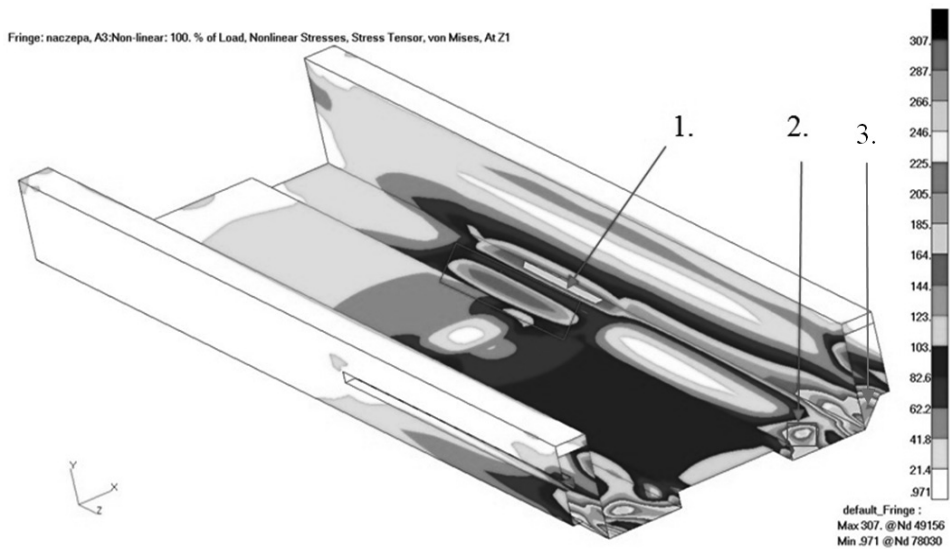


Rys. 6. Platforma ruchoma wagonu – rozkłady naprężeń zredukowanych H-M-H

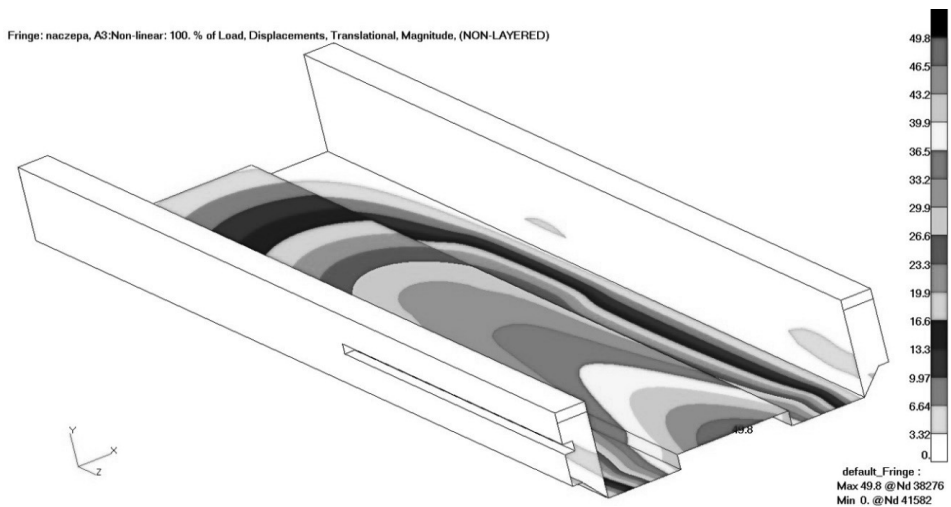


Rys. 7. Platforma ruchoma wagonu – rozkłady przemieszczeń

Ruchoma platforma podlega dużym obciążeniom, wynikającym z nacisku naczepy na jej konstrukcję. Rysunek 8 przedstawia rozkład wyężenia konstrukcji według hipotezy Hubera, uzyskany pod wpływem działania siły nacisku naczepy na platformę (wariant obciążenia LC4). Widoczne są wyraźne oddziaływania nacisku kół (1) i stóp naczepy (2). Wartości naprężeń w tych obszarach to odpowiednio ~ 150 MPa i 250 MPa. Największe koncentracje naprężeń (307 MPa) występują w strefie styku burty z podłogą platformy (3).



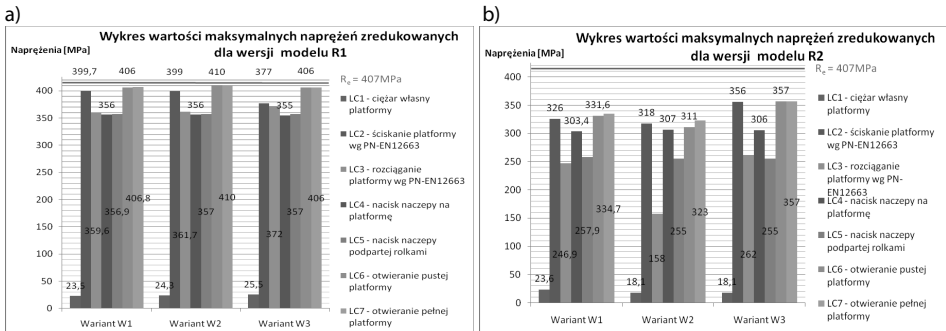
Rys. 8. Platforma ruchoma wagonu – rozkłady naprężeń zredukowanych H-M-H



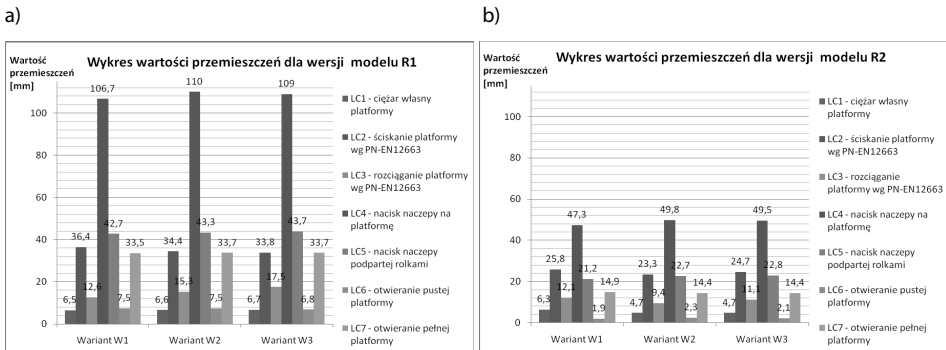
Rys. 9. Platforma ruchoma wagonu – rozkłady przemieszczeń

Na rysunku 9 przedstawiono rozkład wartości przemieszczeń uzyskanych pod wpływem działania siły nacisku naczepy na platformę (wariant obciążenia LC4). Największe wartości przemieszczeń występują w środkowym obszarze platformy, gdzie największy wpływ ma oddziaływanie stóp naczepy. Wartości przemieszczeń w tym miejscu wynoszą 49,8 mm. Ich wartość jest dość duża, więc w kolejnym etapie należy zastosować rozwiązania konstrukcyjne zmniejszające deformację tej części konstrukcji.

Wyniki dla wszystkich wariantów i wersji modelu zestawiono na rysunkach 10 i 11 w postaci wykresów słupkowych.



Rys. 10. Zestawienie wartości naprężeń zredukowanych: a) wersja modelu R1, b) wersja modelu R2



Rys. 11. Zestawienie wartości przemieszczeń: a) wersja modelu R1, b) wersja modelu R2

5. PODSUMOWANIE

Analizując otrzymane wyniki można stwierdzić, że usytuowanie siłownika nie ma znacznego wpływu na deformację burt platformy. Różnice w wartościach maksymalnych deformacji dla poszczególnych wariantów wynoszą 4%. Największe koncentracje naprężeń wystąpiły w miejscach mocowania siłowników hydraulicznych, mimo dodatkowych wzmocnień w postaci zwiększonej grubości blach. W wersji R2 w żadnym z wariantów geometrycznych nie przekroczono granicy plastyczności materiału, którym

była stal S355 ($R_e = 407$ MPa). Dodatkowo wartości przemieszczeń w modelu zmalały o 52% dla wariantu obciążenia LC7, który odpowiadał najbardziej ekstremalnemu obciążeniu konstrukcji.

Zaprezentowany w artykule wagon specjalny może być zastosowany do transportu kolejowego naczeł i pojazdów typu TIR. Metodyka badań numerycznych, modele MES używane w testach, analizach weryfikacyjnych oraz w badaniach symulacyjnych wagonu z obniżoną platformą obrotową i otrzymane wyniki będą wykorzystane w pracach badawczo-rozwojowych w zakresie projektowania konstrukcji wagonu. Opracowana metodyka badań takich konstrukcji pozwala na wdrożenie jej zarówno na etapie projektowania, jak też przy badaniach już eksploatowanych lub remontowanych konstrukcji.

Zakres przedstawionych w artykule analiz jest ograniczony. W tego typu konstrukcjach szczególnie istotne ze względu na obciążenia dynamiczne są testy połączeń pomiędzy platformą obrotową i ostoją wagonu. Po ich uwzględnieniu rozwiązanie konstrukcyjne platformy może ulec zmianie. W kolejnym etapie zakres weryfikacji wytrzymałościowych będzie rozszerzony o dodatkowe testy statyczne i dynamiczne, które umożliwią uzyskanie stosownych certyfikatów dopuszczających konstrukcję do użytkowania.

Praca finansowana przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju – PBR R10 0023 06/2009

Prezentowane rozwiązanie konstrukcyjne chronione jest europejskim zgłoszeniem patentowym EP 10461528 – A railway wagon with a rotatable loading floor

BIBLIOGRAFIA

1. Kwaśniewski S., Nowakowski T., Zając M.: *Transport intermodalny w sieciach logistycznych*. Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2008.
2. MSC.Patran / Nastran. Reference Manual, MSC, 2005.
3. Polska Norma PN-EN 12663 *Wymagania konstrukcyjno-wytrzymałościowe dotyczące pudeł kolejowych pojazdów szynowych*, 2010.
4. Starkowski D., Bieńczyk K., Zwierzycki W.: *Samochodowy transport krajowy i międzynarodowy*. Poznań: SYSTHERM D. Gazińska S.J., 2009.
5. Szymlek K., Ćwiek J.: *Niszczenie wodorowe złączy spawanych ze stali S355*. „Przegląd Spawalnictwa”. 2007, R. 79, nr 11, s. 31–35.
6. Wrona J.: *Transport kombinowany / intermodalny. Teoria i praktyka*. Szczecin, Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Szczecińskiego, 2008.
7. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L.: *The finite element method*. Wydanie 5. London: McGraw-Hill, 2000.