

dr inż. Paweł Kuligowski
mgr inż. Marcin Kruś
Instytut Pojazdów Szynowych „TABOR”

Lekkie struktury konstrukcyjne w budowie ustroju nośnego pojazdu szynowego

Zwiększone wymagania przewozów kolejowych, zarówno w zakresie ilości jak i prędkości, zmuszają do stosowania pojazdów szynowych o coraz lżejszych rozwiązaniach konstrukcyjnych. Zastosowanie lekkich, a jednocześnie wysokowytrzymałych struktur wielowarstwowych z całą pewnością ułatwi realizację powyższego zadania. W pracy przedstawiono, na przykładzie wagonu osobowego, koncepcje budowy ustroju nośnego pojazdu szynowego polegające na zastąpieniu klasycznej konstrukcji szkieletowej, rozwiązaniami wykorzystującymi aluminiowe trójwarstwowe elementy powierzchniowe z rdzeniem wykonanym z pofalowanej blachy. Ocena możliwości zastosowania takich konstrukcji musi być poprzedzona niezbędnymi analizami sztywności i wytrzymałości, które przeprowadzono metodą elementów skończonych. Wyniki obliczeń dla rozważanych koncepcji porównano z rezultatami dla wersji szkieletowej i na tej podstawie przedstawiono wstępną ocenę ich przydatności do zastosowania. Praca powstała w ramach realizacji projektu rozwojowego Nr 10 0047 06: „Konstrukcja pojazdu szynowego z zastosowaniem najnowszych lekkich materiałów o wysokich parametrach wytrzymałościowych i o minimalnym oddziaływaniu na środowisko naturalne”.

1. Wprowadzenie

Obniżenie masy własnej środków transportu jest jednym z podstawowych wymagań stawianych nowoczesnie zorganizowanym przewozom, w tym także kolejowym. Jedną z możliwości jest wykorzystanie w konstrukcjach nośnych pojazdów lekkich np. aluminiowych, a jednocześnie wysokowytrzymałych elementów powierzchniowych o budowie wielowarstwowej. Najczęściej zbudowane są z gładkich blach, zwanych okładzinami, przedzielonych rdzeniem o

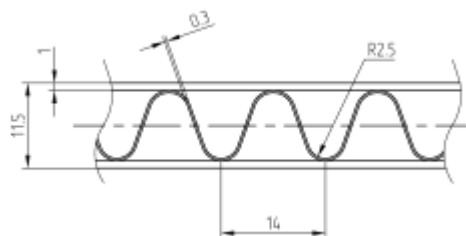
różnorodnej strukturze wykonanej np. ze spienionego tworzywa (sztucznego jak również z piany metalowej), „plastra miodu” lub pofalowanej blachy. Podstawy teorii struktur wielowarstwowych opisano w [1] i [2].

Konstrukcje trójwarstwowe w porównaniu do konwencjonalnych jednorodnych blach posiadają następujące zalety:

- większa sztywność i jednocześnie mniejsza masa,
- możliwość eliminacji dodatkowych wzmocnień i usztywnień,
- mniej pracochłonne wytwarzanie,
- dobra izolacja termiczna,
- dobre tłumienie drgań oraz hałasu.

W ramach prac związanych z realizacją zadań projektu rozwojowego podjęto próby sprawdzenia przydatności do zastosowania, w budowie konstrukcji nośnej pojazdu szynowego, aluminiowych elementów powierzchniowych o strukturze trójwarstwowej, głównie na przykładzie wagonu osobowego.

W pierwszej kolejności konieczne było opracowanie modeli obliczeniowych MES (Metoda Elementów Skończonych) struktur trójwarstwowych z różnym wypełnieniem. Przeprowadzono szereg analiz w celu wyznaczenia podstawowych własności mechanicznych. Weryfikację przygotowanych modeli przeprowadzono porównując wyniki obliczeń z rezultatami badań doświadczalnych rzeczywistych próbek wykonanych na stanowisku badawczym. Rezultaty tych działań omówiono w [3]. Na podstawie uzyskanych wyników wytypowano do dalszych zastosowań elementy powierzchniowe trójwarstwowe z rdzeniem z blachy falistej. Widok ogólny fragmentu takiego elementu oraz przykładowy przekrój poprzeczny przedstawiono na rys. 1.1. Poszczególne elementy wykonane są z blach aluminiowych, a połączenie okładzin z rdzeniem zrealizowane jest za pomocą klejenia.



Rys. 1.1. Widok ogólny trójwarstwowego elementu powierzchniowego z rdzeniem z blachy falistej i jego przekroju poprzecznego

W dalszej kolejności rozważano koncepcje polegające na stopniowym wprowadzaniu elementów trójwarstwowych do dotychczasowych konstrukcji

nośnych szkieletowych. W pierwszym etapie analizowane elementy zastosowano w ścianie bocznej zastępując płaską blachę poszyciową oraz pozostawiając tylko słupki pionowe. W kolejnym kroku dodatkowo zastąpiono całą konstrukcję dachu walcową powłoką trójwarstwową, a wprowadzenie panelu trójwarstwowego zamiast blachy podłogi stanowi ostatni etap rozważań zmian konstrukcji nośnej. Ocena możliwości zastosowania takich konstrukcji musi być poprzedzona niezbędnymi analizami sztywności i wytrzymałości, które przeprowadzono metodą elementów skończonych.

W niniejszym artykule omówiono opracowane modele obliczeniowe MES. Wyniki obliczeń dla rozważanych koncepcji porównano z rezultatami dla klasycznej wersji szkieletowej i na tej podstawie przedstawiono wstępną ocenę ich przydatności do zastosowania.

2. Modelowanie konstrukcji nośnej nadwozia

2.1. Koncepcje rozwiązań konstrukcyjnych

Propozycje koncepcji rozwiązań konstrukcyjnych ustroju nośnego pojazdu szynowego z zastosowaniem lekkich metalowych struktur o podwyższonej nośności opracowano bazując na konstrukcji nadwozia pasażerskiego pojazdu szynowego. Przykładami takiego pojazdu mogą być tradycyjne wagony osobowe przeznaczone do ruchu dalekobieżnego lub człony toczne zespołów trakcyjnych.

Wspomniane konstrukcje, projektowane od wielu lat, mają zazwyczaj klasyczną budowę szkieletową. Podstawę stanowi szkielet, pospawany najczęściej z kształtowników, który pokryty jest poszyciem wykonanym z blachy.

Koncepcje nowych rozwiązań konstrukcyjnych bazują na stopniowym ograniczaniu szkieletu nadwozia z jednoczesnym zastąpieniem blachy poszyciowej metalowymi strukturami trójwarstwowymi.

Rozpatrzono kilka koncepcji rozwiązań konstrukcyjnych różniących się obszarami, w których blachę poszyciową zastąpiono strukturami trójwarstwowymi, a mianowicie:

- I - w ścianach bocznych szkielet ograniczono tylko do słupków pionowych, a płaską blachę poszyciową zastąpiono strukturą trójwarstwową. Pozostała część konstrukcji pozostała bez zmian,
- II - w ścianach bocznych szkielet ograniczono do słupków i pasa dachowego, a płaską blachę poszyciową zastąpiono strukturą trójwarstwową. W części środkowej dachu szkielet i blachę poszyciową zastąpiono strukturą trójwarstwową, tworzącą powłokę walcową. Pozostała część konstrukcji pozostała bez zmian,

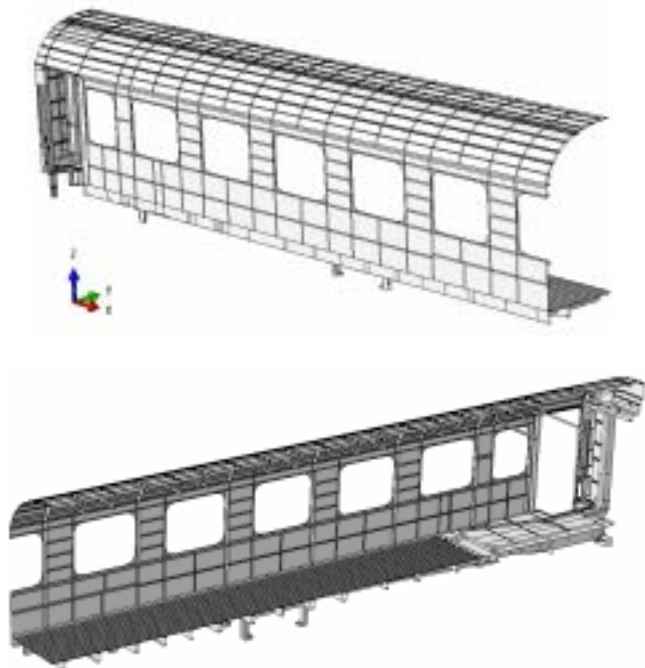
III - zmiany takie jak w koncepcji „II” oraz zastąpienie blachy trapezowej w podłodze strukturą trójwarstwową.

2.2. Modele obliczeniowe

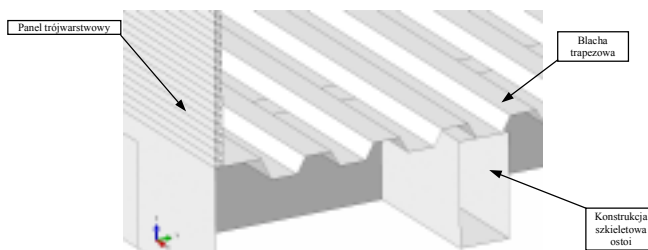
W celu wstępnego określenia przydatności zaproponowanych koncepcji budowy struktur nośnych rozważanych pojazdów szynowych jest niezbędna, oprócz analizy konstrukcyjnej i technologicznej, ocena porównawcza sztywności i wytrzymałości z wynikami dla szkieletowej konstrukcji klasycznej.

Niezbędne analizy sztywności i wytrzymałości wykonano metodą elementów skończonych MES korzystając z systemu ABAQUS.

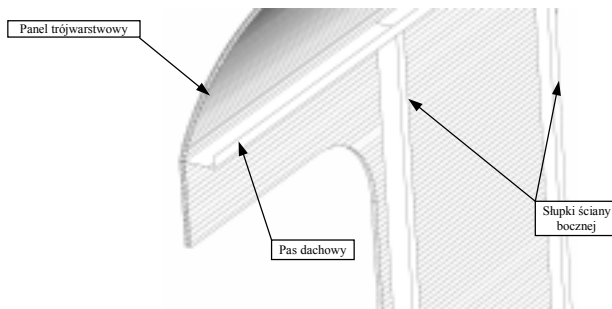
Dla każdej z zaproponowanych koncepcji konstrukcji opracowano model obliczeniowy składający się z elementów powierzchniowych. Ze względu na symetrię geometrii i obciążeń modele obliczeniowe obejmują ćwiartkę konstrukcji wagonu. Na rys. 2.1 przedstawiono ogólny widok modelu obliczeniowego dla konstrukcji szkieletowej. Na rys. 2.2 pokazano fragment modelu ilustrujący wprowadzenie struktury trójwarstwowej w ścianie bocznej, a na rys. 2.3 rejon połączenia ściany bocznej i dachu wykonanego w znacznej części z elementów trójwarstwowych, wzmocnionych jedynie pasem dachowym i słupkami ściany bocznej. Fragment modelu, w którym elementy powierzchniowe trójwarstwowe wprowadzono również w miejsce blachy podłogowej zaprezentowano na rys. 2.4.



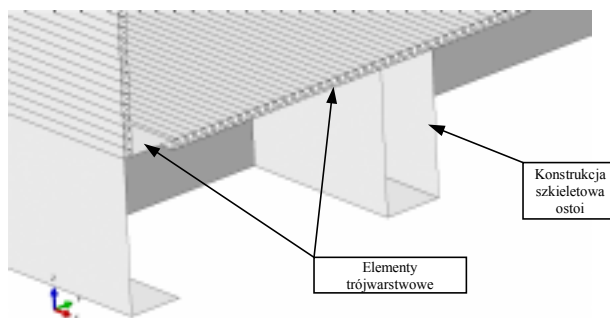
Rys. 2.1. Widok ogólny modelu obliczeniowego konstrukcji szkieletowej wagonu osobowego



Rys. 2.2. Widok fragmentu modelu obliczeniowego połączenia trójwarstwowej ściany bocznej z ostoją (koncepcja I)

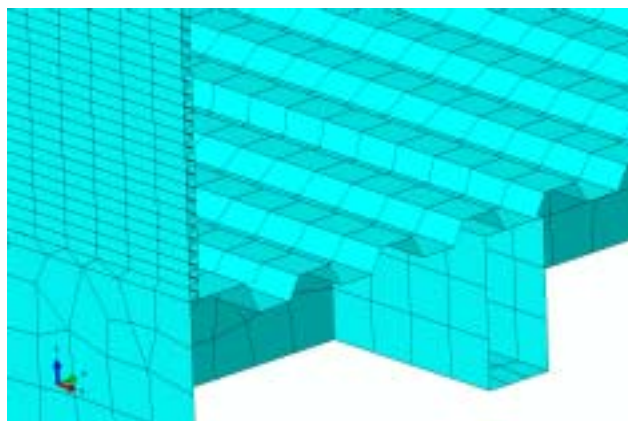


Rys. 2.3. Widok fragmentu modelu obliczeniowego połączenia trójwarstwowej ściany bocznej z dachem (koncepcja II)



Rys. 2.4. Widok fragmentu modelu obliczeniowego z trójwarstwową ścianą bocznią i panelem podłogowym (koncepcja III)

Modele obliczeniowe podzielono na elementy powłokowe typu SHELL. Połączenie blach płaskich i pofalowanej w konstrukcji trójwarstwowej zrealizowano za pomocą połączenia kontaktowego typu „interaction tie”. Przykładowy podział na elementy skończone przedstawiono na rys. 2.5.



Rys. 2.5. Przykładowy podział fragmentu modelu obliczeniowego na elementy skończone

Na podstawie wymagań normy PN-EN 12663-1 [4] określono przypadki obciążeń, dla których należałoby przeprowadzić wstępną analizę sztywności i wytrzymałości konstrukcji. Przyjęto następujące przypadki obciążenia statycznego:

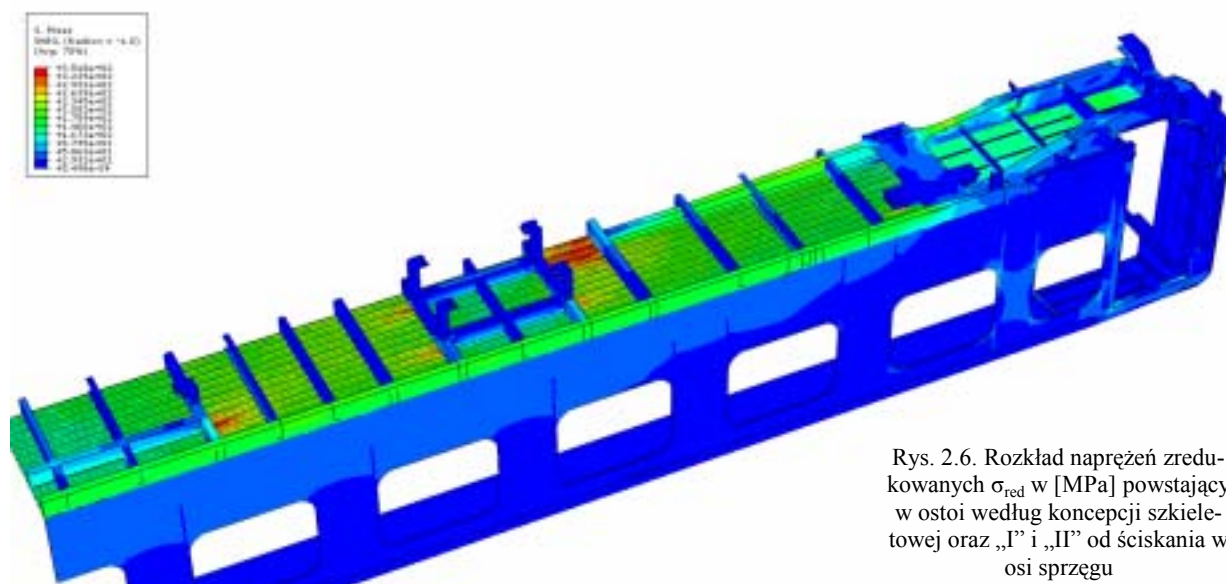
- maksymalne obciążenie pionowe wagonu ciężarem własnym i pasażerów ze współczynnikiem przeciążenia dynamicznego $k=1.3$,
- ściskanie pudła wagonu siłą 2.0 MN w osi zderzaków,
- ściskanie pudła wagonu siłą 2.0 MN w osi sprzęgu,
- rozciąganie pudła wagonu siłą 1.0 MN w osi sprzęgu.

W obliczeniach przyjęto, że masa pudła wagonu wynosi około 35.8 t, natomiast ilość przewożonych pasażerów to 144 osoby (około 11.5 t).

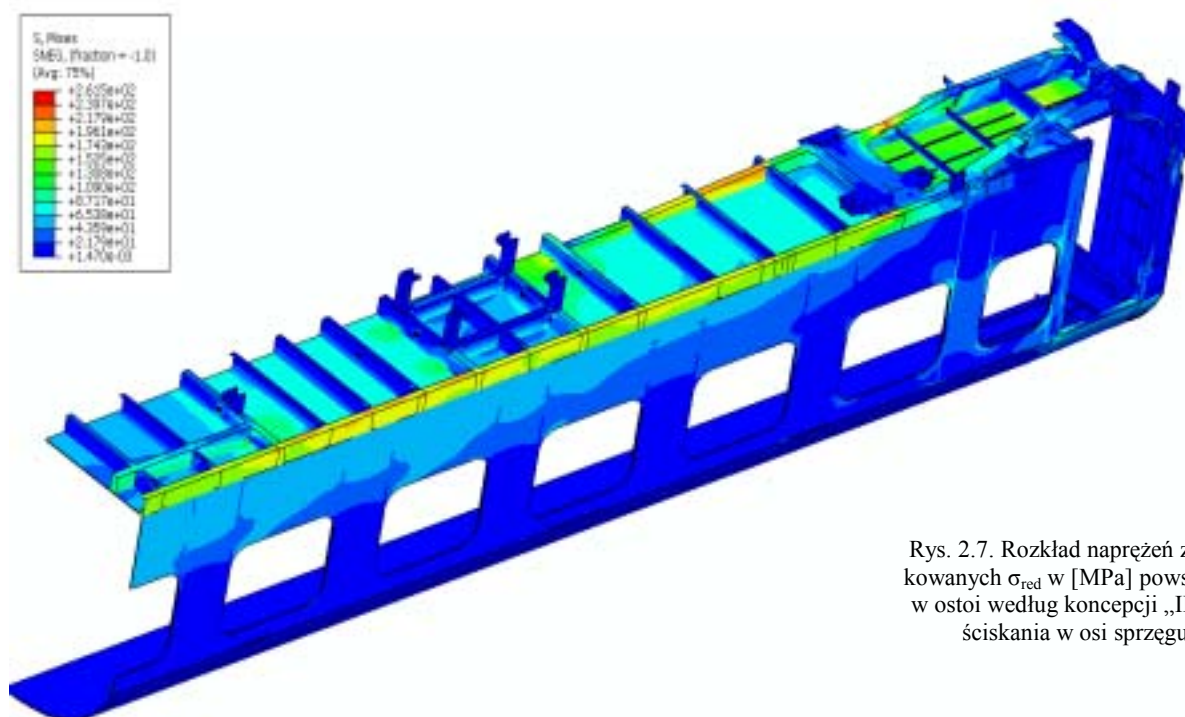
Sposób obciążenia i podparcia dla wszystkich rozpatrywanych modeli jest jednakowy.

2.3. Rezultaty obliczeń

Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że największy poziom naprężeń zredukowanych pojawia się w konstrukcji szkieletowej oraz w koncepcji „I” ze ścianami bocznymi, a także koncepcji „II” ze ścianami bocznymi i dachem o budowie trójwarstwowej, dla przypadku obciążeń wzdłużnych. Wysoki poziom naprężeń, w trapezowej blasze podłogowej, nieprzekraczający wartości dopuszczalnych (maksymalna wartość wynosi $\sigma_{red}= 352$ MPa), ma zdecydowanie charakter lokalny związany z zabudową różnego rodzaju wsporników na ostoi wagonu. Przedstawiono to na rys. 2.6.



Rys. 2.6. Rozkład naprężeń zredukowanych σ_{red} w [MPa] powstający w ostoi według koncepcji szkieletowej oraz „I” i „II” od ściskania w osi sprzęgu



Rys. 2.7. Rozkład naprężeń zredukowanych σ_{red} w [MPa] powstający w ostoi według koncepcji „III” od ściskania w osi sprzęgu

W przypadku koncepcji „III”, w której jednocześnie ściany boczne, dach i podłoga są wykonane z elementów powierzchniowych o budowie trójwarstwowej zmienił się rozplływ sił wewnętrznych. Spowodowane jest to głównie zastąpieniem trapezowej blachy podłogowej płytą trójwarstwową. Z przeprowadzonych analiz wynika, że wówczas siły wzdłużne przenoszone są w większym stopniu przez ostojnice niż blachę podłogową, powodując spadek naprężeń w podłodze przy jednoczesnym wzroście na ostojnicach. W przypadku ściskania w osi sprzęgu wymieniony wyżej poziom naprężeń w blasze podłogowej zmniejsza się do wartości około $\sigma_{red}=200$ MPa, przy wzroście w ostojnicy do wartości około $\sigma_{red}=240$ MPa, co ilustruje rys. 2.7. Jednak w przypadku ściskania w osi zderzaków dla modelu z podłogą trójwarstwową, w części skrajnej ostoi, pojawiają się naprężenia o wartości większej niż dopuszczalne. Sugeruje to, że w przypadku przyjęcia takiej koncepcji rozwiązania konstrukcji należałoby wprowadzić dodatkowe zmiany konstrukcyjne w tej części ostoi.

Dla przypadku obciążenia pionowego największy poziom naprężeń, bez względu na rozważaną koncepcję konstrukcji nośnej, pojawia się w ścianie bocznej w rejonie dolnych naroży okiennych. Przykładowy rozkład przedstawiono na rys. 2.8. Wartości wahają się w przedziale od $\sigma_{red}=138$ MPa do $\sigma_{red}=161$ MPa. Z powyższego wynika, że zmiany konstrukcji ściany bocznej, poprzez wprowadzenie struktur trójwarstwowych, nie zmieniają znacząco poziomu naprężeń.

Zmiany proponowane w kolejnych koncepcjach rozwiązań konstrukcyjnych przyczyniają się równocześnie do obniżenia masy konstrukcji nośnej pudła wagonu osobowego. Poniżej zestawiono uzyskane wartości mas i przewidywane obniżenie procentowe

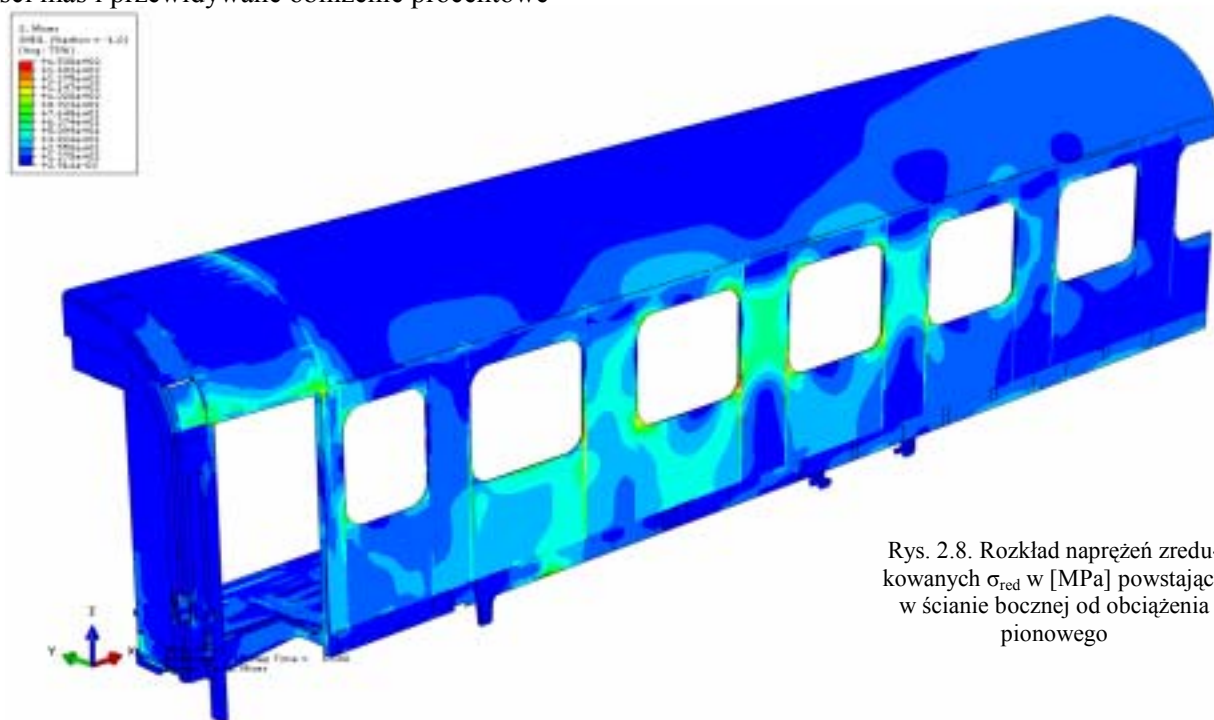
(wartości wyznaczone na podstawie modelu obliczeniowego):

- 1) konstrukcja szkieletowa: ~9990 kg,
- 2) koncepcja „I” - struktura trójwarstwowa w ścianie bocznej: ~9175 kg; obniżenie masy: ~8.2 %,
- 3) koncepcja „II” - struktura trójwarstwowa w ścianie bocznej i dachu: ~8400 kg; obniżenie masy: ~15.9 %,
- 4) koncepcja „III” - struktura trójwarstwowa w ścianie bocznej, dachu i podłodze: ~8318 kg; obniżenie masy: ~16.7 %.

Z przedstawionych rezultatów wynika, że znaczący wpływ na masę konstrukcji mają zmiany wprowadzone w ścianie bocznej i dachu (po około 8 % każdy). Najmniejsza zmiana masy pojawia się po wprowadzeniu struktury trójwarstwowej zamiast blachy trapezowej w podłodze (nie przekracza 1 %).

3. Podsumowanie

Z przeprowadzonych wstępnych analiz porównawczych wynika, że proponowane koncepcje rozwiązań konstrukcyjnych budowy ustrojów nośnych wagonów osobowych z uwzględnieniem elementów powierzchniowych o strukturze trójwarstwowej z rdzeniem z blachy pofalowanej, gwarantują wystarczającą sztywność i wytrzymałość na przeniesienie podstawowych obciążeń według wymagań normy [4]. Zaletą proponowanych zmian jest, przy zapewnieniu odpowiedniej wytrzymałości, obniżenie masy konstrukcji nośnej pudła wagonu (około 16 %) Gwarantuje to zmniejszenie oddziaływania na środowisko naturalne przy tych samych możliwościach przewozowych.



Rys. 2.8. Rozkład naprężeń zredukowanych σ_{red} w [MPa] powstający w ścianie bocznej od obciążenia pionowego

Literatura

- [1] Allen H.G., *Analysis and design of structural sandwich panels*. Oxford, London, Edinburgh, New York, Toronto, Sydney, Paris, Braunschweig, Pergamon Press 1969.
- [2] Plantema F.J., *Sandwich construction*. New York, London, Sydney, John Wiley&Sons 1966.
- [3] *Modelowanie własności mechanicznych wybranych ultralekkich struktur wielowarstwowych wykonanych z aluminium i wysokowytrzymałych tworzyw sztucznych dla budowy nadwozi i ram wózków pojazdów szynowych*, Instytut Pojazdów Szynowych „TABOR”-Poznań, Poznań, 2010, OR-9913 (niepublikowane).
- [4] PN-EN 12663-1:2010 Kolejnictwo – Wymagania konstrukcyjno-wytrzymałościowe dotyczące pudeł kolejowych pojazdów szynowych – Część 1: Lokomotywy i tabor pasażerski (i metoda alternatywna dla wagonów towarowych).