

Prototypowy wagon i system do transportu intermodalnego naczep samochodów ciężarowych

Wiesław Krasoń, Tadeusz Niezgoda

1. Wprowadzenie


W europejskim transporcie kolejowym wprowadzano w ostatnich latach technologie transportu kombinowanego oparte na przeładunku pionowym, poziomym lub inne [1, 2, 3]. Systemy te wymagają rozbudowanych terminali przeładunkowych wyposażonych np. w urządzenia przeładunku pionowego o odpowiednim udźwigu lub inne drogie i skomplikowane urządzenia umożliwiające realizację czynności załadunkowych i wyładunkowych. W naszym kraju nie wdrożono dotychczas systemu do transportu intermodalnego. Zaproponowany przez Wojskową Akademię Techniczną system do przewozów intermodalnych bazujący na wagonie specjalnym z obrotową platformą niskopodłogową stwarza możliwość łatwego i szybkiego autonomicznego załadunku, a następnie przewozu i autonomicznego rozładunku samochodów ciężarowych bez konieczności inwestowania w rozwój infrastruktury dodatkowej [4–9].

Wagon specjalny może być zastosowany do transportu kolejowego naczep i pojazdów typu TIR. Umożliwia on także transport różnego typu pojazdów, takich jak: ciągniki, ciężarówki, przyczepy, kontenery, sprzęt ciężki oraz kompletne zestawy o długości do 17 m. Wagon taki posiada ramę z częściami krańcowymi zamontowanymi na standardowych dwuosiowych wózkach i część środkową obniżoną względem części nadwózkowych. Ponad obniżoną częścią środkową ostoi wagonu znajduje się platforma ładunkowa ułożona poziomo i zamocowana w węźle centralnym obrotowo względem ramy. Koncepcja takiego wagonu platformy zaprezentowana w niniejszej pracy, jako głównego elementu nowatorskiego systemu do przewozów intermodalnych, spełnia następujące założenia konstrukcyjne:

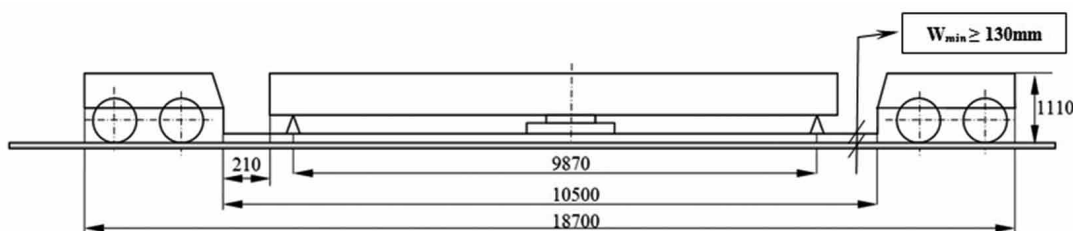
- wymiary zewnętrzne wagonu platformy wynikają ze skrajni GB1 oraz wymiarów bazowej naczepy o wysokości 4 m i ciężarze 36 ton, przyjętej do prac konstrukcyjnych;
- platforma oparta jest na dwóch standardowych dwuosiowych wózkach kolejowych typu Y25 o dopuszczalnym nacisku na oś 22.5 tony [4];
- rama ostoi, wyposażona w części nadwózkowe i obniżoną płytę denną do zabudowy ruchomego nadwozia wagonu, zapewnia minimalny przeswit (z uwzględnieniem roboczej deformacji konstrukcji) obniżonego dna ramy nad główką szyny większy od 130 mm [4];
- część obrotowa wagonu umożliwi samodzielny wjazd zestawu ciągnika i naczepy z jednej i wyjazd z drugiej strony (nadwozie wagonu jest przelotowe) [4, 5];

Streszczenie: W pracy przedstawiono wybrane etapy prac konstrukcyjnych wspomaganych przez analizy numeryczne prototypowego wagonu kolejowego z płaską i nisko umieszczoną platformą obrotową. Wagon taki można wykorzystać do transportu różnego typu pojazdów, takich jak ciągniki, ciężarówki, przyczepy, naczepy i kontenery. Wagon 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 stanowiący część składu kolejowego może być załadowany/rozładowany oddzielnie.

Słowa kluczowe: wagon specjalny z obrotową platformą ładunkową, laboratoryjne i numeryczne badania wytrzymałości, wybrane problemy zastosowania systemu transportu intermodalnego

 **Abstract:** Numerical analysis of the railway wagon with a rotatable, low and flat loading floor was presented in the paper. Such structure can be used for transporting various types of vehicles, such as tractors, trucks, trailers, semitrailers, cargo containers. The railway wagon allows quick and convenient loading and unloading of vehicles and containers (no cranes needed), self loading and unloading; no platform infrastructure required, instead of hardened, flat, surface; no need for hubs, terminals or special logistics. Each wagon can be operated separately.

- ruch obrotowy platformy ładunkowej w wersji prototypowej wagonu wymuszany jest za pomocą mechanizmu złożonego z przekładni typu listwa zębata – zębatka napędzanego silnikiem hydraulicznym. Ruch obrotowy obniżonej platformy ładunkowej realizowany jest względem węzła centralnego związanego z ramą ostoi wagonu na obniżonym dnie ramy [5, 6];
- węzeł obrotowy nie jest poddany dużym obciążeniami zarówno w trakcie przejazdu, jak też podczas operacji załadunku/rozładunku;
- w trakcie załadunku, w celu ustabilizowania platformy, będzie ona podpierana czteropunktowo na główkach szyn, na dodatkowych, sterowanych hydraulicznie podporach [4];



Rys. 1. Schemat układu ramy ostoi wagonu kolejowego wraz z obrotową platformą ładunkową do analizy kinematycznej

- podczas transportu burty części obrotowej nadwozia wagonu połączone będą z częścią nadwózkową za pomocą specjalnych zamków, które będą blokowane za pomocą siłowników hydraulicznych;
- pod końcami części obrotowej nadwozia wagonu, tj. ruchomej platformy ładunkowej, umieszczone będą rolki ułatwiające jej przemieszczanie po peronie i jednocześnie stanowiące dodatkową podporę platformy ładunkowej w procesie załadunku/rozładunku;
- w częściach nadwózkowych wagonu zabudowany zostanie mechanizm umożliwiający regulację wysokości położenia ramy wagonu nad wózkami jezdny. Mechanizm taki może być wykorzystany podczas operacji ładunkowo-rozładunkowych do dopasowania wysokości położenia płyty jezdnej platformy obrotowej względem poziomu ramy peronu, tak aby umożliwić bezkolizyjny najazd obracanej platformy ładunkowej wraz z rolkami wspomagającymi na wzmocnioną powierzchnię peronu [5, 6, 15].

W pracy opisano podstawowe założenia, istotę i najważniejsze etapy rozwiązania konstrukcyjnego oraz omówiono budowę nowatorskiego wagonu w wersji prototypowej z obrotową platformą niskopodłogową wraz z dodatkowymi elementami systemu do przewozów intermodalnych.

2. Projekt wstępny i badania wagonu z obrotową platformą ładunkową – demonstrator i badania symulacyjne

Do wykonania projektu konstrukcyjnego wagonu wykorzystano szeroko pojęte wspomaganie prac w zakresie CAD/CAE. Opracowanie odpowiedniej strategii realizacji symulacji numerycznych wraz z doбором odpowiednich programów komputerowych i zbudowaniem precyzyjnych modeli bryłowych 3D poszczególnych podzespołów wagonu kolejowego do przewozu pojazdów ciężkich pozwalają określić niezbędne modyfikacje przygotowywanego produktu z punktu widzenia wybranych aspektów funkcjonalnych, użytkowych i wdrożeniowo-technologicznych. Zbudowanie odpowiednich modeli wirtualnych elementów konstrukcyjnych badanego wagonu i zastosowanie ich w symulacjach wybranych etapów pracy w fazach załadunku i rozładunku jest przedsięwzięciem tańszym i możliwie dostępnym do zrealizowania w porównaniu z koniecznością przygotowywania określonej partii gotowych produktów, testowania i ich modyfikacji w rzeczywistych warunkach.

W pierwszym etapie badań wypracowywano wstępną koncepcję konstrukcyjną ramy ostoi wagonu kolejowego wraz

z obrotową platformą ładunkową-wyładowczą (rys. 1), umożliwiającą samodzielny wjazd i zjazd zestawu ciągnika z naczepą z odpowiednio przystosowanej ramy kolejowej.

W pracy wykorzystano profesjonalne komercyjne programy do budowy i optymalizacji modeli geometrycznych 3D wagonu platformy w postaci następujących aplikacji graficznych: Solid Edge, Auto Cad, a do symulacji kinematycznych – programy ADAMS, Visual Nastran 4D i CATIA. Zastosowanie tych programów komputerowych pozwoliło na dokładniejsze poznanie działania układu konstrukcyjnego, bezpośrednie śledzenie wpływu wprowadzonych zmian konstrukcyjnych na współpracę elementów wagonu pracującego w różnych fazach użytkowych, poprawę ergonomii, estetykę wykonania, a więc także na konkurencyjność finalnego produktu. Trudnością związaną ze stosowaniem metod numerycznych do oceny zmian wprowadzonych w konstrukcji jest prawidłowy opis właściwości fizycznych i mechanicznych, stosowanych w tego typu urządzeniach materiałów konstrukcyjnych oraz uwzględnienie uproszczeń w zbudowanych modelach komputerowych.

Na podstawie wykonanych badań zaproponowano koncepcję wagonu z obniżoną ramą i platformą ładunkową z zamkami sprzęgającymi platformę ładunkową i ramę w częściach nadwózkami – rys. 2 a. Na rys. 2 b przedstawiono demonstrator wagonu z obrotową platformą ładunkową opracowany na podstawie projektu wstępnego. W zaprezentowanej poniżej wybranej koncepcji wstępnej ramy przyjęto klasyczne założenia projektowe dla tego typu konstrukcji i niezbędne na tym etapie uproszczenia w modelach numerycznych.

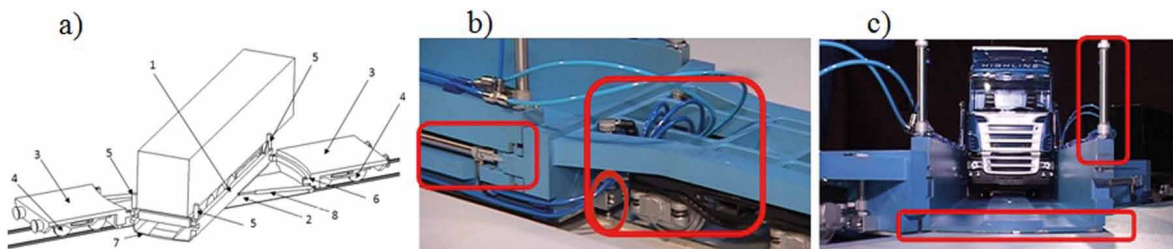
Wybrane wyniki analizy numerycznej w modelach odwzorowujących taką koncepcję wagonu do przewozu naczep zamieszczono na rys. 2 c. Maksymalne naprężenia zredukowane w prezentowanym wariantcie wyężenia ramy wynoszą 217 MPa, a maksymalna strzałka ugięcia 95 mm. Wyniki dotyczą wariantu analizy rozciągania wagonu siłą 2 MN oraz obciążenia ciężarem własnym wagonu i ciężarem maksymalnym naczepy równym 360 kN.

2.1. Szczegółowe rozwiązania konstrukcyjne do koncepcji wstępnej wagonu z obrotową platformą ładunkową

Wagon do przewozu intermodalnego z obrotową platformą niskopodłogową, zaproponowany przez Wojskową Akademię Techniczną (rys. 3 a), według założeń konstrukcyjnych powinien umożliwiać łatwy i szybki, autonomiczny załadunek, a następnie przewóz i autonomiczny rozładunek samochodów



Rys. 2. Schemat wagonu według koncepcji po etapie wstępnych prac projektowych: a) rozmieszczenie punktów 1-8 połączenia pomiędzy ramą wagonu i platformy obrotowej; b) demonstrator zestawu w skali 1:22 wagonu platformy, ciągnika siodłowego z naczepą oraz element infrastruktury peronu; c) przykład wyników badań numerycznych w postaci mapy naprężeń zredukowanych ramy wagonu w niniejszym rozwiązaniu konstrukcyjnym



Rys. 3.: a) Schemat wyjaśniający budowę i prezentujący podstawowe podzespoły wagonu z obrotową platformą zaproponowanego w WAT: platforma obrotowa (1), obniżona płyta podwozia wagonu (2), części nadwózkowe (3), dwuosiowy wózek jezdny (4), zamki ze sworzniami blokującymi (5), bieżnie prowadzące (6), urządzenia wsporcze, tzw. rolki (7), burtowe siłowniki hydrauliczne (8); b) demonstrator wagonu kolejowego do transportu samochodów ciężarowych w skali 1:14; mechanizm obrotu, części nadwózkowe ramy i podpory stabilizujące wagon podczas operacji załadowczo-rozładowczych; c) wagon z obróconą platformą i modelem ciężarówką, widok na burtowe zamki sworzniowe i rolki wsporcze

ciężarowych typu TIR bez konieczności inwestowania w rozwój infrastruktury dodatkowej. Prace konstrukcyjne i badania symulacyjne zaowocowały szczegółowymi rozwiązaniami mechanizmów wykonawczych wagonu z obrotową platformą ładunkową. Współpracę tych mechanizmów w procesie załadunku/rozładunku projektowanego wagonu wyjaśniono poniżej na podstawie demonstratora wstępnego wagonu.

Model demonstrator wagonu kolejowego do transportu samochodów ciężarowych w skali 1:14 zbudowano w Laboratorium Wytrzymałości Materiałów KMiIS. Na rys. 3 b, c, pokazano fotografie szczegółowych rozwiązań konstrukcyjnych głównych mechanizmów wykonawczych demonstratora wagonu przedstawione na schemacie w rys. 3 a. W modelu odwzorowano zasadnicze części składowe wagonu oraz infrastruktury peronu załadowczo-wyładowczego, odpowiadające tej fazie projektu. Model umożliwia demonstrację zasady działania i wizualizację podstawowych funkcji wagonu kolejowego do transportu samochodów ciężarowych [7, 8, 9].

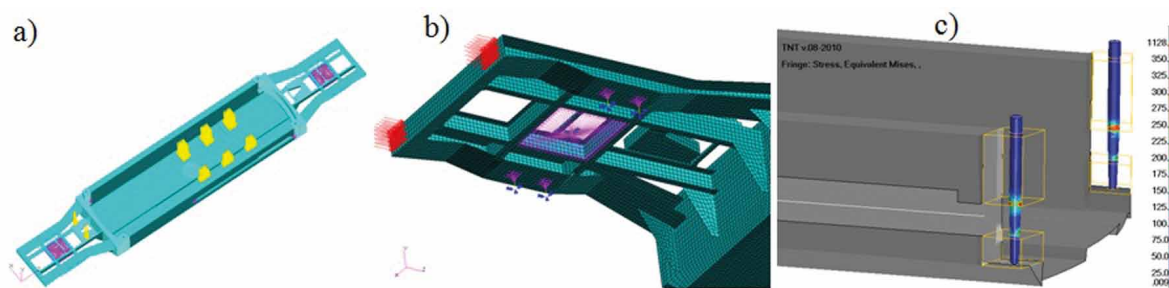
Sposób załadunku naczepy polega na obrocie platformy (1) względem środka wagonu i ustawieniu jej tak, by z peronu mógł na nią wjechać samochód z naczepą – rys. 3 a, c. Po dojechaniu do odpowiedniego punktu naczepa jest odłączana, a następnie razem z platformą obracana do położenia transportowego. Za obracanie platformy odpowiedzialne są siłowniki (8) umieszczone w bocznych burtach obrotowej platformy – rys. 3 b. Po ustawieniu w położeniu transportowym siłowniki pionowe zamocowane na stałe na części obrotowej wysuwają się, łącząc

na zasadzie połączenia sworzniowego (5) obrotową platformę z nieruchomą częścią wagonu. Obrót platformy ładunkowej wspomagają bieżnie prowadzące i rolki zamontowane pod końcowymi krawędziami platformy – rys. 3 b, 3 c.

2.2. Badania modelowe wagonu z uwzględnieniem rozwiązań szczegółowych

Analizę wytrzymałości wstępnej wersji ze szczegółowymi rozwiązaniami podzespołów konstrukcyjnych wagonu platformy wykonano na podstawie normy PN-EN 12663 [10]. Obliczenia wykonano, uwzględniając oddziaływanie maksymalnych obciążeń normowych w postaci ciężaru własnego wagonu, przewożonego ładunku (naczepy o całkowitym ciężarze 360 kN) wraz z jednoczesnym ściskaniem siłą 2 MN przyłożoną w płaszczyźnie zderzaków wagonu. Omówiono wybrane wyniki badań numerycznych podzespołów konstrukcyjnych otrzymane w wersji wstępnej oraz po uwzględnieniu modyfikacji konstrukcyjnych wagonu do przewozów intermodalnych.

Z uwagi na charakter pracy projektowanego wagonu uznano, że prawidłowe odwzorowanie pracy konstrukcji możliwe jest tylko wówczas, gdy analizie poddane będą jednocześnie wszystkie podzespoły, z uwzględnieniem warunków brzegowych wynikających z ich współpracy. Ze względu na nieliniowy charakter odwzorowywanej współpracy podzespołów wagonu, a w tym zjawisk kontaktowych, do wykonania obliczeń wytrzymałościowych wybrano program MSC.Marc. Model MES, w którym uwzględniono wszystkie zasadnicze podzespoły



Rys. 4. Model MES: a) model obciążenia wagonu reprezentujący oddziaływanie kół i zaczepu transportowanej naczepy; b) więzy kinematyczne w modelu części nadwózkowej ostoji z warunkami brzegowymi; c) przykładowe wyniki w postaci mapy naprężeń zredukowanych HMH – widok koncentracji naprężeń w obszarze współpracy burt platformy obrotowej i zamków sworzniowych

konstrukcyjne wagonu wraz z przyjętymi warunkami brzegowymi przedstawiono na rys. 4. Model zaprezentowanej wersji konstrukcyjnej wagonu z obrotową platformą składa się z 93 000 węzłów i 83 000 elementów [8, 15].

Na rys. 4 przedstawiono także fragment nadwózkowej części ostoji wagonu z więzami kinematycznymi (elementy sztywne typu RBE2) modelującymi oddziaływanie wózka. Element RBE2 w środkowej części odwzorowuje czop skrotny, elementy RBE2 po bokach, wraz z elementami sprężystymi, modelują ślizgi boczne i oddziaływanie sprężyn wózka. Sztywności sprężyn odpowiadają charakterystyce zdefiniowanej w dokumentacji wózka. Warunki brzegowe zdefiniowano w węźle środkowym czopu i na swobodnych końcach elementów sprężystych. Na rys. 4 a zaznaczono też miejsca oddziaływania obciążeń wzdłużnych od zderzaków. Siłę 2 MN w modelu zastąpiono zredukowanym ciśnieniem zdefiniowanym na powierzchniach czołowych ramy ostoji, w miejscach zamocowania zderzaków [10].

Oddziaływanie ładunku na wagon zdefiniowano w postaci zestawu sił skupionych działających w miejscach nacisku kół naczepy na platformę obrotową nadwozia. Wartości sił i obszary ich przyłożenia przyjęto na podstawie charakterystyki najcięższej trójosiowej naczepy z dopuszczalnym ładunkiem. Na podstawie wcześniejszych prac [15] ustalono, że przypadkiem wymiarującym dla badanego wagonu jest przypadek obciążenia opisany wzorem: $1,95 \times g \times (m_1 + m_2)$, gdzie: m_1 – masa pudła pojazdu w stanie gotowym do pracy; m_2 – dopuszczalna masa ładunku; g – przyspieszenie ziemskie. W związku z tym w rozważanym wariantcie obciążenia platformy uwzględniono również siły bezwładności skalowane z zastosowaniem mnożnika określonego w normie [10]. Z tego powodu analizę konstrukcji prezentowanej w pracy ograniczono do opisanego, krytycznego dla konstrukcji wagonu przypadku obciążenia. Założono, że wszystkie podzespoły wagonu wykonane są z różnego rodzaju stali, nie określając na tym etapie dokładnego typu stali. Dlatego też wszystkim elementom przypisano materiał o następujących właściwościach: $E = 2,1 \cdot 10^5$ MPa; $\nu = 0,3$; $\rho = 7,8 \cdot 10^{-9}$ tona/mm³.

Wybrane wyniki analizy numerycznej dla tak określonego wariantu badanego układu przedstawiono w postaci map naprężeń zredukowanych HMH. Niekorzystne spiętrzenia naprężeń zaobserwowano w elementach zamków burtowych łączących

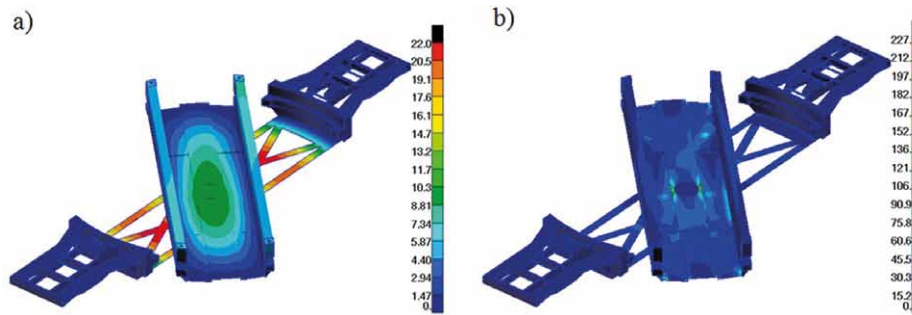
część nadwózkową ramy i burty platformy ładunkowej – rys. 4 c.

W analizach numerycznych wykonanych w tym etapie prac konstrukcyjnych rozważano także przypadki obciążenia masami własną i ładunku w położeniu załadawczo-wyładowczym platformy ładunkowej. W tych wariantach pracy układu (otwarcie zamków łączących burty i platformę i obrócenie platformy względem węzła centralnego – rys. 3 c) w modelach obciążenia zastosowano dodatkowe warunki brzegowe, uwzględniające fakt opierania się platformy obrotowej o peron i działanie dodatkowych wsporników. Dodatkowe miejsca podparcia dla przedniej części modelu pokazane są na rys. 3 c, a wybrane wyniki dla konfiguracji załadawczo-wyładowczej wagonu na rys. 5. Kryteria naprężeniowe i przemieszczeniowe w tak określonym wariantcie analizy zostały spełnione.

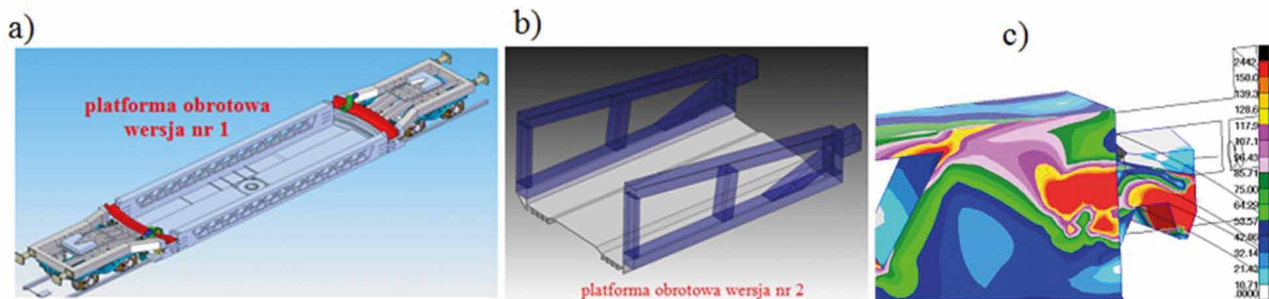
2.3. Model numeryczny i wybrane wyniki badań numerycznych wagonu po modyfikacjach konstrukcyjnych

Zaprezentowane powyżej rozwiązanie zdefiniowane w niniejszej pracy jako koncepcja wstępna wagonu obarczone jest jednak pewnymi problemami konstrukcyjnymi. Po pierwsze, zamocowanie siłowników w burtach bocznych połączonych z częścią nieruchomą wagonu ogranicza możliwości załadawcze wagonu (wagon może się obracać tylko w jedną stronę). Ponadto takie ułożenie siłowników oraz zamocowanie siłowników pionowych napędzających zamki sworzniowe wymusza przeprowadzenie przewodów zasilających elementy hydrauliczne przez węzeł obrotowy platformy. Zwiększa to znacznie ich długość oraz zwiększa ryzyko ich uszkodzenia. W związku z powyższym postanowiono zmodyfikować konstrukcję wagonu tak, by wyeliminować wspomniane problemy dotyczące tego rozwiązania. Wprowadzono następujące modyfikacje konstrukcyjne:

- zmieniono mechanizm obrotu platformy nadwozia;
- zmodyfikowano zamki łączące nadwozie z częścią nadwózkową ramy wagonu;
- zmieniono platformę obrotową nadwozia (wysokość i ażurowa konstrukcja burt, zmodyfikowana budowa łożyska obrotu);
- zmodyfikowano konstrukcję części nadwózkowej podwozia wraz z bieżnią prowadzącą ruchomej platformy ładunkowej.



Rys. 5. Wyniki analiz wagonu z platformą w położeniu załadowczo-wyładowczym: a) mapa przemieszczeń - $W_{\max} = 22$ mm; b) naprężenia zredukowane HMM - $\sigma_{\max} = 227$ MPa



Rys. 6. a) Model CAD wagonu opracowany po uwzględnieniu modyfikacji szczegółowych rozwiązań konstrukcyjnych; b) model platformy obrotowej z wyprofilowaną płytą najazdową i ażurowymi burtami; c) mapa ze śpiętrzeniem naprężeń zredukowanych HMM ($\sigma_{\max} = 2442$ MPa) w obszarze zmodernizowanego zamka łączącego burtę platformy ładunkowej z ramą części nadwózkowej wagonu

Widok modelu geometrycznego konstrukcji, w którym uwzględniono powyższe modyfikacje, przedstawiono na rys. 6. Badania numeryczne wagonu po modyfikacjach konstrukcyjnych wykonano z uwzględnieniem identycznych wariantów obciążeń eksploatacyjnych, jak opisano w rozdziale 2.2 pracy.

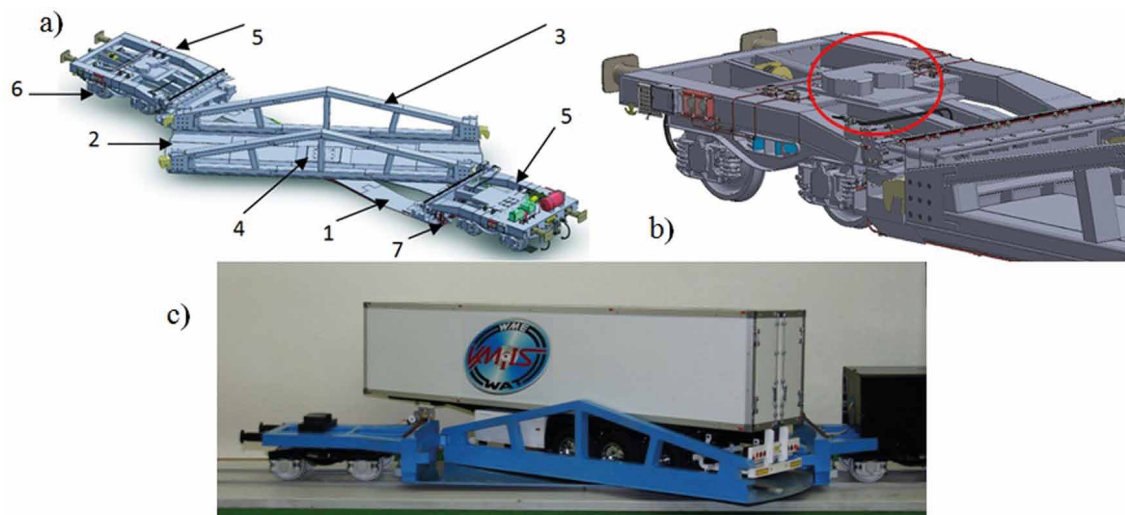
Wybrane wyniki analizy konstrukcji wagonu z podłogą płytową, odpowiadające wariantowi warunków brzegowych w modelu z rys. 6 a, pokazano na rys. 6 c [15].

Podstawowym celem badań zaprezentowanych w tej części opracowania jest weryfikacja głównych założeń konstrukcyjnych i określenie kierunków dalszych prac projektowych wagonu do przewozu nacze. Z przedstawionych wyników obliczeń wynika, że podzespoły układu w obszarach mocowania zamków łączących burtę z częściami nadwózkowymi wagonu oraz same zamki są nadmiernie wyężone. Stan taki wymaga kolejnych poprawek konstrukcyjnych badanego układu, szczególnie w celu wspomaganie działania zamków łączących ramę ostoję z platformą ładunkową w położeniu transportowym. Proponowana koncepcja konstrukcyjna może spełnić kryteria normowe zawarte w PN-EN 12663 [10], jednak niektóre jej fragmenty wymagają dalszej analizy. Dotyczy to szczególnie minimalizacji masy całej konstrukcji, wzmocnienia konstrukcji części nadwózkowej, a szczególnie modyfikacji w obszarach mocowania

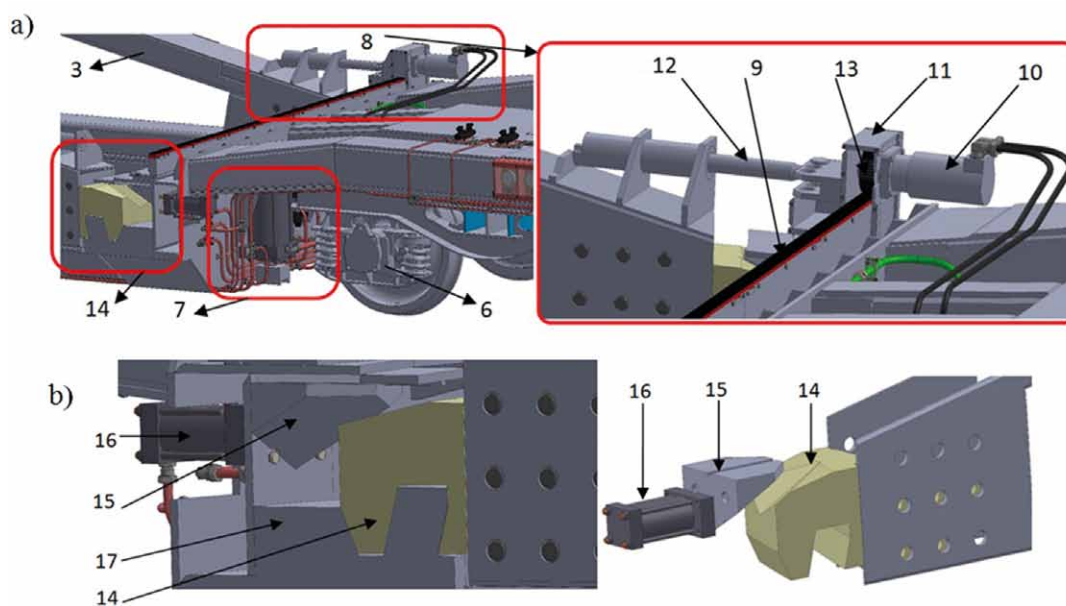
złączy burtowych platformy obrotowej wraz z opracowaniem poprawek zaproponowanego nowego rozwiązania zamków burtowych, tak by zmniejszyć wyężenie tego newralgicznego zespołu badanego wagonu.

3. Wagon kolejowy z obrotową platformą w wersji prototypowej

Budowę wagonu w wersji prototypowej omówiono szczegółowo w innych pracach autorów [7, 8, 9, 15]. Na rys. 7 a przedstawiono wizualizację kompletnego wagonu według dokumentacji 3D projektu wykonawczego prototypu wagonu wraz ze wszystkimi instalacjami oraz osprzętem dodatkowym w widoku z platformą ładunkową w położeniu obróconym do pozycji załadowczo-rozładowczej. Wagon według tego rozwiązania (rys. 7) wyposażono w nisko umieszczoną ramę podwozia (1) oraz platformę obrotową nadwozia (2) o wzmocnionej konstrukcji burt (3), wyposażoną w rolki obrotowe znajdujące się pod spodem platformy, ułatwiające obrót względem ramy podwozia. Platforma jest obracana względem podwozia i peronu załadowczo-wyładowczego dzięki zastosowaniu węzła obrotowego (4) umieszczonego w centralnej części wagonu. Ponadto wagon posiada konstrukcję nośną nadwózkową (5), znajdującą się nad wózkami jezdny (6) na obydwu końcach podwozia.



Rys. 7. a) Wagon prototypowy w widoku z platformą ładunkową w położeniu po jej obróceniu do pozycji załadowczo-rozładowczej; b) widok części nadwózkowej wagonu prototypowego z zabudowanym siodłem do mocowania naczepy na czas transportu wagonem; c) zdjęcie demonstratora wagonu prototypowego do transportu samochodów ciężarowych w skali 1:14 w wersji prototypowej – widok na wagon z platformą ładunkową w pozycji obróconej względem osi wagonu po wprowadzeniu i podparciu naczepy na płycie dennej platformy [15]



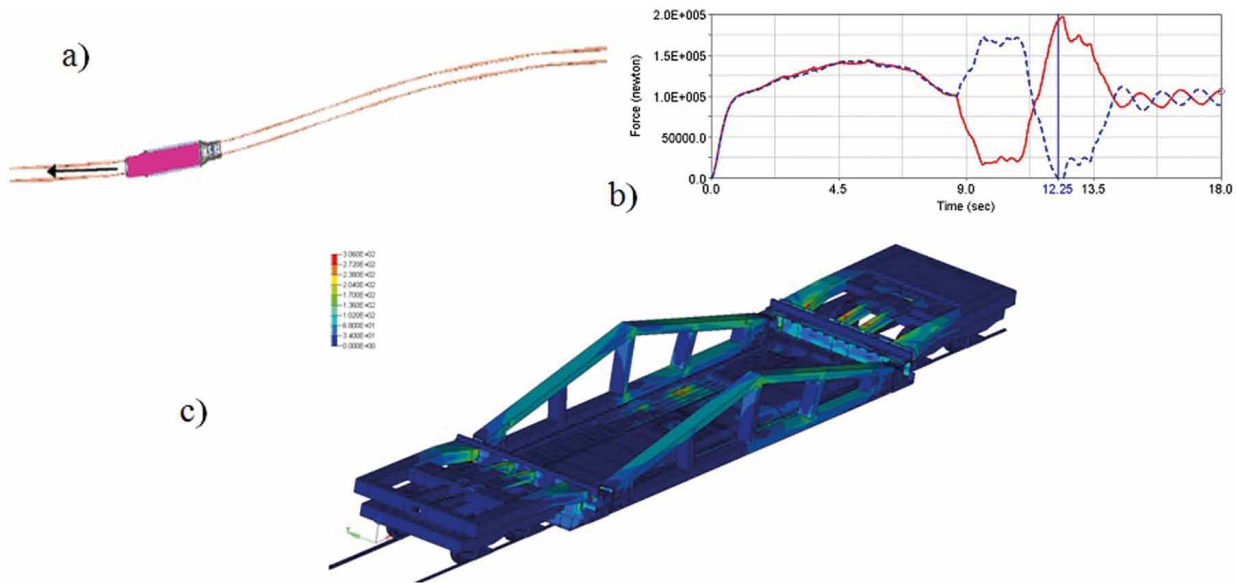
Rys. 8. a) Widok fragmentu części nadwózkowej z zamkami burtowymi (14) i podporami stabilizującymi (7) oraz mechanizm (8) obracający platformę ładunkową wagonu - w powiększeniu; b) ogólny widok złącza burtowego, sposób łączenia z burtą platformy obrotowej i blokowania poprzecznego za pomocą klina sterowanego hydraulicznie

Wagon może ponadto zawierać stabilizatory w postaci dodatkowych podpór hydraulicznych (7) zamontowanych pod obniżoną płytą podwozia i przystosowanych do unoszenia wagonu na szynach w trakcie załadunku i rozładunku wagonu.

Za wymuszenie ruchu obrotowego platformy ładunkowej nadwozia (2) odpowiadają mechanizmy (8) – rys. 8 – a znajdujące się po obu wewnętrznych stronach części nadwózkowej wagonu. Budowę takiego mechanizmu obracającego platformę ładunkową i widok fragmentu części nadwózkowej z zamkami

burtowymi i podporami stabilizującymi przedstawiono w powiększeniu po prawej stronie na rys. 8 a. Składa się on z płyty, do której przymocowana jest listwa zębata (9), silnika hydraulicznego (10) napędzającego mechanizm obrotu, koła zębatego (13) współpracującego z listwą i zamocowanego w korpusie wodzika (11), prowadzącego za pomocą wysięgnika (12) burty nadwozia wagonu podczas operacji obrotu.

W prezentowanym rozwiązaniu konstrukcyjnym połączenie burt platformy obrotowej z częścią nieruchomą (17) ostoi



Rys. 9. a) Widok modelu multibody wagonu i odcinka krzywoliniowego toru do symulacji kinematycznych i dynamicznych w systemie ADAMS; symulacja przejazdu wagonu z prędkością 100 km/h; b) wykres nacisków kół tylnej osi wózka przedniego podczas przejazdu z prędkością 100 km/h; czerwony – koło lewe; niebieski – koło prawe; c) wyniki symulacji MES z obciążeniem quasi-statycznym (ciężar własny i naczepy) z przeciążeniem 1,95 g – naprężenia zredukowane HMH – $\sigma_{\max} = 306 \text{ MP}$ [15]

wagonu jest realizowane poprzez odpowiednio ukształtowany zamek w postaci haka (14). Jego kształt, sposób łączenia z burtą platformy obrotowej i blokowania poprzecznego za pomocą klina (15) sterowanego hydraulicznie siłownikiem 16, pokazano na rys. 8 b. Konstrukcja takiego zamka pozwala jedynie na przenoszenie obciążenia wzdłużnego, a więc nie blokuje obrotu platformy i jej ruchu w kierunku poprzecznym. Funkcję tę pełni klin (15), który jest dociskany do zamka haka i blokowany za pomocą siłownika hydraulicznego (16). Precyzyjne prowadzenie klina gwarantują dwie powierzchnie skośne, nacięte na górnej powierzchni zamków, po których on się ślizga. Zarówno ukształtowanie zamka haka, jak i klina jest tak dobrane, aby podczas dosuwania klina zredukowane były wszelkie luzy pionowe oraz poprzeczne do osi wagonu. Odpowiada za to wcięcie utworzone w haku oraz wypust na klinie w postaci ostrosłupów o podstawie trójkątnej. W trakcie załadunku lub rozładunku siłownik odsuwa klin od zamka, zwalniana jest blokada haka, umożliwiając jednocześnie mechanizmowi obrotu otwarcie wagonu. W trakcie obrotu platforma ruchoma opiera się na węzle obrotowym na środku wagonu oraz dwóch bieżniach, po których przemieszczają się haki. Bieżnie te tworzą łuki o środku pokrywającym się ze środkiem obrotu platformy. W tej części operacji mechanizm obrotu platformy ładunkowej wspomagany jest za pomocą zestawów rolek [5, 6], które ułatwiają przemieszczenie końców platformy obrotowej względem płyty dennej ramy ostoi wagonu, a następnie odpowiednio przygotowanej powierzchni skrajni rampy peronu.

Siodło (widoczne na rys. 7 b) służy do mocowania naczepy w przedniej części nadwózkowej ramy podwozia wagonu specjalnego. Mechanizm taki powinien także częściowo odciążać platformę. Jest głównym elementem unieruchamiającym na-

czepę w kierunku podłużnym wagonu. Siodło powinno być przesuwne, ze względu na możliwość zapięcia/zakotwiczenia naczepy po obrocie platformy.

Prace konstrukcyjne nad złożeniem kompletnego wagonu w wersji prototypowej wspomagano za pomocą szeregu badań stanowiskowych, symulacji kinematycznych i analiz MES. W ramach prac nad wersją prototypową wagonu wykonano:

- badania kinematyczne i analizy drgań własnych konstrukcji;
- analizy numeryczne statyczne i dynamiczne zgodnie z normami [10–12];
- symulacje zmęczeniowe;
- badania stanowiskowe i analizy komputerowe wydzielonych złączy burtowych platformy obrotowej;
- opracowanie założeń i podstaw teoretycznych systemu do transportu intermodalnego na bazie wagonu z obrotową platformą ładunkową;
- demonstrator wagonu w wersji prototypowej;
- projekt infrastruktury peronu do załadunku i wyładunku wagonu prototypowego;
- projekt prac komercjalizacyjnych w celu zbudowania prototypów wagonu w skali 1:1 i wykonania niezbędnych badań certyfikacyjnych.

Wybrane wyniki badań multibody i MES wagonu w prototypowej wersji konstrukcyjnej przedstawiono na rys. 9 [15]. Model i reprezentatywne wyniki analizy dynamicznej 3D platformy kolejowej do badania ruchu załadowanego wagonu oraz wyznaczenia granicy bezpieczeństwa użytkowania pokazano odpowiednio na rys. 9 a, b. Zgodnie z [10–12] w ramach zakresu badań koniecznych do uzyskania świadectwa dopuszczenia do eksploatacji wagonu towarowego należy sprawdzić pojazd między innymi w zakresie przejazdu przez łuk o minimalnym

promieniu. Wymagana jest również ocena własności dynamicznych pojazdu w zakresie określenia współczynnika bezpieczeństwa przeciw wykołeniu oraz sił między kołem a szyną.

W ramach badań symulacyjnych wykonano także wielowariantowe analizy MES w modelach odkształcalnych kompletnego wagonu i toru w zakresie statyki i dynamiki. Maksymalne naprężenia zredukowane wg hipotezy HMH w wariancie analizy kompletnego wagonu z naczepą o masie 36 ton osiągają maksymalną wartość 306 MPa (rys. 9 c). Dotyczy to tylko niewielkich obszarów połączeń części nadwózkowej z platformą ładunkową, a więc zaproponowana konstrukcja wagonu może bezpiecznie pracować. Spełniono także inne założenia konstrukcyjne.

4. Wybrane problemy zastosowania systemu intermodalnego na bazie wagonu specjalnego – podsumowanie

W pracy omówiono także niektóre aspekty projektu konstrukcyjnego wagonu do przewozu naczep samochodów ciężarowych, dostosowanego do obecnego stanu istniejącej infrastruktury kolejowej w Polsce. Zasadniczym problemem do rozwiązania były ograniczenia przestrzeni roboczej, którą mógł zająć wagon z załadowaną na niego naczepą. Przy użyciu nowoczesnych metod projektowania, wykorzystując opracowaną przez zespół KMIIS WAT metodykę badań, w której zastosowano zaawansowane analizy numeryczne, testy stanowiskowe oraz materiały o wysokiej wytrzymałości, zaprojektowano wagon, uzyskując wymaganą wytrzymałość i spełnienie przyjętych założeń technicznych. Wagon kolejowy do przewozów intermodalnych, zaproponowany w Wojskowej Akademii Technicznej, wyposażony jest w obniżoną obrotową platformę ładunkową, która z powrotem może współpracować z typowymi peronami przeładunkowymi (po wzmocnieniu nawierzchni skrajni peronu). Przyjęto, że największe obciążenia konstrukcji pochodzące od ciężaru ładunku, obciążeń własnych i sił generowanych podczas ruchu wagonu będą dystrybuowane poprzez specjalne zamki burtowe na boczną część obrotowej platformy spinającej w konfiguracji transportowej (podczas jazdy) części nadwózkowej wagonu.

Zaproponowana konstrukcja nie wymaga podczas czynności przeładunkowych wykorzystania specjalnych zewnętrznych urządzeń podnoszących, wchodzących w skład infrastruktury terminalu przeładunkowego. W opracowanej konstrukcji zastosowano obracaną platformę ładunkową wagonu, po której zestaw drogowy może wjechać z naczepą na wagon. Rozwiązanie takie umożliwia załadunek i rozładunek naczepy, na terminalach przeładunkowych, gdzie wokół torów jest specjalnie przygotowany peron o odpowiednio utwardzonych krawężniach. Po obrotowej platformie ciągnik siodłowy z naczepą może wjechać na wagon prosto z peronu przylegającego do torów. Dodatkową zaletą jest możliwość dokonywania czynności załadunkowych z dwóch stron wagonu. Zaletą jest również możliwość dokonywania rozładunku z każdego wagonu niezależnie od siebie. Takiej możliwości nie oferuje często stosowana w Europie technologia ruchomej drogi, przy użyciu której załadunek i rozładunek odbywa się według metody FIFO; pierwszy załadowany zestaw opuszcza skład pociągu również jako pierwszy [13, 14]. Opracowano projekt konstrukcyjny rampy peronu przystosowanego do

przeprowadzenia operacji załadowczo-wyładowczych naczep samochodów ciężarowych na prototypowy wagon z obrotową platformą ładunkową lub skład kolejowy zestawiony z większej liczby takich wagonów [15].

Skład pociągu złożony z wagonów wykonanych według innowacyjnej technologii posiada prostą konstrukcję i celowo w trakcie opracowywania uwzględniano istniejące zaplecze infrastruktury kolejowej PKP. Tak rozumiany system intermodalny może wykazywać dużą mobilność. Kolejność ładowania i rozładowywania wagonów nie ma tu dużego znaczenia. Czas załadunku jest zminimalizowany do kilku minut. Jest to proste rozwiązanie, które może być obsługiwane bezpośrednio przez przeszkolonych kierowców i praktycznie eliminuje ryzyko uszkodzenia platformy oraz ciągnika siodłowego lub naczepy.

Rozwiązanie takie pozwala na skrócenie czasu przeładunku oraz obniżenie kosztów bezpośrednich działania terminalu przeładunkowego. Dzięki zastosowaniu standardowych wózków Y25 proponowane rozwiązanie pozbawione jest wad przyspieszonego zużywania się kół wózków jezdnych [3, 13, 14], systemu ruchomej drogi oraz nie wymaga skomplikowanych terminalowych rozwiązań przeładunkowych stosowanych w systemie Modalohr [2, 13, 14]. Istotną zaletą proponowanego rozwiązania jest możliwość zlecenia produkowania taboru kolejowego przez krajowe przedsiębiorstwa produkcyjne. Zaproponowane rozwiązanie może mieć wpływ również na: przyspieszenie tranzytu samochodów ciężarowych, zmniejszenie szkodliwości oddziaływania na środowisko naturalne, zmniejszenie stopnia zniszczenia dróg publicznych przez przejazdy ciężkich samochodów, zwiększenie zdolności jednorazowego pokonywania długich dystansów, co ma szczególne znaczenie przy przewożeniu towarów o dużych masach, zmniejszenie ruchu na drogach, a więc zwiększenie bezpieczeństwa dróg publicznych, skrócenie czasu dostawy towaru do odbiorcy, między innymi dzięki mniejszej wrażliwości transportu kolejowego na niekorzystne warunki pogodowe (zwłaszcza w okresie zimy), eliminację postoju samochodów ciężarowych na przejściach granicznych, a także obniżenie kosztów przejazdu samochodów ciężarowych.


Ważnym zadaniem etapu wdrożenia produkcyjnego zaproponowanego wagonu, a zarazem niezbędnym do zastosowania innowacyjnego wagonu w praktyce jest zbudowanie krótkiej serii prototypowej zaproponowanego obiektu. Zbudowanie rzeczywistej konstrukcji umożliwi weryfikację zastosowanych rozwiązań i sprawdzenie funkcjonalności wagonu w praktyce. Zbudowanie prototypu umożliwi dopracowanie dokumentacji produkcyjnej koniecznej do wykonania serii próbnej wagonów oraz pozwoli na wykonanie niezbędnych badań eksperymentalnych i eksploatacyjnych, przewidzianych w normach krajowych i regulacjach branżowych.

Literatura

- [1] KWAŚNIEWSKI S., NOWAKOWSKI T., ZAJĄC M.: *Transport intermodalny w sieciach logistycznych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2008.
- [2] www.modalohr.com/pl.htm, 15.08.2012.
- [3] www.tabor.com.pl, 15.08.2012.

- [4] Zespół KMiIS WAT: A railway wagon with a rotatable loading floor. European patent, EP10461528.1, 2013.
- [5] Zespół KMiIS WAT: Mechanizm obrotu i blokowania platformy nadwozia wagonu kolejowego zwłaszcza do transportu kombinowanego. Krajowe zgłoszenie patentowe P.395135, 2011.
- [6] Zespół KMiIS WAT: A railway wagon and a mechanism for rotating and blocking a loading floor of a railway wagon for combined transportation. European Patent Application, EP12170915, 2012.
- [7] NIEZGODA T., KRASOŃ W., BARNAT W., SŁAWIŃSKI G.: *Badania numeryczne rozwiązań prototypowych mechanizmu obrotu platformy wagonu kolejowego do przewozu naczep typu TIR*. „Problemy Kolejnictwa, Instytut Kolejnictwa”, Zeszyt 153, Warszawa 2011, s. 137–146.
- [8] KRASOŃ W., NIEZGODA T., DAMAZIAK K.: *FEM driver design process of innovative intermodal truck – rail solution*. International Conference on Road and Rail Infrastructure – CETRA, Croatia 2012, s. 709–715.
- [9] NIEZGODA T., KRASOŃ W., STANKIEWICZ M.: *Simulations of Motion of Prototype Railway Wagon with Rotatable Loading Floor Carried Out in MSC Adams Software*. „Journal of KONES Powertrain and Transport”, Vol. 19, No. 4, 2012.
- [10] Polska Norma PN-EN 12663: Wymagania konstrukcyjno-wytrzymałościowe dotyczące pudeł kolejowych pojazdów szynowych. 2002.
- [11] Polska Norma PN-70/K-02056: Tabor kolejowy normalnotorowy – Skrajnie statyczne.
- [12] Polska Norma PN-EN 13232: Kolejnictwo – Tor – Rozjazdy i skrzyżowania. 2004.
- [13] MARKUSIK S.: *Infrastruktura Logistyczna w Transporcie. Tom II. Infrastruktura Punktowa – magazyny, centra logistyczne i dystrybucji, terminale kontenerowe*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2010.
- [14] STOKŁOSA J.: *Transport intermodalny. Technologia i organizacja*. Wydawnictwo Naukowe Wyższej Szkoły Ekonomii i Innowacji, Lublin 2011.
- [15] Zespół KMiIS WAT, Sprawozdanie z pracy badawczej NCBiR, Innowacyjna technologia kolejowego transportu samochodów ciężarowych typu TIR. Opracowanie WAT, 2012.

Praca finansowana przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju. Prezentowane rozwiązania konstrukcyjne chronione są patentami krajowymi i europejskimi.

 dr inż. Wiesław Krasoń, prof. dr hab. inż. Tadeusz Niezgoda –
Wojskowa Akademia Techniczna im. Jarosława Dąbrowskiego

artykuł recenzowany