

**prof. dr hab. inż. Janusz Mielniczuk**  
Politechnika Poznańska  
Instytut Pojazdów Szynowych „TABOR”  
**mgr inż. Paweł Kuligowski**  
Instytut Pojazdów Szynowych „TABOR”

## **Analiza wytrzymałości konstrukcji pudła wagonu osobowego całkowicie wykonanego z materiału porowatego**

*W artykule omówiono konstrukcję nośną wagonu osobowego, w której klasyczną strukturę szkieletową zastąpiono elementami powierzchniowymi o budowie porowatej. Zaprezentowano wyniki analiz wytrzymałości proponowanych rozwiązań oraz porównanie ich z rezultatami dla konstrukcji klasycznej. Artykuł składa się z dwóch części. W pierwszej części [1] oceniono wytrzymałość konstrukcji wagonu osobowego z dachem wykonanym z elementów powierzchniowych o strukturze porowatej, a w drugiej części artykułu (2) omówiono możliwości rozszerzenia zastosowań takich elementów do budowy ścian bocznych wagonu.*

*Praca powstała w ramach projektu badawczego nr N509 014 32/099 pt. „Elementy powierzchniowe z materiału porowatego w budowie pojazdów szynowych” finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego ze środków na naukę w latach 2007÷2008*

### **1. Wprowadzenie**

Praca stanowi kontynuację wcześniej podjętych i opublikowanych badań [1]. Tematyką ich są rozważania dotyczące możliwości zastosowania metalowych materiałów porowatych w budowie wagonów osobowych. Podstawową zaletą takiego przedsięwzięcia jest uzyskanie lżejszej konstrukcji nośnej. Ponadto metalowe struktury porowate posiadają między innymi bardzo dobre właściwości izolacji cieplnej, tłumienia hałasu oraz niepalności, co znacznie obniża koszty wytworzenia i poprawia własności eksploatacyjne.

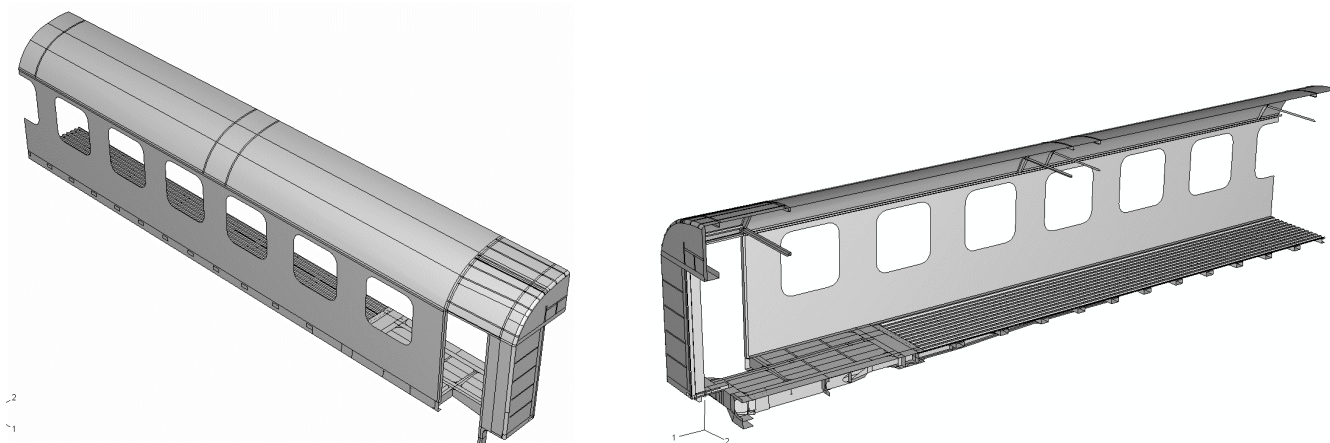
W [1] przedstawiono rezultaty analizy wytrzymałości konstrukcji nośnej wagonu osobowego, w którym strukturę dachu wykonano z elementów powierzchniowych o budowie porowatej. Z przeprowadzonej analizy wynika, że zastąpienie szkieletowej konstrukcji dachu wagonu osobowego porowatą powłoką walcową jest w pełni możliwe, pod warunkiem zachowania fragmentu szkieletu dachu w postaci zestawów krokwi wraz ze ściągami. Szczątkowy szkielet zapewnia z jednej strony spełnienie wymagań wytrzymałościowych wynikających z przepisów kolejowych, a z drugiej umożliwia zrealizowanie zamierzeń projektowych w zakresie mocowania do dachu urządzeń niezbędnych do prawidłowego funkcjonowania wagonu. Proponowane rozwiązania znacznie obniżają masę konstrukcji nośnej. W zależności od parametrów struktury porowatej określanej przez grubość oraz współczynnik porowatości można uzyskać ponad dwukrotne obniżenie masy dachu.

W celu pełnego wykorzystania zalet omawianych materiałów w odniesieniu do zastosowań w budowie pojazdów szynowych zaproponowano wprowadzenie w ścianie bocznej, w miejsce dotychczas stosowanej konstrukcji szkieletowej, płaskich elementów powierzchniowych o strukturze porowatej.

Analizie wytrzymałości poddano całą konstrukcję nośną pudła wagonu, w której przyjęto, że dach posiada budowę opartą na walcowych elementach powierzchniowych o strukturze porowatej taką jak ostatecznie przyjęto w [1], a w ścianie bocznej pomiędzy drzwiami wejściowymi zastosowano płyty o analogicznej strukturze. Dla celów porównawczych rozpatrzono również zachowanie dotychczasowego szkieletowego rozwiązania pudła wagonu.

### **2. Obciążenia, modele obliczeniowe i omówienie wyników analiz**

Konstrukcję wagonu poddano analogicznie jak w [1] podstawowym obciążeniom wymagany w przepisach ustalonych przez międzynarodowe organizacje kolejowe (UIC, ERRI) oraz w normach europejskich. Należą do nich przede wszystkim obciążenia pionowe pochodzące od masy własnej oraz pasażerów, a także obciążenia wzdłużne wynikające ze ściskania wagonu w osi zderzaków i sprzęgu oraz rozciągania w osi sprzęgu. Bardzo ważnym obciążeniem dla konstrukcji wagonu jest masa śniegu zalegającego na jego dachu.



Rys. 1. Model ¼ wagonu osobowego z porowatą powłoką na ścianie bocznej

Przyjęto tak jak w [1] następujące obciążenia: ściskanie w osi zderzaków 2,0 MN, rozciąganie w osi sprzęgu 1,5 MN oraz obciążenie śniegiem około 2 kN/m<sup>2</sup>. Masę własną pudła przyjęto około 41 t, a masę pasażerów około 4,6 t.

Obliczenia wytrzymałości konstrukcji pudła wagonu konieczne do przeprowadzenia analiz wykonano metodą elementów skończonych (MES) przy pomocy systemu obliczeniowego ABAQUS. Wykorzystując istniejącą w rzeczywistości symetrię konstrukcji pudła rozpatrzono model obejmujący tylko ¼ wagonu, który przedstawiono na rys. 1. Do modelowania zastosowano przede wszystkim element powłokowy S8R, przy czym dla konstrukcji szkieletowej przyjęto jednorodny przekrój powłokowy, a dla powłoki walcowej wielowarstwowy (złożony) przekrój powłokowy.

Własności materiałowe powłoki, zmienne na grubości przekroju poprzecznego, zostały zamodelowane w identyczny sposób jak w [1] za pomocą szeregu warstw o stałej grubości oraz o stałych wskaźnikach mechanicznych. W [1] omówiono również zmianę własności mechanicznych poszczególnych warstw.

Badania wytrzymałości tak zamodelowanej konstrukcji nośnej wagonu osobowego przeprowadzono dla dwóch grubości poszycia porowatego tj. 5 i 11 mm, wprowadzonego zarówno na dachu jak i ścianie bocznej oraz dwóch współczynników porowatości:  $e_0=0,45$  oraz  $e_0=0,90$ .

Przyjęto następujące dane materiałowe: elementy szkieletu i klasyczne poszycie jak dla stali ( $E=2,05 \cdot 10^5$  MPa,  $\nu=0,3$ ), a powłoka porowata jak dla aluminium ( $E_1=0,7 \cdot 10^5$  MPa,  $\nu=0,3$ ).

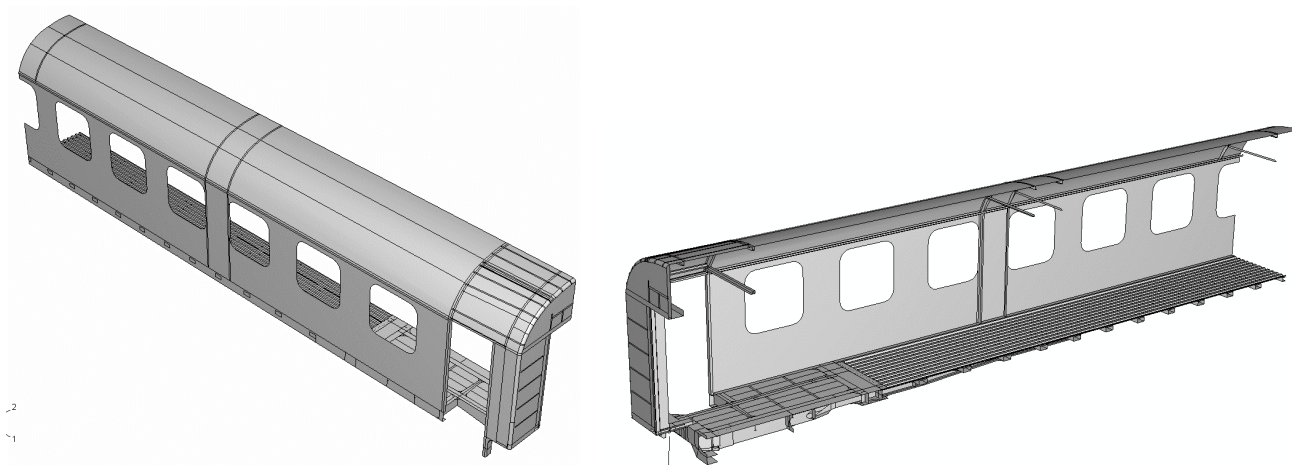
W pierwszej kolejności przeprowadzono obliczenia dla modelu pudła (rys. 1), w którym na dachu i ścianie bocznej przyjęto porowate poszycie o grubości 5 mm, przy czym w konstrukcji dachu występuje fragment szkieletu omówiony w [1]. Szczególną uwagę poświęcono zmianom wysokości i szerokości pudła

wagonu oraz ugięcia osto. Z obliczeń wynika, że poszerzenie pudła w środku długości wagonu na wysokości pasa dachowego, a spowodowane obciążeniem pionowym pochodzącym od masy własnej oraz pasażerów i obciążenia śniegiem zalegającym na dachu, jest znacznie większe niż dla konstrukcji szkieletowej i w przypadku obciążenia pionowego dla porowatości  $e_0=0,90$  przekracza 2,8 razy i wynosi około 13,5 mm. Podobnie zmiana wysokości pudła w przekroju przechodzącym przez czop skrzytu w przypadku obciążenia śniegiem dla porowatości  $e_0=0,90$  jest ponad 2,7 razy większa niż dla rozwiązania klasycznego. Tak znaczny wzrost, a zwłaszcza szerokości pudła na wysokości pasa dachowego stanowi zagrożenie z punktu widzenia spełnienia wymagań odnośnie wpisywania się w zarys skrajni kinematycznej według przepisów UIC.

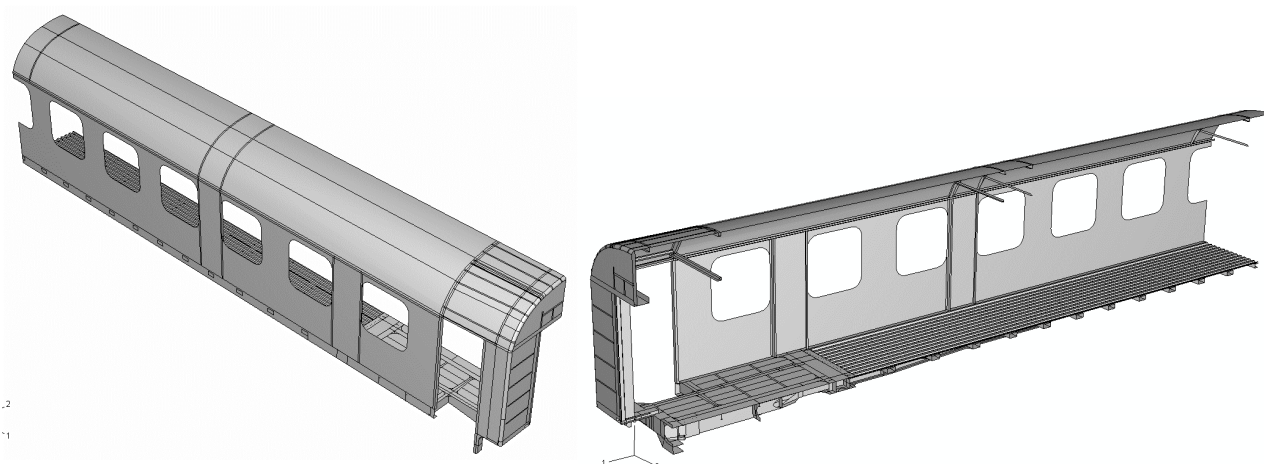
Wobec powyższego zaproponowano dwa rozwiązania problemu.

Jednym z nich jest zastosowanie grubszej powłoki porowatej zarówno na dachu jak i na ścianie bocznej np. o grubości 11 mm. Z powtórnych obliczeń z uwzględnieniem grubszej powłoki wynika, że poszerzenie pudła znacznie zmniejszyło się i przyjmuje wartości na poziomie odpowiadającym konstrukcji szkieletowej. Wadą takiego rozwiązania jest jednak zwiększenie masy konstrukcji pudła, które w przypadku współczynnika porowatości  $e_0=0,45$  przekracza masę rozwiązania klasycznego.

Drugim rozwiązaniem problemu nadmiernego poszerzenia pudła jest wprowadzenie w ścianie bocznej pod krokiewiami dachowymi dwóch zestawów słupków po dwa słupki w każdym zestawie. Wówczas model obliczeniowy przyjmuje budowę pokazaną na rys. 2.



Rys. 2. Model  $\frac{1}{4}$  wagonu osobowego z porowatą powłoką na ścianie bocznej i zestawem słupków pod krokiewmi w  $\frac{1}{4}$  długości ściany bocznej



Rys. 3. Model  $\frac{1}{4}$  wagonu osobowego z porowatą powłoką na ścianie bocznej i zestawem słupków pod krokiewmi w  $\frac{1}{4}$  długości ściany bocznej i nad belką skrętową

Z obliczeń przeprowadzonych dla takiego modelu wynika, że znaczne polepszenie wyników w zakresie poszerzenia pułda wagonu uzyskuje się dla obciążenia śniegiem. W przypadku obciążenia pionowego poprawa jest niewielka. Dążąc do polepszenia sytuacji zaproponowano wprowadzenie w ścianie bocznej jeszcze dwóch podobnych zestawów słupków w rejonie nad belką skrętową. Tak przygotowany model przedstawiono na rys. 3. Obliczenia wykazały, że tym razem wpływ na zmniejszenie poszerzenia pułda jest odwrotny tzn. jest większy dla obciążenia pionowego. Jednak wartości poszerzeń w obu modelach są mimo wprowadzonych zmian konstrukcyjnych większe niż dla konstrukcji klasycznej. W celu uzyskania pełnego obrazu zachowania się konstrukcji nośnej pułda wagonu osobowego wykonanego z porowatych elemen-

tów powierzchniowych przeprowadzono kolejne analizy, w których zróżnicowano grubości powłok na dachu i ścianie bocznej. Przyjęto grubość powłoki na dachu 5 mm, a na ścianie bocznej 11 mm. Z obliczeń wynika, że zachowanie konstrukcji nośnej pułda jest bardziej zbliżone do wersji, w której wszystkie powłoki miały grubość 11 mm.

Wszystkie wyniki uzyskane w przeprowadzonych obliczeniach zestawiono w postaci wykresów na rys. 4÷7. Przedstawiają one zmiany wysokości pułda w przekrojach przechodzących przez kolejno: czop skrzętu, krokiew w  $\frac{1}{4}$  długości i środek wagonu oraz poszerzenie pułda i ugięcie ostoi. Wynikają z nich istotne informacje na temat poszczególnych sztywności pułda, a mianowicie:

– szywność poprzeczna

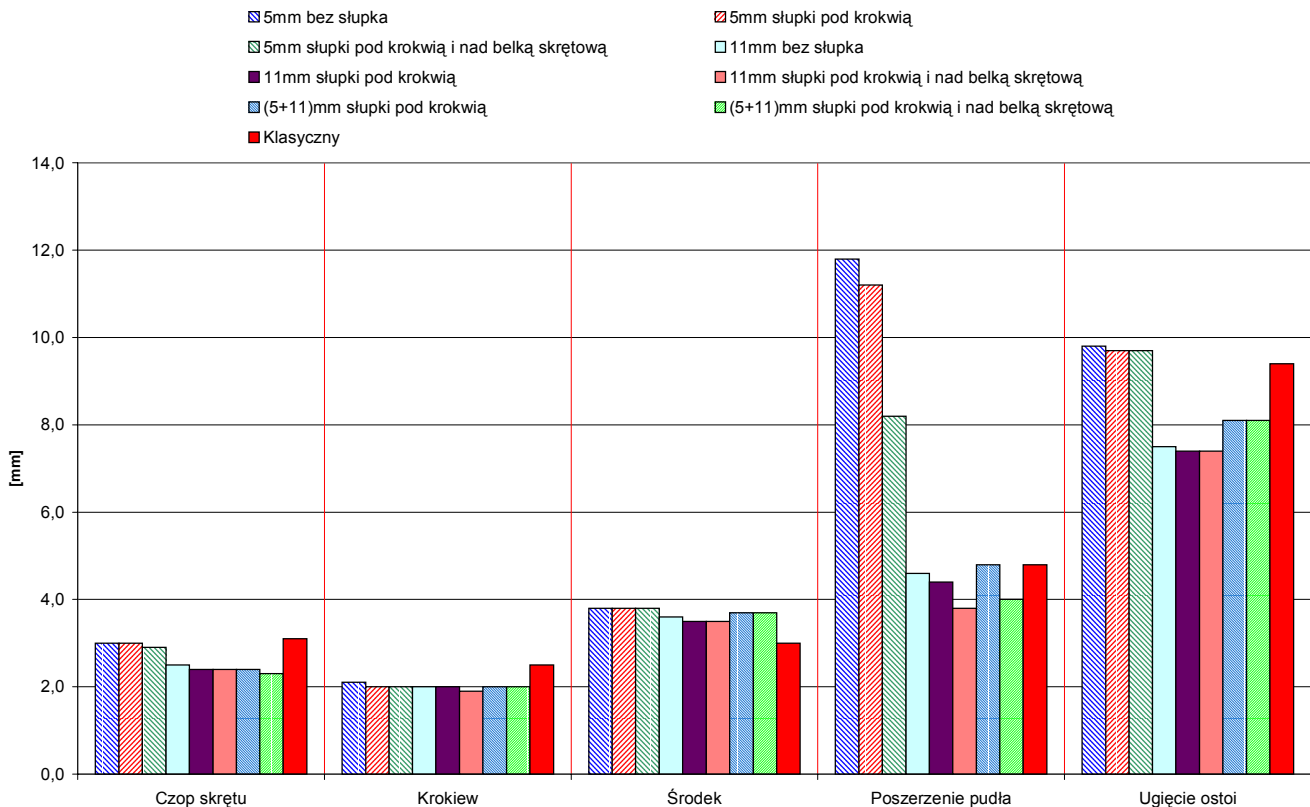
Miarą sztywności poprzecznej jest poszerzenie pudła wagonu mierzone na wysokości pasa dachowego. Z obliczeń wynika, że poszerzenia pudła wagonu w przypadku konstrukcji dachu i ściany bocznej wykonanej z powłoki porowatej o grubości 5 mm są większe niż dla konstrukcji klasycznej, przy czym w przypadku obciążenia pionowego te różnice są większe. W przypadku obciążenia pochodzącego od zalegającego śniegu, zwłaszcza dla rozwiązania konstrukcyjnego z dodatkowymi słupkami w ścianie bocznej, poszerzenia pudła są tylko nieznacznie większe niż w konstrukcji szkieletowej. Dla porowatości  $e_0=0,90$  różnica ta nie przekracza 30 %. Dla rozwiązań z powłoką o grubości 11 mm oraz kombinacją grubości 5 mm na dachu i 11 mm na ścianie bocznej, wielkość poszerzenia pudła oscyluje wokół wartości dla konstrukcji klasycznej, a niejednokrotnie jest mniejsza.

– szywność pionowa

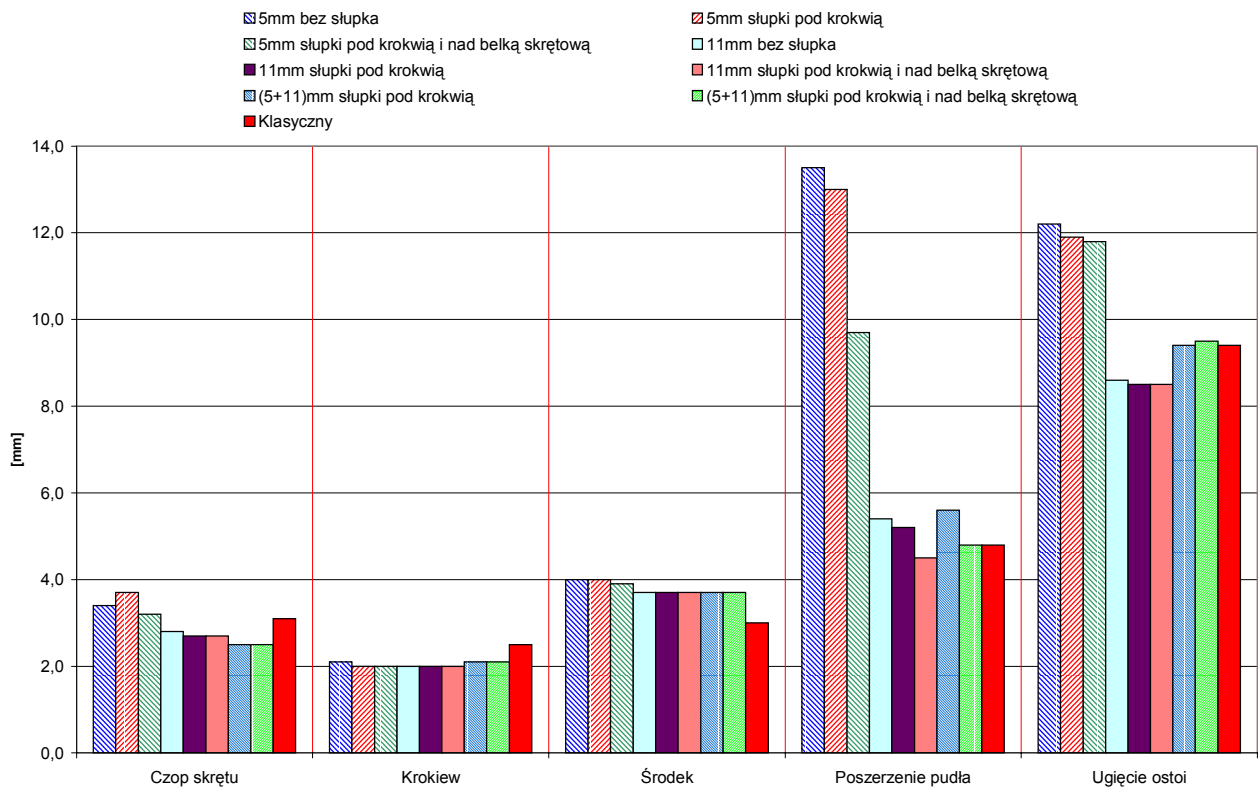
Miarą sztywności pionowej jest zmiana wysokości pudła mierzona odległością między ostoją a dachem. Z obliczeń wynika, że zmiany wysokości dla danej grubości powłoki są praktycznie niezależne od przyjętych rozwiązań

konstrukcyjnych ściany bocznej (bez lub z zestawami słupków). Dotyczy to zarówno obciążenia masą własną oraz pasażerami jak i obciążenia śniegiem, przy czym w przypadku obciążeń pionowych wielkość zmian wysokości kształtuje się na poziomie zbliżonym do występujących w konstrukcji klasycznej. W przypadku obciążenia śniegiem zmiany wysokości pudła w miejscach podparcia na krokwiach również różnią się niewiele od klasycznej, natomiast w rejonach nie podpartych (np. w czopie skrzętu) zmiany wysokości dla poszczególnych rozwiązań konstrukcyjnych są większe niż dla klasycznej, nawet w przypadku porowatości  $e_0=0,90$  ponad 2,7 razy.

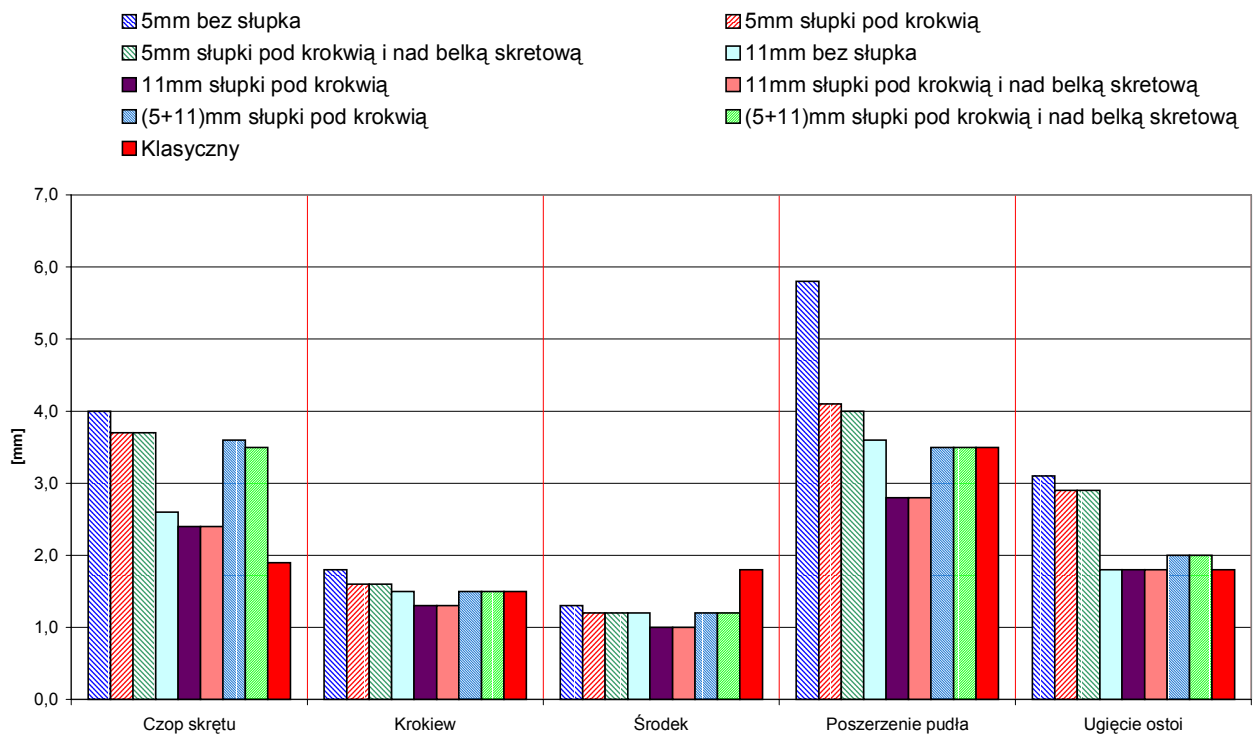
Zmiany ugięcia ostoi w środku długości wagonu zachowują się bardzo podobnie do poszerzeń pudła. Dla rozwiązań z powłoką o grubości 11 mm oraz kombinacją grubości 5 mm na dachu i 11 mm na ścianie bocznej, wielkość ugięcia ostoi pudła nie wiele różni się od wartości dla konstrukcji klasycznej. Jednak w przypadku powłoki o grubości 5 mm na całej konstrukcji pudła, zwłaszcza dla obciążenia śniegiem jest większa. Maksymalnie przekracza 2,4 razy dla współczynnika porowatości  $e_0=0,90$ .



Rys. 4. Zmiany wysokości i szerokości pudła oraz ugięcia ostoi dla obciążenia pionowego przy porowatości  $e_0=0,45$

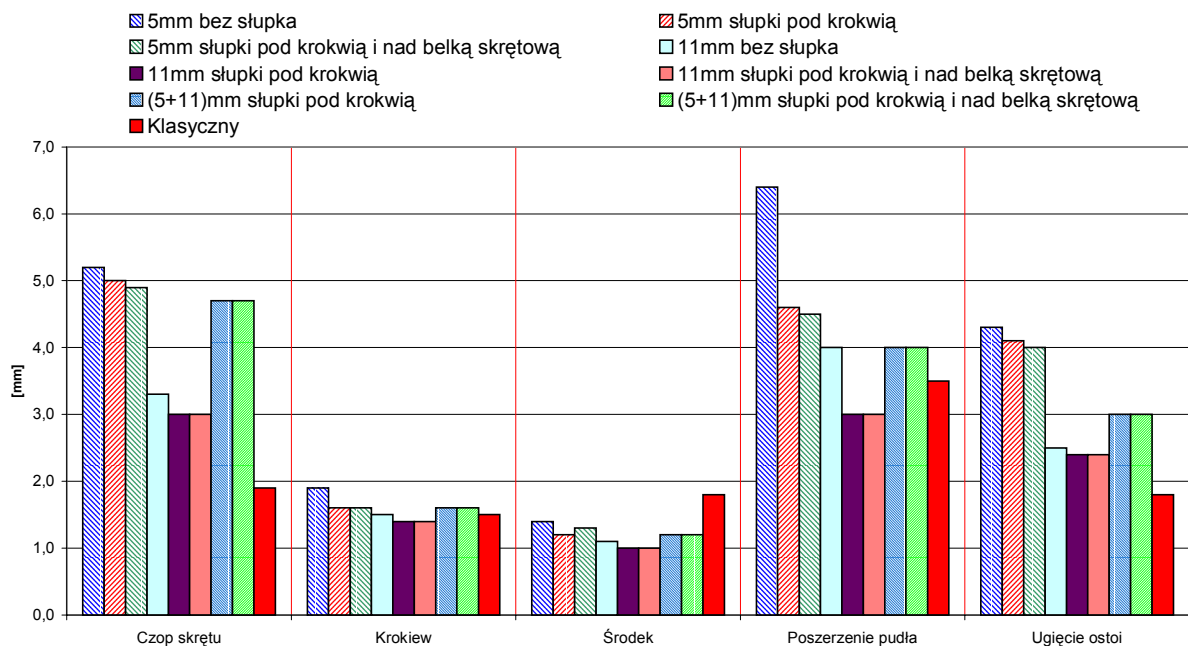


Rys. 5. Zmiany wysokości i szerokości pudła oraz ugięcia ostoi dla obciążenia pionowego przy porowatości  $e_0=0,90$

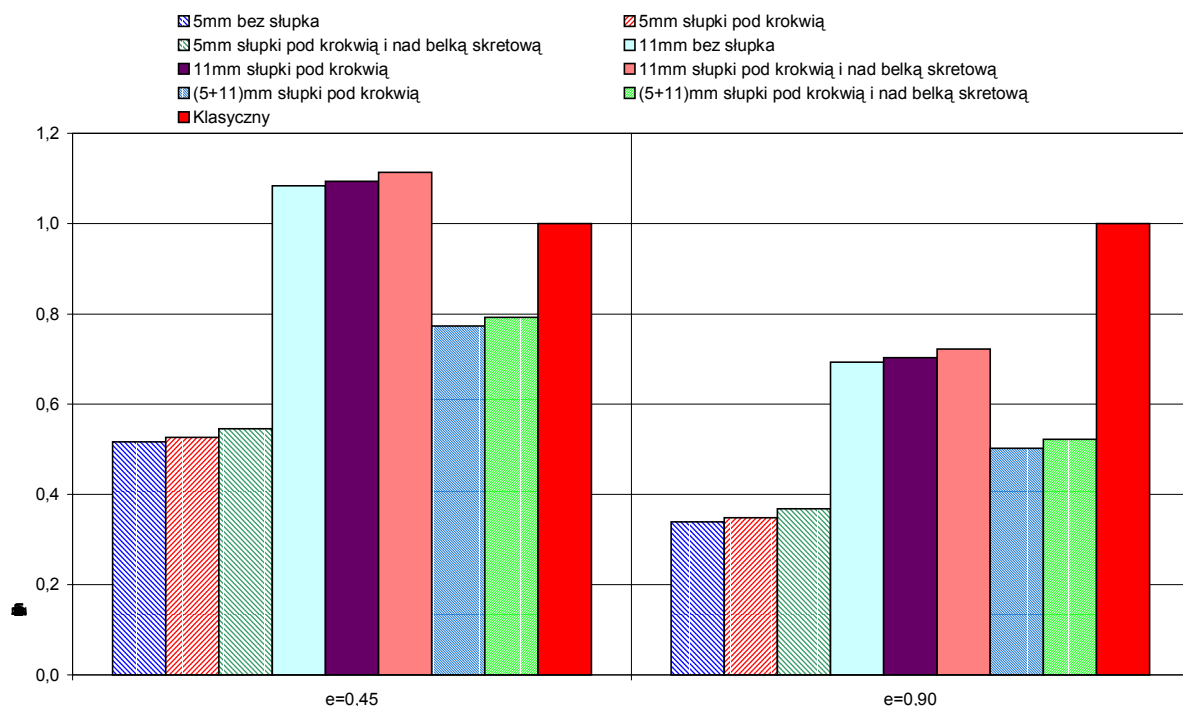


Rys. 6. Zmiany wysokości i szerokości pudła oraz ugięcia ostoi dla obciążenia śniegiem przy porowatości  $e_0=0,45$





Rys. 7. Zmiany wysokości i szerokości pudła oraz ugięcia ostoi dla obciążenia śniegiem przy porowatości  $e_0=0,90$



Rys. 8. Stosunek mas porowatych rozwiązań konstrukcyjnych i klasycznego

Na rys. 8 porównano masy konstrukcji nośnej wagonu osobowego, wykonanej z proponowanych elementów powierzchniowych o strukturze porowatej z dodatkowymi wzmocnieniami, z masą wagonu w rozwiązaniu klasycznym. Założono, że materiał porowaty wykonany jest ze stopów aluminium. Z rys. 8 wynika, że jedynie konstrukcja wykonana z powłoki porowatej o grubości 11 mm na dachu i ścianach bocznych wykazuje większą masę i to o około 11 %. Największe obniżenie masy można uzyskać dla konstrukcji wykonanej z powłoki 5 mm, nawet do około 34 % masy konstrukcji klasycznej.

Dla celów porównawczych wybrane analizy przeprowadzono również dla konstrukcji nośnej wagonu osobowego, w którym w miejsce powłoki o strukturze porowatej zdefiniowanej tak jak w [1], a więc zmiennej na grubości według zależności trygonometrycznych wprowadzono powłokę o klasycznej strukturze trójwarstwowej. Zewnętrzne warstwy są wykonane z jednorodnego stopu aluminium, a rdzeń ze struktury porowatej, ale o jednorodnej porowatości. Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że ugięcia ostoi oraz poszerzenia tak zbudowanego pudła wagonu, w przypadku obciążenia

pionowego masą własną i pasażerami, a także śniegiem zalegającym na dachu, osiągają większe wartości. Wzrost ten jest tym większy, im większy jest współczynnik porowatości rdzenia elementu powierzchniowego. Dla porowatości  $e_0=0,90$  sięga ponad 50 %. Podobna sytuacja jest w przypadku zmian wysokości pudła dla obciążenia śniegiem. Przy obciążeniu pionowym natomiast zmiany wysokości pozostają na porównywalnym poziomie. Porównano również masy konstrukcji nośnej wykonanej z elementów powierzchniowych o różnej strukturze wewnętrznej. Wynika z niej, że zastosowanie powłok trójwarstwowych obniża masę konstrukcji i w zależności od współczynnika porowatości może to być od 12 do 38 %.

### 3. Wnioski

Z przeprowadzonych analiz wynika, że wprowadzenie w konstrukcji ścian bocznych wagonów osobowych, w miejsce dotychczasowej struktury szkieletowej, elementów powierzchniowych o budowie porowatej podobnych jak zaproponowano w dachu [1], jest możliwe. Analogicznie jak w [1] konieczne jest pozostawienie niewielkich wzmocnień w wybranych rejonach.

Ze względu na sztywność konstrukcji nośnej wagonu najkorzystniejszym rozwiązaniem jest zastosowanie porowatej powłoki o grubości 11 mm, przy czym przy małym współczynniku porowatości dyskwalifikuje je masa, która przekracza masę konstrukcji klasycznej. Na przykład dla porowatości  $e_0=0,45$  jest większa o 11 %.

Dla rozwiązania, w którym na dachu zastosowano powłokę o grubości 5 mm, a na ścianach bocznych 11 mm, uzyskano w zakresie sztywności, poza zmianą wysokości pudła w rejonie czopa skrzytu, porównywalne wyniki. Występujące różnice są tym mniejsze im niższa jest porowatość. Jak wynika z rys. 8 masa takiego rozwiązania nawet dla najmniejszej z analizowanych porowatości ( $e_0=0,45$ ) jest mniejsza niż dla konstrukcji klasycznej i nie przekracza 80 %. Zastosowanie elementów porowatych o klasycznej strukturze trójwarstwowej gwarantuje dalsze obniżenie masy konstrukcji, ale jednocześnie pogarszają się, i to niejednokrotnie znacznie, wskaźniki sztywności pudła.

Reasumując można stwierdzić, że koncepcję budowy konstrukcji nośnej wagonu osobowego polegającej na zastąpieniu struktury szkieletowej porowatymi elementami powierzchniowymi, można pod względem wytrzymałościowym zrealizować i to na wiele sposobów. Z całą pewnością omówione w artykule propozycje stanowią punkt wyjściowy do określenia dalszych kierunków rozwoju strukturalnych zastosowań materiałów porowatych w budowie pojazdów szynowych.

### Literatura

- [1] *Mielniczuk J., Kuligowski P.: Analiza wytrzymałości konstrukcji wagonu osobowego z zastosowaniem materiału porowatego (1). Pojazdy Szynowe 1/2008.*