ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2005
Seria: TRANSPORT z. 60 Nr kol. 1702

Krzysztof GRABOWIECKI, Janusz KRASUCKI

PERSPEKTYWY ZASTOSOWANIA KONSTRUKCJI SANDWICZOWEJ W KONTROLOWANYCH STREFACH ZGNIOTU LEKKIEGO POJAZDU SZYNOWEGO

Streszczenie. Konstrukcje lekkich pojazdów szynowych, oprócz zapewnienia odpowiedniej wytrzymałości na obciążenie statyczną siłą wzdłużną, wymagają zwiększenia odporności na zderzenie w zakresie ochrony operatora oraz pasażerów. Zapewnienie kontrolowanej strefy zgniotu można uzyskać zarówno poprzez właściwą strukturę konstrukcji pudła wagonu, jak i przez dobór właściwości materiałowych elementów pochłaniających energię. W tym celu możliwe jest wykorzystanie koncepcji mikroskrzynki typu I-core z wypełnieniem pianką.

A PERSPECTIVES OF SANDWICH STRUCTURE APPLICATION IN CONTROLLED CRUSH ZONES OF LIGHT RAIL VEHICLE

Summary. The concept of light rail vehicles demands for additional study dedicated to its crashworthiness. There are distinguished two groups of design parameters to satisfy the crash energy management: structure configuration and material properties. Two engineering solutions are considered to satisfy that demand: the application of I-core panels and the foam-filling concept.

1. WSTĘP

Zgodnie z prognozą opracowaną przez ERRAC [1], dynamicznie rozwijający się rynek lekkich pojazdów szynowych (w skrócie określanych jako: LRV, LRT, LNT) w krajach Unii Europejskiej spowoduje w roku 2020 podwojenie długości połączeń w ramach istniejących systemów miejskich i regionalnych oraz blisko 50% wzrost liczby nowych systemów LRV. Największą dynamikę wykazywać będzie rynek autobusów szynowych oraz pojazdów typu „tram-train" (tramwaj regionalny). Taka sytuacja powoduje, że problem bezpieczeństwa w ruchu tego typu pojazdów oraz minimalizowania skutków ewentualnych kolizji nabiera szczególnego znaczenia. W takim też kontekście należy spojrzeć na zagadnienie bezpieczeństwa biernego związane przede wszystkim z ochroną przestrzeni, w których znajdują się pasażerowie oraz motorniczy pojazdu. Bezpieczeństwo to zapewnia się zarówno przez ukształtowanie odpowiedniej struktury pudła wagonu, jak i poprzez dobór materiałów konstrukcyjnych. Kształtowanie struktury pudła wagonu pozwala na zarządzanie przepływem

energii niszczenia, podczas gdy dobór materiałów konstrukcyjnych pozwala na projektowanie akumulowania i rozpraszania energii zderzenia.

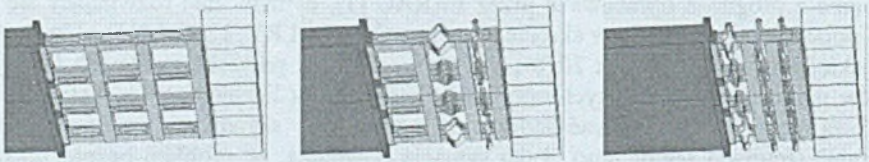
Jako element łączący powyższe może być użyta płyta typu I-core – koncepcja mikroskrzynki możliwa również do wykorzystania jako element składowy konstrukcji sandwicz wypełniający przestrzeń konstrukcyjną pianką. Konstrukcja I-core jest stosowana w okrętownictwie, budownictwie i transporcie; przy niewielkiej masie wykazuje wysoką zdolność pochłaniania energii zderzenia.

2. BEZPIECZEŃSTWO BIERNE LEKKIEGO POJAZDU SZYNOWEGO

Pojęcie bezpieczeństwa biernego funkcjonuje od dawna w pojazdach samochodowych, gdzie dopuszczenie do ruchu warunkowane jest uzyskaniem certyfikatów na odporność na zderzenie, zgodnie z odpowiednimi przepisami. Przykładem mogą być przepisy, dotyczące samochodów osobowych, czy też wymagania odporności na przewrócenie dla autobusów określone w regulaminie ECE66. W pojazdach szynowych wymaganie odporności na zderzenie ograniczone jest do określenia wytrzymałości pudła wagonu poprzez określenie dopuszczalnej wzdłużnej siły działającej statycznie, przyłożonej na wysokości sprzęgów lub osi zderzaków, nie powodującej odkształceń plastycznych nadwozia. Niemniej niektóre firmy przeprowadzają obliczenia zderzeniowe w przypadkach szczególnego zagrożenia bezpieczeństwa ruchu – takim przykładem jest konstrukcja pociągu TGV. Istniejące przepisy odnoszą się w tym zakresie do pojazdów stricte kolejowych – karty UIC, lub tramwajów, np. BOStrass. Europejska dyrektywa 2004/49/EC, określająca zasadnicze wymagania bezpieczeństwa, również dotyczy „tradycyjnych" pojazdów kolejowych.

Najnowsza norma PN-EN 12663 „*Wymagania konstrukcyjno - wytrzymałościowe dotyczące pudeł kolejowych pojazdów szynowych*" rozszerza wprawdzie kategorie pojazdów szynowych, dla których podaje się dopuszczalną siłę wzdłużną (metro – 800 kN, szybka kolej miejska – 400 kN), lecz pojazdy tramwajowo-kolejowe nie zostały w niej ujęte. Pojazdy tramwajowe dopuszczone do ruchu po torach kolejowych będą przedmiotem oddzielnej regulacji w niemieckich przepisach EBO, poprzez uwzględnienie obecnej praktyki w tego typu pojazdach, gdzie maksymalną statyczną siłę wzdłużną przyjmuje się na poziomie 600 kN.

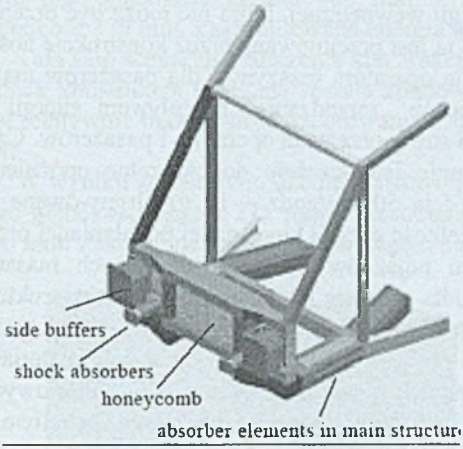
Bezpieczeństwo bierne jest pojęciem związanym przede wszystkim z problemem aktywnego rozpraszania energii zderzenia (*CEM - Crash Energy Management*) [2].



Rys. 1. Symulacja pracy absorbera energii w pociągu TGV
Fig. 1. Simulation of energy absorbers in TGV train

Sterowanie przepływem energii zderzenia uzyskuje się przez zastosowanie specjalnej konstrukcji zderzaków, dodatkowych elementów tzw. absorberów energetycznych, zastosowanie w konstrukcji pudla elementów strukturalnych, nowych materiałów o silnie

nieliniowej charakterystyce (w tym kompozytów), konstrukcji sandwiczowych itp. Przykładem może być konstrukcja absorberów w wagonie TGV 2N – rys.1.



Rys. 2. Elementy przejmowania energii zderzenia w tramwaju regionalnym [3]
Fig. 2. Adsorbers elements in periurban tram

Zapewnienie odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa biernego można realizować poprzez:

- wprowadzenie strefy zgniotu pojazdu nienaruszającej przestrzeni chronionej,
- kształtowanie pożądanej charakterystyki „crash": siła zgniotu w funkcji głębokości deformacji,
- ograniczenie maksymalnego opóźnienia występującego podczas kolizji – czyli wydłużenie czasu deformacji.

Zagadnienia powyższe były m.in. przedmiotem projektu SAFETRAM [3] realizowanego w ramach 5 Programu Ramowego UE, w którym obiektem badań, oprócz tramwaju miejskiego, był również tramwaj regionalny.

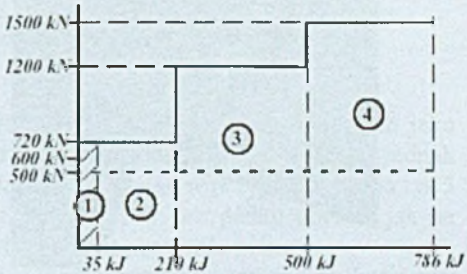
Na rys. 2 pokazano proponowaną konstrukcję takiego pojazdu w obszarze strefy zgniotu. W scenariuszu czołowego zderzenia tramwaju regionalnego wyróżnione zostały następujące fazy zderzenia, różniące się wielkością obciążenia oraz pochłanianej energii:

I. Przejmowanie energii przez amortyzatory.

II. Przenoszenie obciążenia przez zderzaki – maks. 600 kN (pełny skok zderzaka).

III. Deformacja plastyczna wymiennych absorberów energii (nienaruszona geometryczna struktura pudła).

IV. Przejmowanie obciążenia i deformacja plastyczna absorberów będących elementem konstrukcji nośnej.



Rys. 3. Zależność siły od energii zderzenia
Fig. 3. Crash force-energy curve [3]

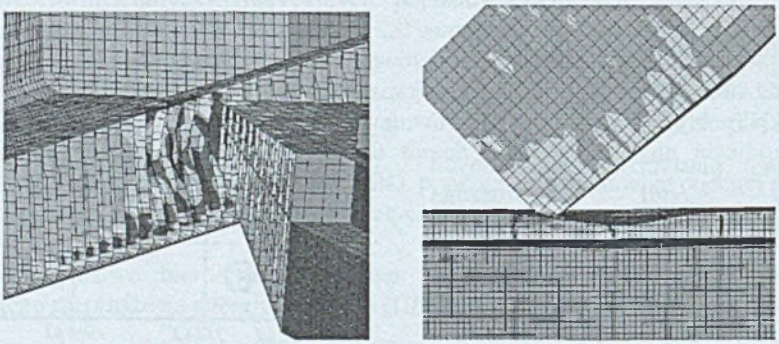
Przy założeniu dopuszczalnej siły statycznej na poziomie F_s = 600 kN przyjęto [3], że proces niszczenia konstrukcji zaczyna się przy obciążeniu F_{dmin} = 1.2 F_s = 720 kN, a maksymalna wielkość obciążenia niszczącego przy zachowaniu odpowiedniej strefy zgniotu nie powinna być większa niż F_{dmax} = 2.33 F_s = 1400 kN. Nominalna głębokość strefy zgniotu zawiera się w granicach 0.5 -0.7 m.

Poziomy obciążenia i odpowiadającą im energię zderzenia ilustruje rys. 3. Uzyskane wyniki badań wskazują, że w zakresie obciążenia niszczącego podstawową rolę odgrywają właściwie zaprojektowane i dobrane absorbery energii, będące jednocześnie fragmentem konstrukcji przedniej części pudła wagonu.

3. ODPORNOŚĆ STRUKTURY NOŚNEJ NA UDERZENIE

Jak można zaobserwować na wykresie – rys. 3., uderzenie konstrukcji wagonu z siłą większą niż 700 kN powoduje wyzwolenie energii wewnętrznej, która nie może być przejęta wyłącznie przez konstrukcję zderzaków; energia ta jest przejmowana przez konstrukcję nośną pudła wagonu. Wyznaczenie strefy przeżycia dla operatora maszyny i dla pasażerów ma w tym przypadku znaczenie pierwszorzędne. Sposób „zarządzania" przepływem energii w konstrukcji decyduje o zachowaniu integralności strefy przeżycia operatora i pasażerów. Czas niezbędny na zakumulowanie energii determinuje jednocześnie dopuszczalne opóźnienia działające na pasażera (dla zderzenia z prędkością 50 km/godz – 10 g) obserwowane na manekinie HIBRID III 95 centyli. Z uwagi na wielkość energii kinetycznej pochłanianej przez konstrukcję podczas uderzenia przy zderzeniu pojazdów o relatywnie dużych masach, kluczowe podczas projektowania konstrukcji pudła staje się takie zaprojektowanie struktury części przedniej pojazdu, która pozwoli bądź to na pochłonięcie wyzwalanej energii przez odkształcenie plastyczne, bądź jej rozproszenie poprzez wykorzystanie tłumienia materiałowego i zastosowanie materiałów kompozytowych o własnościach silnie nieliniowych. Najbardziej właściwym podejściem wydaje się wykorzystanie obu tych możliwości jednocześnie.

Autorzy brali udział w pracach dotyczących analizy zjawisk występujących podczas zderzenia ciężkich i dużych gabarytowo konstrukcji w ramach PR5 – projekt INBAT [7], gdzie prowadzone były analizy czułości różnych rozwiązań konstrukcyjnych zderzających się obiektów. Analizowane konstrukcje miały zarówno charakter konstrukcji klasycznych, gęsto żebrowanych o grubych powłokach kryjących konstrukcję, jak i konstrukcje innowacyjne



Rys. 4. Zderzenie konstrukcji skrzynkowej tradycyjnej i konstrukcji z wypełnieniem pianką
Fig. 4. Crash analysis for classic structure (impactor) and foam filled structure (impacted)

wykonywane z płyt I-core. Badany był również wpływ wypełnienia konstrukcji piankami poliuretanowymi i powłokami elastomerowymi.

Wyniki analiz pokazują, intuicyjnie oczywistą, zależność efektów zderzenia od struktury konstrukcyjnej badanego obiektu. Dla zderzenia pod kątem 45 stopni wyzwalane energie przekraczają 0.5GJ.

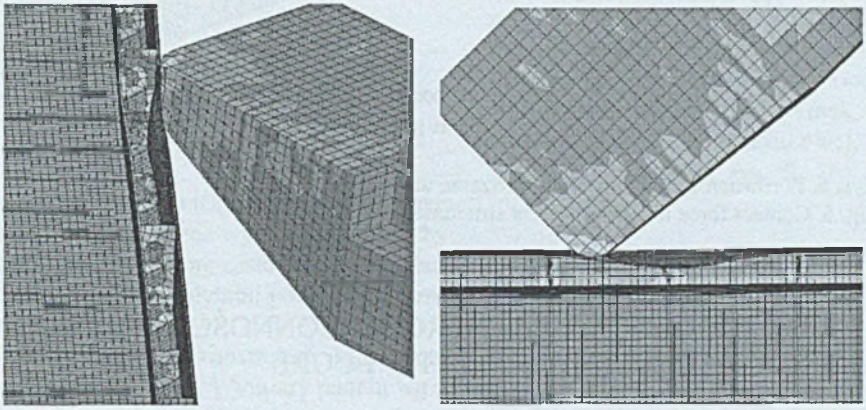
Sposób użebrowania i rodzaj konstrukcji sandwiczowej w dużym stopniu decydują o naruszeniu obszaru chronionego. Interesujące wyniki zostały uzyskane dla konstrukcji opartych na panelach I-core oraz dla konstrukcji wypełnianych pianką poliuretanową.

Na rys. 4 przedstawiona jest koncepcja konstrukcji skrzynkowej użebrowanej i wypełnionej pianką poliuretanową. Siła uderzenia osiągała wartość 1700 kN.

W wyniku uderzenia uszkodzenie konstrukcji uderzanej rozciągało się na długości 4800 mm, jego głębokość sięgała 480 mm. Przestrzeń bezpieczeństwa została naruszona na głębokość 379 mm. Zakumulowana energia wewnętrzna wyniosła 1.2 MJ.

Taki sam scenariusz zderzenia konstrukcji przedstawiony jest na rys. 5. W tym przypadku jednak konstrukcja uderzana została zbudowana z paneli I-core. Charakterystyczna dla niej jest relatywnie mała gęstość użebrowania. Maksymalna wartość siły uderzenia wynosiła 2190 kN.

W wyniku kolizji uszkodzenie konstrukcji uderzanej rozciągało się na długości 3300 mm, jego głębokość sięgała 275 mm. Przestrzeń bezpieczeństwa została naruszona na głębokość 260 mm. Zakumulowana energia wewnętrzna wyniosła 89 MJ.

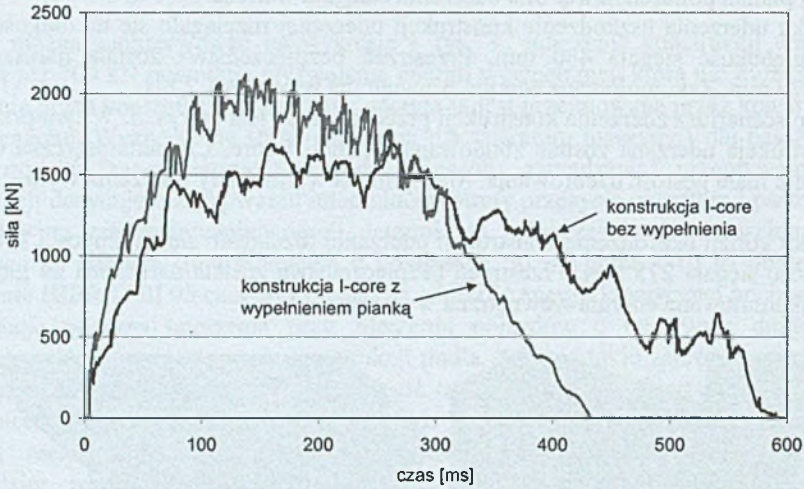


Rys. 5. Zderzenie konstrukcji skrzynkowej tradycyjnej z konstrukcją I-core
Fig. 5. Crash analysis for classic structure (impactor) and foam filled structure (impacted)

Porównanie efektów kolizji pozwala na pozytywną ocenę konstrukcji I-core, jeżeli jako miarę oceny jakości konstrukcji przyjąć rozmiary obszaru uszkodzenia. Należy jednak zwrócić uwagę na fakt, że w obszarze uderzenia obiektu uderzanego w przypadku jak na rys.5 zastosowano dodatkowe wzdłużne wzmocnienie, podczas gdy w przypadku obiektu jak na rys. 4 był on uderzany w obszarze posiadającym wyłącznie wzmocnienia pionowe.

Sposób zaprojektowania struktury konstrukcji i wykorzystanie materiałów konstrukcyjnych pozwalają również na projektowanie przebiegu siły uderzenia oraz czasu jej trwania. Różnicę pomiędzy tymi parametrami dla przedstawianych przypadków można obserwować na rys. 6 - dochodzi ona do 20% w zakresie siły uderzenia i ok. 30% dla czasu trwania zderzenia.

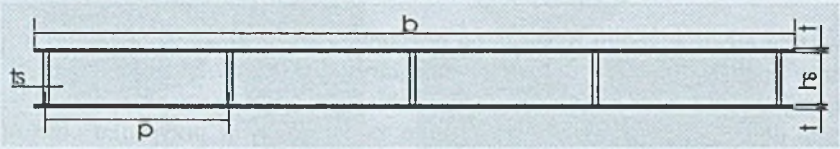
Otrzymane wyniki zwróciły uwagę autorów na konieczność przeprowadzenia bardziej podstawowych badań, mających na celu ocenę przydatności mikroskrzynkowych paneli I-core jako elementów strukturalnych akumulujących energię zderzenia. Dodatkowym przedmiotem dalszych badań stał się problem wykorzystania wypełnień przestrzeni konstrukcyjnych piankami z różnych materiałów jako narzędzia do kontrolowania procesu rozpraszania energii zderzenia.



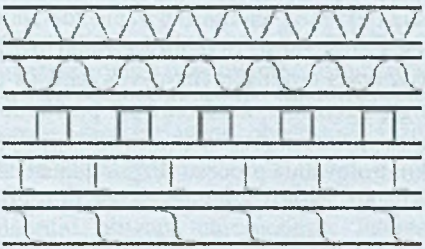
Rys. 6. Porównanie siły kontaktu w obszarze uderzenia
Fig. 6. Contact force for two different structures

4. BADANIA PORÓWNAWCZE ENERGOCHŁONNOŚCI KONSTRUKCJI WYKORZYSTUJĄCEJ PANELE TYPU I-CORE

Płyty typu I-core® - to laserowo spawana konstrukcja mikroskrzynkowa. Panele składają się z dwóch cienkich płatów blachy połączonych usztywniającymi środnikami jak na rys.7.



Rys. 7. Typowa struktura panelu I-core
Fig. 7. I-core panel standard structure



Rys. 8. Kształty paneli I-core
Fig. 8. Shapes of I-core panels

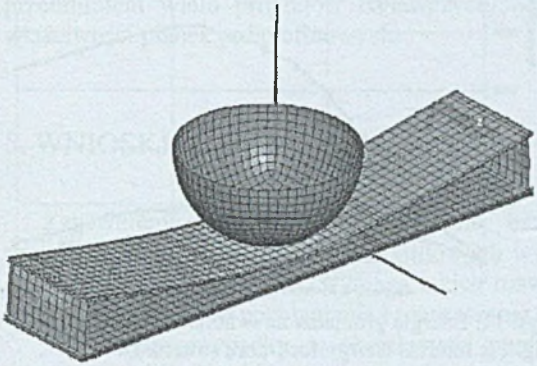
Panele mogą być wykonywane zarówno ze stali, jak i ze stopów aluminium, tytanu lub innych materiałów. Kształt środników może być różny, stosownie do potrzeb – rys.8.

Cechy charakterystyczne paneli I-core to:
- mały ciężar,
- wysoka wytrzymałość,
- odporność cieplna,
- zdolność tłumienia drgań mechanicznych i hałasu.

Zaletą tej konstrukcji jest duża jednorodność materiałowa mikroskrzynki uzyskana w wyniku spawania laserowego.

Badania [4] wykazują blisko trzykrotnie wyższą wytrzymałość struktury I-core niż konstrukcji monolitycznej o podobnej wadze.

Analizując właściwości wielkogabarytowych konstrukcji wykonanych z płyt I-core pod względem ich odporności na zderzenie [7], autorzy podjęli badania nad czułością parametryczną różnych struktur konstrukcyjnych. Oprócz badań porównawczych struktur tradycyjnych i zbudowanych z płyt I-core, przeprowadzone były badania wpływu wypełniania przestrzeni konstrukcyjnych różnymi typami pianek.



Rys. 9. Przyjęty model uderzenia
Fig. 9. Assumed impact model

Aby ocenić wpływ wypełnienia, przeprowadzono badania symulacyjne, wykorzystując Metodę Elementu Skończonego – program PAM-CRASH [8] – do zamodelowania zjawiska uderzenia konstrukcji wykonanej z paneli I-core. Badanym obiektem był wycinek rzeczywistej konstrukcji skrzynkowej, której model pokazano na rys. 9. Do analizy porównawczej przyjęto trzy wersje konstrukcyjne:

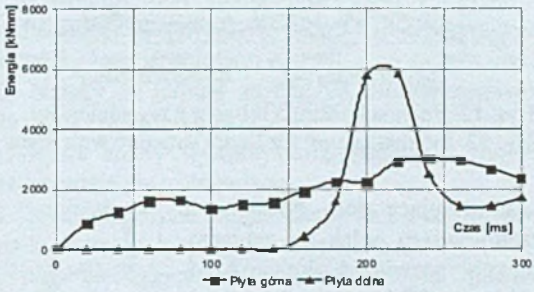
1. Jako płyty zewnętrzne wykorzystano blachy.
2. Jako płyty zewnętrzne zastosowano standardowe panele typu I– core.
3. Przestrzeń między płytami paneli I-core została wypełniona pianką poliuretanową z typoszeregu SANDIA.

Wymiary elementu konstrukcji dobrano tak, aby masa konstrukcji była jednakowa we wszystkich przypadkach. Wymiary panelu wg schematu jak na rys. 7 były następujące:

- wysokość panelu h = 632 mm,
- podziałka środników p = 120 mm,
- grubość płyty górnej t_g = 5 mm,
- grubość płyty dolnej t_d = 2.5 mm,
- grubość środnika t_s = 4 mm.

Materiałem paneli była stal o podwyższonych właściwościach mechanicznych: R_e = 315 MPa, R_m = 700 MPa.

Przeprowadzany eksperyment polegał na uderzaniu nieruchomego elementu konstrukcyjnego kulą o masie 1000 kg, poruszającą się z prędkością 5[m/s] - rys.9. Energia kinetyczna kuli wynosiła 12,5 kJ.

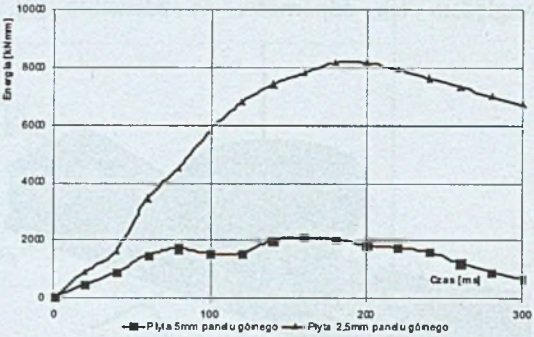


Rys. 10. Energia gromadzona w konstr. z blachy
Fig. 10. Internal Energy for classic structure

W badaniach symulacyjnych wykorzystane zostało oprogramowanie PAM-CRASH firmy ESI Group [8]. Program ten oparty jest na jawnym schemacie całkowania MES i przeznaczony do analizy zagadnień dynamicznych silnie nieliniowych - w szczególności zagadnień związanych z niszczeniem konstrukcji pojazdów podczas zderzeń. Panele I-core zamodelowano wykorzystując elastoplastyczne, izotropowe elementy skończone typu powłokowego z rozszerzonym algorytmem plastyczności (uwzględniony efekt ścinania poprzecznego). Podczas eksperymentów obserwowana była energia pochłaniana przez poszczególne elementy konstrukcji i przemieszczenia punktu półek na osi uderzenia.

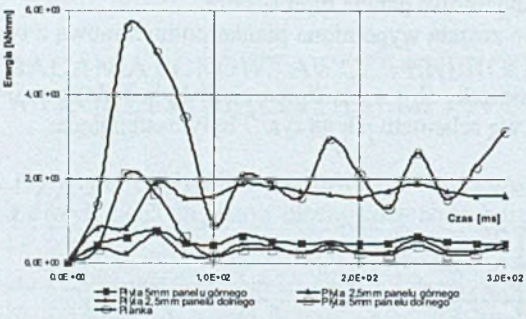
Każdy typ konstrukcji w inny sposób rozpraszał energię uderzenia. W przypadku uderzenia w konstrukcję skrzynkową tradycyjną, wykonaną z blachy, płyta górna wchodziła w kontakt z płytą dolną – rys. 10, a stan naprężeń osiągał poziom przewyższający wartość R_e.

Konstrukcja z paneli I-core charakteryzuje się dużym poziomem absorpcji energii – blisko 90% przez półkę górną, w tym 80% energii jest przejmowanej przez płytę górną paneli – rys. 11. Stan energetyczny panelu dolnego praktycznie nie ulega zmianie– energia gromadzona w tym panelu nie przekracza 1%. Płyta uderzana przemieszcza się nie wchodząc w kontakt z płytą dolną konstrukcji; wielkość przemieszczenia punktu uderzenia półki górnej wynosiła połowę wartości uzyskiwanej przez konstrukcję klasyczną. Stan naprężeń jedynie lokalnie przekracza poziom granicy plastyczności R_e.



Rys. 11. Energia gromadzona w konstrukcji I-core
Fig. 11. Internal energy for I-core structure

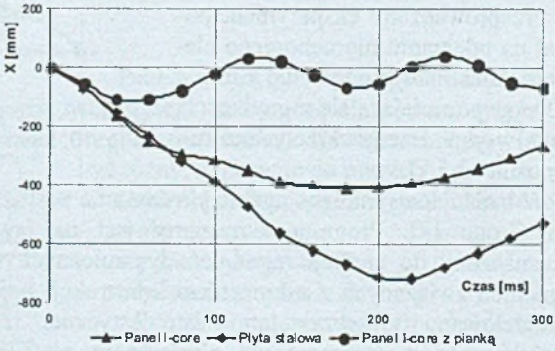
W kolejnych eksperymentach badana konstrukcja była wypełniana różnymi typami pianek poliuretanowych: badane pianki różniły się gęstością, modułem sprężystości oraz parametrami reologicznymi. Dla tak zbudowanej konstrukcji energia akumulowana w konstrukcji I-core i w piance miała podobną wartość. Przykładowe charakterystyki energetyczne przedstawione są na rys. 12. Natomiast czas odpowiedzi konstrukcji na impuls odpowiedzi był trzykrotnie krótszy niż dla konstrukcji nie wypełnionej pianką; wynika to głównie z typu zastosowanej pianki, który spowodował pracę badanej konstrukcji jako monolitu.



Rys. 12. Energia konstrukcji I-core z wypełnieniem
Fig. 12. Internal energy for I-core structure with foam

Interesujące jest porównanie przemieszczeń półek dla poszczególnych rozwiązań konstrukcyjnych;najmniejsze przemieszczenia półki górnej – rys. 13 – jak i dolnej uzyskane zostało dla konstrukcji I-core z wypełnieniem piankowym. Odbyło się to kosztem wprowadzenia drgań tej konstrukcji spowodowanych zbyt dużą sztywnością zastosowanej pianki poliuretanowej.

Przeprowadzone prace wskazują zarówno na praktyczną możliwość projektowania struktur



Rys. 13. Przemieszczenia płyty w miejscu uderzenia
Fig. 13. Ply displacement in impact point

o różnym stosunku akumulowanej energii uderzenia w konstrukcji i materiale wypełniającym, jak i dobór wymaganych stałych czasowych odpowiedzi konstrukcji na uderzenie; dobór typu konstrukcji i materiału wypełniacza decyduje o właściwościach tłumiących konstrukcji.

Prace nad doborem typu pianek pozwalającego na uzyskanie efektu tłumienia są przedmiotem wielu projektów badawczych. Są one w szczególności ukierunkowane na właściwości pianek poliolefinowych.

5. WNIOSKI

Zapewnienie odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa biernego lekkiego pojazdu szynowego, oprócz spełnienia standardowych wymagań wytrzymałości pudła związanych z dopuszczalną siłą wzdłużną, wymaga takich rozwiązań konstrukcyjnych, które pozwalają na kontrolowany sposób pochłaniania i rozpraszania energii w procesie zderzenia pojazdu.

W każdym przypadku, w określonych granicach, strefy zgniotu nie powinny naruszać przestrzeni chronionej motorniczego i pasażerów. Aby to uzyskać, oprócz dodatkowych wymiennych absorberów energii, konieczne jest zastosowanie w części przedniej wagonu specjalnej konstrukcji, która pozwalałaby na zarządzanie przepływem, akumulowaniem i rozpraszaniem energii zderzenia. Przykładem takiej konstrukcji mogą być panele I-core z dodatkowym wypełnieniem przestrzeni wewnętrznych pianką.

Przeprowadzone porównawcze badania symulacyjne procesu zderzenia przy użyciu programu PAMCRASH jednoznacznie wskazują na wyższy stopień przejmowania energii uderzenia przez konstrukcje, w których zastosowane zostały panele I-core. Jednocześnie w konstrukcji typu I-core zaobserwowano niższy poziom naprężeń niż w konstrukcji klasycznej wykonanej z blachy.

Wprowadzenie pianki poliuretanowej jako wypełnienia przestrzeni między płytami powoduje blisko dwukrotne zwiększenie chłonności energii, a dodatkowo można zaobserwować, że zachowanie takiej konstrukcji pod obciążeniem jest podobne do zachowania się podobnej konstrukcji monolitycznej. Negatywnym wynikiem wprowadzenia wypełnienia piankowego jest znaczne skrócenie czasu akumulacji energii, a co za tym idzie – zwiększenie występujących przyspieszeń, Należy tu jednak zaznaczyć, że przedstawione zachowanie się konstrukcji badane było dla pianki poliuretanowej.

Na tle otrzymanych wyników najważniejsze zalety wykorzystania paneli I – core w odniesieniu do rozwiązań klasycznych przedstawiają się następująco:

a. możliwość polepszenia właściwości mechanicznych konstrukcji bez konieczności zwiększenia ich masy lub też stosowania kosztownych materiałów do ich budowy,
b. zachowanie dotychczasowych właściwości mechanicznych z jednoczesnym spadkiem masy całej konstrukcji,
c. odpowiednie właściwości paneli z zachowaniem ich wymiarów gabarytowych odbywać się może poprzez dobór kształtów profili wewnętrznych w panelach ogólnodostępnych handlowo.

Przeprowadzone badania wskazują, że celowe jest połączenie wybranej struktury konstrukcji metalowej, takiej jak płyta I-core z wypełnieniem materiałem piankowym.

Odpowiednie skonfigurowanie przestrzeni konstrukcyjnych połączone z doborem określonego typu pianki daje możliwość opracowania konstrukcji typu sandwicz, która pozwala na kontrolowanie przepływu energii i jej akumulacji. Tego typu element mógłby spełniać funkcje podniesienia bezpieczeństwa biernego w lekkich pojazdach szynowych.

Właściwości płyt I-core wskazują na ich potencjalne zastosowanie w konstrukcjach absorberów energii dla lekkich pojazdów szynowych w obszarach kontrolowanych stref zgniotu, tam gdzie przy zachowaniu właściwości wytrzymałościowych konstrukcji pożądane jest zmniejszenie ciężaru konstrukcji oraz gdzie ważną przesłanką konstrukcyjną jest odporność na uderzenie i zdolność pochłaniania energii uderzenia.

Literatura

1. ERRAC: Strategic Rail Research Agenda 2020. First Report of the European Rail Research Advisory Council, September 2002, p. 8; Light Rail and Metro Systems in Europe: current market perspectives and research implication, April 2004.
2. Kirkpatrick S.W., Schroeder M., Simons J.W.: Evaluation of Passenger Rail Vehicle Crashworthiness. International Journal of Crashworthiness, Vol. 6, No. 1, pp. 95-106, 2001.
3. http://www.safetram-project.com
4. Meyer Werft Presentation: Laser welding and I-core panels, Thomas Reinert, 2002.
5. Ando K., Grabowiecki K., Kisielewicz L.T., Kiyomiya O., Petitjean A.: Symulacja w projektowaniu statków: doświadczenia i perspektywy, Konferencja CTO, Jurata 2001.
6. Brodowski A., Grabowiecki K.: Płyta I-core: zdolność pochłaniania energii uderzenia, XVII Konferencja: Problemy Rozwoju Maszyn Roboczych, Zakopane 2004.
7. Jastrzębski T., Taczała M., Grabowiecki K.: Numerical Simulation of Cash and Graunding of Inland Waterway Transportation Barges, Konferencja PRADS'04, Travemunde 2004.
8. Podręcznik użytkowania systemu PAM-Crash firmy ESI Group.